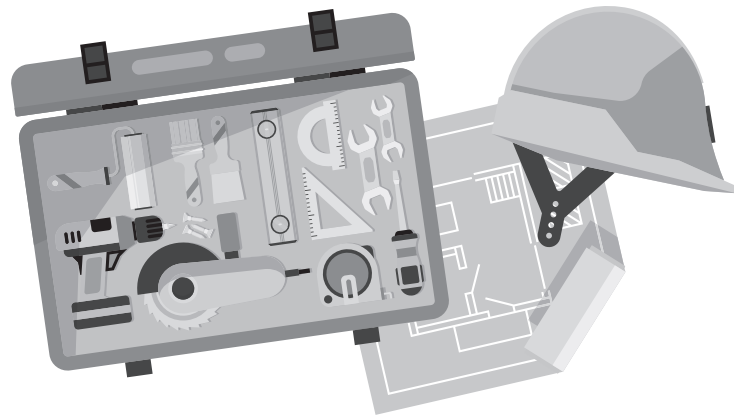


工程技术 与质量管理

Engineering Technology and Quality Management



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editors-in-Chief

Yulei Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co. LTD.

Haizhong Gao

Zhejiang Zhongnan Construction Group Co. LTD.

Associate Editor

Pengyue Yu

Shandong Construction Engineering (Group) Co., LTD.

Editorial board member

Sanath Alahakoon

School of Engineering and Technology Centre for Railway Engineering

Salahuddin Azad

School of Engineering and Technology Institute for Future Farming Systems,
Centre for Regional Economies and Supply Chains

Yungang Wang

Ordos Sports Development Center

Qigui Chi

Expert Committee of China Construction Supervision Association

Danhui Chi

Fujian Provincial Institute of Engineering Supervision and Project Management
Association

Yahui Chi

Fujian Provincial Civil Engineering and Construction Industry Association

Chunxiu Liu

Fujian Provincial Association of Engineering Construction Quality and Safety

工程技术与质量管理

Engineering Technology and Quality Management

第3卷 第2期 2025年2月刊

主 管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主 办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编 辑 《工程技术与质量管理》编辑部

ISSN(O): 2992-9806

ISSN(P): 2995-3170

地 址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网 址: <https://www.artdesignnp.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事
项如下:

1. 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、
翻译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著
作权在世界范围内免费转让给本刊。
2. 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单
位造成的全部损失。
3. 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作
者的身份真实。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。



工程技术 | ENGINEERING TECHNOLOGY

- 005 基于 FPGA 的数字信号处理在
雷达系统中的应用研究 林健, 闫晓兵, 孙大伟
Research on the Application of Digital Signal Processing Based
on FPGA in Radar System Lin Jian, Yan Xiaobing, Sun Dawei
- 008 ZB48A 包装机关键部件改进对
设备性能提升的研究 王林鹏, 高大林, 杨静, 王增浩, 李国良
Research on Improving the Performance of ZB48A Packaging
Machine by Improving the Key Components Wang Linpeng, Gao Dalin, Yang Jing, Wang Zenghao, Li Guoliang
- 011 移动式干冰智能清洗设备在电气原件快速清洗中的应用研究 胡家亮
Research on the Application of Mobile Dry Ice Intelligent Cleaning Equipment
in the Rapid Cleaning of Electrical Components Hu Jialiang
- 014 烟草行业除尘系统的智能化发展路径探索 王飞
Exploration of Intelligent Development Path of Tobacco
Industry Dust Removal System Wang Fei
- 017 航空器维修生产的生命周期管理与成本控制 程相静
Life-Cycle Management and Cost Control of Aircraft
Maintenance and Production Cheng Xiangjing
- 020 车身轻量化设计中高强度钢与铝合金混合连接结构的
疲劳性能分析 洪吉发, 李亚蕾
Fatigue Performance Analysis of Mixed Joint Structure of High Strength Steel and
Aluminum Alloy in Lightweight Design of Car Body Hong Jifa, Li Yalei
- 023 激光熔覆 $Fe_{18}Co_{24}Cr_{20}Ni_{23}Mo_7Nb_3W_1Si_2C_2$ 复合涂层
组织形貌及耐蚀性能研究 赵珊, 兰元阔, 郭文敏, 于淞百, 李梦奇
Research on the Microstructure and Corrosion Resistance
of Laser Cladding $Fe_{18}Co_{24}Cr_{20}Ni_{23}Mo_7Nb_3W_1Si_2C_2$ Composite
Coatings Zhao Shan, Lan Yuankuo, Guo Wenmin, Yu Songbai, Li Mengqi
- 029 地铁隧道在软土地层进行盾构的施工技术研究 王伟
Research on Shield Tunneling Construction Technology for Subway
Tunnels in Soft Soil Layers Wang Wei
- 032 建筑工程管理模式的数字化转型研究 肖晨虹
Research on the Digital Transformation of Construction
Project Management Mode Xiao Chenhong
- 035 废弃矿山生态修复存在的问题困难及对策建议 郝鹏志
Problems and Countermeasures of Ecological Restoration
in Abandoned Mines Hao Pengzhi
- 038 光面爆破技术在隧道开挖过程中的应用与推广 白周全
Application and Promotion of Smooth Blasting Technique
in Tunnel Excavation Bai Zhouquan
- 041 人工挖孔桩施工技术在结构纠偏中的运用 蒋晓辉
The Application of Manual Digging Pile Construction Technology
in Structural Correction Jiang Xiaohui
- 044 模块化装配式钢结构房屋建筑施工技术研究 陈强
Research on the Construction Technology of Modular Prefabricated
Steel Structure Building Chen Qiang
- 047 地铁渗漏水问题治理探讨——以北京地铁 16 号线为例 顾广宇
Discussion on the Treatment of Subway Leakage Water Problem
----Taking Beijing Subway Line 16 as an example Gu Guangyu

050	海上复杂地质条件下大直径嵌岩钻孔灌注桩施工技术研究 Research on the Construction Technology of Large-Diameter Rock-Socketed Bored Piles under Offshore Complex Geological Conditions	袁锡权 Yuan Xiquan
053	海上潮变区大体积承台混凝土温控技术研究 Temperature Control Technology for Mass Concrete Footings in Tidal Zones	陈时波 Chen Shibō
056	附着式升降脚手架结构设计与施工适配性研究 ——基于奉贤区奉贤新城 16 单元 36-02 区域地块 7#、12# 楼实践 Research on the Structural Design and Construction Adaptability of Attached Lifting Scaffolding -- Based on the Practice of Buildings 7# and 12# in Area 36-02, Unit 16, Fengxian New City, Fengxian District	杨迎文 Yang Yingwen
059	GPS 技术在海洋测绘中的运用 Application of GPS Technology in Ocean Surveying and Mapping	卢忠连 Lu Zhonglian
062	智能化机械设备维保体系构建与实施策略 Construction and Implementation Strategy of Intelligent Machinery and Equipment Maintenance System	徐驰 Xu Chi
065	高速重载工况下轴承与联轴器协同优化设计 Coordinated Optimization Design of Bearings and Couplings under High-speed and Heavy-load Conditions	魏巍, 冯卫国, 岳国艳, 章俊杰 Wei Wei, Feng Weiguo, Yue Guoyan, Zhang Junjie

水电工程 | HYDROPOWER ENGINEERING

068	基于智能技术的煤矿机电运输系统设计 Design of Coal Mine Electromechanical Transportation System Based on Intelligent Technology	杨玉伟 Yang Yuwei
071	900MW 压水堆核电站三十年改造后厂用降压变与辅变电源之间切换试验控制过程 Switthe test Control Process between the Step-Down Transformer and Auxiliary Transformer Power Supply	潘志勇 Pan Zhiyong
074	智能算法在交通机电设备故障预测与维护中的应用 Application of Intelligent Algorithms in Fault Prediction and Maintenance of Transportation Mechanical and Electrical Equipment	张世冀 Zhang Shiji
077	消防水系统使用 HDPE 管道代替碳钢管道的优越性 Superiority of Using HDPE Pipes Instead of Carbon Steel Pipes in Firefighting Water Systems	卢广朋 Lu Guangpeng
080	配电网故障智能研判与主动抢修技术应用 Intelligent Analysis and Proactive Repair Technology Application for Distribution Network Faults	慕晓杰 Mu Xiaojie
083	风电场集电线路故障原因分析及防范方法 Cause Analysis and Prevention Methods for Faults in Wind Farm Collection Lines	卢应强 Lu Yingqiang
086	风电场集电线路电缆终端接头状态监测技术研究 Research on the Monitoring Technology of Cable Terminal Joints in Wind Farm Collecting Lines	杨志勇 Yang Zhiyong
089	电力价格波动对用户行为的影响及应对策略 The Impact of Electricity Price Fluctuations on User Behavior and Corresponding Strategies	周黎, 朱鹏飞 Zhou Li, Zhu Pengfei

路桥工程 | ROAD AND BRIDGE ENGINEERING

092	高速公路桥梁工程施工中的质量控制 Quality Control in Expressway Bridge Construction	王永成 Wang Yongcheng
095	市政工程道路与桥梁连接处的设计与施工研究 Design and Construction Study of Road and Bridge Connection in Municipal Engineering	黄凯 Huang Kai
098	市政高架桥梁桥墩立柱和盖梁装配式施工技术应用研究 Research on the Application of Prefabricated Construction Technology of Bridge Pier Column and Cover Beam of Municipal Elevated Bridge	何渊 He Yuan

安全质量 | SAFETY QUALITY

101	质量是无需投资的效益 Quality is a Benefit That Requires No Investment	童明华 Tong Minghua
104	燃煤电厂热工自动化系统安全性与可靠性分析 Safety and Reliability Analysis of Thermal Automation System in Coal-Fired Power Plant	袁嘉欣 Yuan Jiaxin
107	核电厂大修质量大监督网络模式探讨 Exploration of a Quality Supervision Network Model for Nuclear Power Plant Overhauls	张燕青 Zhang Yanqing
110	浅谈调度精细化管理在煤矿安全生产中的作用 Discussion on the Role of Refined Scheduling Management in Coal Mine Safety Production	谢兰新 Xie Lanxin
113	城镇燃气工商业用户运行安全风险防范研究 Research on the Operation Safety Risk Prevention of Urban Gas Industrial and Commercial Users	赵冀川 Zhao Jichuan
116	基于数据分析的汽车零部件供应商质量管理与评价研究 Research on the Quality Management and Evaluation of Auto Parts Suppliers Based on Data Analysis	路文 Lu Wen

基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中的应用研究

林健, 闫晓兵, 孙大伟
泰山科技学院, 山东 泰安 271000

摘要： 随着雷达技术的不断进步，对数字信号处理的要求也越来越高。研究基于 FPGA 的数字信号处理技术，不仅能够推动雷达系统的发展，还能为未来更先进的雷达技术打下坚实的基础。针对与本文首先分析了基于 FPGA 的数字信号处理技术原理，阐述了数字信号处理在雷达系统中应用的意义，并针对该技术在雷达系统实际应用中存在的问题，提出了相对应的优化策略，通过统一接口协议与降低能耗等策略的实施，期望能为雷达系统的进一步优化提供帮助。

关键词： FPGA；数字信号处理；雷达系统

Research on the Application of Digital Signal Processing Based on FPGA in Radar System

Lin Jian, Yan Xiaobing, Sun Dawei
Taishan University of Science and Technology, Tai'an, Shandong 271000

Abstract： With the continuous progress of radar technology, the requirement of digital signal processing is getting higher and higher. The research of digital signal processing technology based on FPGA can not only promote the development of radar system, but also lay a solid foundation for more advanced radar technology in the future. In view of this, this paper first analyzes the principle of digital signal processing technology based on FPGA, expounds the significance of the application of digital signal processing in radar system, and proposes corresponding optimization strategies in view of the problems existing in the practical application of this technology in radar system. It is expected to help the further optimization of the radar system.

Keywords： FPGA; digital signal processing; radar system

引言

在现代雷达系统中，数字信号处理技术的应用已经成为提升系统性能的关键因素。随着电子技术的飞速发展 FPGA 因其在并行处理、实时性和灵活性方面的优势，成为实现复杂 DSP 算法的理想平台。FPGA 不仅能够提供高速的数据处理能力，还能够根据实际需求进行现场编程和优化，这对于雷达系统中不断变化的信号处理需求来说至关重要。雷达系统在军事、民用航空、气象监测等多个领域发挥着重要作用，但当前传统的模拟信号处理方法已经难以满足现代雷达系统对速度、精度和灵活性的需求。因此基于 FPGA 的数字信号处理技术成为了研究的热点。通过将 FPGA 应用于雷达信号的采集、处理和分析，可以实现更高效的信号处理流程，提高雷达系统的分辨率和抗干扰能力，同时降低系统的功耗和成本。

一、基于 FPGA 的数字信号处理技术概述

（一）FPGA 技术在数字信号处理中的优势

FPGA 技术在数字信号处理中的优势主要体现在其高度的可编程性、并行处理能力和实时性能上。首先 FPGA 是一种可以通过硬件描述语言进行编程的集成电路，它允许设计者根据需要定制硬件逻辑功能。这种可编程性使得 FPGA 能够灵活适应不同的数字信号处理算法和应用需求，从而在产品开发周期中节省时间和成本。其次 FPGA 内部的逻辑单元可以并行工作，这为实现复杂的数字信号处理算法提供了强大的计算能力^[1]。

（二）FPGA 的基本原理与结构

与传统的 ASIC 相比，FPGA 提供了更高的灵活性和更快的开发周期。FPGA 的基本原理是基于查找表和可编程互连的结构，这些查找表可以实现任意的逻辑功能，而可编程互连则允许用户定义不同逻辑块之间的连接关系。FPGA 的结构通常包括可编程逻辑块、可编程互连资源、输入输出模块（I/O 模块）和嵌入式存储器或处理器等。逻辑块是 FPGA 的基本单元，通常包含多个可编程逻辑单元，它们可以被配置为实现各种组合逻辑和时序逻辑功能。可编程互连资源则负责逻辑块之间的信号传递，通过编程可以形成复杂的逻辑网络^[2]。

作者简介：林健（1989.08-），男，汉族，山东省泰安市泰山区人，硕士研究生，研究方向：电子信息工程。

（三）数字信号处理在雷达系统中的作用

在雷达系统的应用中，数字信号处理技术发挥着至关重要的作用。数字信号处理技术在雷达系统中的应用主要体现在信号的采集、滤波、变换、检测、估计和识别等方面。据特容易数字信号处理技术在雷达系统中用于提高信号的信噪比。在信号检测方面，还能够执行各种检测算法，如恒虚警率检测，以区分目标信号和背景噪声。

二、基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用的意义

（一）提升雷达系统的实时处理能力

随着现代战争与国防环境的日益复杂化，使得国家对雷达系统的性能要求越来越高。基于 FPGA 的数字信号处理技术在雷达系统中的应用，为提升其实时处理能力提供了重要支持。FPGA 具有极高的灵活性和并行处理能力，能够实现复杂的数字信号处理算法，从而大幅提高雷达系统的数据处理速度和精度。具体而言 FPGA 能够实现高速数据采集和处理。在雷达系统中信号的采集速度直接影响到系统的反应速度和目标检测能力。利用 FPGA 的并行处理特性，可以同时处理多个数据通道，显著缩短信号处理时间，从而提升雷达系统的实时性^[3]。

（二）增强信号处理的灵活性和可重构性

FPGA 技术的由来可以追溯到 20 世纪 80 年代中期，当时为了应对日益增长的电子系统复杂性和缩短产品上市时间的需求，Xilinx 公司推出了世界上第一款现场可编程门阵列（FPGA）。FPGA 是一种可以通过编程来配置的集成电路，它允许用户在不更换硬件的情况下，重新配置其逻辑功能。这种灵活性使得 FPGA 在数字信号处理、通信系统、航空航天和军事应用等领域迅速获得了广泛应用。而在当前基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用的意义重大。在雷达系统中信号处理算法可能会根据不同的应用场景和目标特性进行调整。FPGA 允许设计者在硬件层面上快速修改和优化算法，而无需更换物理硬件。这种可重构性使得雷达系统能够适应多变的战场环境和任务需求，提高系统的适应性和生存能力^[4]。

（三）降低雷达系统的功耗和成本

基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用的意义不仅体现在提高性能和灵活性上，在降低雷达系统的功耗和成本层面，基于 FPGA 的数字信号处理技术的应用同样可以实现。例如 FPGA 可以通过其并行处理能力同时执行多个任务，从而减少对多个专用处理器的需求。这种集成度的提高意味着雷达系统可以使用更少的硬件组件，进而降低整体功耗和制造成本。以一款现代的空空交通控制雷达系统为例，传统设计可能需要多个数字信号处理器芯片来处理不同通道的信号。每个数字信号处理器芯片都需要独立的电源和散热系统，这不仅增加了系统的复杂性，还提高了能耗。而采用 FPGA 后可以将多个数字信号处理器芯片的功能集成到一个芯片上，通过编程实现多通道信号处理。这样不仅减少了硬件数量，还降低了对散热和电源管理的要求，从而大

幅降低功耗。

（四）提高雷达系统的抗干扰能力和检测精度

在现代战争和民用领域中，使得雷达系统在实际应用中往往面临着日益复杂的电磁环境，各种有意或无意的干扰源对雷达的正常工作构成了严重威胁。基于 FPGA 的数字信号处理技术能够有效提高雷达系统的抗干扰能力。通过实施先进的信号处理算法，如自适应滤波、波束形成和频谱分析等，FPGA 可以准确地识别和抑制干扰信号，确保雷达能够准确地检测和跟踪目标。

三、基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用时的难点

（一）高速数据处理与传输的挑战

在当前的雷达系统运行中，应用 FPGA 用于数字信号处理时高速数据处理与传输是一个主要的难点。由于雷达系统通常需要实时处理大量的数据，而这些数据来自于雷达的发射和接收模块，它们需要被迅速地采集、处理和分析。FPGA 虽然在并行处理方面具有优势，但随着数据速率的提高，对 FPGA 内部逻辑和外部接口的带宽要求也随之增加。例如现代雷达系统可能需要处理高达数 Gbps 的数据流^[5]。

（二）实时信号处理算法的资源消耗问题

随着雷达技术的快速发展，对实时信号处理的要求越来越高。在是在当前基于 FPGA 的数字信号处理中由于 FPGA 的资源是有限的，这就要求工作人员在设计实时信号处理算法时，必须在性能和资源消耗之间找到一个平衡点。但是在当前的应用中这一平衡的难以把控，使得基于 FPGA 的数字信号处理在雷达监测中的应用效果受到限制。

（三）系统集成与兼容性难题

而在系统集成与兼容性层面，基于 FPGA 的数字信号处理单元的应用往往需要与多种硬件和软件组件协同工作，这带来了新的难题。例如 FPGA 需要与模拟到数字转换器、数字到模拟转换器与存储器以及其他专用集成电路等组件进行无缝连接。这些组件可能来自不同的制造商，具有不同的接口标准和电气特性，这就要求 FPGA 设计必须能够适应这些差异，实现高效的数据交换。

（四）热管理与功耗控制的复杂性

雷达系统应用的重要性在于其在军事、民用和科研领域的广泛应用，如空中交通管制、气象监测、航天探测等领域在雷达系统的应用之下能够提供目标的距离与角度等信息，对于保障飞行安全、灾害预警和科学研究具有不可替代的作用。随着技术的发展，基于 FPGA 的数字信号处理技术在雷达系统中的应用越来越广泛，因其灵活性高等优点，成为现代雷达系统设计的关键技术之一。然而在基于 FPGA 的数字信号处理应用于雷达系统时，热管理和功耗控制的复杂性尤为突出。由于 FPGA 在执行复杂算法时会产生大量热量，若不加以有效管理，将导致设备温度过高，影响其性能甚至损坏硬件^[6]。

四、基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用的优化策略

（一）使用高速接口标准

研究人员为了优化高速数据处理与传输的挑战，可以在优化策略中使用高速接口的标准。高速接口标准如 PCI Express (PCIe) 和 Serial ATA (SATA) 提供了比传统并行接口更高的数据传输速率和更低的延迟。通过将这些高速接口集成到 FPGA 设计中，研究人员能够实现数据的快速读写，从而显著提高了雷达系统的数据处理能力。为了进一步优化性能，研究人员还采用了数据压缩技术。通过在 FPGA 内部实现高效的压缩算法，可以减少需要通过高速接口传输的数据量，从而降低对带宽的需求并减少处理时间^[7]。

（二）加强对信号处理算法的优化

在当前的多个领域雷达系统应用中，其中信号处理算法的效率高低往往直接影响到整个系统的性能。因此加强对信号处理算法的优化是提高基于 FPGA 的数字信号处理能力的关键。在具体的优化中研究人员可以采用快速傅里叶变换算法，来显著提高信号处理速度。在实际应用中雷达系统可以通过优化 FFT 算法的实现来减少计算资源的消耗，提高数据处理的吞吐量。以某型号的空交通管制雷达系统为例，该系统采用了 FPGA 来实现高速的信号处理。在该系统中为了提高雷达信号的处理速度和精度，工程师们对 FFT 算法进行了优化。他们首先对算法进行了并行化处理，将原本顺序执行的 FFT 运算分解为多个子任务，这些子任务可以同时并在 FPGA 的不同处理单元上执行。通过这种方式大大缩短了 FFT 的处理时间^[8]。

（三）使用标准化的接口和协议

21 世纪初，在数字信号处理技术的快速发展背景下，使得在雷达系统中 FPGA 因其出色的并行处理能力和可重配置性得到了广泛应用。雷达系统作为现代军事和民用领域的重要组成部分，其性能的优劣直接关系到目标检测、跟踪和识别的准确性。而为

了提高雷达系统的互操作性和可维护性，采用标准化的接口和协议是至关重要的。标准化的接口可以确保不同模块之间的高效通信，同时降低系统集成的复杂度。例如采用 PCI Express 接口可以实现高速数据传输，满足雷达系统对数据吞吐量的要求。此外利用以太网接口可以实现远程监控和控制，提高系统的灵活性和可扩展性^[9]。

（四）使用低功耗设计技术

对于现代化的雷达系而言，随着对实时处理能力要求的不断提高，以及对便携式和移动式雷达设备的需求增加，低功耗设计技术变得尤为重要。所以研究人员为了实现基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中的低功耗优化，首先可以采用动态电源管理技术。动态电源管理允许 FPGA 在不同的工作负载下动态调整其电源电压和频率，从而在保证性能的前提下最小化功耗。其次可以利用 FPGA 的模块化设计特性，通过部分重配置技术实现功耗优化。在雷达系统中，某些功能模块可能不需要持续运行，或者在特定时间段内可以暂停工作。通过动态地重配置这些模块，可以在不需要时将其关闭或降低其功耗，从而节省能源^[10]。

五、结语

综上所述，基于 FPGA 的数字信号处理技术在雷达系统中的应用虽然面临诸多挑战，但通过采用高速接口标准、优化信号处理算法、使用标准化的接口和协议以及低功耗设计技术等策略，可以显著提升系统的性能和效率。这些优化措施不仅能够应对资源限制和系统集成的难题，还能有效管理热和功耗问题，确保雷达系统在各种应用场合下的稳定运行和长期可靠性。随着技术的不断进步，未来基于 FPGA 的数字信号处理技术有望在雷达系统中实现更高的数据处理速度、更低的延迟和更优的能效比。这将为雷达技术的发展开辟新的道路，使其在军事防御、民用监测和科学研究等领域发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]左磊, 贾豫东. 基于 FPGA 的测风激光雷达功率谱估计系统设计 [J]. 电子制作, 2023,31(03):49-51.DOI:10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2023.03.026.
- [2]邓翔. 敏捷型电离层高频雷达信号处理若干关键技术研究 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2020.DOI:10.27562/d.cnki.gkyyz.2020.000063.
- [3]夏扬. 多功能两维周界雷达信号处理系统设计与实现 [D]. 南京理工大学, 2021.DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.002438.
- [4]陈泽宗, 周章凯, 赵晨. 基于分裂基 FFT 的 S 波段雷达信号处理单元设计与实现 [J/OL]. 电子测量技术, 1-10[2024-11-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2175.TN.20240929.1316.041.html>.
- [5]卿国能, 朱正元, 朱康奇, 等. 面向高速多目标测距测速的微波光子雷达系统及算法研究 [J/OL]. 光通信技术, 1-11[2024-11-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20240523.1534.002.html>.
- [6]利才钲, 晋良念, 蒙淑娇. 改进的八波束比幅测向系统校正方法及 FPGA 实现 [J/OL]. 现代防御技术, 1-8[2024-11-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3019.TJ.20240418.1437.018.html>.
- [7]周皓秋, 冯珏, 陈洁, 等. 用于黄土地结构与物性探测的无人机载探地雷达 [C] //中国地球物理学会. 2023 年中国地球科学联合学术年会论文集——专题十七 电磁地球物理学研究应用及其新进展、专题十八 探地雷达新进展. 吉林大学地球探测科学与技术学院; 大连中睿科技发展有限公司; , 2023:1.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.115378.
- [8]周皓秋, 冯珏, 陈洁, 等. 用于黄土地结构与物性探测的地面多极化探地雷达 [C] //中国地球物理学会. 2023 年中国地球科学联合学术年会论文集——专题十七 电磁地球物理学研究应用及其新进展、专题十八 探地雷达新进展. 吉林大学地球探测科学与技术学院; 大连中睿科技发展有限公司; , 2023:1.DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.115377.
- [9]周莎莎, 吴侃, 曹先益, 等. 基于 LABS 技术和 FPGA 的固态激光雷达测距系统 [J]. 光通信技术, 2023,47(05):71-77.DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.015.
- [10]祝判骏, 贾小波, 覃觅觅, 等. 基于扩频方法的谐波雷达目标检测研究 [J]. 火控雷达技术, 2023,52(03):10-15.DOI:10.19472/j.cnki.1008-8652.2023.03.002.

ZB48A 包装机关键部件改进对设备性能提升的研究

王林鹏, 高大林, 杨静, 王增浩, 李国良

山东中烟工业有限责任公司青州卷烟厂, 山东 青州 262500

摘 要 : 本论文针对 ZB48A 包装机在运行过程中出现的输送带与轨道 距离偏离过大、输送带张紧度不稳定以及烟包定位不准确等问题, 分别提出了增加输送带限位装置、增加张紧轮调节装置和增加烟包夹紧钢板的改进方案。通过详细阐述各方案的设计思路、实施过程和效果验证, 证明了这些改进措施能够有效提升设备的运行稳定性、降低故障停机时间、提高包装质量, 为包装机的优化升级提供了重要的实践参考。

关 键 词 : 张紧轮; 输送带; 摩擦力

Research on Improving the Performance of ZB48A Packaging Machine by Improving the Key Components

Wang Linpeng, Gao Dalin, Yang Jing, Wang Zenghao, Li Guoliang

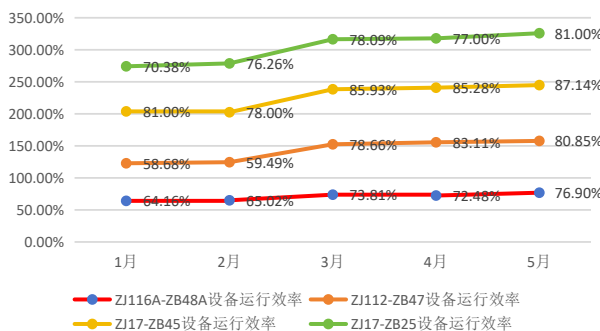
Qingzhou Cigarette Factory, China Tobacco Industry Co., LTD. Qingzhou, Shandong 262500

Abstract : In this paper, aiming at the problems such as excessive distance deviation between conveyor belt and track, unstable tension of conveyor belt and inaccurate positioning of cigarette bag in the running process of ZB48A packaging machine, the improvement scheme of increasing conveyor belt limit device, increasing tension wheel adjustment device and increasing cigarette bag clamping steel plate is proposed respectively. Through elaborating the design ideas, implementation process and effect verification of each scheme, it is proved that these improvement measures can effectively improve the operating stability of the equipment, reduce the failure downtime, improve the packaging quality, and provide an important practical reference for the optimization and upgrading of the packaging machine.

Keywords : tension wheel; conveyor belt; friction

ZB48A 包装机是于2020年8月11日入厂安装调试, 2021年5月19日-20日进行设备验收, 设备验收三个班次, 每班次设备运行7小时, 平均设备运行效率为89.59%。验收期间设备短时间停机次数较多, 三个班次总停机次数105次, 停机时长2.05小时。正式验收生产后, 随着生产任务逐年递增, 设备暴露出生产效率低, 单箱破烟量高的问题, 对于促进效率提升和成本管控产生阻力, 且存在流入不合格品的风险, 因此该问题亟待解决。

我们对其工艺流程进行梳理, 找出其影响输送带问题的关键流程和因素, 并对其进一步的分析和验证, 最终通过配对 T 检验以及统计分析的工具判断, 得出输送带与轨道距离偏离过大、输送带张紧度难以保持以及烟包定位不准确等问题的关键所在, 这个关键因素不仅导致了设备故障停机时间的增加, 降低了生产效率, 还影响了产品的包装质量, 增加了生产成本。因此, 对这些关键部件进行改进研究具有重要的现实意义。



> 图1 2023年1月-5月 ZJ116A-ZB48A单箱破烟量

一、输送带与轨道距离偏离过大问题的改进

(一) 问题分析

输送带与轨道距离偏离过大, 会使输送带在运行过程中受力不均, 容易导致输送带磨损加剧、跑偏甚至断裂, 进而引发设备

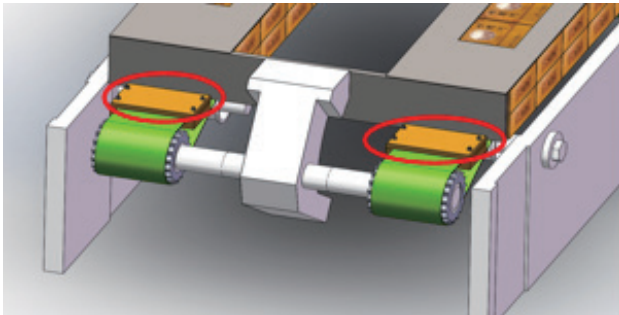
故障停机。传统的解决方法往往难以实时监测和调整输送带的偏移情况, 无法从根本上解决问题。

(二) 增加输送带限位装置的方案

利用 SolidWorks 工具, 技术人员可以根据输送带的实际尺寸精确设计限位装置。设计过程中, 充分考虑输送带的运行特点和

作者简介: 王林鹏(1982.09-), 男, 汉族, 山东潍坊市青州市人, 大学, 工程师, 研究方向: 机械制造及自动化。

设备的工作环境，根据输送带的速度、负载等因素，调整限位装置的强度和刚度，以确保其能够有效限制输送带的偏移，同时又不会对输送带的正常运行造成过大阻力。



> 图2 输送带限位装置

通过对安装限位装置后的设备进行运行测试，发现输送带在运行过程中始终保持在正确的轨道上，未出现明显的偏移现象，且设备的振动和噪音明显降低，不仅减少了设备故障的发生概率，还提高了包装质量，确保了产品的一致性^[1]。

（三）实施过程

1. 设计图纸

利用 SolidWorks 软件，根据确定的安装位置和输送带的实际尺寸，绘制限位装置的三维模型图。在建模过程中，精确设计限位框和限位杆的形状、尺寸和结构，确保其能够与输送带紧密配合，提供稳定的限位作用。

2. 确定位置

对输送带的运行路线进行详细分析，确定输送带容易出现偏移的位置。这些位置通常包括输送带的转弯处、连接处以及与其他部件接触的部位。通过观察和数据分析，找出输送带在这些位置偏移的规律和原因，为限位装置的安装位置提供依据。

3. 加工零件、安装调试

根据 CAD 设计图，使用 3D 打印技术制造限位装置的零件。

安装过程中，注意调整限位装置的位置和角度，使其与输送带紧密贴合。安装完成后，进行调试工作，启动设备，观察输送带的运行情况，检查是否存在卡滞、摩擦等异常现象。如有问题，及时调整限位装置的位置或参数，直到设备运行正常^[2]。

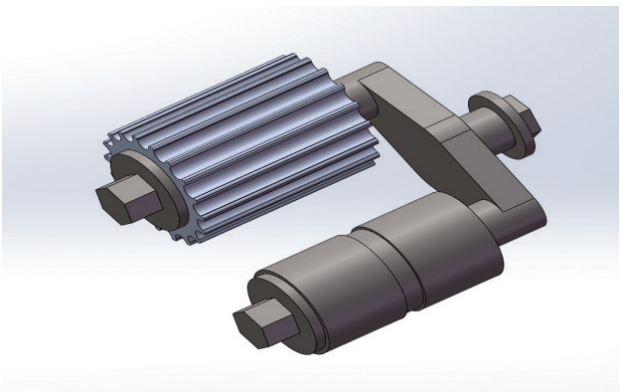
三、输送带张紧度不稳定问题的改进

（一）问题分析

输送带张紧度不稳定会导致输送带打滑、跑偏，影响物料的正常输送，严重时甚至会造成输送带断裂，引发设备故障。传统的张紧方式难以实时调整张紧度，无法适应设备在不同工况下的运行需求。

（二）增加张紧轮调节装置的方案

自主加工张紧轮和可调节导向轮具有一定的技术可行性。根据输送带的规格和设备的要求，选择合适的材料，如高强度合金钢，进行张紧轮的加工。加工过程中，严格控制张紧轮的尺寸精度、形状精度和表面粗糙度，确保其能够平稳转动并承受输送带的张力。



> 图3 张紧轮调节装置

（三）实施过程

1. 设计图纸

根据输送带的尺寸、张力要求和设备的结构特点，设计张紧轮调节装置的图纸。

利用计算机辅助设计软件，对设计图纸进行模拟分析，评估张紧轮调节装置在不同工况下的性能。通过模拟分析，优化设计方案，提高装置的稳定性和可靠性^[3]。

2. 加工零件、安装调试

按照设计图纸，加工制造张紧轮、导向轮、调节机构和安装支架等零件。加工过程中，严格控制加工精度，确保各零件的质量符合要求。对于关键部件，如张紧轮和调节机构，要进行严格的质量检测，包括硬度测试、平衡测试等，以确保其性能可靠。

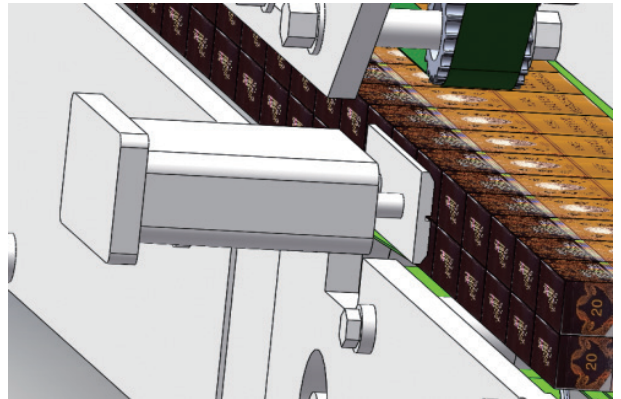
设备进行张紧轮调节装置的安装调试工作。启动设备，逐步调整张紧度，观察输送带的运行情况，检查是否存在打滑、跑偏等异常现象。根据调试结果，对装置进行进一步的优化调整，直到设备运行稳定^[4]。

四、烟包定位不准确问题的改进

（一）问题分析

传统的制动气囊在烟包定位过程中，由于接触面积小、摩擦力不足，容易导致烟包在输送过程中发生蹿动、偏移，影响包装质量。而且气囊磨损较快，需要频繁更换，增加了设备维护成本和停机时间^[5]。

（二）增加烟包夹夹紧钢板的方案



> 图4 烟包夹夹紧装置

1. 结构改进与原理

通过在输送通道中改变原有结构，抛弃气囊，采用钢板配合气缸夹紧烟包。钢板采用高强度、耐磨的金属材料制成，其形状和尺寸根据烟包的规格和输送通道的结构进行设计。

气缸作为动力源，根据控制系统的指令驱动钢板夹紧或松开烟包。当烟包进入夹紧区域时，气缸推动钢板向烟包方向移动，使钢板与烟包形成大面积的面接触。这种面接触方式大大增加了烟包与夹紧装置之间的摩擦力，能够有效防止烟包的窜动和偏移，确保烟包在输送过程中的准确位置^[6]。

2. 优势分析

增加烟包夹紧钢板后，烟包的定位更加准确，包装质量得到显著提高。由于钢板的夹紧力稳定且均匀，烟包在包装过程中能够保持正确的姿态，减少了因定位不准确而导致的包装缺陷，如包装不严密、标签粘贴不正等问题。

与传统气囊相比，钢板不易磨损，不需要频繁更换，降低了零部件成本和设备维护工作量^[7]。

（三）实施过程

1. 设计图纸

根据烟包的尺寸、形状和输送通道的结构，设计烟包夹紧钢板的图纸。图纸应包括钢板的形状、尺寸、厚度、安装位置，以及气缸的型号、安装方式和连接结构等详细信息。

利用三维设计软件对夹紧钢板装置进行建模，模拟钢板在夹紧烟包过程中的运动情况和受力状态。通过模拟分析，优化钢板的结构设计，提高夹紧效果和装置的可靠性^[8]。

2. 加工零件、安装调试

根据设计图纸，加工制造钢板和气缸等零件。钢板的加工要保证尺寸精度和表面质量。

在设备停机期间，进行夹紧钢板装置的安装调试工作。启动设备，观察钢板的夹紧动作是否正常，烟包的定位是否准确。通过调整气缸的压力和行程，优化夹紧效果，直到设备运行稳定，烟包定位准确^[9]。

五、改进效果验证

（一）故障停机时间统计

1. 数据收集与对比

在改进措施实施前后，分别对设备的故障停机时间进行详细统计。收集不同时间段内设备因输送带相关问题（如偏移、张紧度不稳定、烟包定位不准确等）导致的停机时间数据。

2. 结果分析

改进后设备的故障停机时间显著减少平均维修时间减少至10.2分/班，这表明增加输送带限位装置、张紧轮调节装置和烟包夹紧钢板等改进措施有效地解决了设备运行中的关键问题，提高了设备的稳定性和可靠性^[10]。

（二）包装质量检测

对改进前后的产品包装质量进行全面检测，检测项目包括包装外观完整性、标签粘贴质量、烟包尺寸精度等。制定详细的检测标准，明确各项指标的合格范围，确保检测结果的准确性和可比性。

（三）经济效益评估

提升了设备运行效率，减少了操作人员处理废品的时间，降低了劳动强度，为品牌结构提升提供了有力保障。

六、结论与展望

从设计到实施的全过程中，通过精确的位置确定、合理的图纸设计、严格的零件制造和安装调试，以及有效的效果验证，证明了该方案能够有效降低故障停机时间，提高设备运行效率和产品质量，同时负面影响风险可控，为其他类似设备的改进提供了有益的参考和借鉴。在未来的设备维护和改进工作中，可进一步优化输送带限位装置的设计和应用，持续提升设备的性能和可靠性。

参考文献

- [1] 易文超, 喻树洪, 项颖, 等. ZB48型机组 YB618入口部位的综合改进与应用 [J]. 设备管理与维修, 2023, (01): 66-68. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2023.01.26.
- [2] 余有芳, 普靖峰, 李惠峰, 等. YB618型硬条及条外透明纸包装机烟包输入通道的改进 [J]. 烟草科技, 2020, 53(02): 102-106. DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.2019.0049.
- [3] 马万杰, 施忠兵, 张志盛, 等. YB618型硬条提升及条外透明纸美容装置的改进 [J]. 烟草科技, 2017, 50(01): 92-97. DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.2016.0042.
- [4] 张志盛, 马万杰, 施忠兵, 等. YB618型透明纸包装两端面预热封装置的改进 [J]. 企业技术开发, 2015, 34(02): 4-6.
- [5] 吴建军, 施忠兵, 陈祁华. YB618型硬条及条外透明纸包装机第二推进器的改进设计 [J]. 烟草科技, 2014, (12): 23-26.
- [6] 孙斌. YB618机型中条盒纸侧边折叠过程改进 [J]. 企业技术开发, 2014, 33(30): 10-12.
- [7] 谢伟, 李惠峰. YB618包装机条盒输送稳定性的分析与改进 [J]. 科学技术创新, 2020, (22): 14-16.
- [8] 张红卫. ZB45(GDX2)包装机 CV 条外透明纸输送部位结构的调整与改进 [J]. 中国包装工业, 2014, (14): 3. DOI: 10.14047/j.cnki.cpi.2014.14.172.
- [9] 张能全, 张庆楠, 马坚, 等. ZB45B包装机烟包成型通道的改进 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(34): 132-135. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2024.34.029.
- [10] 周江, 卢霄, 资义琪, 等. ZB45卷烟封装机组 YB55烟包分离式加包器 [J]. 包装学报, 2024, 16(04): 1-6.

移动式干冰智能清洗设备在电气原件快速清洗中的应用研究

胡家亮

国家电投内蒙古公司矿山机电设备检修公司，内蒙古 通辽 029200

摘 要： 电气设备在现代工业中起着至关重要的作用，其性能和稳定性直接影响生产效率和产品质量，电气原件作为电气设备的重要组成部分，其表面经常会堆积各种污垢，如灰尘、油脂、积碳等，不仅影响原件的散热性能，还可能导致电气故障。因此，定期清洗电气原件是保证电气设备正常运行的关键，随着科技的进步和环保意识的提高，寻找一种高效、环保、无损的清洗方法成为当前研究的热点。移动式干冰智能清洗设备应运而生，以其独特的清洗原理和显著的清洗效果，广泛应用于电气原件清洗领域。

关 键 词： 移动式干冰智能清洗设备；电气原件；快速清洗；应用研究

Research on the Application of Mobile Dry Ice Intelligent Cleaning Equipment in the Rapid Cleaning of Electrical Components

Hu Jialiang

State Power Investment Inner Mongolia Company mine mechanical and electrical equipment maintenance company, Tongliao, Inner Mongolia 029200

Abstract： electrical equipment plays a vital role in modern industry, its performance and stability directly affect the production efficiency and product quality, electrical original as an important part of electrical equipment, its surface often piled up all kinds of dirt, such as dust, oil, carbon, etc., not only affect the cooling performance of the original, but also may lead to electrical failure. Therefore, regular cleaning of electrical components is the key to ensure the normal operation of electrical equipment. With the progress of science and technology and the improvement of environmental awareness, looking for an efficient, environmental protection, non-destructive cleaning method has become a hot topic of current research. Mobile dry ice intelligent cleaning equipment arises as the historic moment, with its unique cleaning principle and significant cleaning effect, widely used in the field of electrical original cleaning.

Keywords： mobile dry ice intelligent cleaning equipment; electrical components; quick cleaning; application research

引言

伴随工业化进程的加快和电气设备在各行各业的广泛应用，电气原件的清洗显得尤为重要，传统的清洗方法存在效率低、对原有的破坏大等问题。近年来，移动式干冰智能清洗设备以其高效、环保、无损清洗的优势，逐渐在电气原件清洗领域崭露头角，介绍了移动式干冰智能清洗设备的工作原理，分析了其在电气原件快速清洗中的应用优势，并通过具体案例验证了其清洗效果，对该设备未来的发展方向进行了展望。

一、移动式干冰智能清洗设备的工作原理

（一）固体二氧化碳升华现象及能量转换

移动干冰智能清洗设备的核心驱动力来自于固体二氧化碳（干冰）接触常温环境时特有的升华现象，这个过程不仅仅是简单的物质状态转变，还包含着复杂的物理和化学能量转换机制。当干冰颗粒被高压空气加速，以极高的速度撞击350KW 电气原件表

面时，其表面温度迅速下降，导致干冰颗粒的升华过程直接由固态变为气态。在这个转化过程中，干冰颗粒吸收了周围环境的热量，导致局部温度急剧下降，这种低温效应在污垢的脆化和剥落中起着至关重要的作用。^[1]在升华过程中，干冰颗粒吸热，其内部能量结构发生显著变化，从稳定的固态能级变为气态高能级，释放出大量潜热，这种能量转换不仅为清洗提供动力，还巧妙地利用了环境热量，实现了能量的高效利用。升华产生的二氧化碳

作者简介：胡家亮（1994.05-），男，蒙古族，河北省滦县人，大学本科，助理工程师，研究方向：机械专业。

气体体积迅速膨胀，形成高压气流，对污垢有很强的冲刷作用，进一步增强清洗效果，这种能量转换机制不仅使清洗过程更加高效，而且降低了能耗，体现了绿色清洗的理念。^[2]

（二）高速冲击和微爆炸效应的结合及其复杂的动力学分析

当干冰颗粒以超过300 m/s的速度撞击350KW电气原件表面的污垢时，其强大的机械冲击力足以打破污垢与基板之间的粘附，使其与表面分离，这个过程不仅仅是简单的物理碰撞，还涉及到复杂的动力学机制。高速冲击产生的应力波在污垢层中传播，导致污垢结构的破坏和分离，干冰颗粒在撞击瞬间释放的能量，使污垢层在接触面局部变脆，进一步降低其附着力。此外，微爆效应在清洗过程中起着重要的作用，干冰颗粒升华时，其体积的快速膨胀在污垢层内部形成微小的爆炸力，有助于彻底清除基板表面的顽固污垢。微爆效应与干冰颗粒的升华过程密切相关，在升华过程中，干冰颗粒中的气态二氧化碳分子在极短的时间内迅速膨胀，形成高压气团，当这种高压气团与污垢层接触时，会产生强烈的冲刷和剥离作用，从而加速污垢的清除，这种高速冲击和微爆炸效应的结合，使得移动式干冰智能清洗设备在清洗过程中能够全面、均匀、快速地清除污垢。

（三）智能调节和精确清洗的先进技术和算法实现

该系统采用先进的传感器技术和算法实现，可以根据350KW电气原件的材质、污垢的种类和厚度等因素，精确调节干冰颗粒的喷射速度、角度和压力等参数，这种智能调节不仅提高了清洗的准确性和效率，还避免了因参数设置不当而损坏电气原件的风险。智能控制系统的核心在于其强大的数据处理和分析能力，通过内置的传感器，系统可以实时监控清洗过程中的各种数据，如温度、压力、流量等，这些数据实时传输到中央处理器，经过复杂的算法处理和分析，得到最优的清洗参数，这些参数被快速反馈到控制系统，实现干冰颗粒喷射参数的精确调节。^[3]此外，智能控制系统还具有自学习和优化能力，通过积累清洗过程中的数据，系统可以逐步优化其算法和参数设置，提高清洗效率和精度。这种智能控制机制不仅使清洗过程更加高效可靠，而且降低了人工干预的成本和风险。通过智能控制系统的精确控制，移动式干冰智能清洗设备可以实现对电气原件表面的全面、均匀、快速清洗，同时保证清洗质量的一致性和可靠性。

二、移动式干冰智能清洗设备在电气原件快速清洗中的应用优势

（一）高效清洗和立即恢复电气性能

传统的清洗方法往往需要长时间浸泡、刷洗或化学处理，不仅费时费力，还可能对350KW电气原件造成不必要的损坏，干冰清洗，以其独特的物理清洗机理，能在短时间内快速去除污垢，避免对电气原件的任何化学腐蚀或物理损伤。在清洗过程中，干冰颗粒高速撞击电气原件表面，其强大的冲击力能迅速瓦解并剥离污垢，使电气原件表面恢复原有的光滑度，这种高效的清洗方式不仅缩短了清洗周期，而且提高了清洗质量，保证了电气原件清洗后能立即恢复原有的电气性能，这对于需要经常清洗维护的

电气设备来说，无疑是一大优势。^[4]此外，干冰清洗过程中产生的二氧化碳气体升华后会迅速消散，不会留下任何残留物，避免了传统清洗方式中可能存在的二次污染问题，这使得电气部件能够在清洗后立即投入使用，无需额外的处理或等待时间。

（二）环境保护、节能和可持续发展

干冰清洗作为一种物理清洗方法，不依赖于任何化学溶剂和清洗剂，因此不会产生有害的废水、废气和固体废物。这不仅降低了环境污染的风险，也降低了企业的环保成本。同时，干冰清洗过程中产生的二氧化碳气体经过升华后将返回大气，实现资源的循环利用，这符合目前全球倡导的绿色低碳、可持续发展的理念。此外，干冰清洗设备在运行过程中消耗的能源相对较少，不会产生额外的碳排放，对于推动电气行业的绿色转型和可持续发展具有重要意义。

（三）电气部件的精确清洗和保护

移动式干冰智能清洗设备在快速清洗电气原件的同时，还具有精确清洗和保护电气原件的能力，传统的清洗方式往往难以精确控制清洗强度和范围，容易对电气原件造成不必要的损坏，干冰清洗可以通过智能控制系统精确控制干冰颗粒的喷射速度、角度、压力等参数，实现对电气原件表面的精确清洗。^[5]在清洗过程中，干冰颗粒高速撞击电气原件表面，其冲击力能准确作用于污垢层，不会损伤电气原件基板，这种精准的清洗方式不仅提高了清洗质量，还保护了电气原件的完整性和稳定性，这对于需要保持高精度和稳定性的电气设备来说，无疑是一个重要的优势。此外，干冰清洗过程中产生的低温效应也能在一定程度上冷却电气原件表面，有助于降低清洗过程中的热应力，进一步保护电气原件的完整性和可靠性。

（四）适应性强，应用灵活

干冰清洗可以为复杂的电路板、精密的电子原件或大型电气设备提供有效的清洗解决方案，干冰清洗设备的设计小巧轻便，便于携带和移动，使其能够适应各种复杂的清洗环境和场景。同时干冰清洗的清洗范围广，可以清洗各种类型的污垢，如油脂、灰尘、氧化物等，这种广泛的适应性使得干冰清洗设备在电气原件的快速清洗中发挥了最大的作用。^[6]此外，干冰清洗设备还具有智能操作界面和控制系统，操作人员可以轻松掌握设备的运行状态和清洗参数，这种灵活的应用能力不仅提高了清洗效率和质量，还降低了操作难度和成本。

三、移动式干冰智能清洗设备在电气原件快速清洗中的应用路径分析

（一）从人工低效到智能高效的飞跃

在电气制造和维修领域，350KW电气原件的清洗度是保证其高效运行和延长使用寿命的关键因素，传统的人工清洗方式，如溶剂擦拭、高压水枪冲洗等，不仅效率低，而且难以保证清洗质量的一致性，还可能对电气原件造成潜在的损坏，如腐蚀、短路等风险。西门子电气作为全球电气行业的领先企业，面对清洗电气原件的严峻挑战，正在积极寻求创新的解决方案。西门子电气

推出移动式干冰智能清洗设备，标志着其从人工低效清洗向智能高效清洗的跨越，干冰清洗技术利用干冰颗粒在高速冲击下瞬间升华的物理特性，有效剥离电气原件表面的污垢，同时避免化学溶剂残留和水侵入的风险，该技术的引入不仅显著提高了清洗效率，而且保证了清洗质量的一致性和稳定性。以西门子一系列高压开关柜的清洗为例，传统的清洗方式需要大量的人力和时间，很难彻底去除油污和灰尘。^[7]使用干冰清洗技术后，清洗效率提高了近50%，清洗质量明显提升，干冰颗粒的精确喷射确保了电气原件表面的污垢被完全清除，避免了对电气原件的潜在损坏，干冰清洗的环保性也符合西门子电气对可持续发展的承诺。

（二）满足多样化需求的定制解决方案

ABB作为全球电气领域的巨头，其变压器广泛应用于各种工业场景，对清洗技术的要求尤为严格，ABB选择与移动干冰智能清洗设备供应商合作，共同开发变压器清洗定制解决方案，满足不同场景下的清洗需求。在定制解决方案的开发过程中，ABB与设备供应商密切合作，深入分析变压器结构、污垢类型和清洗要求，基于这些分析，设备供应商为ABB定制了干冰清洗设备，包括专门设计的喷嘴和清洗路径规划，这种定制化的解决方案不仅考虑了变压器结构的复杂性，还针对不同类型的污垢设计了不同的清洗策略。^[8]以ABB一台大型变压器的清洗为例，定制化解决方案的实施保证了清洗过程的高效和安全，干冰颗粒的精准注入，有效去除了变压器油箱外的油污和灰尘，避免了对油箱壁的损伤，针对油箱内的油泥和沉积物，定制解决方案采用软性清洗方式，确保油箱的清洗和安全。

（三）智能监控和数据分析优化清洗过程

施耐德电气对其智能工厂中电气原件的清洗提出了更高的智能化要求，在施耐德电气的智能工厂中，移动式干冰智能清洗设备不仅承担了清洗电气原件的任务，还融入了工厂的智能监控系统，实现了清洗过程的智能化管理和优化。随着智能监控系统的引入，清洗过程中的关键参数，如干冰用量、清洗时间、清洗效果等，被实时采集并上传至云端。施耐德电气的数据分析团队利用这些数据不断优化清洗过程，例如，通过分析干冰用量与清洗

效果的关系，团队发现适当的干冰用量可以保证清洗效果，降低成本，基于这一发现，该团队调整了清洗设备，以实现对于冰消耗量的精确控制。^[9]此外，智能监控系统还能及时发现和预警潜在的清洗问题，比如当清洗设备出现故障或者清洗效果不达标时，系统会立即发出预警信号，提醒操作人员及时处理，该功能的实现保证了电气原件的清洗质量始终保持在最高水平，也提高了清洗设备的可靠性和稳定性。

（四）践行环保与可持续发展理念

在电气行业，环保和可持续发展已成为不可逆转的趋势，通用电气作为全球知名的电气设备制造商，积极响应这一趋势，将移动式干冰智能清洗设备作为其绿色清洗战略的重要组成部分。干冰清洗作为一种物理清洗方式，不产生任何有害废弃物，干冰颗粒在清洗过程中直接升华为二氧化碳气体，实现了资源的循环利用，这一特点使得干冰清洗技术在环保方面具有明显的优势。在电气原件清洗过程中，通用电气全面采用干冰清洗技术，不仅显著降低了清洗过程中的碳排放，还减少了化学溶剂的使用和环境污染。^[10]通用电气通过优化清洗工艺和提高清洗效率，进一步降低了清洗过程中的能耗，例如，通过智能监控系统的数据分析，通用电气发现清洗设备的运行效率与能耗之间有着密切的关系，基于这一发现，通用电气对清洗设备进行了优化调整，提高了设备运行效率，降低了能耗。

四、结语

综上所述，移动干冰智能清洗设备在电气原件快速清洗中的应用，不仅实现了从人工低效到智能高效的跨越，还通过定制化的解决方案满足了多样化的需求，通过智能监控和数据分析优化了清洗流程，践行了环保和可持续发展的理念，该技术的广泛应用不仅提高了电气设备的清洁度和运行效率，也为电气行业的绿色发展提供了有力支撑。未来，随着技术的不断进步和创新，移动式干冰智能清洗设备将在清洗电气原件领域发挥更加重要的作用，为电器行业的可持续发展注入新的活力。

参考文献

- [1] 龙斯玮. 浅谈干冰清洗技术的应用 [J]. 科技展望, 2019(30).
- [2] 王鸿晓. 干冰清洗技术与市场现状 [J]. 洗净技术, 2020(03).
- [3] 郑莉; 李梦佳. 干冰清洗机清洗原理及使用注意事项 [J]. 清洗世界, 2018(02).
- [4] 刘溟, 王家礼, 马心良, 喻剑辉, 黄杨珏, 周文俊. 干冰清洗变电站绝缘子试验 [J]. 高电压技术, 2011, 07: 1649-1655.
- [5] 郑俊杰, 邹建明, 姜锋, 喻剑辉, 韩军杰, 何小新, 徐和璋. 220kV变电站绝缘子带电干冰清洗车载系统 [J]. 中国电力, 2014, 04: 118-122.
- [6] 朱正国, 钟建灵. 变电站绝缘子清洗试验数据分析 [J]. 高压电器, 2008, 05: 472-473.
- [7] 王志谦, 汤清正. 干冰清洗技术在余热锅炉中的应用 [J]. 水泥, 2020, (01): 73.
- [8] 苏德, 丁永平. 燃煤锅炉空气预热器堵塞防治技术浅析 [J]. 石化技术, 2019, 26(09): 39-40.
- [9] 季小红, 占刚. 锅炉空气预热器防堵改造可行性研究 [J]. 轻工科技, 2019, 35(09): 41-42.
- [10] 苏春洲, 栾晓雨, 王海军, 袁晓东, 叶亚云. 激光清洗技术的初步研究和应用 [J]. 科技资讯, 2013(26).

烟草行业除尘系统的智能化发展路径探索

王飞

江苏华正环保科技有限公司，江苏 徐州 221000

摘 要： 由于环境保护的日益严格，智能化程度越来越高，对烟草行业除尘的要求也越来越高。常规的烟草行业除尘技术在处理效率、能耗和自动化程度上都有其不足之处。本文论述了烟草行业除尘系统智能化发展的必要性，以及推进烟草行业除尘技术向智能化方向发展的具体途径。将智能传感器、人工智能算法和大数据分析相融合，实现烟草行业除尘的高效、节能和安全。

关 键 词： 烟草行业；除尘系统；智能化发展；人工智能；传感器技术

Exploration of Intelligent Development Path of Tobacco Industry Dust Removal System

Wang Fei

Jiangsu Huazheng Environmental Protection Technology Co., LTD. Xuzhou, Jiangsu 221000

Abstract： Due to the increasingly strict environmental protection, the degree of intelligence is getting higher and higher, the tobacco industry dust removal requirements are also getting higher and higher. Conventional tobacco dust removal technology has its shortcomings in terms of treatment efficiency, energy consumption and automation. This paper discusses the necessity of intelligent development of tobacco dust removal system, and the concrete ways to promote the development of tobacco dust removal technology to intelligent direction. Smart sensors, artificial intelligence algorithms and big data analysis are integrated to achieve efficient, energy-saving and safe dust removal in the tobacco industry.

Keywords： tobacco industry; dust removal system; intelligent development; artificial intelligence; sensor technology

引言

由于烟草行业对环境保护与高效利用的需求，使得常规烟草行业除尘技术受到了很大的挑战。智能除尘技术是提高除尘效率、降低能耗、保证安全生产的一种有效途径，是工业发展的必然方向。通过对粉尘浓度的实时监测、数据分析和控制，实现对设备运行的优化，提高能源利用效率，保证安全生产，达到环境保护的目的。本文探讨烟草行业除尘技术向智能化方向发展，是提高烟草行业除尘技术产业竞争力、实现可持续发展的重要途径。

一、烟草行业除尘系统智能化发展的必要性

近年来，我国烟草行业迅速发展，企业的经营范围越来越广，企业在获得良好的经济效益的同时，也受到了越来越多的环境保护与安全管理方面的挑战。在烟草行业中，烟尘是一个严重的问题。常规的除尘工艺具有很好的除尘效果，但普遍存在着运行不稳定和管理困难等缺点。所以，推进烟草行业除尘技术向智能化方向发展具有十分重大的意义。首先，采用了智能化的除尘器，提高了除尘器的收尘性能，提高了工作的效率。常规的除尘装置主要依靠人工操作、定期清洗，不仅效率低下，而且有漏尘隐患。同时，它还可以对粉尘浓度、风速等相关数据进行在线监

测，从而实现对工作方式和清洗时间的动态调节，保证了各个工序的粉尘有效脱除，满足环境要求^[1]。此外，该智能控制系统还可以对设备的工作状况进行实时的反馈，并对可能出现的问题进行检测，从而缩短了设备的停工周期，提升了企业的经济效益。其次，在节约能源和降低能耗等诸多领域中，采用了一种新型的智能除尘器。常规的吸尘装置能量消耗大，即使含尘量很少，也要连续运行，导致能量消耗巨大。该智能控制系统可以依据工作场所及含尘量的不同，对操作方式进行智能调整，防止能量的消耗、实现节能。在此基础上，通过对生产过程中的相关数据进行统计，实现对生产周期、能源消耗的最优控制，从而达到更好的节能效果^[2]。

作者简介：王飞（1986.02-），男，汉族，江苏省徐州市铜山区人，本科，中级，研究方向：烟草行业除尘系统。

二、智能化除尘系统的核心技术

（一）智能传感器技术

1. 粉尘浓度监测传感器

在智能除尘设备中，粉尘浓度的监测是一个非常重要的问题。该装置可以对大气中的粉尘含量进行实时监测，并以数字方式将测量结果传送给控制器。目前常用的粉尘浓度传感器主要有激光散射式、光电式和电化学式三种。目前，存在一种基于光散射原理的光散射法。该类传感器响应速度快、测量精度高，可对除尘器运行状况进行准确测量，并对其运行状况进行实时反馈，进而对其进行动态调节。

2. 温度和湿度联合检测

将温、湿度和气敏元件有机地组合在一起，使智能除尘设备能够获得更为完整的环保信息^[3]。空气中的温、湿条件直接关系到粉尘的凝聚、沉降和过滤效率。温、湿度传感器可以实现对烟气温度和湿度的在线检测，为烟草行业除尘装置的设计提供依据。另外，还可以对尾气中的二氧化硫、氮氧化物、氨气等有害气体进行检测，为下一步的烟气处理、除尘效果的优化奠定了基础。

3. 数据采集与实时反馈机制

目前，存在一种基于神经网络的智能除尘技术，利用该技术支持对各种不同的环境参数如粉尘浓度、温度、气体浓度等进行实时分析，并通过信息反馈方式向控制器传递。通过对除尘设备运行参数的调整，启动和停止除尘设备的启动和停止，以及风机转速的调整，达到对周围灰尘的精准治理。

（二）大数据与云计算技术

1. 数据的实时采集与分析

通过对各类传感器获取的各类环境信息进行及时地获取和分析，是实现智能除尘的关键。利用先进的数据收集技术，实现了粉尘浓度、温度、瓦斯浓度等多维信息的在线获取^[4]。通过云平台，实现海量实时、高精度的实时计算与分析，实现对复杂工况的精确评价。该方法可以实现对紧急情况的快速响应，有效地防止了由于延迟响应而对周围的环境造成的污染。

2. 智能预警与自适应控制模型

高效除尘设备在线监测方法可以有效地提高除尘设备的可靠性，提高除尘效率。通过对这些历史资料的深入挖掘与分析，能够及时发现诸如粉尘浓度超标、设备失效、工作条件改变等隐患，并给出相应的报警提示。在此基础上，实现了基于外界条件的自动调节，实现了对除尘工艺的优化。该方法可实现粉尘净化装置在复杂变化的情况下仍能维持高效稳定地运行。

3. 云平台的远程监控与管理

基于云计算的智能除尘系统可以对其进行远程监测和控制。在此基础上，实现了对设备运行状况、监控数据和对历史发展趋势的分析。在任何地点，通过互联网的方式，管理者可以实现对整个系统的远程调配与管理。同时，通过云计算的方式，对各个区域的除尘设备进行统一集成，实现跨地域、跨行业的粉尘治理，为区域内的粉尘治理工作提供科学依据。该方法既可有效地

提升企业的运行管理水平，又可方便企业进行远程维修与故障检测^[5]。

1. 基于 AI 的优化控制算法

AI 优化控制方法可以通过在线监控的数据，对除尘器的操作进行动态调整，使除尘器的工作性能达到最大，同时达到节能降耗的目的。在此基础上，提出了一种新的、具有自主知识产权的新型智能交通管理方法。比如，AI 能够随着灰尘的含量的改变，自动调节过滤器的清洗频率、调节风扇转速、优化吸尘孔的开启和关闭，保证整个系统在各种工况下的工作性能。

2. 自适应除尘系统与预测维护

该方法利用人工智能与深度学习相结合的方法，可以根据外界的情况，对除尘方案进行实时优化^[6]。通过对生产过程中产生的烟尘含量、装置失效等因素的综合分析，提出了相应的对策。比如，人工智能模型可以通过对装备的工作状况和失效信息进行分析，对装备的使用时间和维修要求进行预估，从而对装备进行维修计划，防止了突然失效对除尘器的冲击。

三、智能化除尘系统的实施路径

（一）制定智能化发展规划

1. 确定发展目标与技术路线

在烟草行业中，要实现智能化除尘体系，必须制订出智能发展计划。为此，必须确定除尘效率、降低能耗、降低运行费用，实现自动化和智能化的实时监测和管理。我们的目的既要满足环境方面的要求，又要满足工业的发展速度和不断改变的需要。为此，本文拟针对现有除尘设备的实际情况，将现代智能感知技术、大数据处理技术与人工智能技术相融合，逐渐将传统的除尘工艺向智能控制体系转化^[7]。在设计的过程中，应该按照一定的步骤来进行，前期可以通过对已有的装备进行改进来引进基本的智能功能，然后在以后的时间里逐渐形成一个高度整合的智能体系，最后达到完全的自动化和智能化。

2. 评估现有除尘系统的智能化潜力

要想实现智能发展，首先要对目前的除尘体系进行综合评价。这不仅是对现有的除尘系统的硬件级别的检测，更重要的是要从其控制体系、监控手段和维修费用等多个方面来对现有的除尘系统的智能潜能进行剖析。通过对已有装备的评价，确定了装备升级的空间，存在的问题和实现的可能性。目前的除尘设备存在着无法进行在线的数据获取与处理等问题，从而造成了设备利用率低、能耗大等问题。在评价时，还要考虑到产业内部的发展动态以及其它产业的实际运用情况，为企业的智能提升奠定基础。

（二）引入先进技术与设备

1. 选择适合烟草行业的智能传感器

感应技术的引进与应用是实现智能除尘的重要环节。作为智能监控设备的“眼睛”，它可以对车间内的粉尘浓度、气体组成、温度、湿度等参数进行实时监控，并将这些参数反馈给控制器。在烟草行业中，对传感器的选用要充分考虑到其对烟草的适

应能力，如高温、高湿和烟雾等。普通的粉尘浓度传感器、温湿度传感器和瓦斯传感器能够有效地完成对大气环境的监测，但其精度、稳定性和长期工作稳定性都有待提高。所以，在生产过程中，要根据自己的需要和实际情况，选用性能好、维修费用低的产品。

2. 投资云计算与 AI 技术平台

云计算技术可以对大量的数据进行高效的存储、管理和处理，并便于远程监测、共享与分析^[9]。人工智能可以根据大数据进行精确的排灰决策，并对其进行最优的工艺调整，即使出现了不正常的情况，也可以进行相应的调整，对设备运行情况进行自动调节。在此基础上，提出了一种新的思路，即利用人工智能技术和云计算技术，使烟草行业除尘过程中的过程自动控制，从而提高企业的生产效益和环保水平。在此基础上，加大对“云”、“AI”等技术的投入，是实现智能化除尘设备智能化改造的重要环节。

（三）建立智能化管理与服务体系

1. 建立数据驱动的决策系统

实现智能除尘体系的顺利运行，除了依靠硬件设施的更新外，还应构建一套完整的基于数据的智能控制决策体系。该方法的关键是对除尘过程中的实际运行情况进行综合分析，提出最优策略及辅助决策。本文以人工智能为基础，以大数据为基础的智能检测与故障诊断方法。例如，当检测到灰尘含量超出规定的临界值后，会自行调节，保证了收尘效果与安全，并降低了能量的消耗。另外，基于该数据的智能决策体系，还可以基于以往的数据，对除尘政策进行持续地优化，提高了该系统的自动化程度以及对紧急状况的反应能力^[9]。

2. 完善智能化除尘设备的维护与升级

打造智能除尘系统时，必须在硬件及软件技术上进行创新，并且要打造出一套全面的保养和更新机制。设备的持久稳定工作有赖于常规的检查与保养。智能除尘系统拥有自我诊断与修复功能，可以即时监督设备的工作状况，预判潜在故障，减少了对人工的依赖，从而提升了设备的工作效率。因此，在烟草企业的系统部署过程中，应同步推进设备保养和更新的体系建设，利用智

能化方法降低系统故障率，减少保养费用，延长设备使用期限，同时为将来的技术提升预留充足的发展空间。

（四）进行持续的技术创新与优化

1. 引导科研机构与企业合作

构建智能化除尘系统，其进步与完善依赖于强有力的技术背景和不断的创新驱动。在此环节中，高等院校与研究实体与产业界的联合作用不可或缺。公司方面应当积极倡导与科研单位的交流协作，依托科技进步促进技术革新。研究单位不仅能向公司输送前沿技术成果，还能依据烟草行业的特定需求，设计出针对性技术对策。

2. 推动智能除尘技术的标准化发展

为保证烟草行业智能化除尘系统的普及与应用，促进相关技术规范建设具有十分重要的意义。标准化既保证了技术的连贯性与可靠性，又减少了执行时的不确定因素。智能除尘系统技术标准的制订，促进产业装备与工艺的统一，是整个产业向智能化方向发展的必由之路。通过规范的技术规范，实现了各种智能装备在各个工厂之间的兼容，增强了系统的互用性和维护性。同时，它也可以促进技术的推广和应用，降低产业门槛，推动智能技术的推广^[10]。

四、结论

在烟草行业中实现智能除尘是实现绿色环保、可持续发展的一项重大措施。在烟草行业中，通过明确的发展计划、合理的工艺路线与装备、构建智能管理系统，可以使除尘系统的工作效率得到有效的提升，减少能耗，达到绿色生产的目的。智能技术的引进，不但有助于工业应对越来越严苛的环境保护规定，而且还能给企业带来更大的经济与社会价值。但在实际应用中，如何实现智能除尘系统，仍然面临着技术整合、数据安全和成本控制等方面的问题。要解决上述问题，就必须加强与国内外科研院所的协作，促进烟草产业的科技创新与标准化建设。随着科技水平的提高，智能化除尘系统将成为烟草行业发展的一个新方向，为我国烟草行业的绿色转型与可持续发展奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 张伟; 刘强; 刘芳. 烟草行业环保技术发展现状与挑战 [J]. 环境保护, 2022(6): 18-21.
- [2] 王晓鹏; 周晨; 王丽. 智能化除尘技术在工业生产中的应用研究 [J]. 环境工程技术, 2023(8): 50-53.
- [3] 陈红; 基于大数据的工业除尘系统优化与智能化发展 [J]. 机械设计与制造, 2023(4): 44-47.
- [4] 李伟; 张玲. 烟草行业节能减排技术发展趋势 [J]. 节能与环保, 2023(12): 56-59.
- [5] 刘欣; 工业除尘系统的智能化控制技术研究 [J]. 工业自动化, 2021(7): 12-15.
- [6] 王敏; 李秋红. 基于物联网技术的智能化烟草行业除尘系统研究 [J]. 现代制造工程, 2022(5): 30-34.
- [7] 张婷. 智能除尘设备在烟草行业中的应用与前景 [J]. 工程技术与应用, 2023(1): 19-22.
- [8] 李强. 智能化控制在工业除尘系统中的应用研究 [J]. 自动化技术与应用, 2021(9): 40-44.
- [9] 赵明; 吴玲. 烟草生产过程中的粉尘污染控制技术研究 [J]. 工业环保, 2022(3): 35-39.
- [10] 刘浩; 王阳. 基于物联网的智能除尘系统优化设计 [J]. 机械工程与自动化, 2021(12): 25-28.

航空器维修生产的生命周期管理与成本控制

程相静

河南飞机维修工程技术有限公司, 河南 郑州 451400

摘 要： 随着全球航空业的蓬勃发展，航空器的安全高效运营成为核心关注点。航空器维修生产在保障飞行安全和维持航空器适航性方面起着关键作用，在航空器漫长的服役过程中，从引入新机的初始时刻到日常繁忙的使用阶段再到面临老化挑战的后期，维修生产贯穿始终。与此同时成本控制也至关重要，维修成本涉及人力、备件、设备等多方面，其合理与否直接影响航空公司的经济效益与市场竞争力。如何在整个维修生产生命周期内实现科学管理和有效成本控制，成为航空业发展中亟待深入研究和解决的重要课题。

关 键 词： 航空器维修；生命周期管理；成本控制

Life-Cycle Management and Cost Control of Aircraft Maintenance and Production

Cheng Xiangjing

Henan Aircraft Maintenance Engineering Technology Co., LTD. Zhengzhou, Henan 451400

Abstract： With the booming development of the global aviation industry, the safe and efficient operation of aircraft has become the core focus. Aircraft maintenance production plays a key role in ensuring flight safety and maintaining aircraft airworthiness. In the long service process of aircraft, maintenance production runs through from the initial moment of the introduction of new aircraft to the daily busy use stage to the later stage of aging challenges. At the same time, cost control is also very important. The maintenance cost involves manpower, spare parts, equipment and other aspects, and its rationality or not directly affects the economic benefits and market competitiveness of airlines. How to realize scientific management and effective cost control in the whole life cycle of maintenance and production has become an important topic that needs to be deeply studied and solved in the development of aviation industry.

Keywords： aircraft maintenance; lifecycle management; cost control

引言

随着航空业的快速发展，航空器数量不断增加，航空器维修生产的重要性日益凸显。一方面合理的使用寿命管理能够确保航空器在各个阶段保持良好的适航状态，保障飞行安全；另一方面有效的成本控制对于航空公司的盈利能力和市场竞争力有着关键作用^[1]。然而航空器维修生产是一个复杂的系统工程，涉及到众多环节和因素，如何在整个生命周期内实现科学管理并控制成本是航空业面临的重要课题。

一、航空器维修生产生命周期管理

（一）初始阶段（引入新航空器）

在引入新航空器这一关键的初始阶段，全面且深入的评估工作至关重要。对航空器的型号选择需综合考虑航线特点、预期客流量等因素，其性能评估涵盖飞行性能、燃油效率、客舱舒适度等多方面，严格审查其适航性更是保障安全飞行的前提^[2]。与航空器制造商保持密切且高效的沟通能够争取获取最详尽的技术资

料和具有针对性的维护建议，同时精心建立航空器的初始档案，此档案作为后续维修的根基，不仅包括设计图纸、技术参数、零部件清单等基础数据，更要将航空器的特殊设计与制造细节囊括其中。例如北京首都国际机场在引入新型客机时，会综合考量其主要运营的国内国际长途航线特点，以及庞大的客流量需求，对多种型号客机进行详细评估对比后选定合适机型。在与制造商沟通后，建立起了完善的初始档案，为后续维修工作奠定了坚实基础。

作者简介：程相静（1994.04—），女，汉族，河南濮阳人，硕士研究生，研究方向：航空器维修、航空器维修运行控制管理、航空器维修安全管理。

除此之外还要依据航空器预期的使用强度、飞行时长和航线环境,谨慎制定初步的维修计划和维护规程^[3]。维修计划需明确不同阶段的维修重点,如首飞后的检查周期和项目,维护规程则要详细规定每个检查环节的操作标准和流程。同时要确定合理的维修周期和关键检查点,这些要点是基于航空器的关键系统和易损部位设定,例如发动机的首次深度检查时间、起落架的日常检查要点等。而且针对新机型对维修人员开展全面培训,培训内容不仅包括新机型的结构特点和维修技术还要涵盖新的维修理念和安全注意事项,以确保维修人员熟练掌握相应技能和知识,为新航空器的维护工作做好充足准备^[4]。

(二) 使用阶段(日常运营与维修)

在使用阶段这个航空器维修生产的核心环节中日常运营与维修工作需要高度的规范性和精确性。在日常运营过程中严格按照维护规程执行定时检查和维护是确保航空器安全飞行的关键,航线检查作为最频繁的检查环节要在每次飞行前后对航空器外观、起落架、轮胎等进行细致检查,确保飞行准备就绪和飞行后的安全状况。A 检、C 检等不同级别的检查则更具深度和广度,A 检注重对航空器内部系统的一般性检查,如空调系统、液压系统的运行状况;C 检则涉及对航空器结构和关键系统的详细检测,如机翼结构完整性、发动机内部部件磨损情况等^[5]。

与此同时利用先进的检测技术和设备也是发现潜在故障隐患的重要手段。无损检测技术能够在不破坏航空器结构的前提下检测出内部的裂纹、腐蚀等问题;借助高精度的传感器可以实时监测发动机的各项参数,提前预警可能出现的故障^[6]。而对于出现的故障,维修团队要迅速响应并凭借丰富的经验和专业的诊断设备进行准确诊断,在修复过程中还要严格遵循维修手册的标准来确保更换的零部件质量合格、安装正确。另外完善的维修记录系统是保障维修质量的重要环节,详细记录每次维修的内容、更换的零部件、维修人员等信息,这些记录不仅为后续维修提供参考也有助于分析航空器的健康状况和故障趋势。此外依据航空器的实际使用情况,如飞行小时数增加、航线变化以及技术发展带来的新检测方法和维修工艺,适时对维修计划和维护规程进行优化调整,使维修工作更具针对性和高效性^[7]。例如上海浦东国际机场,其航班流量大,各类航空器使用频繁。在日常运营中,严格执行维修检查流程,通过先进的检测技术对航空器进行全面监测。在发现一架客机的液压系统存在潜在故障隐患时,维修团队利用高精度传感器快速定位问题,凭借专业经验和诊断设备迅速修复,同时详细记录维修信息,为后续同类情况提供了宝贵参考,并且根据机场航线的拓展和技术更新,及时优化了维修计划和维护规程。

(三) 老化阶段(航空器使用寿命后期)

当航空器步入使用寿命后期的老化阶段,维修管理工作面临更为严峻的挑战。在此阶段由于长期的飞行和复杂的环境因素影响,航空器结构和系统的老化问题愈发凸显,对关键部位的监控和检测频率必须加强^[8]。例如机翼作为承受飞行载荷的关键结构要增加探伤检查的次数,使用更先进的探伤设备,精确检测金属疲劳和微小裂纹的发展情况;起落架在频繁的起降过程中承受巨

大冲击,需要更频繁地检查其液压系统、减震部件的性能,确保起落安全。而发动机作为航空器的核心,其内部高温部件的磨损、叶片的老化等情况需要通过更精密的监测手段进行密切关注,如采用内窥镜检查燃烧室内部状况、利用振动分析技术评估转子部件的健康程度。

针对老化严重的零部件,提前制定科学合理的更换计划是保障飞行安全的关键措施。对于那些达到设计寿命或出现明显老化迹象的部件,如老化的密封件、磨损的传动部件等,要依据其对飞行安全的影响程度和剩余寿命预测来安排有序的更换时间表。同时综合评估航空器的剩余价值和维修成本成为这一阶段决策的重要依据,要考虑航空器的剩余飞行小时数、市场价值、维修所需的成本投入,包括零部件更换、结构修复等费用,权衡是对航空器进行延寿改造以延长其服役期限还是选择退役处理。在这个过程中维修工作的难度和成本都会显著增加,需要更加精细的管理策略和谨慎的决策过程,以确保在保障飞行安全的前提下实现经济效益的最大化。

二、航空器维修生产成本控制

(一) 维修人力成本控制

(1) 人员资质与效率提升

维修人员的资质与技能水平直接影响维修工作的质量和效率,应制定全面且系统的培训方案,如开展针对新型航空器复杂系统维修技能的培训课程,邀请制造商专家授课。还要鼓励维修人员参加外部专业培训与认证考试并给予一定的经费支持,并在此基础上设立技能竞赛等激励机制来激发员工提升自我。同时引入智能化维修辅助工具,如智能故障诊断系统来减少维修人员诊断时间。还可以通过线上培训平台,提供便捷的学习途径,使维修人员能及时更新知识,提升效率^[9]。

(2) 人力安排优化

合理的人力安排对于维修成本控制至关重要。根据航空器维修计划的优先级和紧急程度分配人员,如将经验丰富的高级维修师优先安排到关键且紧急的维修任务中。同时利用数据分析预测维修任务量的波峰波谷,在低谷期安排人员进行培训或设备维护等工作。另外还要建立跨部门人力调配应急机制,当出现大面积航班延误导致维修任务剧增时能迅速从行政、后勤等部门调配有一定维修基础的人员协助。

(二) 维修备件成本控制

(1) 备件库存管理

科学的备件库存管理是成本控制的关键环节。运用大数据分析航空器历史维修数据,精确计算不同备件的需求概率以此确定安全库存水平。对于高价值、低故障率的关键备件可以采用“零库存”与供应商快速响应的联合模式,减少库存积压资金。同时实施动态库存盘点制度,利用物联网技术实时监控备件的存储环境和状态,并且建立库存老化预警机制,对于长时间未使用的备件及时进行评估可考虑与其他企业进行交流或合理处置以便能够避免浪费。

（2）备件采购优化

优化备件采购策略可显著降低成本，与多家供应商建立战略合作联盟，定期进行联合采购谈判，争取更优惠的价格和付款条件。在采购过程中深入评估供应商的质量管控体系，确保所采购备件质量可靠，同时可以设立专门的备件采购市场调研小组，密切关注全球备件价格波动和新技术发展趋势，如新型复合材料零部件价格走势。对于用量大的标准备件，采用全球招标采购方式，选择性价比最优的供应商。在此基础上对于采购的每一批备件进行严格的质量抽检，保证质量符合要求。

（3）备件维修与翻新

备件维修与翻新是降低成本的有效途径。在企业内部建立专业的备件维修中心，配备先进的检测和修复设备，如高精度的零部件探伤仪和自动化的修复机床。同时培养专业的备件维修工程师团队，掌握多种修复技术，如针对航空发动机叶片的表面涂层修复技术。另外对于翻新后的备件应按照与新备件相同的质量标准进行严格检测和认证；在此基础上与外部专业的备件翻新企业合作，对于复杂且企业内部维修难度大的备件进行外包维修并监督其维修质量和成本。

（三）维修设备成本控制

（1）设备选型与租赁

维修设备的选型与租赁决策影响成本控制效果。在选型时依据航空器维修的具体技术要求和业务量预测，对不同品牌和型号的设备进行详细的技术性能对比分析，例如对于飞机起落架维修设备要考虑其对不同型号起落架的兼容性和维修精度。对于使用频率较低但又必需的大型设备，如大型航空发动机测试台可通过租赁的方式获取，并且与多家租赁商洽谈来争取灵活的租赁条款，包括租赁时长、设备维护责任等。同时对租赁设备进行严格的入场验收，确保其性能符合维修要求。

（2）设备维护与更新

良好的设备维护与适时更新是保障维修工作顺利进行和控制成本的必要措施，所以要制定详细的设备维护计划，包括日常清洁、定期校准和深度保养等内容。同时对于关键维修设备，如飞行控制系统检测设备要采用预防性维护策略，根据设备运行数据提前预测可能出现的故障并进行维护。另外要建设备更新评估体系，综合考虑设备的维修成本、技术性能提升和新航空器维修需求等因素，当新的无损检测技术设备出现且成本效益合理时及时更新老旧设备，提高维修效率和质量^[10]。

（3）设备共享与合作

设备共享与合作能有效降低维修设备成本。与周边航空公司或维修企业建设备共享网络，通过共享平台共享大型、昂贵的维修设备，如大型飞机结构探伤设备。同时制定明确的设备共享规则，包括使用预约机制、费用分摊标准等来确保共享过程公平有序。另外共同投资建设一些高成本、低使用频率的特种维修设备，如航空复合材料修复设备，降低单个企业的设备购置成本和资金压力。

三、结语

航空器维修生产的生命周期管理和成本控制是相互关联、相互影响的整体。在实际运营中航航空公司和维修企业需要从航空器的全生命周期角度出发，统筹规划维修生产活动，通过科学的管理手段和有效的成本控制策略，在确保航空器安全可靠运行的前提下降低维修成本并且提高经济效益和市场竞争能力。同时随着航空技术的不断发展和市场环境的变化，还需要持续对维修生产的管理和成本控制方法进行改进和创新以适应新的挑战和要求。

参考文献

- [1] 吴剑. 飞机维修工程管理系统优化与成本控制 [D]. 大连理工大学, 2001.
- [2] 周岸勋. 飞机维修系统生产计划控制的设计研究 [D]. 厦门大学, 2008.
- [3] 张清平. 浅谈航空维修生产中的人为因素管理 [J]. 价值工程, 2011, 30(18): 35. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2011.18.036.
- [4] 吴月伟, 刘燕, 冯建朝, 等. 国内民航机务维修培训体系的现状与发展 [J]. 航空维修与工程, 2014, (01): 21-24.
- [5] 张建新. 航空器维修企业质量管理模式探讨 [J]. 航空标准化与质量, 2014, (01): 30-32+48.
- [6] 何旭婧. 民航维修消耗类工具采购与库存技术应用研究 [D]. 上海交通大学, 2016.
- [7] 张璐, 刘武发. 现代航空维修思想及其应用 [J]. 机械制造, 2017, 55(08): 84-87.
- [8] 王清薇. 通用航空器运行可靠性分析研究 [D]. 南京航空航天大学, 2022.
- [9] 冯天杰. 通航维修管理平台开发 [D]. 中国民用航空飞行学院, 2021. DOI: 10.27722/d.cnki.gzgmh.2021.000023.
- [10] 蒋刚毅. 通用航空维修分类管理研究 [D]. 中国民用航空飞行学院, 2020. DOI: 10.27722/d.cnki.gzgmh.2020.000094.

车身轻量化设计中高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳性能分析

洪吉发, 李亚蕾

江铃汽车股份有限公司, 江西 南昌 330000

摘 要： 本文研究了在轻量化车辆车身设计中使用高强度钢和铝合金的混合连接结构的疲劳性能。通过综合文献回顾和实验测试，我们分析了这种混合材料连接的优势和挑战，并探讨了其长期疲劳性能。研究应用了多种研究方法，包括材料疲劳试验和有限元分析，确定了影响疲劳性能的关键因素。实验结果表明，妥善的连接设计和表面处理能够显著提升结构的疲劳寿命。此外，本文提出了一些改善建议，如优化连接几何形状和采用先进的连接工艺，以进一步提高结构的耐久性。研究结果不仅为混合材料连接的设计提供了新的思路，也有助于推动轻量化车辆的未来发展。

关 键 词： 高强度钢；铝合金；轻量化车辆；混合连接结构；疲劳性能；有限元分析；耐久性

Fatigue Performance Analysis of Mixed Joint Structure of High Strength Steel and Aluminum Alloy in Lightweight Design of Car Body

Hong Jifa, Li Yalei

Jiangling Automobile Co., Ltd. Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract： This paper investigates the fatigue performance of hybrid connection structures using high-strength steel and aluminum alloy in lightweight vehicle body design. Through an extensive literature review and experimental tests, we evaluate the advantages and challenges of these hybrid material connections and explore their long-term fatigue performance. Various research methods, including material fatigue tests and finite element analysis, were employed to identify key factors affecting fatigue performance. The experimental results indicate that adequate connection design and surface treatments can significantly enhance the fatigue life of the structure. Moreover, the paper proposes improvement suggestions, such as optimizing connection geometry and adopting advanced joining techniques to further improve structural durability. The findings not only provide new insights into hybrid material connection design but also facilitate the future development of lightweight vehicles.

Keywords： high-strength steel; aluminum alloy; lightweight vehicles; hybrid connection structure; fatigue performance; finite element analysis; durability

引言

在当今汽车工业中，车身轻量化设计已经成为提高燃油效率、降低排放和提升车辆性能的关键策略之一。随着全球对环保和能源效率要求的不断提高，汽车制造商正在积极寻求各种轻量化材料和技术，以满足日益严格的排放标准和消费者对于高性能汽车的需求。在这些材料中，高强度钢和铝合金因其各自的优点，成为轻量化车身设计中最具潜力的选择。

高强度钢因其优异的强度和韧性，在车身结构的关键部位得到了广泛的应用。它不仅能够承受高负荷，而且在碰撞安全方面表现出色。然而，钢材的高密度限制了其在整体车身轻量化方面的应用潜力。

一、文献综述

轻量化设计是提高汽车性能、降低燃油消耗和减少排放的重要途径之一。在近年的研究与应用中，车身轻量化设计的趋势愈发明显，成为汽车制造业关注的核心问题之一。为了实现轻量

化，材料的选择与结构设计成了突破的关键。

（一）车身轻量化设计现状

传统的汽车车身主要采用普通钢材作为制造材料，这种材料具有良好的成本效益和机械性能。然而，为了应对日益严格的环保要求，仅继续使用传统钢材难以实现显著的轻量化效果。因

作者简介：洪吉发（1987.09-），男，汉族，江西省南昌市人，大学本科，中级，研究方向：汽车设计、汽车产品研发或者汽车零部件等，身份证号：150429198709132910，邮箱：943283299@qq.com。

此,越来越多的制造商开始考虑高强度钢和铝合金等轻量化材料的混合使用。

高强度钢具有优异的强度和韧性,是提升车身结构安全性的理想选择。其抗拉强度通常可以达到600 MPa以上,甚至超过1000 MPa,足以抵御复杂负荷的作用。相比之下,铝合金的密度仅为钢的三分之一左右,虽然其强度较低,但在满足结构刚度要求的同时,显著减轻了车身重量。因此,高强度钢与铝合金的混合使用构成了现代汽车轻量化设计的前沿领域。

（二）高强度钢和铝合金的力学性能

高强度钢的高强度来源于其合金成分的优化和现代热处理工艺的应用,这些工艺包括相变强化、淬火和高温回火等。材料的微观结构能显著影响其疲劳性能,通常需考虑疲劳裂纹的萌生与扩展行为。

铝合金则凭借其具有显著的轻量特性和良好的加工性能,广泛应用于中低负荷的结构件中。其合金元素(如镁、硅、铜等)不仅提升了材料的强度和耐腐蚀性,还对其疲劳性能起到了至关重要的影响。

（三）混合连接技术在汽车结构中的应用和挑战

混合连接技术主要包括焊接、铆接、粘接以及机械连接等多种形式。其中,焊接技术最为常见,但由于钢和铝之间的化学和物理性质差异,容易产生金属间化合物,导致接头性能下降。铆接和机械连接工艺较好地避免了焊接所产生的热效应问题,但其连接强度和耐久性依然需要进一步研究和优化。粘接技术作为一种新型连接方法,则在提升结构整体性和消减应力集中方面表现出了良好潜力。

（四）疲劳性能的影响因素

对于混合材料连接结构,疲劳性能的影响因素包括应力集中、腐蚀影响和材料缺陷等。异质材料接头处往往存在较大应力集中,这对于疲劳裂纹的萌生和扩展过程至关重要。此外,环境因素如腐蚀介质的存在,也会加速材料接头的疲劳失效。接头处材料的缺陷,如孔隙、夹杂物等,可能成为疲劳裂纹的源头。因此,在材料选择和工艺控制的过程中,如何有效减少这些不利因素的影响,是提高混合连接结构疲劳性能的关键。

通过以上综述,可以看出高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳性能是一个复杂的多因素问题,涉及材料科学、力学设计和工艺技术等多个领域。随着研究的深入,如何优化混合材料的连接工艺,以进一步提升车身轻量化设计的效果,仍是当前和未来一段时期的重要研究课题^[1]。

二、研究方法

在本研究中,我们探讨了高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳性能,采用了一系列严谨的实验和仿真方法。以下是具体研究过程中所采用的方法与步骤。

（一）材料选择

在本研究中,选用了一种高强度钢(例如,HSLA钢)和一种6061铝合金。这两种材料不仅具有出色的力学性能,而且能够

满足轻量化车身设计对材料性能的高要求。高强度钢具有高抗拉强度和良好的疲劳抗性,而铝合金则以其轻质和耐腐蚀性能而著称。我们对所选材料进行了拉伸试验和金相分析,以准确获取其机械性能和微观结构特征,为后续的连接工艺和疲劳性能研究奠定基础。

（二）连接工艺选择

在本研究中,采用电阻点焊作为高强度钢与铝合金的连接工艺。选择这种技术的原因在于其广泛应用于汽车工业中的异种材料连接,并且具备良好的经济性和快速性。关键工艺参数如焊接电流、焊接时间和电极压力通过初步实验进行优化,以确保接头的机械性能和疲劳寿命。

（三）试验设计

为了评估混合连接结构的疲劳性能,我们设计并实施了一系列疲劳试验。试验在一台经过校准的液压伺服疲劳试验机上进行,疲劳加载遵循ASTM标准,施加的应力比为0.1,频率为10 Hz。试件样品按照实际车身结构的几何参数制备,包括焊点间距、层厚比等关键参数,确保试验的现实性和代表性^[2]。

三、实验结果

（一）高强钢与铝合金混合连接的疲劳寿命

在研究中,我们对多种高强钢与铝合金混合连接结构进行了疲劳寿命测试。通过反复拉压循环测试,我们测得在特定加载条件下,混合连接结构的疲劳寿命表现出显著差异。其中,采用机械连接的结构,其疲劳寿命普遍较短,而使用激光熔焊和摩擦搅拌焊接的结构则表现出较长的疲劳寿命。实验数据显示,摩擦搅拌焊接的疲劳寿命提升幅度最高,达到了约30%,这是由于其联合界面强度的显著增加^[3]。

（二）疲劳裂纹的萌生与扩展规律

在对疲劳裂纹的萌生与扩展进行观察时发现,不同的连接工艺对裂纹的起始位置和扩展路径产生了不同影响。对于激光熔焊,裂纹多从焊缝边缘开始,并向母材延伸,而摩擦搅拌焊则显示出较为分散的裂纹萌生点,同时裂纹扩展较缓慢。利用扫描电子显微镜和应力场图像分析,明确了裂纹倾向于在应力集中区内出现,且扩展路径受到材料界面结合力的影响。混合连接中,铝合金一侧由于较低的屈服强度和较高的延展性,裂纹延伸速度较快,成为疲劳寿命的主要限制因素^[4]。

（三）连接工艺对疲劳性能的影响

实验结果显示,连接工艺显著影响混合连接结构的疲劳性能。机械连接仅通过物理紧固,其疲劳性能较差。激光熔焊由于其作业过程中会产生热影响区,容易形成微裂纹,而摩擦搅拌焊由于其固态结合特性,能有效避免热影响区的晶粒粗化,经测试,该工艺显著提高了连接界面的疲劳性能。具体而言,连接工艺参数如焊接速度、搅拌头转速等对疲劳寿命有重要影响。通过调节摩擦搅拌焊接的参数,疲劳寿命最高提高了35%^[5]。

综合上述实验结果,我们可以得出结论,选择合适的连接工艺和优化连接参数是提升混合结构疲劳性能的关键。这为进一步

的疲劳性能优化和轻量化车身设计提供了有力的数据支持和方向指导。

四、分析与讨论

在本研究中，我们对高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳性能进行了深入分析，重点考察了材料异质性与连接技术对疲劳性能的影响，以及实验结果与理论模型之间的一致性^[6]。

（一）材料异质性与疲劳性能的影响

高强度钢与6061铝合金在机械性能、热膨胀系数、以及表面特性等方面存在显著差异，这种材料异质性对混合连接结构的疲劳性能产生了深远影响。实验表明，材料之间的界面是疲劳裂纹萌生的敏感区域，这是由于异种材料之间的界面区域可能存在应力集中与界面结合不够理想的问题。高强度钢的高屈服强度使得在连接过程中，该材料承受更大的负荷，而铝合金则因其较低的强度和较高的延展性在动态负荷作用下表现出不同的变形行为，这种不均衡会加速界面的疲劳裂纹产生和扩展。

（二）连接技术对混合结构疲劳性能的影响

连接技术的选择显著影响了混合结构的疲劳性能。在本研究中，我们关注了电阻点焊方法，并进一步探讨了这一方法在异种材料连接中的适用性。结果显示，由于电阻点焊的连接点温度较高，铝合金一侧的热影响区（HAZ）硬度降低，从而导致疲劳裂纹更容易在铝合金一侧萌生。此外，其他连接技术如搅拌摩擦焊（FSW）通过更均匀的材料结合和更少热输入提供了某些优势，实验也体现出这种方法在减小应力集中和提高疲劳寿命方面的潜力^[7]。

（三）实验结果与理论模型的比较

在分析实验结果与理论预测模型的一致性时，我们观察到，尽管理论模型能够大致预测高强度钢与铝合金混合连接结构的疲劳寿命，但在一些具体情况下存在偏差。模拟分析中的假设条件，如材料的均匀性及接触界面的理想化处理，可能导致预测的疲劳裂纹扩展路径与实际不符。实验结果揭示了裂纹萌生和扩展多数始于铝合金的焊接区，并逐渐向外围蔓延，这与疲劳模拟中预测的疲劳裂纹路径相符，但在实际实验中，裂纹扩展速率和路径因界面结合质量和局部微观结构变化而略有不同。

总的来说，实验结果与模拟分析基本一致，但强调了在处理异种材料连接结构时，需深入考量材料界面的微观异质性及实际使用中的复杂工况。这为后续的理论模型改进提供了重要依据，

参考文献

- [1] 郭清超, 索兆祥. 混动汽车车身轻量化设计研究 [J]. 汽车测试报告, 2023(9).
- [2] 汪涛. 车身轻量化设计分析 [J]. 时代汽车, 2019(18).
- [3] 刘吉; 傅林; 赵云; 刘硕; 汤萌. 基于柱碰和侧碰的某电动车车身轻量化设计 [J]. 中国汽车, 2020(11).
- [4] 陈虹. 汽车车身轻量化研究和创新应用 [J]. 上海汽车, 2018(09).
- [5] 骆建丽; 陈晓锋; 李程; 李建华; 高增辉. 汽车车身轻量化管理要点与思考 [J]. 汽车实用技术, 2017(19).
- [6] 李占营; 董彦龙; 宗辉. 汽车车身轻量化评价方法研究 [J]. 汽车测试报告, 2023(23).
- [7] 孔祥帅; 刘多加; 李灿; 张胜利; 陈海琴. 基于白车身轻量化系数提升的优化设计方法 [J]. 中国汽车, 2024(06).
- [8] 谢朝辉. 轿车车身轻量化及其对连接技术的挑战 [J]. 南方农机, 2021(02).
- [9] 周槿枫; 孔娇龙; 耿娟. 应用热成型技术实现白车身轻量化实践案例 [J]. 时代汽车, 2021(15).
- [10] 张亚坤; 尚国强; 王光辉. 复合结构材料与塑料在汽车车身轻量化设计中的应用 [J]. 科学技术创新, 2019(35).

尤其是在多材料集成的车体设计中，为连接技术的选择和优化提供了科学指导^[8]。

五、改进建议

在对高强度钢与铝合金混合连接结构疲劳性能的分析后，我们针对实验结果和分析讨论中发现的问题，提出以下几点改进建议，以提高这种轻量化车身设计的整体性能。

（一）材料选择和处理

首先，可以考虑选择更优化的铝合金材料，如添加微量合金元素或采用特殊处理方式来提高其表面硬度和耐疲劳性能。这些改良有助于减少由于材料异构性带来的疲劳弱点，从而延长接头的疲劳寿命。此外，对高强度钢进行适当的热处理也可能提升其抗疲劳裂纹扩展的能力^[9]。

（二）连接方法优化

针对实验中选择的两种连接方法，点焊和搅拌摩擦焊，应结合具体使用场景和结构要求选择最优连接方式。搅拌摩擦焊适用于厚壁材料的连接，同时减少接头的残余应力和变形。而对于薄板材料，改进点焊设备以实现更精确的焊接控制也许更为必要。此外，考虑使用混合搭接或多种焊接工艺的组合，以实现更优的疲劳性能表现。

（三）结构设计调整

优化结构设计也是提高疲劳性能的关键方法之一。可以通过改进接头的几何形状来减少应力集中区域，从而抑制裂纹的萌生和扩展。此外，采用数值模拟和实验方法相结合的方式，可以在设计阶段预先识别潜在的疲劳热点，进行针对性结构优化^[10]。

六、结语

在本文中，我们全面研究了高强度钢与铝合金混合连接结构在轻量化车身设计中对疲劳性能的影响。这项研究对于提升车辆安全性与耐久性，同时实现节能减排目标具有重要意义。

总体而言，通过针对混合连接结构的疲劳性能分析及改进策略，本文为下一代轻量化车身设计提供了科学支持，能够显著提升车辆的整体性能和使用寿命，同时助力绿色环保的汽车工业发展。未来的研究可以进一步探索多材料复合结构中连接技术的创新，以及智能监测技术在疲劳损伤早期预警中的应用。

激光熔覆 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 复合涂层组织形貌及耐蚀性能研究

赵珊, 兰元阔, 郭文敏, 于淞百, 李梦奇

邵阳学院 机械与能源工程学院, 湖南 邵阳 422000

摘 要 : 针对海洋工程装备因长期腐蚀致使其关键零部件表面受损严重的问题, 本研究基于激光熔覆技术, 探究了激光功率和离焦高度对激光熔覆 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 复合涂层微观组织与腐蚀行为的影响规律。结果表明, 激光熔覆涂层呈现出典型的树枝晶结构, 主要由 FCC 结构的 (Co, Cr, Fe, Ni) 相、共晶碳化物相及相组成, 分别对应了涂层截面微观组织中的枝晶组织、枝晶间组织和析出相。研究获得了最优激光熔覆制备工艺参数: 激光功率为 1000 W, 离焦高度为 3 mm, 扫描速度为 10 mm/min, 送粉率为 15 g/min, 气流量为 15 L/min, 搭接率为 50 %。在最佳工艺下制备的涂层致密均匀。电化学分析结果表明, 涂层的耐腐蚀性能优异, 主要归因于涂层表面的钝化膜具有高稳定性、高阻抗、对溶液中阴离子的敏感程度越低以及腐蚀反应速率低等综合优势。

关 键 词 : 涂层; 激光熔覆; 微观形貌; 腐蚀

Research on the Microstructure and Corrosion Resistance of Laser Cladding $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ Composite Coatings

Zhao Shan, Lan Yuankuo, Guo Wenmin, Yu Songbai, Li Mengqi

Mechanical and Energy Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000

Abstract : Marine engineering equipment has been subject to long-term corrosion, resulting in serious surface damage to its key components. To address this problem, this study explored the effects of laser power and height from the laser focus on the microstructure and corrosion behavior of laser cladding $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ coatings based on laser cladding technology. The results show that the laser cladding coatings present a typical dendritic structure, which is mainly composed of (Co, Cr, Fe, Ni) FCC structure phase, eutectic carbide phase and phase. The three phase structures correspond to the dendrite structure, interdendritic structure and precipitation phase in the cross-sectional microstructure of the coatings. The study obtained the optimal laser cladding preparation process parameters: laser power of 1000 W, height from laser focus of 3 mm, scanning speed of 10 mm/min, powder feeding rate of 15 g/min, gas flow rate of 15 L/min, and overlap rate of 50%. The coating prepared under the optimal process is dense and uniform. The electrochemical analysis results show that the coating has excellent corrosion resistance, which is mainly attributed to the comprehensive advantages of the passivation film on the coating surface, such as high stability, high impedance, low sensitivity to anions in the solution, and low corrosion reaction rate.

Keywords : coating; laser cladding; microstructure; corrosion

钻井平台、风电平台、水下采矿机器人等海洋工程装备长期处于腐蚀磨损共存的复杂工况, 致使其关键零部件表面受损严重, 甚至会导致灾难性故障^[1-2]。开发新型的涂层防护材料与技术是解决极端环境下材料腐蚀磨损耦合失效的有效方法之一。其中, 高熵合金 (HEA) 具有高硬度、优异的耐磨和耐蚀性能^[3-6], 是海洋工程装备有前景的防护涂层材料之一。

激光熔覆技术因热源集中可控, 涂层稀释率低且热影响区小, 基体与涂层间良好的冶金结合等优势, 在功能性涂层领域得到广泛应用^[7]。Zhuang 等^[8]报道了激光熔覆技术在风电叶片表面改性中的应用, 有效提高了叶片的耐蚀性和耐磨损性, 为风电设备的长期稳定运行提供了技术保障。Liu 等人^[9]报道了激光熔覆 CoCrNi 涂层在酸性雨水中的腐蚀电流密度比 304 不锈钢低 2 个数量级。激光熔覆工艺参数的优化对涂层性能至关重要。Zhu 等^[7]在综述中强调, 激光熔覆技术能够通过调整激光功率、扫描速度和送粉率, 可以减少激光熔覆过程中可能产生的缺陷, 如孔隙和裂纹等, 进而提高涂层的致密性和结合强度, 最终改善涂层的耐腐蚀性能和耐磨性。Shang 等人^[10]采用不同激光功率制备了 $\text{Fe}_{44}\text{Cr}_{30}\text{Mo}_{20}\text{B}_3\text{C}_3$ 非晶纳米晶涂层。研究发现, 较低的激光功率会导致非晶相和 Cr_{23}C_6 含量较高, 涂层具有更高

基金项目: 湖南省自然科学基金 (2022JJ50175), 湖南省教育厅科研基金 (21A0465) 和邵阳学院研究生创新项目 (CX2022SY063)。

作者简介: 赵珊 (1986.05-), 女, 汉族, 湖南省邵阳市人, 研究生, 职称: 助理工程师, 研究方向: 机械相关。

的硬度和更好的耐磨性。Cr元素与非晶相的共存促进了涂层在腐蚀磨损过程中的钝化，有利于提高涂层的抗腐蚀性能。此外，研究发现在CoCrFeNi高熵合金中添加Mo、Nb等元素能够同时提高合金的耐腐蚀性能^[11-12]。

本研究基于时效析出强化的设计思想，在CoCrFeNi基高熵合金中采用Mo、Nb、W、Si、C进行掺杂，设计了一种 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 高熵复合材料。探究了激光焦点距离基体的高度（即离焦高度）与激光功率对CoCrFeNi基复合涂层的微观组织以及耐腐蚀性能的影响规律，重点揭示了涂层的耐腐蚀机理。

一、试验

（一）粉末材料

选用Fe、Co、Cr、Ni、Mo、Nb、W、Si、C高纯单质（99.99%）粉末为原料，将原料按照表1所示名义成分经过真空自耗电极弧炉反复熔炼获得成分均匀的合金铸锭（ZH001，盘星新型合金材料有限公司，常州，中国）。采用气雾化制粉设备（HERMIGA 100-30 V2ICC，盘星新型合金材料有限公司，常州，中国）将合金锭融化，采用高速气流将金属液雾化冷却后形成球形粉末颗粒。雾化气压为4 MPa。

表1 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 气雾化粉末名义化学成分 (at.%)
Table 1 Nominal chemical composition of $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ aerosolized powder (at.%)

元素	Fe	Co	Cr	Ni	Mo	Nb	W	Si	C	元素
含量 (at.%)	18	24	20	23	7	3	1	2	2	含量 (at.%)

（二）涂层制备

基体选用304不锈钢，样品尺寸为60 mm×60 mm×12 mm。304不锈钢的化学成分如表2所示。在制备涂层前，将304不锈钢基体采用砂纸研磨去除材料表面的氧化层及油污。

选用 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 粉末作为原料，采用高纯Ar气保护的激光熔覆系统（Weld Star-M3000，长沙天辰激光科技有限公司，长沙，中国）在304不锈钢表面制备合金涂层。激光熔覆涂层制备的工艺参数如表3所示。

表2 304不锈钢基体材料的化学成分
Table 2 Chemical composition of 304 stainless steel matrix material

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
含量 (wt.%)	0.017	0.45	1.12	0.030	0.002	16.72	10.09	2.03	0.046	余

表3 激光熔覆工艺参数
Table 3 Laser cladding process parameters

序号	功率 (W)	离焦高度 (mm)	扫描速度 (mm/s)	搭接率 (%)	送粉量 (g/min)	保护气 (L/min)
1	900W	3	10	50	15	15
2	1000W	3				
3	1100W	3				
4	1000W	2				
5	1000W	3				
6	1000W	4				
7	1000W	5				
8	1000W	6				

（三）涂层的微观组织表征

采用用X射线衍射仪（AL-2700B，丹东奥龙仪器有限公司，丹东，中国）对激光熔覆涂层的表面进行物相鉴定。采用场发射扫描电镜（Tescan Mira4，Tescan公司，布尔诺市，捷克）对激光熔覆涂层的横截面微观形貌进行表征，工作电压为20 keV，束流为1 nA。

（四）电化学测试

将涂层样品背面连接导线后冷镶嵌在环氧树脂中，通过机械抛光，仅预留面积为1 cm²的涂层表面暴露在外。用配有三电极电池系统的电化学工作站（CHI600E，上海辰华仪器有限公司，上海，中国）对涂层的腐蚀行为进行电化学测试。采用3.5 wt.%的NaCl溶液作为腐蚀电解液。使用饱和甘汞电极（SCE）作为参比电极，铂片电极作为辅助电极，制备的测试样品作为工作电极。每个样品进行三种测试，分别为开路电位（open circuit potential, OCP）、电化学阻抗谱（Electrochemical impedance spectroscopy, EIS）和动电位极化曲线（Potentiodynamic polarization curve, PDP）。所有测试均在室温（25℃）下进行。测量所制备样品的开路电位（OCP）约30分钟，以获得相对稳定的涂层表面。PDP曲线的电位范围为-0.5 V_{SCE}至1.5 V_{SCE} vs. OCP，电位扫描速率为1mV/s。EIS测量在OCP下以100 kHz至10 mHz的频率范围进行，施加10 mV正弦信号幅度。

二、结果与讨论

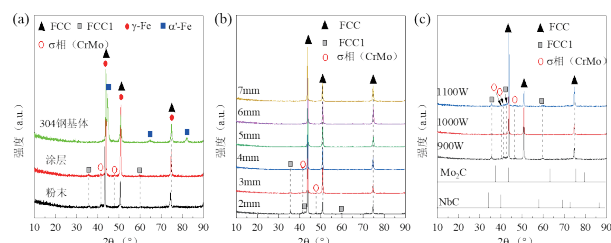
（一） $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层的相结构

图1（a）为304不锈钢基体、 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 粉末及激光熔覆涂层的XRD图谱。由图可知，304不锈钢基体由 α' -Fe和 γ' -Fe两种相组成。 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 粉末和涂层的相结构基本一致，主要包含面心立方（FCC）主相、少量FCC1相和 σ 相（CrMo）。这表明合金粉末经过激光熔覆后相结构没有发生明显变化。

不同离焦高度下制备的 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层的X射线衍射图如图1（b）所示。离焦高度小于4 mm时，涂层的相组成主要为FCC主相，同时存在FCC1相和 σ 相。但随着离焦高度进一步提高，XRD衍射图谱中FCC1相和 σ 相的衍射峰消失，仅观察到面心立方结构的Fe-Co-Cr-Ni相。

进一步分析了不同激光功率条件下获得的涂层的相结构，如图1（c）所示。可以发现激光功率对涂层的相结构基本无影响。激光熔覆涂层的相结构与粉末相一致。 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层的相结构以面心立方结构的Fe-Co-Cr-Ni相

(称为 FCC 主相) 为主 (对应 JCPDS#47-1417)。同时发现有另外一种面心立方结构 (称为 FCC1 相), 可能是由 Mo_2C 、 WC 和 NbC 形成的一种 (Mo, W, Nb) C 碳化物共晶组织^[13]。图中还显示了 Mo_2C 和 NbC 的标准衍射峰。涂层中还含有一种富 (CrMo) 的 σ 相 (与 JCPDS#10-0197 较为对应)。



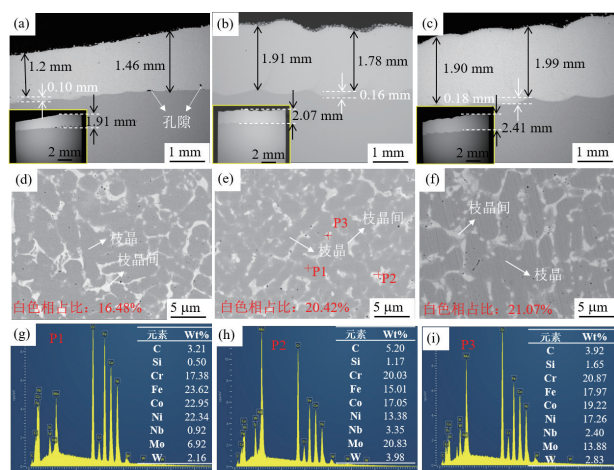
> 图1 粉末与复合涂层的 XRD 图谱。(a) 基体、粉末和涂层的 XRD 图谱; (b) 不同离焦高度条件下涂层的 XRD 图谱; (c) 不同激光功率条件下涂层的 XRD 图谱。

> Figure 1 XRD patterns of powders and composite coatings. (a) XRD patterns of 304 stainless steel, alloy powders and coatings; (b) XRD patterns of coatings at different defocus heights; (c) XRD patterns of coatings at different laser powers.

(二) $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层的微观形貌

1. 激光功率对涂层微观形貌的影响

设定离焦高度为 3 mm, 分别采用 900 W、1000 W 和 1100 W 的激光功率在 304 不锈钢表面制备了合金涂层。图 2 是在不同激光功率下制备的 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层的微观组织。如图 2 所示, 随着激光功率从 900 W 增加至 1100 W, 涂层的平均厚度显著增大, 说明激光功率升高能够提高粉末的利用率。图 2 (d~e) 展示了涂层的微观形貌。涂层内呈现树枝晶结构, 其中灰色区域为枝晶组织, 而白色区域为枝晶间组织, 少量分布在枝晶间的黑色点状区域为析出相。图 2 (g~i) 是三种组织的能谱分析结果。灰色的枝晶组织 (P1 点) 主要含 Fe、Co、Ni 和 Cr, 是面心立方结构的固溶体相, 但 Cr 元素含量明显低于其余三种元素。白色的枝晶间组织 (P2 点) 主要具有 Cr 和 Mo 元素, 以及高含量的 C, 推测可能是 (Mo, W, Nb) C 相。碳化物相中固溶了



> 图2 不同激光功率条件下激光熔覆涂层的微观形貌。(a, d) 激光功率为 900 W; (b, e) 激光功率为 1000 W; (c, f) 激光功率为 1100 W; (g~i) 图 2(e) 中 P1、P2 和 P3 位置的能谱分析结果。

> Figure 2 Micromorphologies of laser cladding coatings under different laser power conditions. (a, d) Laser power is 900 W; (b, e) Laser power is 1000 W; (c, f) Laser power is 1100 W; (g~i) Energy spectrum analysis results of positions P1, P2 and P3 in Figure 2 (e).

大量 Cr 元素, 涂层熔覆过程中 Cr 元素的偏析使涂层形成了枝晶结构。黑色的点状组织中仅 Cr 和 Mo 元素同样偏高, 含少量 Nb 元素, 可能是 Cr 和 Mo 的偏聚产生了细小的富 (Cr, Mo) 组织。Niu 等人报道, 在 $\text{CoCrFeNiW}_{0.2}$ 的微观形貌图中观察到类似的三种相结构^[14]。当激光功率从 900 W 升高至 1000 W, 涂层中白色碳化物相的占比从 16.48 % 增加至 21.07 %。这表明升高激光功率导致涂层制备过程中的能量输入加大, 涂层由于受到热处理作用加速了 Mo、W 和 Nb 等元素的扩散, 促进了碳化物的形成^[15]。然而, 高的激光功率导致了树枝晶组织的粗化, 如图 2 (f) 所示。因此, $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层的最佳激光功率应为 1000 W。

2. 离焦高度对涂层微观形貌的影响

图 3 展示了在不同离焦高度下制备的涂层的微观形貌。从图中可以看出, 随着离焦高度从 2 mm 增加至 4 mm, 涂层厚度从 1.77 mm 降低至 1.12 mm。然而, 当离焦高度为 5 mm 时, 如图 3 (d) 所示, 304 不锈钢表面的涂层厚度非常薄。离焦高度超过 5 mm 以后, 304 不锈钢基体表面几乎没有形成涂层。当离焦高度为 2、3 和 4 mm 时, 基体的稀释率分别约为 11 %、8 % 和 10 %。在激光熔覆过程中, 基体和粉末同时吸收了激光能量。基体表面与激光焦点之间的距离越大, 基体受激光的影响越小 (即能量密度越低), 而且送粉装置将粉末输送到基体表面时粉末分布越分散, 导致被粉末吸收的激光能量越低。当离焦高度大于 5 mm 时, 激光熔覆过程中仅有少量粉末进行进入在基体表面的熔池内, 从而无法形成形成涂层, 致使 304 不锈钢基体表面形成大面积的热影响区。

如图 3 (a1~f1) 所示, 涂层截面的枝晶间组织的分布与离焦高度密切相关。当离焦高度从 2 mm 升高至 4 mm 时, 涂层中的白色枝晶间组织占比从 20.21 % 显著下降至 9.02 %。离焦高度越小, 激光焦点距离 304 不锈钢基体表面越接近, 则涂层中的枝晶间组织尺寸较大。随着离焦高度的升高, 涂层制备过程中的能量密度减小, 涂层中的白色枝晶结构尺寸减小且分布均匀。这一结果与 XRD 的分析结果相符。

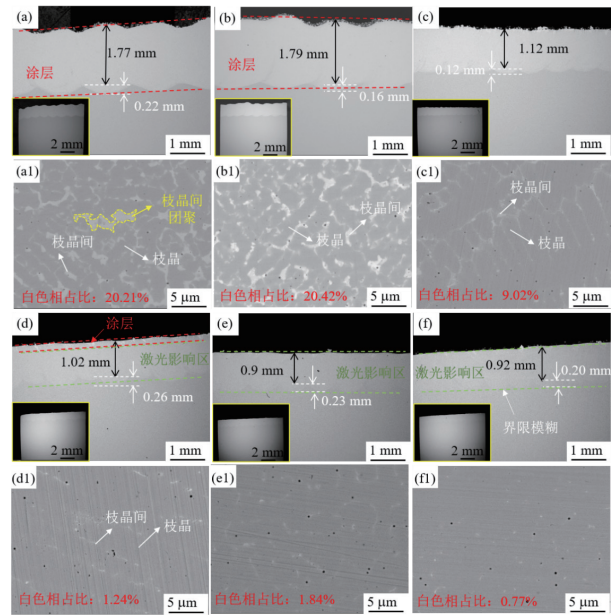
(三) 激光熔覆 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层的耐腐蚀性能

1. 激光功率对涂层耐腐蚀性能的影响

图 4 显示了在不同激光功率条件下制备的 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层及 304 不锈钢在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的动电位极化曲线。如图所示, 304 不锈钢在腐蚀电位为 -0.35 V 时开始发生钝化。随着腐蚀电位升高, 电流密度的波动表明材料表面出现了钝化膜被破坏以及再钝化过程。在 1000 W 和 1100 W 的激光功率条件下, 制备的涂层的钝化区间相近, 钝化区间内的极化曲线趋近垂直, 说明钝化膜有效阻碍了电荷转移。然而, 在 900 W 激光功率条件下制备的涂层没有发生明显钝化, 说明涂层表面没有形成稳定钝化膜。表 4 列出了从 PDP 曲线拟合得到的腐蚀电位 (E_{corr})、腐蚀电流密度 (i_{corr}) 等电化学参数。采用外推法计算极化电阻所需的阳极 (β_a) 和阴极 (β_c) 塔菲尔常数。常用 Stern-Geary 方程 (公式 1) 计算涂层的极化电阻 (R_p)。

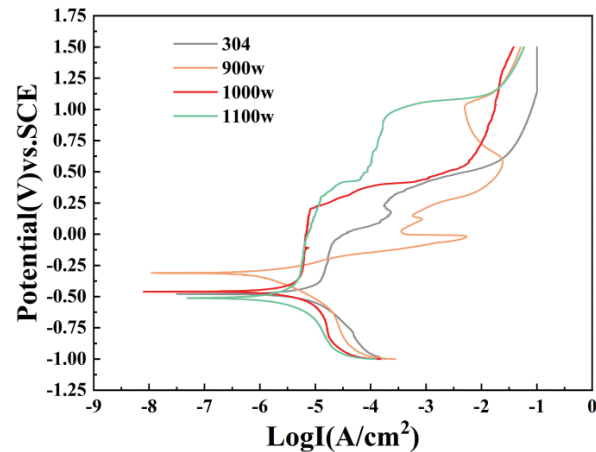
$$R_p = \frac{dE}{di} = \frac{1}{i_{corr}} \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \quad (1)$$

其 β_a 和 β_c 分别是阳极和阴极 Tafel 曲线的斜率。



> 图3 不同离焦高度条件下激光熔覆涂层的微观形貌。(a, a1) 离焦高度为 2 mm; (b, b1) 离焦高度为 3 mm; (c, c1) 离焦高度为 4 mm; (d, d1) 离焦高度为 5 mm; (e, e1) 离焦高度为 6 mm; (f, f1) 离焦高度为 7 mm。

> Fig. 3 Microstructure of laser cladding coating at different heights from the laser focus. (a, a1) The height from the laser focus is 2 mm; (b, b1) The height from the laser focus is 3 mm; (c, c1) The height from the laser focus is 4 mm; (d, d1) The height from the laser focus is 5 mm; (e, e1) The height from the laser focus is 6 mm; (f, f1) The height from the laser focus is 7 mm.



> 图4 不同激光功率条件下制备的激光熔覆涂层及 304 不锈钢的动电位极化曲线
> Fig. 4 Potentiodynamic polarization curves of 304 stainless steel and laser cladding coatings prepared under different laser power conditions.

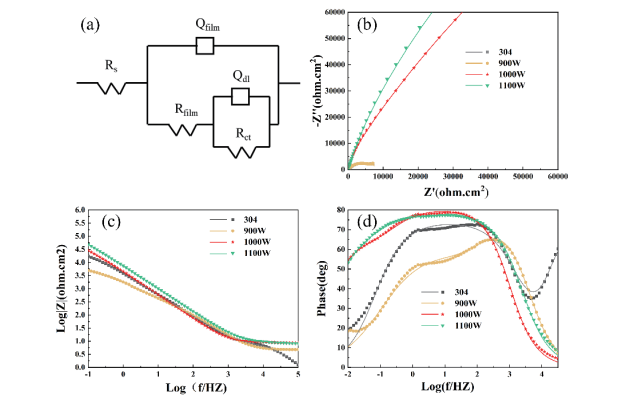
表4 根据 304 不锈钢与涂层的 PDP 曲线拟合得到的电化学参数
Table 4 Electrochemical parameters obtained by fitting the PDP curves of 304 stainless steel and coatings.

	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($A \cdot cm^{-2}$)	β_a ($V \cdot dev^{-1}$)	β_c ($V \cdot dev^{-1}$)	R_p ($\Omega \cdot cm^2$)
304	-485	5.13×10^{-6}	0.293	-0.216	10541
900 W	-335	1.08×10^{-6}	0.115	-0.16	26898

	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($A \cdot cm^{-2}$)	β_a ($V \cdot dev^{-1}$)	β_c ($V \cdot dev^{-1}$)	R_p ($\Omega \cdot cm^2$)
1000 W	-401	2.8×10^{-6}	0.378	-0.224	21829
1100 W	-510	1.74×10^{-6}	0.28	-0.191	28516

图5为在不同激光功率条件下制备的涂层及 304 不锈钢的电化学阻抗谱 (EIS)。从图中可以看出, 304 不锈钢及涂层的 Nyquist 图 (图 5 b) 都是不完整的半圆弧, 表明了涂层和 304 不锈钢的腐蚀过程由电荷转移过程控制。一般来说, Nyquist 图中电容弧的半径与样品的耐腐蚀性呈正相关^[16]。从图 5 (b) 可以看出, 当激光功率为 1100 W 和 1000 W 时, 制备的涂层的电容弧直径较大, 表明两种涂层的表面在电化学腐蚀过程中形成了保护性更强的钝化膜。当激光功率为 900 W 时, 制备的涂层的电容弧与 304 不锈钢接近, 且都远远小于前两者, 表明它们具有较差的抗电化学腐蚀能力。Bode 图 (图 5 (c)) 表示钝化膜具有类似于电容的特性。Phase-log f 图 (图 5 (d)) 展现出的两个峰分别由钝化膜的等效电容和双电层的等效电容容抗弧引起的, 表明有两个时间常数。采用文献^[17]中提出的 $R_s(Q_{film}(R_{film}(Q_{dl}R_{ct})))$ 等效电路进行拟合分析, 结果如表 5 所示。 R_s 、 R_{film} 、 R_{ct} 、 Q_{film} 及 Q_{dl} 分别代表溶液电阻、钝化膜电阻、电荷转移电阻、钝化膜电容及双电层电容。因溶液与钝化膜表面存在诸多不确定因素, 所以发生的电化学反应与纯电容行为略有偏差。采用等效电容 C (恒定相角元件 CPE) 替代纯电容 C 进行拟合^[18]。 Q 包括两个参数: 常数 Y_0 ($\Omega^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-n}$) 和无量纲指数 n 。 n 是与纯电容行为的偏差值。 n 的值越接近 1, 系统就越接近于理想电容^[19]。

通过 Chi-squared (χ^2) 值评估拟合结果精度, 四种材料的 χ^2 值的数量级均小于或等于 10^{-3} , 表明采用 $R_s(Q_{film}(R_{film}(Q_{dl}R_{ct})))$ 等效电路 (图 5 (a)) 拟合测试数据是合理的。通过表 4 的数据发现, 当激光功率为 1000 W 和 1100 W 时, 制备的涂层具有较高的 R_{film} 值。涂层表面钝化膜的阻抗越高, 对溶液中阴离子的敏感程度越低, 涂层耐腐蚀能力优异。激光功率为 1000 W 时制备的涂层的 R_s 值最高, 说明涂层的腐蚀速度最慢。综上, 激光功率为 1000 W 时, 涂层耐蚀性能最佳。



> 图5 不同激光功率条件下制备的涂层和 304 不锈钢的电化学阻抗谱。(a) EIS 拟合电路图, (b) Nyquist 图, (c, d) Bode 图。

> Figure 5 Electrochemical impedance spectras of 304 stainless steel and coatings prepared under different laser power conditions. (a) EIS fitting circuit diagram, (b) Nyquist plots, (c, d) Bode plots.

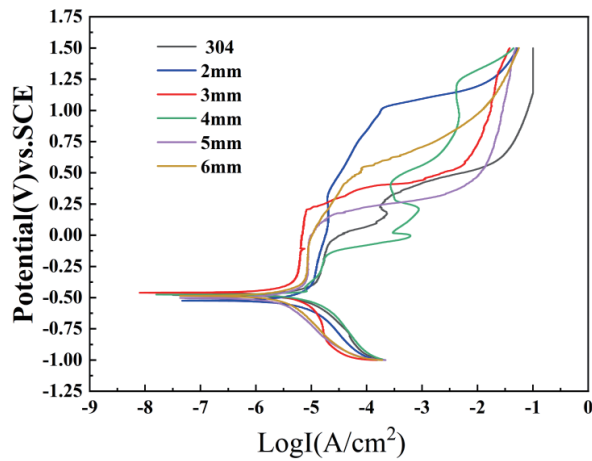
表5 根据涂层与304不锈钢的电化学阻抗谱拟合得到的电化学参数

Table 5 Electrochemical parameters obtained by fitting the electrochemical impedance spectras of the coatings and 304 stainless steel

	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$Q_{\text{film}} - Y_0$ ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n}$)	$Q_{\text{film}} - n$	R_{film} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$Q_{\text{dl}} - Y_0$ ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n}$)	$Q_{\text{dl}} - n$	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	χ^2
304	0.39	1.3×10^{-6}	1	7.56	5.63×10^{-5}	0.81	3.5×10^4	3.6×10^{-3}
900 W	4.74	2.74×10^{-5}	0.87	1.97×10^2	1.43×10^{-4}	0.59	8.79×10^3	1.74×10^{-3}
1000 W	8.95	4.15×10^{-5}	0.9	5.07×10^4	2.39×10^{-4}	0.66	5.53×10^5	5.39×10^{-4}
1100 W	8.58	2.76×10^{-5}	0.86	2.28×10^5	1.03×10^{-5}	0.58	7.9×10^5	6.94×10^{-4}

2. 离焦高度对涂层耐腐蚀性能的影响

图6为不同离焦高度条件下制备的涂层及304不锈钢的动电位极化曲线。从图中可以明显发现，当离焦高度为3 mm时，制备的涂层最先钝化，且钝化电流密度最小。而离焦高度大于4 mm时，涂层表面的钝化膜在腐蚀电位约为-0.1 V左右时被击穿，随之电流密度快速升高，说明涂层的钝化膜稳定性较弱。表6列出了依据PDP曲线拟合得到的腐蚀电位、腐蚀电流密度等电化学参数。结果表明，离焦高度为3 mm时，制备的涂层的腐蚀电位最高，表明涂层表面发生电化学腐蚀需要到达更高的腐蚀电位，腐蚀过程的发生更困难。



> 图6 不同离焦高度下制备的涂层及304不锈钢的动电位极化曲线

> Fig.6 Potentiodynamic polarization curves of 304 stainless steel and coatings prepared at different heights from the laser focus.

表6 根据涂层及304不锈钢的PDP曲线拟合得到的电化学参数

Table 6 Electrochemical parameters obtained by fitting the PDP curves of the coatings and 304 stainless steel.

	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	β_a ($\text{V} \cdot \text{dec}^{-1}$)	β_c ($\text{V} \cdot \text{dec}^{-1}$)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
304	-485	5.13×10^{-6}	0.293	-0.216	10541
2 mm	-524	3.93×10^{-6}	0.293	-0.203	13695
3 mm	-401	2.8×10^{-6}	0.378	-0.224	21829
4 mm	-474	2.36×10^{-6}	0.327	-0.208	23410
5 mm	-516	2.44×10^{-6}	0.253	-0.285	23849
6 mm	-501	2.48×10^{-6}	0.27	-0.251	22771

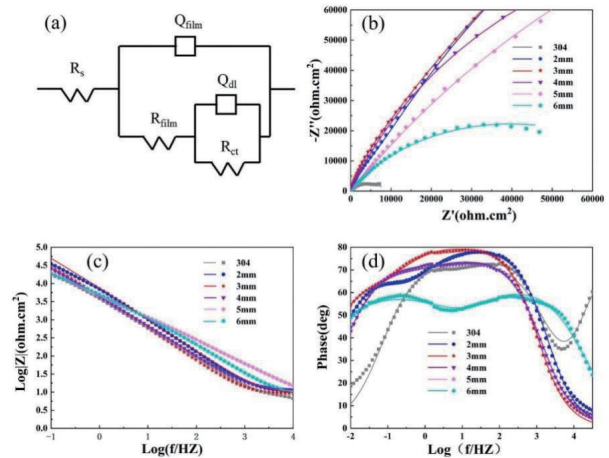
不同离焦高度下制备的涂层及304不锈钢的EIS图谱如图

7所示。从图7(b)可以看出，当离焦高度为3 mm时，制备的涂层的电容弧直径最大。随着离焦高度升高，涂层的电容弧直径不断降低，且304不锈钢的电容弧最小。这说明离焦高度为3 mm时，涂层的钝化膜更具有保护性。同样采用等效电路图 $R_s(Q_{\text{film}}(R_{\text{film}}(Q_{\text{dl}}R_{\text{ct}})))$ 对数据进行拟合处理，拟合得到的数据如表7所示。结果表明，离焦高度为3 mm时，制备的涂层的 R_{film} 值最高，表明其钝化膜电阻最高，可以有效阻碍电荷转移，减弱腐蚀程度。此结论与Nyquist图的分析结果一致。综上，当离焦高度为3 mm时，涂层具有最佳的耐腐蚀性能。

三、结论

(1) 激光熔覆 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层主要由(Co,Cr,Fe,Ni) FCC固溶体相、共晶碳化物相及相组成。涂层呈现出典型的树枝晶结构，其中(Co,Cr,Fe,Ni)相为枝晶组织，碳化物相为枝晶间组织，相弥散分布这两相之间；

(2) 制备激光熔覆 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层的最优工艺参数如下：激光功率为1000 W，离焦高度为3 mm，扫描速度为10 mm/min，送粉率为15 g/min，气流量为15 L/min，搭接率为50 %。涂层的树枝晶组织分布均匀，涂层内部无孔隙，涂层与基体界面无缺陷且涂层的稀释率最低。



> 图7 不同离焦高度条件下制备的涂层和304不锈钢的电化学阻抗谱。(a) EIS拟合电路图，(b) Nyquist图，(c, d) Bode图。

> Figure 7 Electrochemical impedance spectra of 304 stainless steel and coatings prepared at different heights from the laser focus. (a) EIS fitting circuit diagram, (b) Nyquist plots, (c, d) Bode plots.

表7 根据涂层与304不锈钢的电化学阻抗谱拟合得到的电化学参数

Table 7 Electrochemical parameters obtained by fitting the electrochemical impedance spectras of the coatings and 304 stainless steel.

	R_s ($\Omega\cdot\text{cm}$)	$Q_{\text{film}}-Y_0$ ($\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-n}$)	Q_{film}^{-n}	R_{film} ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	$Q_{\text{dl}}-Y_0$ ($\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-n}$)	Q_{dl}^{-n}	R_{ct} ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	χ^2
304	0.39	1.3×10^{-6}	1	7.56	5.63×10^{-5}	0.81	3.5×10^4	3.6×10^{-3}
2 mm	9.47	2.48×10^{-5}	0.89	2.53×10^4	2.24×10^{-5}	0.74	4.37×10^5	1.08×10^{-3}
3 mm	8.95	4.15×10^{-5}	0.9	5.07×10^4	2.39×10^{-5}	0.66	5.53×10^5	5.39×10^{-4}
4 mm	10.81	4.55×10^{-5}	0.84	2.47×10^4	1.26×10^{-5}	0.69	2.23×10^5	5.2×10^{-4}
5 mm	7.136	3.19×10^{-5}	0.72	2.14×10^3	3.72×10^{-5}	0.63	4.23×10^5	7.81×10^{-4}
6 mm	7.54	2.36×10^{-5}	0.82	2.23×10^3	4.3×10^{-5}	0.59	7.84×10^4	4.65×10^{-4}

(3) 最佳激光熔覆工艺下制备的 $\text{Fe}_{18}\text{Co}_{24}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{23}\text{Mo}_7\text{Nb}_3\text{W}_1\text{Si}_2\text{C}_2$ 涂层在电化学腐蚀过程中具备高腐蚀电位, 较大的电容弧直径和钝化膜电阻。涂层优异的耐腐蚀性能主要归因于涂层表面形成的钝化膜具有高稳定性, 高阻抗值, 对溶液中阴离子的敏感程度低以及腐蚀反应速率低等优点。

参考文献

[1] Prameela S E, Pollock T M, Raabe D, et al. Materials for extreme environments [J]. Nature Reviews Materials, 2023, 8(2): 81–88.

[2] Zhang Y, Yin X Y, Wang J Z, et al. Influence of microstructure evolution on tribocorrosion of 304SS in artificial seawater [J], Corrosion Science, 2014, 88: 423–433.

[3] Li Y T, Wang K M, Fu H G, et al. Microstructure and wear resistance of in-situ TiC reinforced AlCoCrFeNi-based coatings by laser cladding [J], Applied Surface Science, 2022, 585: 152703.

[4] Kumar D, Recent advances in tribology of high entropy alloys: A critical review [J], Progress in Materials Science, 20203, 136: 101106.

[5] Li Y T, Fu H G, Wang K M, et al. Effect of Mo addition on microstructure and wear resistance of laser clad AlCoCrFeNi–TiC composite coatings [J], Applied Surface Science, 2023, 623: 157071.

[6] Hao X H, Liu H X, Zhang X W, et al. Microstructure and wear resistance of in-situ TiN/(Nb, Ti)₅Si₃ reinforced MoNbTaWTi–based refractory high entropy alloy composite coatings by laser cladding [J], Applied Surface Science, 2023, 626: 157240.

[7] Zhu L, Xue P, Lan Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review [J], Optics and Laser Technology, 2021, 138: 1069115.

[8] Zhuang D D, Tao W W, Du B, et al. Microstructure and properties of TiC-enhanced CrMnFeCoNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding [J], Tribology International, 2023, 180: 108246.

[9] Ma G L, Cui H Z, Jiang D, et al. The evolution of multi and hierarchical carbides and their collaborative wear-resisting effects in CoCrNi/WC composite coatings via laser cladding [J], Materials Today Communications, 2022, 30: 103223.

[10] Shang X, Zhang C, Xv T, et al. Synergistic effect of carbide and amorphous phase on mechanical property and corrosion resistance of laser-clad Fe-based amorphous coatings [J], Materials Chemistry and Physics, 2021, 263: 124407.

[11] Zhou J L, Cheng Y H, Wan Y X, et al. Strengthening by Ti, Nb, and Zr doping on microstructure, mechanical, tribological, and corrosion properties of CoCrFeNi high-entropy alloys [J], Journal of Alloys and Compounds, 2024, 984: 173819.

[12] Dai J, Feng H, Li H B, et al. Insights into the mechanism of Mo protecting CoCrFeNi HEA from pitting corrosion–A quantitative modelling study on passivation and repassivation processes [J], Journal of Materials Science & Technology, 2024, 182: 152–164.

[13] Zhou J Y, Zhang J Y, Zhang F, et al. High-entropy carbide: A novel class of multicomponent ceramics [J], Ceramics International, 2018, 44(17): 22014–22018.

[14] Niu Z, Xu J, Wang T, et al. Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of CoCrFeNiWx (x = 0, 0.2, 0.5) high entropy alloys [J], Intermetallics, 2019, 112: 106550.

[15] Gao J, Song D Y, Feng J W, Effect of Laser Power on Microstructure and Properties of CBN Coating by Laser Cladding on TC11 Titanium Alloy [J], Applied Mechanics and Materials, 2014, 598: 94–97.

[16] Hao E K, Liu X, An Y L, et al. The coupling effect of immersion corrosion and cavitation erosion of NiCoCrAlYTa coatings in artificial seawater [J], Corrosion Science, 2020, 169: 108635.

[17] Guo W M, Zhang H L, Zhao S, et al. Corrosion Behavior of the CoNiCrAlY–Al₂O₃ Composite Coating Based on Core–Shell Structured Powder Design [J], Materials, 2021, 14(22): 7093.

[18] Wang J Y, Li W H, Yang H L, et al. Corrosion behavior of CoCrNi medium-entropy alloy compared with 304 stainless steel in HSO₄ and NaOH solutions [J], Corrosion Science, 2020, 177: 108973.

[19] Gong X J, Cui Y J, Wei D X, et al. Building direction dependence of corrosion resistance property of Ti–6Al–4V alloy fabricated by electron beam melting [J], Corrosion Science, 2017, 127: 101–109.

地铁隧道在软土地层进行盾构的施工技术研究

王伟

中交第三公路工程局有限公司，北京 101300

摘 要：城市轨道交通建设规模不断扩大，软土地层盾构施工面临严峻考验。本文在梳理软土盾构施工主要难题的基础上，重点探讨了土压平衡、水泥加压、注浆加固等成熟工法的优化升级策略，研究了智能化施工与数字化管控、主动降噪减振与被动防护技术融通、绿色环保材料应用与废弃物循环利用新模式等前沿技术在软土盾构施工中的应用前景。旨在破解制约软土盾构施工的安全、质量、效率瓶颈，以创新引领软土盾构技术走向更高水平，提升城市地下空间开发利用能级，推动城市轨道交通高质量发展。

关 键 词：地铁隧道；软土地层；盾构；施工技术

Research on Shield Tunneling Construction Technology for Subway Tunnels in Soft Soil Layers

Wang Wei

CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd. Beijing 101300

Abstract： With the continuous expansion of urban rail transit construction scale, shield tunneling construction in soft soil strata is facing severe challenges. On the basis of sorting out the main difficulties in soft soil shield tunneling construction, this article focuses on exploring the optimization and upgrading strategies of mature construction methods such as soil pressure balance, cement pressurization, and grouting reinforcement. It studies the application prospects of cutting-edge technologies such as intelligent construction and digital control, active noise reduction and vibration reduction, and passive protection technology integration, green and environmentally friendly material application, and new waste recycling models in soft soil shield tunneling construction. Aiming to break through the safety, quality, and efficiency bottlenecks that restrict the construction of soft soil shield tunneling, and to lead the technology of soft soil shield tunneling to a higher level through innovation, enhance the development and utilization level of urban underground space, and promote the high-quality development of urban rail transit.

Keywords： subway tunnel; soft soil strata; shield tunneling; construction technique

引言

随着城市化进程不断推进，城市轨道交通建设规模不断扩大，建设环境日趋复杂。特别是软土地层广泛分布的地区，地铁隧道施工面临诸多技术挑战。盾构法是目前国内外修建地铁隧道的主要方式之一。相较传统矿山法，其具有施工高效、土体扰动小、地表沉降控制好等优势，特别适合软土等复杂地层条件下的隧道施工^[1]。然而，软土地层强度低、压缩性高、易变形等特点，也给盾构施工带来诸多困难。如何攻克软土地层给盾构施工带来的安全风险与效率瓶颈，成为制约城市轨道交通建设高质量发展的关键难题。

一、研究软土地层盾构施工技术的重要性

（一）确保工程安全，控制风险隐患

软土地层物理力学性质差，承载力低，高压缩性和渗透性，极易引发工程事故。盾构施工易诱发坍塌、涌土、管片脱节错台、地表沉降等风险，危及施工人员生命及设备安全，威胁既有建筑物及地下管线安全^[2]。因此，针对软土特性，研究并采用合理的盾构施工工艺，优化掘进控制参数，同步进行地层加固、面

板支护和周边注浆，实时监测地层变形及周边环境响应，对预警和规避安全风险、确保隧道工程安全具有关键作用。系统研究软土盾构施工安全风险成因机理、失稳破坏模式及其演化规律，建立安全风险评估、预警和动态化控制体系，可为类似工程安全施工提供科学依据和技术指导。

（二）突破技术瓶颈，提升施工效率

软土地层给盾构施工带来诸多技术挑战。软土强度低，遇水极易软化，对盾构掘进机的推进、土仓排土、刀盘驱动、管片衬

作者简介：王伟（1981.09—），男，满族，吉林省磐石市人，本科学历，研究方向：市场开发兼管域内在建项目。

砌等方面提出更高要求。同时，软土渗透性强，易发生淤土泛水，影响掘进速度和效率。现有技术方案难以完全适应软土盾构施工需求，亟需研发突破^[3]。开展软土盾构关键技术攻关，优化盾构结构型式和施工工艺参数，研制适用于软土地层的泥水平衡、土压平衡等新型盾构机，突破长距离、大深埋软土盾构施工技术瓶颈，将从根本上破解制约施工效率提升的难题。通过创新柔性管片及铰接技术，提高管片拼装精度和效率，并解决软土变形大引起的管片错台、接缝开裂等问题，可进一步提升施工效率，加快工程进度。

二、地铁隧道在软土地层进行盾构关键技术介绍

（一）土压平衡盾构技术

土压平衡盾构通过调控土仓压力与地层土水压力动态平衡，维持开挖面稳定。在软土层掘进时，土仓压力控制至关重要。压力过低易引起地层失稳坍塌，压力过高则可能导致地表隆升^[4]。因此，土仓压力需根据地层条件实时调节，与土体平衡压力保持一致。同时，刀盘转速和推进速度需协调控制，避免突变引起土压骤变。合理设计刀盘开口率，优化土仓排土系统，确保开挖土量与排土量平衡。针对软土易流动变形特点，应采用适当的土体改良措施，如添加泡沫剂、聚合物等，改善土体塑性和流变性，确保土压平衡高效掘进。土压平衡盾构技术的有效运用，可最大限度减小对软土地层的扰动，控制地表沉降，保证洞身稳定和施工安全。

（二）泥水加压平衡盾构技术

泥水加压平衡盾构通过泥浆悬浮液的压力平衡开挖面，适用于高地下水位、易渗透的淤泥质软土层。施工时需精确控制泥浆比重、黏度等参数，使泥浆压力与地层土水压力达到平衡。泥浆泵转速和泥浆管路阀门动态调节，实现泥水压力实时控制。开挖出土应匀速连续，避免泥浆渗漏丢失，引起失衡超挖。泥浆须定期检测更换，确保性能满足要求^[5]。同时采用气闸舱或土压平衡舱辅助，防止开仓换刀时泥浆涌流，平稳进出土压力。针对软土层强度低、止水难度大等特点，泥水盾构可与地层加固措施联合运用。如采用超前帷幕注浆，形成止水隔离层；管幕灌浆控制涌水涌砂；盾尾同步注浆填充盾尾空隙，降低管片初期荷载，提高洞身稳定性。泥水加压平衡盾构技术的综合运用，可有效克服高压软土地层施工难题，控制地层变形，确保施工安全高效。

（三）注浆加固技术

针对软土地层强度低、变形大的特点，采用注浆加固提升地层强度和整体稳定性已成为常用措施。根据加固目的和注浆位置，可分为超前注浆、管幕注浆和盾尾同步注浆等类型。超前注浆在掘进面前方一定距离范围内进行，形成加固区，减小盾构掘进阻力，控制地层变形。管幕注浆通过在洞身周边注入水泥浆等材料，构建止水帷幕，防止地下水渗流，有效控制涌水涌砂。盾尾同步注浆及时填充盾尾空隙，减小管片初期荷载，防止环境地层失稳^[6]。注浆施工应遵循先深后浅、分段进行的原则，严格控制注浆压力、注浆量等参数。同时做好注浆过程监测，根据注浆

压力、注浆量、孔口回浆等指标，动态优化注浆参数，确保注浆效果。必要时可辅以高压旋喷等措施，进一步强化加固效果。注浆加固技术与土压平衡、泥水加压等盾构工法联合应用，可显著提升软土地层施工安全性、减小建筑物沉降，保证工程质量。

三、地铁隧道在软土地层进行盾构的施工技术应用

（一）智能化施工与数字化管控共举

伴随新一代信息技术的飞速发展，智能化、数字化理念正加速向盾构施工领域渗透。通过将物联网、大数据、人工智能等前沿技术与盾构机深度融合，实现掘进参数自适应调整、施工状态实时监测、安全风险智能预警，可显著提升软土地层盾构施工的效能与品质^[7]。同时，运用BIM、数字孪生等数字化技术，构建全生命周期管理平台，将设计、制造、施工、运维各环节无缝衔接，实现资源优化配置和多方协同联动，推动项目管理向扁平化、精细化转变。软土盾构施工的智能化、数字化转型，代表了行业发展的必然趋势，将为打造智慧地下工程、提升城市基础设施韧性注入新动能。

在具体应用中，可基于全断面三维地质超前探测，获取掌子面前方土层性质、地下水分布等关键信息，实现复杂地质体的精细刻画和可视化表达。利用机器学习算法，建立地质参数与盾构掘进参数的动态响应模型，自适应优化推进速度、刀盘转速、土仓压力等，实现“因岩施策、智能掘进”。在盾构机上集成振动、噪声、位移等多参数传感监测系统，实时采集岩土体变形、周边环境响应数据，并借助物联网技术回传至数字化管控平台。一旦监测数据超限，平台即利用机器视觉、知识图谱等人工智能技术智能研判风险等级，及时预警并推送优化方案，做到“风险早知、隐患早控”^[8]。同时，将海量施工过程数据汇聚至大数据平台，对施工效率、能耗、安全、质量等关键指标跨项目横向对标、纵向溯源，助力工法优化和标准规范更新，做到数据赋能、提质增效。智能化与数字化的深度融合，将系统重塑软土盾构施工的方法与流程，使之向更加安全、高效、精准、绿色、韧性的方向升级迭代。

（二）主动降噪减振与被动防护技术融通

针对软土盾构施工引发的噪声与振动问题，亟需主动降噪减振技术与被动防护措施协同发力，从源头治理和传播阻断两个维度系统施策。主动降噪减振技术通过优化设备部件结构、材料与工艺，抑制噪声与振动的产生。如采用自动润滑、平顺齿轮传动、主动平衡校正等，可显著降低齿轮箱、刀盘轴承等关键部件的噪振水平；选用低噪声液压泵、电机，并对其进行科学的减振支撑与隔声罩设计，从动力源头最小化噪声辐射。

同时，被动防护措施则侧重从阻隔噪声振动传播的角度施治。合理布设施工场地隔离带，利用地形、地物阻挡，可有效降低向外部环境的噪声辐射；针对噪声敏感建筑，设置隔声屏障，降低噪声向上方和两侧的传播；在振动敏感建筑物地基开挖减振沟，阻断振动波向地面传播，降低盾构掘进引起的二次噪声；对特定保护对象，还可在其基础或内部设置隔振器，降低建筑整体

振动响应^[9]。值得一提的是，随着物联网、大数据等新技术的应用，噪声振动监测系统实现了数字化、智能化升级。海量监测数据经智能算法解析，破解了噪声的频谱特征与指向性，研判了振动的时频特性与空间分布规律，并借助仿真模拟手段优化了噪振传播路径与防护布局，使管控措施的精准性、时效性大为提升。主动降噪减振与被动防护技术的系统融通，是软土盾构施工绿色化、生态化发展的重要路径。建议各方协同发力，加快推动相关创新技术的工程转化，并适时开展标准规范修订，推动形成设计、施工、监测一体化的噪振管控创新体系。

（三）绿色环保材料与循环利用模式创新

软土盾构施工材料的选择与利用模式，对工程的环境影响与资源利用效率至关重要。应积极推广应用绿色环保新材料，优化材料配比与加工工艺，提高材料使用性能，最大限度降低能耗与污染排放^[10]。同时，建立废弃物循环利用新模式，最大化盘活工程副产物，在确保安全、经济的前提下，实现资源的多级利用、全生命周期价值最大化。

具体而言，盾构管片宜优先采用工业副产石膏、粉煤灰、尾矿粉等替代原生材料，在满足力学性能的基础上，最小化碳排放与原材料消耗。考虑到软土环境的特殊性，应重点强化管片抗渗性、抗氯离子侵蚀性等性能，如掺加自修复胶凝材料、表面涂覆防水涂料等。对于注浆材料，则应因地制宜研发定制配方，提高材料与地层的相容性，优化流变性与凝结时间，确保注浆成孔率与扩散半径。同时，大力推广基于环氧、聚氨酯等化学浆液的新

型快速堵漏材料，提高突泥突水等险情处置效率。另一方面，钻渣作为盾构掘进量最大的副产物，蕴含巨大的循环利用潜力。宜高标准分选，将其作为隧道管片回填、道路工程填料、制备新型建材骨料等，最大限度实现废弃物资源化、无害化、高值化利用。

四、结束语

综上所述，软土盾构施工技术正经历从传统经验到科学智能的跨越式发展。面对日益复杂的地质条件与不断提质增效的时代要求，必须坚持创新驱动、融合赋能，加快关键核心技术攻关和成套装备研制，大力推动数字化转型和绿色化发展，为软土盾构工程注入新动力、拓展新空间。一方面，要继续深化土压平衡、泥水加压等传统工法的优化升级，突破长距离、大埋深等极端工况下的安全掘进技术瓶颈；另一方面，更要致力于新理念、新技术、新模式、新装备的集成创新，构建具有自主知识产权的软土盾构施工成套技术体系。将新一代信息技术、智能装备制造技术与软土盾构机深度融合，实现设计、制造、施工、运维一体化的智能建造将是大势所趋。同时，绿色环保材料的规模化应用和循环经济新模式的系统构建，对助力软土盾构工程实现减量化、再利用、无害化发展目标，推动生态环境与地下空间开发的和谐共生，也将发挥关键作用。

参考文献

[1] 曹小平, 韦志凯, 卢洪强, 等. 软土地层小半径盾构隧道下穿在建高铁地基加固效果研究 [J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1):10.
[2] 马超, 刘雪松, 黄喆. 软土地层盾构隧道穿越地下锚索施工技术 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S02):7.
[3] 苏培森. 温州深厚软土地层盾构隧道建设的地质风险及控制研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12):200-203.
[4] 曲腾飞. 软土地层地铁盾构上跨既有隧道施工技术应用研究 [J]. 北方交通, 2023(5):78-81.
[5] 李平. 软土地层双线地铁隧道盾构施工土体变形规律研究 [D]. 东华理工大学, 2022.
[6] 宋艳江. 浅谈盾构隧道管片修补及堵漏施工方法 [J]. 工程技术发展, 2022, 3(4):4-6+9.
[7] 程雪松, 盛鲁腾, 郑刚, 等. 软土地层三线小角度叠交盾构隧道施工影响规律及位移控制 [J]. 铁道建筑, 2024, 64(5):123-128.
[8] 王怀东, 王二丽. 拆建桥桩对软土地层盾构隧道结构影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022.
[9] 袁君. 深厚软土地层大直径盾构隧道施工期沉降预测研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2024(6).
[10] 刘映晶, 闵加正, 张文宏, 等. 软土地层盾构近距上跨运营地铁施工技术 [J]. 科学技术与工程, 2022(003):022.

建筑工程管理模式的数字化转型研究

肖晨虹

德清交水勘察设计有限公司, 浙江 湖州 313000

摘 要： 本文在分析建筑工程管理模式演进历程和数字化转型驱动力的基础上，从数据驱动的精细化管理变革、基于BIM的项目协同平台构建、培育数字化复合型人才三个方面，探讨了建筑工程管理数字化转型的实现路径。文章指出，建筑工程管理数字化转型是顺应新一轮产业革命、推动建筑业高质量发展的必然选择，对于破解建筑业发展瓶颈、提升管理效能具有重要意义。同时，文章强调数字化转型是一个复杂的系统工程，需要加强顶层设计，完善理论基础，创新体制机制，打造数字化人才队伍，为建筑工程管理模式变革提供持久动力。

关 键 词： 建筑工程；管理模式；数字化转型；转型措施

Research on the Digital Transformation of Construction Project Management Mode

Xiao Chenhong

Deqing Jiaoshui Survey and Design Co., Ltd. Huzhou, Zhejiang 313000

Abstract： Based on the analysis of the evolution process of construction project management mode and the driving force of digital transformation, this article explores the implementation path of digital transformation in construction project management from three aspects: data-driven refined management reform, BIM based project collaboration platform construction, and cultivation of digital composite talents. The article points out that the digital transformation of construction project management is an inevitable choice to adapt to the new round of industrial revolution and promote the high-quality development of the construction industry. It is of great significance for solving the bottleneck of construction industry development and improving management efficiency. At the same time, the article emphasizes that digital transformation is a complex system engineering that requires strengthening top-level design, improving theoretical foundations, innovating institutional mechanisms, building a digital talent team, and providing lasting impetus for the transformation of construction project management models.

Keywords： construction engineering; management mode; digital transformation; transformation measures

引言

建筑业是国民经济的支柱产业，在推动经济社会发展、满足人民美好生活需要等方面发挥着关键作用。然而，当前建筑业发展方式粗放，面临诸多深层次矛盾和问题，尤其是在管理模式上亟需变革创新^[1]。党的二十大报告明确提出，加快发展数字经济，推进数字产业化和产业数字化，这为建筑业数字化转型指明了方向。建筑工程管理作为建筑业的核心业务，积极顺应数字化变革趋势，加快数字化转型步伐，对于提升建筑业发展质量和效益、实现高质量发展具有重大意义。

一、建筑工程管理模式的演进与数字化趋势

早期的建筑工程管理模式以粗放型为主，管理方式简单，主要依靠经验，缺乏科学的管理理论和方法做指导^[2]。20世纪初，泰勒等人的科学管理理论为建筑工程管理的科学化、规范化奠定了基础。此后，建筑工程管理实践不断吸收和融合各领域的先进

管理理念，形成了一套较为系统的管理体系和管理模式。各种现代项目管理理论、方法和工具如WBS、网络计划技术、ERP等被引入并广泛应用，使建筑工程管理逐步实现专业化、精细化和动态化，管理水平不断提升。

进入21世纪，以BIM、物联网、云计算、大数据、人工智能等为代表的新一代信息技术蓬勃兴起，数字经济时代到来。在这

作者简介：肖晨虹（1984.02-），女，浙江湖州德清人，本科，中级职称，研究方向：建筑工程管理。

一背景下，建筑工程管理模式呈现数字化、智能化、协同化的新特征。信息技术与建筑工程管理深度融合，催生了数字化管理新模式^[3]。BIM技术集成了设计、施工、运维等各阶段的工程数据，形成信息化集成管理平台，实现了数据的联通共享。物联网技术应用使得各种设备联网，施工现场管理更加透明和实时。大数据分析、机器学习等人工智能技术在进度控制、质量管理、安全监管、设计优化等方面得到应用，促进了管理的智能化。

二、建筑工程管理数字化转型的理论基础

（一）数字化时代的管理范式革新

数字化时代的到来，催生了管理范式的革新。传统的科层制管理模式已难以适应数字经济的高度不确定性和快速迭代特征。建筑工程管理要主动拥抱数字化变革，在充分吸收现代管理理论精华的基础上，构建扁平化、弹性化的新型组织形态，建立跨界协作的生态化管理机制。数字技术为管理决策提供了海量实时数据，但如何去伪存真、提炼洞见，对管理能力提出了更高要求^[4]。建筑工程管理者需要运用数字化思维，增强数据分析能力，推动管理流程再造，实现动态优化。数字化转型也对项目团队的数字素养和创新能力提出了新的要求，亟需加强复合型人才培养。

（二）新兴信息技术的赋能融合

新兴信息技术为建筑工程管理数字化转型注入新动能。BIM、物联网、大数据、人工智能等数字技术与建筑工程管理加速融合，为项目全生命周期管理提供了全新解决方案。BIM打破了设计、施工、运维等阶段的信息壁垒，促进了数据在各参与方之间的无缝流动。云计算、大数据为海量工程数据存储、处理和分析提供了高效手段，使得工程状态可视化、异常实时预警等成为可能。人工智能技术应用于设计优化、施工仿真、进度控制、质量管理等领域，显著提升了管理效率和质量^[5]。区块链有望破解建筑业信任缺失难题，为供应链协同提供可信环境。

（三）多学科交叉融通的协同创新

建筑工程管理数字化转型是一个复杂的系统问题，单一学科的理论难以全力支持其顺利实现。管理学、信息科学、建筑学等多学科的交叉融通，能够提供更全面、深入的理论视角^[6]。例如，复杂性科学为解析数字化时代建筑工程系统的共性特征提供了新的分析框架；系统工程理论强调各子系统的协同耦合，为统筹管理数字化转型的多维度、动态性挑战提供了思路；行为经济学、决策科学等为数字技术环境下的管理决策优化提供了新的视角。跨学科研究有助于揭示数字化转型的内在机理，提炼普适性理论。同时，学科交叉也对传统理论提出新的诠释空间，催生理论创新。数字技术正成为打破学科壁垒、推动理论协同创新的纽带。

三、建筑工程管理数字化转型的实施路径

（一）数据驱动的精细化管理变革

数据驱动是建筑工程管理数字化转型的核心要义，要实现管

理的精细化和智能化，必须充分挖掘数据价值，用数据驱动管理变革。建筑企业要树立数字化管理理念，将数据作为战略资源，加强全生命周期数据的采集、整合和分析，夯实数字化管理的基础^[7]。要建立健全数据治理体系，制定数据标准规范，确保数据的准确性、时效性和安全性。通过数据打通管理壁垒，促进跨部门、跨阶段的数据共享和业务协同，推动管理流程再造和优化。

例如，在施工阶段，可充分利用物联网、移动互联等技术，对人员、材料、设备、环境等各类施工要素进行数字化采集和监测。利用RFID、二维码等技术，实现材料和设备的精准追溯管理，优化库存和供应链。开发施工现场管理APP，借助移动终端实现质量、安全等数据的实时采集和共享，提高一线管理效率。在数据分析层面，可运用大数据分析、机器学习等技术，对各类数据进行关联挖掘，识别管理薄弱环节，优化资源配置。例如，通过对施工进度与资源投入数据的关联分析，预测进度偏差风险，动态优化资源调度。对质量检查数据进行统计分析，识别质量缺陷模式，制定针对性的预控措施^[8]。运用自然语言处理技术，对施工日志等非结构化数据进行语义提取和分析，及时发现安全隐患。通过数据的深度应用，能够显著提升建筑工程管理的效率和质量。建筑企业要以数字化转型为契机，加快建立数据中心，强化数据治理，提升数据分析运用能力，用数据洞察赋能管理决策。

（二）基于BIM的项目协同管理平台构建

BIM以其数字化、信息化、智能化的特征，为打造新型项目管理模式提供了理想载体。传统项目管理受制于信息孤岛问题，各参与方缺乏有效协同，导致低效、错漏频发。BIM通过构建工程信息的数字化语义模型，将各阶段的数据无缝集成，实现了项目全生命周期信息共享和业务协同^[9]。基于BIM平台，各参与方能够围绕统一的工程数字模型开展工作，显著提升信息传递效率，降低沟通成本。通过BIM可视化管理，强化多专业协同，优化设计方案，提高施工效率和质量。BIM为项目管理决策提供数字化支撑，使进度、成本、质量管控更加动态和精准。

例如，在设计阶段，可基于BIM平台开展多专业协同设计。通过BIM模型，各专业可直观审查设计成果的匹配性，及时发现和消除碰撞，优化设计方案。利用BIM开展性能化模拟分析，如采光、通风、能耗等，指导设计优化，提升建筑性能。在施工阶段，可应用4D BIM技术，将三维模型与施工进度计划进行关联，动态模拟施工过程，优化施工计划，降低进度风险。应用5D BIM技术，在施工模拟的基础上叠加成本维度，实现工程量和成本的动态管控。利用BIM移动应用，将BIM模型与现场管理结合，指导技术交底、方案核查等，提高现场管理水平^[10]。在运维阶段，BIM可作为设施管理的数据基础，集成设备信息和运行数据，优化运维策略。BIM也可用于应急演练和处置，提高突发事件响应效率。

（三）培育数字化时代的复合型人才队伍

单纯的工程专业知识已不能完全适应数字化时代的管理需求，建筑企业亟需具备跨界整合能力的复合型人才。管理者需要具备数字化思维和数据素养，既要熟悉建筑工程管理业务，又

要理解数字技术，能够引领组织变革。项目团队成员需要掌握 BIM、大数据分析等数字化工具，并具备创新应用能力。同时，数字化协同也对团队的沟通表达能力提出了更高要求。

建筑企业可从选、育、用、留四个维度系统化培养数字化人才。在选人方面，要完善人才标准，纳入数字素养要求。可通过校企合作培养 BIM 工程师等紧缺人才，鼓励跨专业复合背景人才加入。在育人方面，要强化在职培训，开展 BIM、大数据等全员培训，设立导师制，发挥骨干人才传帮带作用。鼓励管理人才学习数字技术，支持技术人才提升管理能力。同时，要营造数字学习型组织氛围，将数字化能力作为考核激励导向。在用人方面，要为数字化人才搭建施展平台，将其部署在数字化转型的关键岗位，充分发挥才智。要建立敏捷的项目组织和弹性化的用工机制，促进多元化人才融合协作。在留人方面，要构建匹配数字化人才特点的薪酬福利体系，并搭建发展通道，畅通管理和专业双通道。营造尊重知识、崇尚创新的企业文化，激发数字人才活力。

数字化人才队伍建设需制定科学规划，分类施策，久久为功。建筑企业要以数字化转型为牵引，系统谋划人才发展。应设立专门的数字化人才发展中心，统筹资源，优化培养体系。采取自培与外引并举，多渠道充实人才队伍。要发挥骨干人才的头雁效应，以点带面，加速人才梯队建设。同时，积极探索产教融合、校企联合等培养模式，与大学共建数字化人才培养基地，开展订单式培养。依托重大工程项目，建立数字化人才实训基地，强化实战训练。对标数字化转型需求，优化知识培训内容，创新

培养方式，提升针对性和实效性。建筑企业还要树立开放心态，积极引入跨界人才，如数据分析、人工智能等领域专家，促进思想交锋，催生管理创新。此外，建筑企业间可成立数字化人才联盟，搭建共享平台，联合培养行业数字化人才，形成合力。

在建筑工程管理数字化转型的大背景下，建筑企业要坚持人才引领，将数字化人才队伍建设作为转型的先手棋。建筑企业应当制定系统性人才发展规划，多管齐下，加大投入，创新机制，多维度提升人才数字化素养，打造一支与数字化转型相适应、匹配度高的复合型人才队伍。

四、结束语

综上所述，建筑工程管理数字化转型是大势所趋，是建筑业实现高质量发展的必由之路。数字技术与管理实践的深度融合，正在重塑建筑工程管理的业态和范式。通过数据驱动的精细化管理、基于 BIM 的项目协同平台构建、数字化复合型人才培养等转型路径，建筑企业能够破除传统管理的桎梏，激发数字化时代的新动能。随着新一代信息技术的日益成熟和普及，数字化将成为建筑工程管理模式变革的主旋律。建筑业数字化转型任重道远，既是挑战，更是机遇。站在新时代的新起点，建筑企业应当树立数字化发展理念，以开放心态拥抱变革，加快构建数字化管理新型能力。以数字化转型为契机，加速建筑工程管理理论创新，为建筑业高质量发展提供持久动力。

参考文献

[1]周小寒,陈敏云,俞丹. 建筑业数字化转型背景下工程管理应用型人才培养模式改革研究 [J]. 工程管理学报, 2024, 38(3):153-158.
[2]黄小强,陈敏,华艳花. 数字化转型背景下企业信息化项目管理模式研究 [J]. 商业文化, 2022(6):67-68.
[3]张丽娜. 数字化转型对工商管理模式的影响研究 [J]. 经济技术协作信息, 2024.
[4]龚凌燕. 建筑企业数字化转型评价及动态仿真研究 [D]. 中国矿业大学, 2023.
[5]焦世安. 建筑施工技术管理的数字化转型研究与思考 [J]. 建材与装饰, 2023.
[6]雷昊,易尅煜,邓灵莉,等. 基于基建全过程的数字化管理模式研究与实践 [C] //2022 电力行业信息化年会论文集. 2023.
[7]葛又铭. 数字化转型下建筑施工企业的资金管理模式创新研究 [J]. 品牌研究, 2023(31):0016-0018.
[8]易琳. 数字化转型视角下企业人力资源管理模式的创新研究 [J]. 现代商业研究, 2024(7):143-145.
[9]宗媛. 建筑设计企业数字化转型策略研究 [J]. 智能建筑与城市信息, 2022(008):000.
[10]张雨菲. 建筑施工企业数字化转型对碳中和的影响研究 [D]. 中国矿业大学, 2023.

废弃矿山生态修复存在的问题困难及对策建议

郝鹏志

广西凤凰山银矿，广西 南宁 532700

摘 要： 废弃矿山生态修复是改善矿区生态环境、维护区域生态安全的重要举措。然而，这一过程中面临诸多挑战和困难，需采取科学、系统的对策来推进。矿产资源开发利用促进经济发展的同时，也给某市带来了较为严重的矿山生态环境问题。矿山开采活动改变了原有的地形地貌特征，大规模机械开采剩余的采场边坡，形成高陡裸露岩体，植被遭到破坏。一些金属矿产开采区土壤受到重金属污染，矿坑废水、选矿废水和固体废弃物渗滤液，导致地下水污染严重，重金属超标，威胁饮用水安全。生态修复的层次不高，修复效果差。文中着重分析了现阶段废弃矿山生态修复存在的问题，并针对存在的问题给出了对策建议。

关 键 词： 矿山生态修复；生态环境问题；治理模式；市场机制

Problems and Countermeasures of Ecological Restoration in Abandoned Mines

Hao Pengzhi

Silver Mine, Lantau Peak, Nanning, Guangxi 532700

Abstract： Ecological restoration of abandoned mines is an important measure to improve the ecological environment of mining areas and maintain regional ecological security. However, this process faces many challenges and difficulties, and scientific and systematic measures need to be taken to promote it. The development and utilization of mineral resources not only promote economic development, but also bring serious ecological and environmental problems to a certain city's mines. Mining activities have changed the original terrain and landforms, with large-scale mechanical mining of the remaining mining slopes, forming steep and exposed rock masses, and damaging vegetation. Soil in some metal mining areas is contaminated with heavy metals, including mine wastewater, beneficiation wastewater, and solid waste leachate, resulting in severe groundwater pollution and excessive heavy metal levels, posing a threat to drinking water safety. The level of ecological restoration is not high, and the restoration effect is poor. The article focuses on analyzing the problems existing in the ecological restoration of abandoned mines at the current stage, and provides countermeasures and suggestions for the existing problems.

Keywords： mine ecological restoration; eco-environmental problems; governance model; market mechanism

引言

在过去，大规模且高强度的矿产资源开发活动，有力保障了国家能源安全并推动了经济的快速发展。但这种开发模式多采用“重开采、轻保护”的粗放方式，不可避免引发了严重的生态环境问题：众多废弃矿山出现，大量历史遗留矿山随之形成，给生态环境带来沉重负担，并造成难以估量的破坏，其中无法找到恢复责任主体未治理的历史遗留矿山损毁各类土地面积规模达到700余公顷。近些年来，我国对矿山生态修复工作的重视程度日益提升。自“十三五”时期起，国家把生态文明建设推至一个全新的高度，在此背景下，废弃矿山的生态修复成为我国推进生态文明建设进程中的一项关键任务。2013年以来，某市的矿山数目处于不断下降态势，由政策性关闭的矿山以及违法开采所导致的大量遗留生态环境问题急需处理。鉴于历史遗留的废弃矿山数量颇为庞大，并且生态问题呈现出复杂性，再加上治理资金的投入存在欠缺等状况，生态修复工作面临诸多艰难险阻，矿山的综合整治与生态修复工作迫切需加速推进。为加快解决历史遗留的废弃矿山问题，自2018年以来，某市先后开展了两次全市矿山地质环境摸底调查，基本摸清了某市废弃矿山状况，为下一步开展废弃矿山生态修复奠定了坚实基础^[1]。

矿山生态修复一般是指对矿业活动受损生态系统的修复。矿山生态修复不仅是对闭坑矿山废弃地的生态环境进行修复，还包括对正在开采矿山中不再受矿业活动影响区块的生态环境的修复，如闭坑的矿段（采区）、结束开采的露采边坡段、闭库的尾矿库、堆场等，

即所谓的“边开采、边修复”。矿山生态修复旨在把因开采遭受破坏的生态系统，恢复至接近开采前的自然生态状况。矿山生态修复属于系统工程，它关联着矿山的地质地貌、水文、植被、土壤等多方面要素，并且要求岩土力学、环境学、生态学、生物学、土壤学、植物生理学、园艺学等诸多学科协同展开研究，彰显出多学科交叉融合的特性。生态环境修复和改善，是一个需要付出长期艰苦努力的过程，不可能一蹴而就，必须坚持不懈^[2]。要坚持系统观念，从生态系统整体性出发，推进山水林田湖草沙一体化保护和修复，综合治理、系统治理、源头治理。自生态文明理念提出以来，社会经济大步向前，但仍面临诸多矛盾和挑战，需要管理部门及时制定相应政策，持续打好蓝天、碧水、净土保卫战。废弃矿山生态修复是改善矿区生态环境、维护区域生态安全的重要举，但这一过程中面临诸多挑战和困难，要采取科学、系统的对策措施来推进。

一、废弃矿山生态修复存在的问题

（一）生态环境问题复杂，修复难度大

某市矿产资源埋藏较浅，绝大部分矿山采用露天开采方式，废弃矿山遗留的生态环境问题较多，废弃矿山开采形成的采场、废渣场、排土场等破坏了大量土地资源，在严重破坏原生地形地貌景观的同时，对土地资源也造成了严重压占与损毁，致使矿区植被稀少，生态环境恶化，恢复治理难度大^[3]。根据2021年某市历史遗留矿山核查成果统计，各类矿山损毁和压占土地总面积700多公顷。矿山开采活动改变了原有的地形地貌特征，大规模机械开采剩余的采场边坡，形成高陡裸露岩体，植被遭到破坏。“一面墙”式开采，越界开采、乱采滥挖等，导致了严重的环境破坏。一些金属矿产开采区土壤受到重金属污染，矿坑废水、选矿废水和固体废弃物渗滤液，导致地下水污染严重，重金属超标，威胁饮用水安全。

（二）生态修复层次不高，复垦效果差

矿山生态修复治理模式研究不够深入，缺乏对新机制、新模式的探索，出于成本低，成活率高的考虑，已实施矿山地质环境恢复治理的项目，大面积种植单一树种桉树，乡土树种使用较少，还有部分项目整治为耕地，由于土壤肥力不够，水资源短缺，人工监测管护不到位等原因，植被恢复缓慢。项目布局碎片化，未能做到“宜林则林、宜草则草、宜荒则荒”，难以实现生态系统的整体恢复^[4]。2022年以来，某市组织编制了历史遗留矿山生态修复勘查设计和矿山生态修复实施方案等修复方案，但修复方案基本上还保留在对存在地质安全隐患的矿山进行消灾除险，对废弃矿山地势相对平坦的位置采取土地复垦，对削坡、整平的区域进行植被恢复等简单的基础性修复改造，未做到后续的开发建设和产业导入。

（三）修复方式过度工程化

过度工程化的修复方式忽视了自然生态系统的自我恢复能力和再生能力，导致原有生态系统的破坏，影响生物多样性和生态平衡，部分项目在实施过程中，工程思维严重，未充分发挥自然恢复、辅助再生的作用，而是采取大面积挂网喷浆复绿、建设挡土墙、台阶式放坡等生态重建措施，造成过度治理、工程浪费等问题。例如，在某废弃矿山修复中，大面积采用挂网喷浆复绿，虽然短期内植被覆盖率提高了，但长期来看，生态系统的自我修复能力没有得到有效提升^[5]。工程化的修复方式通常需要大量的资金和资源投入，如果设计不合理或施工不当，还会导致资源浪费，以及增加后期的维护管理运营成本。

（四）社会资本参与不足，资金缺口大

某市废弃矿山生态修复主要依靠财政资金支持，但各级财政资

金紧张，市、县两级专项资金投入不足。目前该市历史遗留矿山修复方式以自然复绿为主，其他需要投入资金进行工程治理的矿山，资金筹措渠道有限，工程修复矿山进展缓慢。尽管国家在宏观层面已许可社会资本介入废弃矿山治理，但在具体的操作与推进行程中，一方面，社会资本不确定其投入能否从生态修复中获得稳定、可持续的收益，导致其参与积极性不高；另一方面，配套的制度、机制还不够完善，工程修复后土地和矿产资源经济效益产出模式还处在探索阶段，担心过度修复，致使生态修复工作面临剩余矿产资源难以妥善处置以及废弃工矿建设用地难以有效利用的困境。

二、对策建议

（一）扎实开展前期调查评价，科学确定修复的模式和导向

坚持山水林田湖草是一个生命共同体理念，根据调查评价结果，科学确定修复方向和用途，合理选择修复措施和模式，加强与相关部门的协调，充分体现当地群众的诉求。比如，在某矿山修复规划中，结合当地群众的建议，依据待修复矿山呈现出的破坏类型和破坏程度，参考受损生态系统过往的历史状态，以确定适宜本地的生态系统修复路径。银花山是柳州第一个采用“厚层基材喷播植生以及V型板槽填土植生+后期养护修复技术”治理的矿山。经过适宜性评价，治理工程主要分为危岩治理和山体绿化两个分项工程。危岩治理方面主要以人工清除、静态破碎清除、锚杆锚固、垫托、主动（被动）防护等技术为主，消除地质安全隐患。南宁园博园分布着14处露天采石场遗留下的露天废弃矿坑，存在危岩、崩塌、滑坡等地质安全隐患，因90%以上的矿山为露天矿山，遗留的矿坑多达300多个，严重破坏地形地貌，形成大量“生态疤痕”^[6]。南宁园博园针对废弃矿山开展的生态修复项目，秉持“不推山、不填湖，留存现有植被”这类贴近自然的生态修复理念与方法。依照矿坑在空间上的布局以及能方面的分区状况，把16个矿坑划分成6个矿区，进而精心塑造出极具独特魅力的矿坑花园，实现了废弃矿坑向特色景观的华丽转变。如图1矿坑花园总平面图。



> 图1 矿坑花园总平面图

（二）探索“矿山生态修复+”治理模式，激发社会资本积极性

构建“政府主导、社会参与”的历史遗留矿山生态修复体系，在严格落实国土空间用途管制等要求的前提下，探索实施“矿山生态修复+土地综合修复利用+废弃资源利用+产业融合”等修复新模式，坚持“谁修复、谁受益”，通过政策激励，吸引社会各方投入，寻求多元化、全方位资金保障^[7]。柳州市充分利用市场机制，率先探索在市区采取矿山生态修复与土地开发整理相结合模式，将市区多座采石场地质环境治理和周边土地开发整理相结合，通过收储矿山治理开发的土地进行融资，解决废弃矿山治理经费，既复绿修复了破损山体，又显著提高了土地价值。通过实施矿山生态修复，原来坑坑洼洼的矿山废弃地成为了城市蓝绿空间用地。

（三）注重发挥生态、经济、社会综合效益

着重于发挥生态、经济与社会的综合效益，协同推进矿山生态环境的恢复治理工作以及资源的综合利用进程，达成生态、经济和社会效益的多方共赢局面。于生态效益而言，针对废弃矿山实施封山育林举措，积极开展植树种草活动，以此优化区域生态环境。在社会经济效益方面，扩充可利用的土地资源与生态资源范畴，科学合理地开发运用废弃矿山资源，进而提升矿产资源所带来的收益。探索对适宜开发为农业、旅游用途的采矿废弃地进行适度开发，因地制宜发展生态农业、生态庄园、文化娱乐项目等，推动多产业融合发展，带动经济发展和群众致富^[8]。如图2 矿山修复后的效果。



图2 矿山修复后的效果

（四）充分考虑自然生态原貌，避免过度修复

矿山在完成地质环境治理后，其各类场地需达成安全稳定的状态，不能对人类与动植物构成威胁，也不可对周边环境形成污染，应与周边自然环境及景观相互适配协调，恢复土地的基本功能，结合当地实际情况推动土地的可持续运用，使区域整体生态功能得以维护与恢复。若修复工作具备可持续性，那么开展此项工作便具有价值；反之，若仅能实现短暂的绿色效果而无法持续，其价值便有待考量；特别是处于经济运行较为艰难的阶段时，更需谨慎抉择是否推进此项工作。

（五）科学选择修复方式

1. 坚持自然恢复为主：充分发挥自然恢复、辅助再生的作用，减少对工程措施的依赖，降低修复成本，提高修复效果。例如，在一些损毁较轻的区域，可以通过封山育林、禁牧等措施，让自然生态系统自行恢复。比如，在某地区的废弃矿山修复中，通过封山育林措施，经过几年时间，自然植被得到了有效恢复，生态系统功能逐步恢复。

2. 推广生态修复新技术：积极推广应用微生物修复、植物修复等生态修复新技术，提高修复效率和质量。比如，利用微生物技术改善土壤结构，提高土壤肥力，促进植物生长；在植物修复

方面，可以选择耐旱、耐贫瘠的植物品种进行种植，以适应矿山恶劣的生态环境。例如，在某地区的矿山修复项目中，采用微生物修复技术，有效改善了土壤质量，促进了植被生长^[9]。

（六）加强政策支持与引导

1. 加大资金投入力度：各级政府应加大对矿山生态修复的资金投入力度，设立专项基金，支持矿山生态修复工作。例如，在某地区的矿山修复项目中，政府设立了专项基金，为修复工作提供了充足的资金保障。

2. 完善相关政策法规：制定和完善矿山生态修复相关的政策法规，明确修复责任主体，规范修复行为，加强对修复工作的监督管理。比如，在某地区，政府出台了矿山生态修复管理办法，明确了修复责任主体和修复标准，为修复工作提供了政策保障。

（七）加强宣传引导与公众参与

1. 加强宣传教育：通过多种形式加强矿山生态修复的宣传教育，提高全民环保认知，营造全社会高度关注、积极支持、并踊跃参与矿山生态修复事业的良好氛围。例如，在某地区的矿山修复项目中，通过举办环保讲座、宣传活动等方式，提高了公众的环保意识，促进了公众参与修复工作。

2. 鼓励公众参与：建立公众参与机制，鼓励当地群众积极参与矿山生态修复工作，充分听取他们的意见和建议，提高修复工作的透明度和公众满意度^[10]。比如，在某矿山修复项目中，通过召开村民大会、设立意见箱等方式，充分听取了当地群众的意见和建议，使修复工作更加符合群众需求。

三、结论

废弃矿山生态修复工作如火如荼在各地推进，并收获了显著成效。在严格落实国土空间用途管制等要求的前提下，探索推行“矿山生态修复与土地综合整治并行+废弃资源循环利用+多元产业融合发展”的创新修复模式，旨在实现生态保护、资源利用与产业发展协同共进，是十分必要的。废弃矿山生态修复是一项长期任务，需要政府、企业和社会的共同努力，通过加强政策支持、加大资金投入，选择适宜的废弃地建设矿山遗址公园、生态示范公园、小游园等多种类型的景观绿地，不仅使废弃矿山生态环境得到治理，同时扩展了城市景观绿地体系，实现生态、经济、社会效益多赢。

参考文献

- [1] 妙超；王焱；郑海军；李江力. 秦岭南麓废弃露天矿山生态修复治理研究——以宁陕县寸儿坝花岗岩矿为例[J]. 中国非金属矿工业导刊，2022(03).
- [2] 张吉林. 锚杆及预应力锚索在土质边坡治理工程中的应用[J]. 西部资源，2019(01).
- [3] 弓晓飞；刘四丽；景丽媛；. 露天开采矿山土地复垦适宜性评价研究——以登封某铝土矿为例[J]. 矿产勘查，2022(21).
- [4] 秦凤娇. 土地复垦适宜性评价与措施[J]. 新疆有色金属，2021(05).
- [5] 周妍；陈妍；应凌霄；杨崇曜. 山水林田湖草生态保护修复技术框架研究[J]. 地学前缘，2021(04).
- [6] 于建军；周思彤；李津瑶. 露天矿排土场生态修复与植被重建技术分析[J]. 南方农机，2019(11).
- [7] 赵刚. 废弃矿山对生态环境的危害及恢复治理研究[J]. 世界有色金属，2020(05).
- [8] 吴岩. 废弃露天矿山生态修复治理研究[J]. 中国资源综合利用，2021(08).
- [9] 杨复东. 废弃矿山的生态恢复与景观营造[J]. 海峡科技与产业，2017(07).
- [10] 崔晓艳；陈学军；邹宝平. 矿山环境问题解决模式研究[J]. 山西建筑，2009(28).

光面爆破技术在隧道开挖过程中的应用与推广

白周全

四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300

摘要： 本文分析了光面爆破技术的原理、优势及在隧道施工中的应用，强调了精确控制爆破参数的重要性。文章详细介绍了设计关键参数，并以实际工程为例，验证了其在复杂地质中的效果。同时，指出了技术推广的挑战，并提出了促进技术进步和施工质量提升的策略。

关键词： 光面爆破技术；隧道开挖；爆破参数；应用案例；问题与对策

Application and Promotion of Smooth Blasting Technique in Tunnel Excavation

Bai Zhouquan

Sichuan Chuanjiao Road and Bridge Co., Ltd. Guanghan, Sichuan 618300

Abstract： This paper analyzes the principle, advantages, and application of smooth blasting technology in tunnel construction, emphasizing the importance of precise control over blasting parameters. The article introduces the key design parameters in detail and verifies its effectiveness in complex geology through practical engineering examples. Meanwhile, it points out the challenges of technology promotion and proposes strategies to promote technological progress and improve construction quality.

Keywords： smooth blasting technology; tunnel excavation; blasting parameters; application cases; problems and countermeasures

引言

光面爆破技术作为一种精确控制爆破方法，在地下工程尤其是隧道开挖中具有重要地位。本文将深入探讨光面爆破技术的原理、特点以及在隧道开挖中的具体应用，分析实际工程案例，并针对其应用推广面临的问题提出相应对策，以期为该技术的进一步发展和应用提供有益的参考。

一、光面爆破技术原理及特点

（一）技术原理剖析

光面爆破可以提高开挖效率，精确控制爆破范围和爆破力度，可以提高经济效益，被广泛应用在地下工程中。在上个世纪中，西方科学家发现炮孔装药结构对爆破效果有较大的影响，并且在之后的一些试验项目中对爆破参数进行测试，取得了较为理想的效果。之后，其他国家陆续将光面爆破应用在采矿和隧道施工等项目^[1]。

光面爆破技术通过精确选择爆破参数、装药结构和起爆顺序，旨在实现平整的开挖岩面，减少对围岩的破坏。该技术先通过掏槽眼创造临空面，辅助眼破碎岩石，而周边眼采用不耦合装药方式，最后起爆，确保爆炸能量有效作用于岩石。爆炸产生的应力波和爆生气体的作用使岩石沿炮孔方向拉裂并剥落，实现光面爆破。在硬岩隧道施工中，精确控制光爆孔参数可确保规整的岩壁，为支护和衬砌创造条件。

（二）技术特点归纳

光面爆破技术在隧道施工中显著提升了开挖精度，保护了围

岩稳定性，并提高了施工安全与经济效益。该技术通过精确控制爆破参数，有效减少了超挖，如在山岭隧道中，超挖量控制在10%以内，节约了成本并提升了效率。它对围岩的微小扰动保留了其原有强度，有利于维持稳定，减少支护受力，预防地质灾害。在软弱围岩隧道中，光面爆破显著减小了围岩变形，提升了支护安全性^[2]。

光面爆破的安全性高，减少了飞石等危险，尤其在城市地铁隧道等复杂环境中，有效控制了爆破影响范围，保护了地面建筑和地下管线。与传统爆破相比，它减少了围岩扰动，降低了坍塌风险。实际应用中，光面爆破后的围岩裂隙较少，为支护提供了良好条件。该技术还确保了高标准的成型质量，使开挖面更平整，减少了后期修正工作，节约了成本和时间。

二、光面爆破技术在隧道开挖中的关键参数确定

（一）爆破参数设计

在光面爆破技术中，精确确定炮眼间距、最小抵抗线、装药量以及炮眼深度是确保隧道开挖效果的关键。炮眼间距的设定与

岩石的性质和炸药性能紧密相关,对于坚硬完整的岩石,炮眼间距通常在50—80cm之间,而对于破碎松软的岩石,则需缩小至30—50cm。这一参数的确定,通常依据经验公式和现场试验,取值范围约为钻孔直径的10至18倍。例如,在以石灰岩为主的隧道中,若钻孔直径为40mm,炮眼间距可选取约40cm。

最小抵抗线,即从装药重心到自由面的最短距离,其取值通常为炮眼间距的1.2至1.8倍,一般介于50—80cm之间^[3]。这一参数的合理设置对于岩石的破碎程度和抛掷方向至关重要。在不同的隧道断面和围岩条件下,最小抵抗线的取值需要相应调整,以避免岩石过度破碎或破碎不完全。

装药量的精确计算对于光面爆破的成功至关重要。周边眼的装药量通常采用线装药密度来衡量,根据岩石硬度等因素,线装药密度在0.2—0.3kg/m之间调整。装药量的计算通常采用体积公式法或经验类比法,并根据现场试爆情况及时调整,以避免超挖或围岩破坏。

炮眼深度的确定则需要综合考虑隧道断面大小、施工进度和围岩状况。小断面隧道的炮眼深度一般在1.5—2.5m,而大断面隧道可能会加深至3—5m,以提升施工效率,同时也要考虑到钻孔设备的能力和爆破效果的控制难度。

（二）装药结构与起爆顺序

在光面爆破技术中,装药结构和起爆顺序的精心设计对于实现高效且安全的隧道开挖至关重要。装药结构通常采用不耦合装药和间隔装药两种形式。不耦合装药通过在较大直径的炮孔内装入较小直径的药卷,形成空气间隙,这样可以在爆炸时降低对孔壁的冲击压力,减少围岩的破坏^[4]。不耦合系数的选取通常在1.5到2.5之间,例如在石灰岩隧道中,可能会选择1.5左右的不耦合系数。而间隔装药则是通过将炸药分段并用炮泥间隔,以实现爆炸能量的均匀分布,从而提升岩石的破碎效果。

起爆顺序的安排则是先从掏槽眼开始,以此创造一个临空面,为后续的爆破提供条件。随后是辅助眼的起爆,这一步骤旨在扩大和加深掏槽效果,进一步破碎岩石。周边眼的起爆则用于形成平整的开挖轮廓。为了达到最佳的爆破效果,起爆网络通常采用微差起爆技术,通过合理设置各段雷管的延期时间,使得爆炸应力波能够相互叠加,从而实现岩石的充分破碎。特别是在周边眼的起爆中,常采用同时起爆或极小的微差起爆时间间隔,这样有利于沿着轮廓线形成平整的裂缝,同时有效控制爆破振动,确保施工的安全和效率。

（三）钻孔施工要求

钻孔施工精度对光面爆破效果影响极大。钻孔设备要依据岩石条件和隧道断面合理选择,像凿岩台车、风钻等较为常用^[5]。在钻孔时,必须严格把控炮眼的位置、角度和深度,确保各炮眼间距、排距及相对角度符合设计要求,相邻炮眼偏差要控制在规定误差范围内,角度偏差一般不宜超过3°—5°,深度偏差控制在合理区间,如±0.1m以内,否则会影响开挖面平整度和岩石破碎效果。而且钻孔过程中要及时清理炮孔内岩屑等杂物,保障装药等后续工序顺利开展,可采用激光指向仪等设备辅助钻孔定位,提高钻孔精度,同时保证钻孔孔径均匀、孔壁光滑,避免出现钻孔

弯曲、孔径变化过大等问题,施工人员还需定期维护和检查钻孔设备,确保钻头磨损在合理范围,并严格按照操作规程施工,如控制钻进速度等,以保证钻孔质量。

（四）炸药类型

炸药类型应选用低爆速、低密度、高威力的炸药,如乳化炸药,其爆炸冲击波相对柔和,对围岩破坏小,有利于光面形成;雷管则要选择高精度的毫秒延期雷管,根据起爆顺序合理选用不同段别,确保各炮孔按预定时间依次起爆,达到理想爆破效果^[6]。爆破后还需对开挖轮廓面平整度、半孔率以及超挖和欠挖情况进行检测和控制,轮廓面平整度要求平整度控制在±15cm以内,硬岩中半孔率一般应达80%以上,软岩中不低于50%,超挖率要控制在设计允许范围内,若出现问题需及时调整爆破参数及施工操作,从而保障光面爆破技术在隧道开挖中的有效实施,确保隧道施工的质量与安全,提高施工效率和经济效益。

三、光面爆破技术在具体隧道工程中的应用案例分析

（一）工程概况介绍

峨眉至汉源高速公路大峡谷隧道为特长隧道,左线长12105m,右线长12146m,是本项目的控制性工程。隧道地质条件复杂,穿越多种地层,如板岩、变质砂岩、流纹岩、白云岩等,且受多条大型断层影响,存在岩爆、大变形、涌突水等风险。

（二）光面爆破技术应用情况

隧道爆破设计的核心在于精密的炮眼布置、精确的炸药单耗、合理的装药结构以及严格的施工工艺,这些要素共同确保了爆破作业的安全、高效与质量。周边眼沿隧道轮廓线布置,间距保持在30—50cm,采用1.5—2.0的不耦合系数装药,以减少对围岩的冲击^[7]。在Ⅲ级围岩中,周边眼间距通常为40cm。掏槽眼位于开挖中心,深度比其他炮眼深10—20cm,确保有效掏槽。辅助眼均匀分布在掏槽眼与周边眼之间,间距50—80cm,以扩大自由面。

炸药单耗根据围岩等级设定,如Ⅴ级围岩0.7—0.9kg/m³,Ⅳ级围岩0.9—1.1kg/m³,Ⅲ级围岩1.1—1.3kg/m³,具体数值通过计算和现场试验确定。装药结构上,周边眼采用间隔装药,掏槽眼和辅助眼则连续装药,确保爆破效果。施工工艺方面,高精度钻孔确保炮眼位置和角度精准,严格控制误差。装药与连线严格按设计执行,使用非电毫秒雷管起爆网络,起爆前进行安全检查。

质量控制措施包括优化爆破参数,提高周边眼痕迹率,控制超欠挖在规定范围内^[8]。安全防护措施涵盖提供个人防护装备,加强安全培训,并在爆破前将设备撤离至安全区域。

（三）应用效果

光面爆破技术在隧道施工中的应用,显著提升了围岩稳定性,加快了施工进度,并有效降低了工程成本。该技术通过使隧道开挖轮廓更加平整,减少了对围岩的扰动,从而有效控制了围岩的变形和坍塌。在施工监测中,围岩变形量的明显减小和支护

结构受力状态的改善，特别是在不良地质地段如断层破碎带，围岩自稳能力的保持，大幅减少了支护结构的加固工作量，提高了施工安全性。同时，光面爆破技术减少了超欠挖处理的需求，提升了钻孔和爆破效率，使得施工进度加快。例如，在大峡谷隧道施工中，单循环进尺提高了10% ~ 20%，月进尺增加，施工周期相应缩短。此外，由于超欠挖的减少，混凝土衬砌的超方量得到控制，节约了材料成本，同时减少了支护材料的消耗和设备维修费用。在左线某段施工中，光面爆破技术的应用使得超欠挖处理费用降低了约30%，支护材料消耗减少了约20%，从而整体降低了工程成本^[9]。

（四）经验总结

光面爆破技术的有效应用依赖于设计优化、施工精准控制和监测反馈的协同。设计阶段需根据地质和断面尺寸进行爆破设计，施工中通过试验和监测数据调整爆破参数，以适应不同围岩条件。如在峡谷隧道施工中，调整炮眼间距和炸药单耗等。施工控制要求严格，包括精确钻孔、装药和起爆，强化人员培训和操作技能。监测反馈通过全站仪等设备实时监测爆破效果和围岩变形，及时调整参数，确保施工安全与质量。

四、光面爆破技术应用推广面临的问题与对策

（一）面临的技术难题

光面爆破技术在隧道施工中面临诸多挑战。复杂地质条件下，如遇断层、破碎带、岩溶等，岩体特性多变，地应力不均易引发岩爆、大变形，地下水还会增加爆破难度、影响炸药性能，使得统一爆破参数难以制定。爆破参数确定复杂，受多种因素影响，因实际条件限制难以充分试验计算，准确性难以保证。施工中，钻孔精度受设备、人员和环境制约，难以达标，装药连线操作复杂，对药包位置、药量和起爆顺序要求高^[10]。爆破器材性能有限，炸药在能量、抗水、安全等方面有不足，雷管起爆精度和可靠性待提升。

安全环保方面，爆破振动需严控以保护周边设施，而爆破产生的粉尘和有害气体污染严重，治理困难，威胁施工人员健康。总之，光面爆破技术在隧道施工中，需攻克地质复杂、参数优化、施工精度、器材性能及安全环保等诸多难题，才能更好地发挥其作用。

（二）应对的策略探讨

地质勘察与分析层面，应集成地质雷达、地震波层析成像、钻孔窥视等技术开展精细勘察，施工中利用全站仪、位移传感器实时监测围岩与地应力变化，建立地质信息数据库和动态反馈机制，为爆破设计施工筑牢基础。爆破参数设计优化方面，运用LS-DYNA、ANSYS等软件模拟分析不同参数组合效果，结合现场试验确定最佳参数，同时开发智能化系统，依据地质、隧道情况自动推荐并动态调整参数。

施工精度控制手段提升上，研发新型高精度钻孔设备，如自动定位凿岩台车，升级现有设备，增设精度控制装置，制定装药连线标准化流程，加强人员培训考核与现场监督。安全与环保措施强化方面，深入研究爆破振动规律和预测模型，研发减振爆破技术与材料，改进通风系统设计，采用混合式通风等，研发净化设备，优化爆破工艺，如水封爆破、预湿岩石等，减少粉尘和有害气体，推动光面爆破技术有效应用与广泛推广。

五、结束语

光面爆破技术在隧道施工中已证明其高效、安全和经济的优势，但面临地质复杂性、技术优化、精度控制、爆破器材性能和安全环保等挑战。通过地质勘察、爆破设计优化、施工精度提升和安全环保措施加强，有望解决这些问题，推动技术进步。随着科技进步和经验积累，光面爆破将在地下工程中发挥更大作用，助力基础设施建设。工程技术人员应持续关注并创新，以最大化技术价值和社会效益。

参考文献

[1] 吴玮琛. 火成岩中复杂结构隧道水压光面爆破理论与控制技术 [D]. 太原理工大学, 2023.DOI:10.27352/d.cnki.gylgu.2023.001743.
[2] 林志灵. 隧道掘进光面爆破关键技术参数的确定及应用分析 [J]. 福建交通科技, 2023,(12):55-59.
[3] 高原. 矿山法隧道光面爆破技术及超挖控制方法 [J]. 工程机械与维修, 2023,(06):109-111.
[4] 熊春耀. 光面爆破技术在隧道施工中的标准化应用 [J]. 品牌与标准化, 2023,(06):114-116.
[5] 冯畅, 吴室谕, 袁正兵. 大断面软弱围岩隧道光面爆破技术研究 [J]. 现代交通技术, 2023,20(04):21-26.
[6] 武兆弛, 高远, 陶峰, 等. 聚能水压光面爆破在隧道掘进中的实用技术 [J]. 铁路工程技术与经济, 2023,38(04):24-29+34.
[7] 安自学. 高速公路隧道工程建设中的光面爆破施工技术 [J]. 交通世界, 2023,(20):141-143.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2023.20.033.
[8] 袁丁. 光面爆破技术在碎裂岩石层隧道开挖中的应用分析 [J]. 石材, 2023,(07):138-140.DOI:10.14030/j.cnki.scaa.2023.0303.
[9] 关培山. 高原铁路隧道岩爆施工技术研究 [J]. 铁道建筑技术, 2023,(05):180-183+188.
[10] 祝铭洋. 高速公路隧道光面爆破施工技术的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2023,(14):130-132.

人工挖孔桩施工技术在结构纠偏中的运用

蒋晓辉

四川鼎能鑫盛达建设工程有限责任公司，四川 成都 610066

摘 要： 本文中既有砌体结构以小区住宅建筑为例，地基发生了明显不均匀沉降，导致上部结构发生了倾斜，为了保证建筑纠偏复位作业的正常进行，需要先在建筑底部引入人工挖孔桩作为纠偏复位作业的承力构件，结合实地分析与工程应用对比，采用水磨钻施工技术，总结出人工挖孔桩施工的经验，提高承重能力，保障人工挖孔桩施工安全。

关 键 词： 既有砌体结构；人工挖孔桩；水磨钻施工；纠偏复位

The Application of Manual Digging Pile Construction Technology in Structural Correction

Jiang Xiaohui

Sichuan Dingneng Xinshengda Construction Engineering Co., LTD. Chengdu, Sichuan 610066

Abstract： in this paper both the masonry structure in residential buildings as an example, the foundation occurred obvious uneven settlement, lead to the superstructure tilt, in order to ensure the normal construction rectifying reset operation, need first at the bottom of the artificial digging pile as rectifying reset construction of bearing components, combined with the field analysis and engineering application contrast, using water grinding drilling construction technology, summarizes the experience of artificial digging pile construction, improve the bearing capacity, ensure the safety of artificial digging pile construction.

Keywords： existing masonry structure; manual hole pile; water grinding drill construction; correction

传统砌体结构建筑物由于依赖天然地基或采用较为简单的复合地基技术，建筑物在使用过程中面临着不均匀沉降的问题，导致建筑结构发生严重损害。在轻微的情况下，表现为墙体裂缝；在严重情况下，则导致整栋建筑的坍塌。如果对这种沉降现象视而不见，不仅会对人们的生命安全构成严重威胁，也会引发巨大的财产损失，一旦选择通过推倒重建的方式来解决，经济成本将是极其高昂的。为了保障纠偏复位作业的安全进行，采用人工挖孔桩进行基础加固并作为纠偏复位作业的承力构件，能够有效地提高施工安全性、延长房屋使用寿命。

一、工程概况

既有砌体结构以小区住宅建筑物为例，六层砖混现浇结构，总高19.2m，总面积约2543.94m²，最大沉降量达442mm。地基发生明显不均匀沉降，导致上部结构发生倾斜。根据区域地质分析，地基由旧房条石基础、人工填土、煤矸石、粉质粘土、地域特有火山砾石、泥夹卵石与基岩组成，填土厚薄不一，粉质粘土随基岩面起伏不大，在场地普遍分布；基岩为砂岩，呈中风化，埋深起伏较大。场地为典型的填土混合地基，综合判定场地属不均匀地基，地基承载高负载建筑物。已有地基发生不均匀沉降，面临着承重压力大、坍塌风险高等问题。为保证建筑纠偏复位作业的安全施工，在建筑底部引入人工挖孔桩，利用人工挖孔桩作为纠偏复位作业的承力构件^{[1][2]}，人工挖孔桩施工主要采用水磨钻施工技术、边挖孔边护壁的方式，使人工挖孔桩具有较高的承重能力，用于支撑建筑物，保障人工挖孔桩施工安全，在人工挖孔桩施工过程中避免坍塌。

二、人工挖孔桩深度计算

墙身侧压力是人工挖土桩施工过程中的临时构件，主要由三部分组成：土体重量形成的侧压力、地下水压力和地面荷载引起的附加应力。但根据普拉茨的围岩压力理论，一般来说，当深度增加到一定深度3Xh₁后，土壁的横向压力基本接近于常数。这种现象被称为“拱效应”，这也是普拉茨的自然平衡拱理论。由于“土拱”是由平孔条件建立的，在人工挖土桩的竖向施工中，刺穿拱体的竖向孔削弱了全拱的效果。其中 h₁ 的计算过程如下：

$$h_1 = 1.5 \times (b + h \tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)) / f_k \quad (1)$$

式中：h₁表示人工挖孔桩深度，单位为 m；b表示护壁外径半径，单位为 m；φ表示内摩擦角，本项目中取值为30°；表示岩土的坚固系数，此处取为0.6。

根据现场护壁外径半径计算，人工挖孔桩深度 h₁ 最终设定值为5.69m。

三、人工挖孔桩施工工艺及技术要点

在建筑物下方定桩位、挖设人工挖孔桩，人工挖孔桩施工过程中采用水磨钻施工技术、边挖孔边护壁的方式，使人工挖孔桩具有较高的承重能力，用于支撑建筑物、保障人工挖孔桩施工安全；承重梁与建筑物底部墙体空隙用托换梁妥善连接，建筑物恢复到正常的垂直位置，完成既有砌体结构的纠偏复位工作。

（一）桩位定线

布置施工测量控制网，并根据设计图纸确定桩井身位置和标高参考点。放样时，将300~500mm的木桩或铁钉打入地下，桩孔中心标记外露高度50~80mm，并喷红漆警告。中心偏差不得大于50mm。

（二）人工挖孔桩施工

开挖原则采用水磨钻施工技术，同时隔桩开挖、边挖边护^[3]。水磨钻施工技术工艺流程路线见图1。

首先沿桩基孔墙内环布置几个芯点，设置芯圆，芯圆直径150mm，将芯圆切割至锁的内壁，将芯圆相互切割。每个岩芯的岩芯依次钻孔，岩芯距外围岩芯高约600mm。将外周岩芯取完后桩芯体岩外围便形成一个环形临空面。

然后钻孔桩基孔的中间岩石，并沿着桩基孔的半径钻孔岩心。桩芯质量分为三个等份，各占桩芯质量的1/3。在桩芯岩上使用电钻，然后将桩岩分成六个等份，便于岩石破裂。沿桩基径向电钻钻孔，用大锤敲击钢楔，使岩体获得水平冲击力。在水平冲击力的作用下，岩石沿铅锤表面拉动，底部发生水平剪切断裂。岩体依次划分，直到岩层的堆心完全破碎。

沿着挖好的孔壁内圈打入钢管，对孔壁侧边进行加固，保障孔壁内壁不产生坍塌。在土层开挖中，采用挑、铲、铲等分层开挖，当硬土或岩层用锤、钻、或风镐破碎时，采用水磨钻施工技术挖至硬岩层。开挖顺序为先挖中间后挖周边，孔内挖出土石方装入吊桶，采用卷扬机提升运输到地面，堆积到指定地点^[4]。

取出第一阶段的岩芯后，往复采用水磨钻施工技术挖取岩芯，沿着挖好的孔壁内圈打入钢管护臂，继续向下开挖，每阶段取出岩芯高约600mm。相邻的上下阶段之间支撑有十字支架，避免上方掉落物品。

（三）混凝土护壁

沿着挖好的孔壁内圈打入钢管，进行混凝土护壁的施工，在墙体混凝土上加粗圆钢筋，配置规格：周向配筋 $\phi 8$ ，间距150mm；纵向钢筋 $\phi 8$ ，间距150mm；上、下墙体钢筋 $>400\text{mm}$ 。环形筋、纵向腱和连接腱、纵向腱和连接腱。采用最终的钢模板支架，模板一般由四件组成，每段高1米，每段由两件组装件组成。浇筑混凝土时，拆除上部，支撑下部，自上至下旋转。带有螺栓和U形卡，没有额外的支撑来浇筑混凝土和下部开挖。当第一个孔挖至1.0m深时，浇筑20cm C25混凝土锁，锁的顶面应高于原地面30cm，防止土壤和杂物落入井内，防止地表水流入井内。混凝土浇筑24h，墙体强度不小于5 Mpa。继续开挖，混凝土采用机械搅拌，铲斗运输人工浇筑，钢筋夯实。为了使保护壁稳定，便于下部混凝土的浇筑，在开孔时，孔壁上部

混凝土的内径略大于下部混凝土的外径。墙体上口直径与设计桩直径相同，下口直径比桩基设计大5 cm，使土与下墙共同支撑保护墙混凝土。若遇不良地质孔壁易坍塌时，每节护壁高度减至0.3 ~ 0.5m^[5]。

当孔桩挖至5m以下时，井内设置半圆形钢保护板，随开挖深度悬挂在作业人员上方约2m处。吊装时，上下操作人员应稳定、垂直，操作人员应站在安全板下。

每一段墙完成后，必须在孔内使用“十”线，然后通过孔的中心检查墙的内径和垂直度，确保同水平墙直径的极差不大于50mm混凝土护臂支撑如图2所示。

（四）钢筋笼的制作与安装

光圆钢筋、带肋钢筋应符合《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》的规定。钢筋或钢骨架中使用的结构钢应符合碳素结构钢中 Q235 钢的性能。

（1）钢筋笼制作

为保证钢筋有足够的保护层厚度，每隔2m在钢筋笼的钢筋周围设置4根定位钢筋。定位钢筋用钢筋箍筋焊接牢固，主钢筋用直螺纹连接^[6]。

（2）钢筋笼安装

钢筋笼在堆放和搬运时保持直线，防止扭曲和弯曲变形。采用两点提升的方法进行提升。为防止钢架在运输或放置过程中变形，钢筋的间距为2m。钢筋笼。将钢筋放入孔内后，保持垂直状态，轻轻地与孔的位置对齐。

钢筋笼采用直线连接，下一长度前采用钢束，用人工牵引电缆风绳控制吊装，然后用液压管钳连接测管挤压头；根据设计深度和位置放置钢筋笼，将钢束通过钢筋孔固定，确保钢筋的正确定位，避免钢筋下沉，浇筑混凝土漂浮。

钢骨架制作吊装允许偏差：主钢筋间距 $\pm 10\text{mm}$ ；箍筋间距 $\pm 20\text{mm}$ ；骨架外径 $\pm 10\text{mm}$ ；骨架倾角 $\pm 0.5\%$ ；骨架保护层厚度 $\pm 20\text{mm}$ ；骨架中心平面位置20mm；骨架顶标高 $\pm 20\text{mm}$ 。

（五）混凝土灌注

混凝土浇筑采用弦柱运输。混凝土从孔处设置的弦柱送入孔底，弦管底部出口距离混凝土施工表面不超过2m，防止出现混凝土偏析现象。当孔桩中渗水较大时，桩体混凝土浇筑采用水下混凝土浇筑。串筒与孔口支架及串筒与串筒之间应连接牢固，防止串筒坠落。桩基采用 C30 混凝土，混凝土在拌合站集中拌合，混凝土到达施工现场应由实验员测试混凝土坍落度及和易性。

浇筑前，清除孔洞底部的水，使水深小于5cm。立即用混凝土浇筑速度浇筑混凝土，防止水渗入孔内。浇筑混凝土采用人工插入式振捣器夯实，一次连续浇筑。混凝土分层浇筑，分层厚度控制在30cm。使用振捣器时，严禁与钢筋、模板碰撞。振动器的振动深度一般不超过杆长度的2/3~2/4倍。振动时，振动应快速插入，慢拉，插入点排列均匀，逐点顺序移动，振动均匀。运动间距不大于振动作用半径的1.5倍。振动器棒应插入到5~10cm的下部混凝土中，并与模板保持5~10cm的距离。每个振动部分的持续时间应为20~30s，直到混凝土的振动被压实，以防止振动泄漏，

直到设计的桩顶标高为30cm。当孔底地下水入渗较大，参考值大于6mm/min时，视为水桩，采用导管法灌注。

四、常见问题及预防措施

（1）孔内空气安全措施

在一些地质条件下，如地下腐植土层或煤层，它可能产生一氧化碳、气体等有毒气体，直接危及操作人员的安全。针对此情况，每班开始前，必须检测地下有毒有害气体。当孔深超过6m时，应送至地下。风管直径不小于10cm，风量不小于25L/S，风管出口距离操作者不大于2m。

（2）孔壁坍塌的预防措施

水磨钻施工遇到流砂、泥层、破碎岩层或裂隙时，易发生孔壁坍塌。必须合理控制钻孔深度，根据设计方案保护钢楔墙，加固孔壁，避免影响桩基孔壁的稳定性。相邻的上下阶段之间支撑有十字支架，避免上方掉落物品。在水磨钻钻孔施工过程中，安排专人观察墙体，监测是否有裂缝，及时报告裂缝，找出裂缝的原因，并采取有效措施解决，确保施工安全^[7]。

（3）灌注混凝土安全措施

灌注混凝土过程中，需要控制混凝土的均匀性和密实度，防止出现局部缺陷。针对上述问题，主要措施有：选用优质的砂石，使用前必须根据称重的砂石混合配料进行取样，以保证混凝土的质量。混凝土的配合比应符合要求，只有经过验证后才能使用。当发现墙有蜂窝时，应及时加固。当情况严重时，应再次返工，以防止事故发生。混凝土浇筑高度是在混凝土浇筑过程中进行测量的。对于混凝土的浇筑，浇筑时间、混凝土表面深度、管道埋深、管道拆除及异常现象等，应由专人记录^[8]。

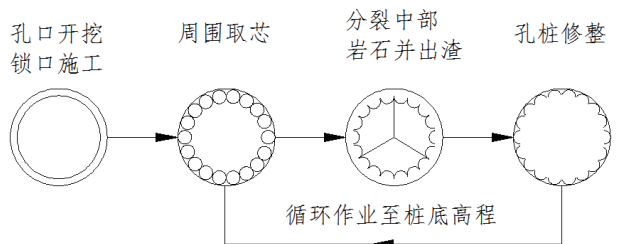
五、技术效益

污染小，噪音小，施工效率高。人工挖孔桩施工技术采用人工挖掘的方式，避免了机械打桩产生的噪声和扬尘等污染，对周围环境的影响较小；水磨钻施工技术的优势在于操作简单便捷和施工成本较低、灵活性更高，能够适应各种复杂的施工环境，周围建筑物较近、不具备爆破条件等挖孔桩施工，本方案无须复杂的机械设备和先进的施工技术支持，只需简单的施工工具及人工

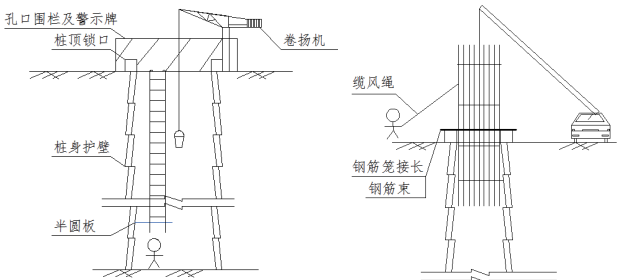
劳力的助力，施工对材料和工具的需求量相对较小，可以有效降低整个建筑工程的施工风险，桩基的承载力和稳定性可以通过精细的施工控制和合理的桩基设计，保证桩基的稳定和可靠；即使在复杂的地质条件下，人工挖土桩的施工技术也能有效处理桩基础的沉降和变形问题，从而保证建筑物的稳定和安全^[9]。继续深化技术研究，进行地质条件、施工方案、施工设备等方面的技术研究，以提高施工效率和质量；优化施工工艺，通过实验和现场测试，不断优化施工工艺，提高施工速度和降低成本；制定安全规范，制定和更新施工安全规范，确保所有施工活动符合安全标准，减少事故发生，有利于增加人工挖孔桩的牢固性能和使用寿命^[10]。

六、结语

既有砌体结构发生了明显不均匀沉降，建筑底部引入人工挖孔桩，利用人工挖孔桩作为纠偏复位作业的承力构件，开挖原则采用水磨钻施工技术，隔桩开挖、边挖边护的方式，在人工挖孔桩在施工过程中，能够有效防止孔壁坍塌掉渣，保障施工安全，确保桩基的质量和性能满足设计要求，具有良好的可操作性和经济效益等优势，有利于为后续同类型项目施工提供指导与支持。



> 图1 挖孔施工过程



> 图2 混凝土护臂支撑

> 图3 钢筋笼的安装

参考文献

[1] 张相平, 乔会丹, 曹江, 等. 超高层建筑超大直径嵌岩扩底人工挖孔桩施工技术[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(23): 57-59.
[2] 罗文. 人工挖孔桩水磨钻施工技术研究[J]. 交通世界, 2021(09) 94-95.
[3] 刘磊. 探讨建筑工程中人工挖孔桩护壁施工技术的运用[J]. 中国建筑装饰装修, 2022, (24): 171-173.
[4] 韩圆圆. 临近铁路隧道桩基水磨钻施工技术[J]. 流体测量与控制, 2023, 4(05): 61-65.
[5] 原亚波, 李晓慧. 复杂岩溶地质条件下高层建筑地基处理的技术研究[J]. 江西建材, 2022, (07): 180-181+184.
[6] 刘迪明. 有限高度下人工挖孔桩钢筋笼节段施工技术研究[J]. 工程设计与设计, 2023, (11): 232-234. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.06.072.
[7] 李晓波. 人工挖孔桩在工程中的应用实践[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(15) 128-130.
[8] 谭丹. 桥梁工程人工挖孔桩施工技术[J]. 四川建材, 2023(02) 107-108.
[9] 徐磊; 于健伟; 黄源. 人工挖孔桩施工技术要点与质量控制[J]. 中国建筑金属结构, 2022(03) 142-143.
[10] 代金鑫; 王菲; 陈浩; 齐世超. 山区砾岩地质紧邻既有物桥梁桩基水磨钻施工技术[J]. 建筑技术, 2023(18) 2266-2268.

模块化装配式钢结构房屋建筑施工技术研究

陈强

中交一公局第一工程有限公司，北京 100010

摘 要： 随着建筑需求的不断增长，模块化装配式钢结构建筑作为一种高效、环保的施工技术逐渐受到关注。本研究探讨了模块化装配式钢结构房屋建筑的特点、优势、应用、面临的挑战以及优化方案。通过对比传统施工工艺，分析了模块化装配式钢结构建筑在未来建筑行业中的前景，并提出了推广的关键要素和策略。

关 键 词： 模块化建筑；装配式钢结构；施工技术；建筑工业化；绿色建筑

Research on the Construction Technology of Modular Prefabricated Steel Structure Building

Chen Qiang

First Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd. Beijing 100010

Abstract： With the increasing demand of building, modular prefabricated steel structure building, as an efficient and environmentally friendly construction technology, has gradually attracted attention. This study discusses the characteristics, advantages, applications, challenges and optimization schemes of modular prefabricated steel structure buildings. By comparing the traditional building technology, the prospect of modular prefabricated steel structure building in the future construction industry is analyzed, and the key elements and strategies for promotion are put forward.

Keywords： modular building; prefabricated steel structure; construction technology; construction industrialization; green building

模块化装配式钢结构建筑是一种基于工厂预制和现场装配的建筑模式，具有施工速度快、质量可控、环保节能等优点。本研究旨在探讨模块化装配式钢结构房屋建筑施工技术，分析其特点、优势及实际应用，并针对存在的挑战提出优化方案，以促进建筑行业的可持续发展。

一、模块化装配式钢结构建筑的特点

（一）高度预制化

模块化装配式钢结构建筑将建筑结构进行细致拆分，以模块零件的形式在工厂内进行高效预制。这一过程充分利用了现代化的生产设备和技术，使得各个模块在尺寸、规格和质量上都达到了极高的精确度。通过高度预制化，施工现场只需进行简单的组装和连接，从而大幅减少了现场施工时间和人力成本。同时，由于模块在工厂内完成制作，还避免了现场施工中的天气、环境等不确定因素对建筑质量的影响，进一步提升了建筑的整体品质和施工效率。这种高度预制化的生产方式，使得模块化装配式钢结构建筑在快速建造、降低成本和保证质量方面具有显著优势^[1]。

（二）灵活性与可拆装性

模块化装配式钢结构建筑的另一大特点是其高度的灵活性与可拆装性。这种建筑模式采用模块化设计，使得建筑空间和布局可以根据实际需求进行灵活调整。例如，当建筑功能发生变化

时，只需更换或重新组合相应的模块，即可轻松实现空间的重新规划和布局。此外，由于模块之间采用标准化的连接方式，使得整个建筑在需要时能够方便地进行拆装和迁移。这种特性不仅提高了建筑的适应性，使其能够更好地满足不断变化的使用需求，同时也增强了建筑的可持续性，延长了建筑的使用寿命，减少了资源浪费。因此，模块化装配式钢结构建筑在灵活性和可拆装性方面具有显著优势。

（三）标准化与系列化

模块化装配式钢结构建筑强调标准化设计与生产流程的应用，这是其另一个核心特点。通过标准化设计，建筑构件的尺寸、规格和性能均得到统一规定，确保了构件的通用性和互换性。这不仅简化了生产流程，提高了生产效率，还有利于实现大规模生产，降低成本。同时，标准化设计也使得构件的采购、运输和存储变得更加便捷，为高效施工提供了有力保障。此外，系列化生产模式使得不同功能和用途的建筑构件能够有序地组合在一起，满足多样化的建筑需求。因此，标准化与系列化不仅提升了模块化装配式钢结构建筑的生产效率，也为其在市场上的广泛

作者简介：姓名：陈强（1988.08-），男，汉族，山西省大同市人，本科，中级，研究方向：房屋建筑施工方向。

应用奠定了坚实基础^[2]。

二、模块化装配式钢结构建筑的优势

（一）施工速度快

模块化装配式钢结构建筑在施工速度方面具有显著优势。由于建筑的大部分构件，如梁、柱、墙板等，均在工厂内预制完成，现场只需进行简单的组装和连接。这种工厂预制、现场组装的方式，大幅缩短了施工周期，减少了现场施工的工作量和时间。同时，由于工厂生产环境稳定，构件质量易于控制，也减少了因质量问题导致的施工延误。因此，模块化装配式钢结构建筑能够更快地投入使用，提高了施工效率，为客户节约了宝贵的时间成本^[3]。这种施工速度上的优势，使得模块化装配式钢结构建筑在紧急救援、临时设施建设等领域具有广泛的应用前景。

（二）质量可控

模块化装配式钢结构建筑在质量控制方面具有显著优势。工厂预制和严格的检验流程确保了每个构件的质量一致性，从源头上保障了建筑的整体质量。在工厂内，构件经过精密的加工和严格的质量检测，能够确保尺寸准确、性能稳定。相较于传统施工方式，现场施工中的误差和问题得到了大幅减少。此外，由于构件在工厂内完成制作，还避免了现场施工中的环境因素对构件质量的潜在影响。因此，模块化装配式钢结构建筑在质量上具有更高的可靠性和稳定性，能够满足客户对高品质建筑的需求。这种质量可控的优势，使得模块化装配式钢结构建筑在高层建筑、大型公共设施等领域具有广泛的应用潜力^[4]。

（三）环保节能

模块化装配式钢结构建筑在环保节能方面展现出了独特的优势。在生产过程中，工厂化的生产方式能够充分利用资源，减少材料浪费，同时降低噪音、粉尘等环境污染物的排放，符合绿色建筑和可持续发展的理念。此外，钢结构材料本身具有高强度、轻质、可回收等特点，有利于资源的循环利用和减少建筑垃圾的产生。在建筑施工和使用过程中，模块化装配式钢结构建筑还能够通过优化设计和采用高效节能技术，提高建筑的能效，减少能源消耗和碳排放。因此，模块化装配式钢结构建筑在环保节能方面具有显著优势，是未来建筑发展的重要方向之一。

三、模块化装配式钢结构建筑的应用

（一）住宅建筑

模块化装配式钢结构建筑在住宅建筑领域展现出了巨大的应用潜力。随着城市化进程的加速，人们对住房的需求日益增长，而模块化装配式钢结构建筑以其快速、高效的建设方式，成为解决住房问题的重要途径。通过工厂预制和现场组装，模块化装配式钢结构住宅能够在短时间内大量建设，有效缓解了住房供需矛盾。同时，这种建筑方式还提高了住宅的建造质量，增强了住宅的抗震、抗风等性能，为居民提供了更加安全、舒适的居住环境。因此，模块化装配式钢结构住宅在城市更新、灾后重建等领

域具有广泛的应用前景^[5]。

（二）商业建筑

在商业建筑领域，模块化装配式钢结构建筑以其灵活的空间划分和高效的建造方式，赢得了市场的广泛认可。通过组合或拆分单元模块，模块化装配式钢结构建筑能够轻松实现商业空间的多样化和个性化设计，满足不同商业活动的需求。无论是购物中心、办公楼还是餐饮娱乐设施，模块化装配式钢结构建筑都能够提供定制化的解决方案。此外，这种建筑方式还缩短了建设周期，降低了商业成本，提高了商业建筑的运营效率。因此，模块化装配式钢结构建筑在商业建筑领域具有广阔的应用前景，为商业发展注入了新的活力。

（三）公共设施

模块化装配式钢结构建筑在公共设施建设领域同样发挥着重要作用。对于学校、医院等关键性公共设施，快速搭建和投入使用至关重要。模块化装配式钢结构建筑凭借其高效的建设流程，能够在短时间内完成搭建，迅速满足紧急情况下的需求。无论是应对自然灾害后的快速重建，还是城市化进程中新增设施的建设，模块化装配式钢结构建筑都能够提供强有力的支持。同时，这种建筑方式还确保了公共设施的建造质量和安全性，为公众提供了更加可靠的服务。因此，模块化装配式钢结构建筑在公共设施建设领域具有不可替代的优势^[6]。

四、模块化装配式钢结构建筑面临的挑战

（一）运输与搬运挑战

模块化装配式钢结构建筑在运输与搬运方面面临诸多挑战。由于钢结构构件通常重量大、体积大，需要使用特殊的大型运输设备和吊装工具进行搬运和运输。这不仅增加了运输成本，还带来了安全风险。在运输过程中，需要确保构件的稳定性和安全性，避免在运输途中发生损坏或事故。同时，对于特殊地形的运输，还需要制定详细的运输方案和安全措施，确保构件能够顺利到达施工现场。因此，如何有效应对运输与搬运挑战，是模块化装配式钢结构建筑发展中需要解决的重要问题。

（二）现场组装挑战

模块化装配式钢结构建筑的现场组装环节同样充满挑战。由于构件在工厂预制完成，现场组装需要极高的精确度和配合度。施工团队需要具备丰富的经验和先进的技术水平，以确保构件能够准确无误地组装在一起。同时，现场组装还需要进行细致的管理和协调，包括施工进度的控制、人员分工的安排以及安全措施的实施等。任何环节的疏忽都可能导致组装出现问题，影响建筑的整体质量和进度。因此，提高施工团队的技术水平和管理能力，是应对现场组装挑战的关键所在^[7]。

（三）设计与标准化挑战

模块化装配式钢结构建筑在设计和标准化方面仍面临一定的挑战。尽管模块化设计带来了诸多优势，但目前市场上仍存在设计单一、缺乏创新的问题。同时，由于模块化装配式钢结构建筑的发展时间相对较短，相关的规范和标准尚未完全建立或完善。

这导致在实际应用中，设计和施工团队可能面临无据可依或规范不明确的情况，增加了项目的复杂性和不确定性。因此，加强模块化装配式钢结构建筑的设计创新和标准化建设，是推动其进一步发展的方向。通过不断完善相关规范和标准，提高设计和施工的质量水平，为模块化装配式钢结构建筑的广泛应用提供有力保障^[9]。

五、模块化装配式钢结构建筑优化方案

（一）优化运输与搬运

针对模块化装配式钢结构建筑在运输与搬运方面面临的挑战，可以采取一系列优化措施。首先，应使用专业的运输设备和吊装工具进行搬运和运输，这些设备通常具有强大的承载能力和精确的操控性能，能够确保构件在运输过程中的稳定性和安全性。其次，加强包装和防震措施也是至关重要的。通过对构件进行专业的包装，如使用泡沫、气垫等材料进行填充和保护，可以有效减少在运输过程中因碰撞或震动而导致的损坏。同时，还可以采用先进的防震技术，如减震器、缓冲垫等，进一步降低构件在运输过程中的风险。通过这些优化措施的实施，可以显著提升模块化装配式钢结构建筑在运输与搬运方面的效率和安全性^[9]。

（二）提高现场组装效率

在模块化装配式钢结构建筑的施工过程中，现场组装效率的提升对于整个项目的进度和成本控制至关重要。为此，可以从以下几个方面着手：培训施工人员是基础。通过组织定期的培训和技能提升课程，施工人员可以掌握更先进的组装技术和操作规范，从而提高工作效率。这些培训课程可以涵盖从基础理论知识到实际操作技能的全方位内容，确保施工人员在实际工作中能够准确、快速地完成组装任务。数字化技术的引入同样不可或缺。利用三维建模、虚拟现实等先进技术，可以在施工前对组装过程进行模拟和预演，从而提前发现并解决潜在的问题。这种数字化

的方式不仅可以减少施工过程中的误差和返工，还可以提高组装的精度和速度，确保建筑的整体质量。此外，自动化设备的运用也是提高现场组装效率的重要手段。通过引入自动化焊接设备、机器人等高科技设备，可以大幅降低人力成本，同时提高组装的精度和速度。这些自动化设备能够根据预设的程序进行精确的组装作业，从而确保每个构件都能准确无误地连接在一起。

（三）完善设计与标准化

模块化装配式钢结构建筑的发展离不开设计与标准化的完善。为了推动这一领域的持续进步，我们需要加强相关研究和探索，以科学的方法和严谨的态度，制定和完善模块化装配式钢结构建筑的设计标准和规范。设计标准的制定是保障建筑质量和安全的基础。在模块化装配式钢结构建筑的设计过程中，应充分考虑结构的安全性、稳定性和耐久性，同时兼顾建筑的实用性和美观性。通过制定明确的设计标准，可以规范设计人员的行为，提高设计质量和效率，确保建筑在各个方面都能达到预期的要求。此外，推动技术创新也是完善设计与标准化的重要方向。随着科技的不断进步，新材料、新工艺和新设备不断涌现，为模块化装配式钢结构建筑的设计提供了更多的可能性。我们应积极引进和应用这些新技术，推动模块化装配式钢结构建筑在设计理念、构造方式和施工方法等方面的创新，以适应市场需求和时代发展的需要^[10]。

六、结论

模块化装配式钢结构建筑作为一种高效、环保的施工技术，具有广阔的市场前景和巨大的发展潜力。通过解决运输、组装和设计等方面的挑战，优化施工技术和管理流程，可以进一步提高施工效率和质量，推动建筑行业向更加高效、可持续的方向发展。未来，随着技术的不断进步和应用的推广，模块化装配式钢结构建筑将成为建筑行业的重要趋势。

参考文献

[1] 琚金建, 杨小三, 廖明生. 装配式建筑钢结构梁柱节点焊接施工技术研究 [J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(06): 112-114. DOI: 10.13824/j.cnki.cmtm.2024.06.030.

[2] 孔运. BIM技术在钢结构装配式建筑施工中的应用 [J]. 砖瓦, 2024, (12): 111-113. DOI: 10.16001/j.cnki.1001-6945.2024.12.014.

[3] 崔宇龙. 装配式建筑工程钢结构施工技术和管理措施 [J]. 中国住宅设施, 2024, (11): 181-183.

[4] 高锐. 基于装配式建筑工程钢结构施工技术和施工管理措施探讨 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(21): 85-87. DOI: 10.16673/j.cnki.jcfzdx.2024.0741.

[5] 张瑞, 顾伟东, 赵浩星, 等. 装配式钢结构住宅建筑施工主要技术分析 [J]. 工程建设与设计, 2024, (20): 133-135. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2024.10.243.

[6] 李志鸿. 装配式钢结构公共建筑施工关键技术研究 [J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(10): 49-52+60. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2024.10.013.

[7] 卢中津. 装配式钢结构建筑关键施工技术与结构优化研究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5(19): 99-101.

[8] 胡志远, 丁东, 陈泽伟, 等. 高大空间钢结构建筑装配式防排烟风管施工技术 [J]. 安装, 2024, (09): 10-12.

[9] 朱明野, 尹喜慧. 装配式钢结构建筑工程施工技术研究与应 [J]. 建筑机械, 2024, (09): 70-75. DOI: 10.14189/j.cnki.cm1981.2024.09.003.

[10] 赵彦章. 装配式钢结构建筑设计和施工技术研究 [J]. 金属世界, 2024, (05): 60-67.

地铁渗漏水问题治理探讨

——以北京地铁 16 号线为例

顾广宇

北京城市快轨建设管理有限公司, 北京 100070

摘 要 : 轨道交通地下工程渗漏水问题, 不仅造成腐蚀结构, 造成地下工程耐久性降低, 影响其使用功能, 还会严重危害内部线路、机械设备、通讯照明, 甚至接触网和道床等设施, 造成一定的安全隐患。地铁 16 号线在运营期间出现的渗漏水缺陷数量呈逐年递增的现象, 本文通过介绍地铁 16 号线相关建设和运营期间渗漏水治理相关经验, 对轨道交通工程渗漏水防治提供了相关参考经验。

关 键 词 : 城市轨道交通; 变形缝; 渗漏水; 注浆止水; 内装可卸式止水带

Discussion on the Treatment of Subway Leakage Water Problem ----Taking Beijing Subway Line 16 as an example

Gu Guangyu

Beijing Urban Rapid Transit Construction Management Co., Ltd. Beijing 100070

Abstract : Water leakage in underground rail transit projects not only corrodes the structure, reduces the durability of underground projects, and affects their use functions, but also seriously harms internal lines, mechanical equipment, communications and lighting, and even contact networks and roadbeds, causing certain safety hazards. The number of water leakage defects in Metro Line 16 during operation has increased year by year. This article introduces the relevant experience of water leakage control during the construction and operation of Metro Line 16, and provides relevant reference experience for the prevention and control of water leakage in rail transit projects.

Keywords : urban rail transit; deformation joint; leakage water; grouting waterproofing; internal detachable waterstop

一、地铁渗漏水类型及原因分析

1. 类型

(1) 根据渗漏现象

渗漏现象共分 5 种。湿渍, 指地下混凝土结构背水面, 呈现明显色泽变化的潮湿斑; 渗水, 指地下混凝土结构背水面有水渗出, 墙壁上可观察到明显的流挂水迹; 水珠, 指地下混凝土结构背水面的顶板或拱顶, 可观察到悬垂的水珠, 其滴落间隔时间超过 1min; 滴漏, 指地下混凝土结构背水面的顶板或拱顶, 渗漏水滴落速度至少为 1 滴 /mm; 线漏, 指地下混凝土结构背水面, 呈渗漏成线或喷水状态^[1]。

(2) 根据渗漏部位

变形缝、施工缝等接缝渗漏: 多为出入口、换成通道或附属结构环向变形缝处; 施工缝, 后浇带等; 盾构管片结构及接缝、螺栓孔及注浆孔; 混凝土结构拱顶或顶板、侧墙、底板等。

2. 原因分析

(1) 施工质量问题

结构变形缝渗漏水:

导致变形缝渗漏水的主要原因是止水带埋设不当, 在施工中

由于种种原因, 止水带没有按设计要求进行施工, 造成止水带破裂, 偏离设计定位要求, 或者止水带老化失效。

施工缝渗漏水:

施工缝是混凝土结构施工造成的, 在施工缝处一般都设置有止水材料, 如果止水材料性能不适应施工条件或者是埋设工艺不当, 当混凝土收缩时, 出现裂隙。

外防水层失效:

对于顶板防水层, 若在未保证基面平整、干燥的情况下涂刷防水涂料, 防水涂料涂刷厚度不均匀, 或在雨雪天气天气进行涂刷涂料施工, 都会导致顶板防水层失效。

混凝土开裂:

一般为大结构尺寸混凝土受干缩和温度变化的影响产生形变, 当结构受到外部边界约束, 不能自由伸张和收缩时, 结构开裂形成裂缝。或混凝土配合比不当, 致使抗渗等级太低; 大面积振捣不足, 致使混凝土疏松, 会导致面渗水; 混凝土局部漏振, 或者模板穿心螺栓的止水措施不当, 将引起点渗漏。

盾构管片渗漏水:

盾构施工注浆孔设置不当, 注浆材料质量不过关及施工工艺不严谨, 如: 注浆孔封堵质量差, 管片拼装过程中的破损以及错

作者简介: 顾广宇 (1988-), 男, 北京市通州人, 本科, 初级, 单位: 北京城市快轨建设管理有限公司, 邮编: 100000, 研究方向: 轨道交通地下工程。

台，盾构机在推进过程中控制失误，在挤压力过大的情况下形成管片裂缝；管片螺栓未按设计要求拧紧，造成拧紧扭矩不足以将止水条挤压密实，致使拱顶渗漏；止水条未粘贴牢固，在存放、吊装、运输、拼装的过程中出现脱胶、破损现象，拼装时表面杂物未清理干净，造成管片拼缝渗漏，未及时进行二次注浆等，都会出现盾构管片渗漏水情况。

（2）地下水位上涨

根据北京市水务局公示的地下水位数据，得益于南水北调工程的推进和一系列生态补水措施，自2015年以来，北京平原区地下水水位已连续九年回升，地下水储量增加了70亿立方米。2024年北京地下水位在年内变化：地下水水位平均回升了2.75米，地下水储量增加了14.1亿立方米^[2]。

结合地铁16号线建设期及运营期勘察的水位变化情况，以16号线车站为例：木樨地站（西城区）地下平均水位标高2016年至2024年36.8米涨至40.7米；宛平城站（丰台区）地下平均水位标高2016年至2024年40.13米涨至47.4米。

地铁16号线车站及区间每年会出现不同程度的渗漏水病害，渗漏水病害发生的频率和次数逐年递增，显然地下水位的上涨已经成为了地铁渗漏水的重要原因之一。

二、渗漏水治理

1. 注浆封堵

注浆就是将一定的材料配成浆液，用压送设备将其灌入缝隙内或孔洞中，使其扩散、胶凝或固化，以达到 防渗堵漏的效果^[3]。

通常用于防水工程上的堵漏灌浆材料主要有颗粒型浆液、化学浆材料和混合浆液。

颗粒型浆液（又名：悬浊浆液），是指分散质直径大于100nm，不溶的固体小颗粒悬浮于液体里形成的混合浆液，固体小颗粒随着水溶质扩散直至析出固结，达到封堵渗漏水的目的，其流动性与颗粒的大小有关，如膨润土、水泥、粉煤灰、石灰岩等。

地铁16号线渗漏水治理所采用的悬浊浆液基本为水泥浆，水泥浆具有结石强度高、价格低、运输储存方便、工艺简单等优点，是应用最为广泛的基本注浆材料之一。但是，由于它属于颗粒材料，对微小裂隙的处理不能起到满意的效果；此外水泥浆材凝固时间长，在有一定流速的漏水部位灌浆时会在凝固前被水稀释或冲走，难达堵漏的目的。因此，水泥灌浆只适用灌注不存在流水条的混凝土裂缝和其他较大缺陷的修补^[4]。

化学浆液（又名：乳浊浆液），是指分散质直径100nm~500nm，成分是两种或多种不相溶的液体小液滴的混合物浆液；液体小液滴随溶质扩散直至胶凝固化，达到封堵防渗的目的，其流动性与其粘度有关，聚氨酯、丙凝（有毒），改性环氧树脂、丙烯酸盐材料等

化学浆比水泥浆材具有较好的流动性，它能按工程的需要调节浆液的胶凝时间，适用于有流动水部位的堵漏或防渗，

混合浆液，是指将颗粒型浆液和化学浆液通过两条注浆管

道，分别通过压送设备，混合均匀后注入目标结构或地层，浆液混合后迅速凝结（1min左右）以达到封堵防渗的目的，如：水泥－水玻璃双液浆。

2. 不同渗漏水情况的材料选用：

（1）目前地铁渗漏水治理常用的几种注浆材料（详见表1）：

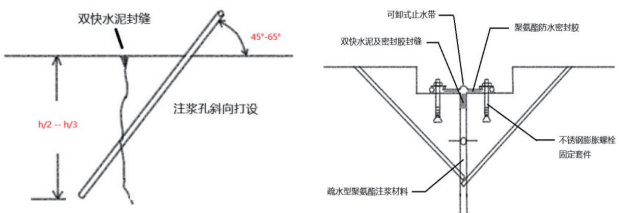
材料类型名称	特点	适用场景
丙烯酸盐	流动性大，柔性大，反应较快，无毒无害	结构侧墙、区间等渗漏轻微
水溶聚氨酯	柔性大，反应快	结构侧墙、区间等渗漏严重
疏水性聚氨酯（油溶聚氨酯）	快速发泡、防渗性能好，有一定的补强加固效果	结构顶板、区间拱顶等
环氧树脂	粘度大，可注性较差，强度大，带水作业粘接力较差，易堵塞注浆设备	用于结构结构裂缝补强加固或孔洞封堵
水泥浆	流动性不如化学浆液，凝结速度慢，价格便宜，无毒无害	迎水面土层防渗加固
水泥－水玻璃	反应快、强度大，防渗性能好	用于结构底板、迎水面土层止水

表1 注浆材料特点及适用场景

3. 操作方法

（1）结构空鼓或裂缝造成的渗漏水问题：

堵漏前须先用双快水泥进行封缝，后采用钻孔（锚杆）斜向打孔注浆方式进行注浆堵漏，注浆孔与结构面夹角控制在45°－65°之间，打设深度应在结构厚度的1/2至1/3之间，对于长度大的裂缝，注浆孔间距宜为30cm至50cm，压注丙烯酸盐或水溶聚氨酯浆液（拱顶或顶板宜采用疏水性聚氨酯材料封堵），注浆终压力为0.3-- 0.5MPa，快速发泡阻断水流，从而达到封堵渗漏水的效果（详见图1），待治理完成后涂刷环氧树脂及水泥基渗透结晶型防水材料补强加固裂缝^[5]。



> 图1 钻孔注浆堵漏示意图

> 图2 接缝可卸式止水带安装示意图

（2）施工缝、变形缝、后浇带等接缝渗漏水处理

施工缝、变形缝等接缝渗漏水治理时，同样采用斜孔注浆方式。首先，应先用双快水泥封堵接缝，后进行打设斜孔浆，宜选用疏水型聚氨酯注浆材料，降低漏水量后，对于接缝部位安装可卸式止水带，经聚氨酯防水密封胶粘贴和不锈钢膨胀螺栓套件加固，通过采用后嵌压缩密封材料，以达到防水功能。诱导缝渗漏水治理时，采用斜孔注浆和骑缝注浆相结合的方式进行堵漏，并安装顶部接水盒引流板等，预防二次渗漏影响运营^[6]。

对于反复出现渗漏水的结构，一般采用背后填充水泥浆的措施。

（3）预留孔洞封堵

对于不同类型的孔洞一般采用不同的材料，一般采用聚氨酯

材料填充和环氧树脂补强结合的方式。

（4）离壁沟预留

以地铁16号线建设及渗漏水治理经验来看，离壁沟的预留具有非常高的必要性，16号线南段通过在设计阶段增设了离壁沟，相较于未设置离壁沟的车站，离壁沟随着车站主体一体化浇筑施工，避免了后期改造开沟的工程难度，对于车站疏排水提升运营质量有着重要的促进作用，即便出现渗漏水问题，对运营造成的影响要小的多，渗漏水治理更加方便快捷^[7]。

离壁沟的施工控制要点主要为坡度控制和检修口设置的合理性，运营单位可通过检修口定期清理堵塞物保持离壁沟畅通。

（5）管片环缝还有纵缝间渗漏水的处理

在进行对管片的环缝还有纵缝间的渗漏水的处理过程中，首先应当对其缝隙内的异物采用钢丝刷进行有效地清理。展开对渗漏位置的确定的过程中，应当在出现渗漏的区域的两端进行终止孔的设置，终止孔的孔径通常情况下应当保持在6mm左右，转孔的深度要达到管片密封橡胶条的位置，采用环氧乳液防水胶泥进行对终止孔的封闭^[8]。

对于拼缝按照35公分的距离进行注浆孔的设置，利用氯丁胶乳聚合物水泥砂浆进行封缝嵌缝埋管处理。在进行注浆的过程中应当注入改性环氧化学灌浆液，然后进行有序的注浆，在注浆的过程中其压力需要保持在0.4至0.5Mpa的范围内，在压力到达标注以后再进行闭管等其进行凝固。

必要时应当进行二次注浆或者多次重复注浆，通过该种措施保障其注浆的质量能够达到预期的标准。注浆管拆除的同时，对其缝面涂刷环氧树脂材料，从而确保管片结构的质量。

三、新线建设渗漏水防治控制要点

地铁新线建设中的渗漏水防治控制是确保施工质量和地铁运营安全的关键之一。渗漏水问题可能导致结构损坏、设备故障、施工质量下降等问题，甚至可能影响地铁的长期运行。因此，在新线车站建设时应当从源头对车站质量进行把控，降低投运后渗漏水产生的概率，具体要求如下：

在施工前，必须根据水文地质勘察相关资料，详细了解地下水位变化趋势、土壤渗透性，地下水的种类、压力以及流量等信息。

设计阶段的防水要求要根据水位变化趋势进行适当的提高设计标准，合理选择防水材料，采用低渗透性、高强度的混凝土，增强施工缝的抗渗能力；将预防渗漏水措施：如留离弊沟、接水托盘等，统一出在施工图中。

施工阶段，应对于防水层施工、混凝土浇筑振捣、施工缝和接口处理等容易出现渗漏水的高风险工序或部位重点管控，以提高施工质量^[9]。

四、结语

本文分析了北京轨道交通地铁16号线运营期车站及区间常见的渗漏水问题的治理分析，对于未来新线车站施工和运营线路渗漏治理提供了一定的建议，对渗漏病害的典型性治理方法进行了整理汇集，结合轨道交通建设水平不断提升的大趋势，对提高地铁建设水平和运营安全具有一定参考意义^[10]。

参考文献

- [1] 罗富荣, 刘赫炜, 韩焯. 地下水水位上升对地铁隧道结构的影响分析 [J]. 中国铁道科学, 2011, 32(01): 81–85.
- [2] 白海贞. 地铁车站抗裂防渗技术研究与实践 [J]. 公路, 2021, v.66(05): 337–340.
- [3] 张继霞, 张捷. 聚氨酯灌浆材料地铁防渗处理应用中存在问题探讨 [J]. 中国建筑防水, 2016, No.356(24): 36–39.
- [4] 郑秀华. 水泥-水玻璃浆材在灌浆工程中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2000, (02): 59–61.
- [5] 牛成. 地铁车站刚柔结合注浆堵漏加固治理研究——以北京地铁12号线穿越5号线车站为例 [J]. 工程建设与设计, 2021, No.460(14): 40–43.
- [6] 王利民. 北京地铁出入口渗漏水原因分析及应对措施 [J]. 建筑技术, 2017, 48(06): 580–583.
- [7] 董飞, 房倩, 张顶立, 徐会杰, 李宇杰, 牛晓凯. 北京地铁运营隧道病害状态分析 [J]. 土木工程学报, 2017, v.50(06): 104–113.
- [8] 龚晓南, 郭盼盼. 隧道及地下工程渗漏水诱发原因与防治对策 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(07): 1–30.
- [9] 张学文. 运营期地铁隧道常见结构病害成因及治理方法研究 [D]. 南京大学, 2014.
- [10] 廖晓东. 丙烯酸盐注浆材料堵漏特性试验研究 [D]. 北京交通大学, 2019.

海上复杂地质条件下大直径嵌岩钻孔灌注桩 施工技术研究

袁锡权

中交二航局第二工程有限公司, 重庆 401121

摘 要： 随着海上工程的快速发展, 对海上大直径嵌岩钻孔灌注桩施工技术提出了更高的要求, 尤其是在复杂地质条件下及特殊海上施工环境下。本文依托特大桥工程, 以主桥桩基施工工艺为例, 通过对依托工程施工环节的深入分析和实践总结, 详细介绍海上复杂地质条件下大直径钻孔灌注桩施工成孔技术, 为类似工程提供参考。

关 键 词： 跨海大桥; 复杂地质条件; 大直径桩基; 嵌岩钻孔灌注桩

Research on the Construction Technology of Large-Diameter Rock-Socketed Bored Piles under Offshore Complex Geological Conditions

Yuan Xiquan

China Communications 2Nd Navigational Bureau 2Nd Engineering Co., LTD. Chongqing 401121

Abstract： With the rapid development of offshore engineering, higher demands have been placed on the construction technology of large-diameter rock-socketed bored piles, particularly in complex geological conditions and special offshore construction environments. This paper takes the Grand Bridge project as a case study, focusing on the construction technology of the main pier pile foundation. Through an in-depth analysis of existing technologies and a summary of engineering practices, it provides a detailed introduction to the drilling technology of large-diameter bored piles in offshore complex geological conditions, offering valuable references for similar projects.

Keywords： cross-sea bridge; complex geological conditions; large-diameter pile foundation; rock-socketed bored pile

引言

大直径嵌岩钻孔灌注桩因其承载力高、稳定性好而被广泛应用于海上基础设施的桩基工程中^[1-2]。随着海洋工程的快速发展, 对海上桩基施工技术提出了更高的要求^[3]。特别是在复杂地质条件下, 如斜岩、破碎带岩层、闪长岩层等。同时海上施工环境的特殊自然条件的影响, 使得大直径嵌岩桩的施工技术面临诸多挑战。在海上复杂地质条件下, 钻孔灌注桩的施工不仅要考虑桩的垂直度和直径的精确控制, 更要确保桩底成孔质量。

本文以在建跨海大桥桩基施工工艺为例, 通过对现有技术的深入分析和工程实践的总结, 详细介绍海上复杂地质条件下大直径钻孔灌注桩成孔技术, 为类似工程提供参考。

一、工程概况

项目位于福建省福清兴化湾, 全长3920 m。大桥主桥主墩、过渡墩及引桥桩基共计340根, 全部为嵌岩桩, 除桥台8根桩基之外, 均为水上桩基。其中, 主桥墩桩基桩径3.0 m, 桩长53 m ~ 62 m, 需嵌入微风化岩层花岗闪长岩层2D。施工区域地基土主要包括第四系堆积物和前第四系基岩。第四系堆积物主要有: 第四系全新统冲海积层 (Q4al-m), 第四系残坡积层 (Qel-dl), 局部零星分布有第四系人工堆积层 (Q4ml); 岩性包括分布于冲海积层中的淤泥、淤泥质土、中细砂、粘土、粉质粘土、卵砾

石层等。前第四系地层出露岩体主要为燕山早期侵入的花岗闪长岩, 局部路段的花岗岩球状风化较为发育。

大桥桩基建设过程中面临着施工工期紧张、环境恶劣、地质条件复杂、施工难度大以及质量要求严格等工程难点。主要包括如下:

表1 桩基施工主要难点

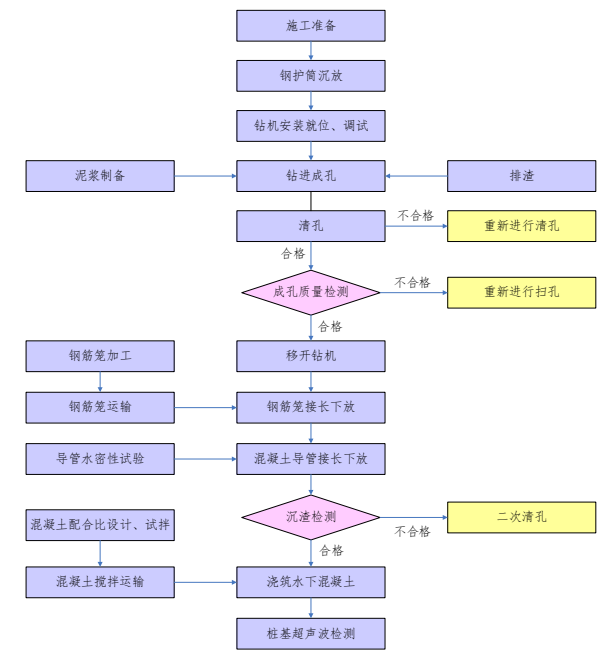
序号	工程难点描述
1	项目工期紧, 项目合同仅有24个月
2	桩基几乎为全海上施工, 线路较长, 水上钢栈桥为进出作业区的唯一通道

作者简介: 袁锡权 (1973.05-), 男, 重庆市, 汉族, 大学本科, 工程师, 研究方向: 桥梁工程。

序号	工程难点描述
2	场区面临灾害性台风天气，年平均受台风影响3.5次
3	地层变化复杂，基岩起伏大，局部区域存在闪长岩、斜岩、孤石
4	桩基桩径大，最大设计桩径达3 m，最大桩长62 m；部分桩基无中风化岩层，需进入微风化，基岩强度高、岩层厚，设计最大入岩深度达40 m，成孔效率低、难度大
5	钢筋笼最重达46.7t，对下放设备、施工平台以及吊具的设计等要求较大，且下放时间较长，对桩基的清孔和沉渣厚度的控制影响较大

二、施工工艺流程

根据桩基施工区域的实际地质情况，项主桥主墩桩基选用CK-3000型冲击钻，正循环成孔工艺组织施工。其主要施工工艺流程如下：



> 图1 钻孔桩施工工艺流程图

三、复杂地质条件下大直径桩基成孔技术

针对桥梁桩基施工面临的主要难点，尤其是面对需在较短期内完成项目全部施工任务的挑战，项目制定以下控制目标：

- （1）桩基成桩质量一次合格率100%；
- （2）关键线路上的主墩3m大直径桩基单桩平均成桩时间不超过25天。

按照以上总体控制目标，结合项目施工区花岗闪长岩具有强度大，岩样呈颗粒状、白色晶剔透，易沉淀等特点，前期试桩无损伤检测发现有沉渣超标情形（须通过取芯验证合格后方可后续工序施工），项目主要从桩底沉渣、桩径缩孔以及斜岩条件下成孔控制几方面进行了深入研究。

（一）桩底沉渣控制

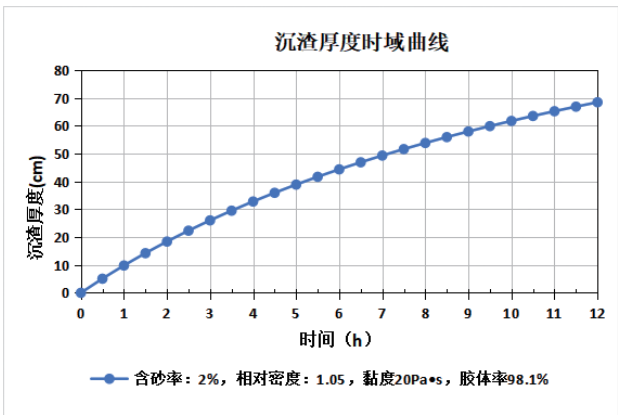
按照规范及设计要求，桩基清孔后泥浆各项指标要求如下：

相对密度：< 1.05（大直径、超长桩）、黏度：17~20Pa·s、含砂率：< 2%、胶体率：> 98%、沉渣厚度≤50mm（支承桩规范值）、沉渣厚度≤30mm（支承桩设计值）。

桩基施工采用膨润土和淡水制浆，浆液泥水配合比按照经验参数125:1000控制，桩顶标高至护筒顶标高考虑长度为6.5m，泥浆相对密度按照1.05计算，则不考虑护筒段扩大体积的情形下，单根60m长3.0m直径桩基所需膨润土量为：

$$3.14 \times 1.5^2 \times (60+6.5) \times 1.05 \times 125/1125=55t$$

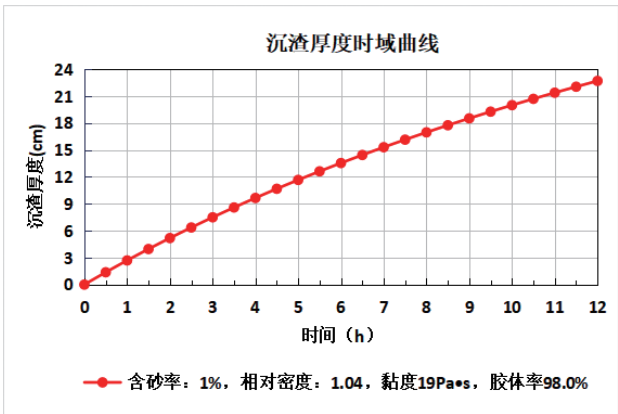
为进一步确定二次清孔后桩基沉渣速度，量化二次清孔后至桩基浇筑混凝土两道工序之间的时间间隔控制指标，项目在首根桩基二次清孔指标完全达到规范要求的情形后，每隔半小时进行了沉渣厚度实测，并绘制了沉渣厚度曲线图。



> 图3 沉渣厚度曲线图（一）

根据曲线图统计数值，在二次清孔完成后（含砂率：2%，相对密度：1.05，黏度20Pa·s，胶体率98.1%），沉渣厚度达到50mm的对应时间为0.5h，而二次清孔完成后至桩基混凝土浇筑前的准备工作时间至少需要0.5~0.75h，因此在此条件下，3.0m大直径桩基沉渣厚度无法控制到设计要求的30mm以内。

经过分析，现场对桩基二次清孔后泥浆指标进行了优化调整，在保持其它指标不变的前提下，将含砂率标准调整为不大于1%。然后再次间隔半小时进行沉渣厚度实测，并绘制了新的沉渣厚度曲线图。



> 图3 沉渣厚度曲线图（二）

根据曲线图统计数值，二次清孔完成后0.5h，沉渣厚度降低至14mm；完成后1h对应沉渣厚度为26mm。根据论证结果，为确保桩基的桩底质量，项目针对性的提出了“一小时封底”的成

桩方案，即通过现场提前组织调配设备及混凝土材料等资源，在结束二次清孔后一小时内，完成桩基的封底施工，最大限度减少桩底的沉渣厚度，保证桩基的整体成桩质量。

（二）桩径缩孔控制

场区内地层中存在砂土状强风化花岗闪长岩遇水易崩解，含砂量较大，桩基易缩孔的问题。因此在钻进过程中，为防止埋钻，无法提锤，项目针对性提出加大施工过程中提锤扫孔的频次的要求，在对应地层范围内每个工作台班至少保证提锤扫孔不少于两次，直到穿过砂土状强风化花岗闪长岩层后形成稳定泥浆护壁。

（三）斜岩条件成孔控制

按照设计地质钻勘图，施工区大部分区域均存在斜岩，主要集中在碎块状强风化花岗闪长岩和中风化花岗闪长岩两种岩层中。为避免在冲击钻钻孔过程中，因斜岩地质影响，冲击钻自由冲击到强弱风化交接层时，由于交接层面处的延迟 R_c 不同，导致冲击锤偏向施工面破坏程度大的一方，产生偏孔的现象。特制定如下措施：

（1）提前分析地质钻勘资料，根据钻勘资料判断钻进施工时桩基可能发生偏位的地层，并确定相关地层的桩孔深度范围；

（2）进入预判的斜岩地层前，提前调整钻机，使冲击钻钻头

偏向孔位可能偏移的反向侧；

（3）当钻头进入斜岩区岩层后，减小钻进冲程，采用低锤密击的方式进行钻进，减少冲击偏向作用；增大清渣频次，保证钻头每次均能作用在新鲜岩面上；同时更换或加焊刚度较大的锤牙，增强冲进效果；

（4）当偏孔较明显时，回填片石，将桩孔内上表面垫平，增加偏孔侧岩层的物理特性，强行对偏孔段进行纠偏；然后再降低冲程继续钻进，并安排专人时刻观察钢丝绳晃动情况，及时修正，防止再次斜孔。

四、结论

桩基础作为水下隐蔽工程，是桥梁工程施工顺利的重要保障。通过上述技术措施，同时结合“项目经理或总工亲自把关关键工序的提级管理”“配置双技术员复核”等一系列管理措施，项目桩基施工过程管控得以全面提升，高质量高效率完成340根桩基施工，除前期试桩之外，经专业机构检测，其余均为Ⅰ类桩。本文依托实际工程的难点处理，总结了海上复杂地质条件下大直径钻孔灌注桩成孔技术工艺，期待能为类似复杂地质条件下大直径钻孔灌注桩施工提供参考。

参考文献

[1] Liu M W, Wu F Y, Abi E D, et al. Experimental Study on the Bearing Performance of Rock-Socketed Concrete-Filled Steel Tube Piles under Horizontal Cyclic Loading [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(4), 788.

[2] Wang X L, Fan F F, Lai J X. Strength behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns under axial compression: A review. [J] Constr. Build. Mater. 2022, 322, 126144.

[3] 吴泽生, 姚红梅. 舟山连岛工程金塘大桥主通航孔桥海上桩基施工 [J]. 铁道建筑, 2007, (01):29-32.

海上潮变区大体积承台混凝土温控技术研究

陈时波

中交二航局第二工程有限公司, 重庆 401121

摘 要 : 大体积混凝土具有体积大、结构厚度大、温度应力大、施工时间长等特点。依托实际工程, 从原材料选择和配合比设计、混凝土质量及浇筑控制、混凝土入模温度控制以及冷却水系统布设方面对潮变区大体积承台混凝土施工中的温控措施进行了研究设计。实际应用得出, 混凝土浇筑后72 h内为升温阶段, 承台混凝土内部最高温度为64.1℃, 浇筑完成72 h后, 进入降温阶段, 平均降温速率为2.7℃, 满足承台温控标准要求。验证表明施工过程中所采用的措施具有较好的温控效果, 可以为类似工程提供参考。

关 键 词 : 桥梁承台; 大体积混凝土; 质量控制; 温度控制

Temperature Control Technology for Mass Concrete Footings in Tidal Zones

Chen Shibo

China Communications 2Nd Navigational Bureau 2Nd Engineering Co., Ltd. Chongqing 401121

Abstract : Mass concrete is characterized by large volume, substantial structural thickness, significant thermal stresses, and long construction periods. Based on practical engineering projects, this study investigates temperature control measures for mass concrete footing in tidal zones, focusing on material selection and mix design, concrete quality and pouring control, temperature control during pouring, and cooling water system layout. Practical application results show that within 72 hours after pouring, the concrete undergoes a heating phase, with the maximum internal temperature reaching 64.1℃. After 72 hours, the concrete enters a cooling phase, with an average cooling rate of 2.7℃, which meets the temperature control standards for the footing. The results indicate that the employed temperature control methods are effective, and the research provides useful reference for similar projects.

Keywords : bridge footing; mass concrete; quality control; temperature control

引言

随着交通基础设施建设的快速发展, 大体积混凝土的施工规模和数量不断扩大, 存在的问题也日益突出。其中, 大体积混凝土施工过程中的温控技术是工程建设中一直以来重点关注的问题, 大体积混凝土中温度控制是保证工程质量的重要环节^[1]。整体浇筑的大体积混凝土结构在养护期间, 因降温 and 水泥水化作用会产生温度收缩和水化收缩两种变形^[2]。变形会导致混凝土结构内部及表面产生拉应力, 当拉应力大于混凝土相应龄期的抗拉强度时, 结构就会出现开裂^[3], 严重影响工程质量。因此, 控制温差、防止裂缝的出现是大体积混凝土施工亟须解决的重点和难点问题。

大体积混凝土内部的温度分布及变化主要受水泥水化热、外界环境、约束条件等因素影响。在大体积混凝土施工中的温控方法主要有分缝处理、使用低水化热水泥、在混凝土中预埋冷却水管等。当前大体积混凝土温控措施仍是施工的难点, 尤其是海上潮水变化区。本文依托在建跨海大桥实际工程项目, 对潮汐变化区承台大体积混凝土施工中的温控措施进行了研究设计, 并对实际应用效果进行了总结分析, 验证了温控措施的可靠性, 对类似工程具有良好的参考意义。

一、工程概况

大桥项目位于福建省福清市兴化湾, 全长3920 m, 由主桥和引桥组成。其中主桥的两个主墩承台平面尺寸为35.0×23.6 m, 圆端形结构, 厚度为6.0 m, 如图1所示。单个承台混凝土方量为4441 m³, 属于大体积混凝土。施工区位于潮汐变化区, 受潮水影响大, 大体积混凝土结构质量要求高, 施工期间必须分层施工,

采取有效的温控措施, 以防止产生裂缝。

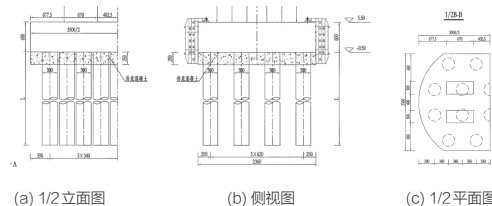


图1 主墩承台结构示意图

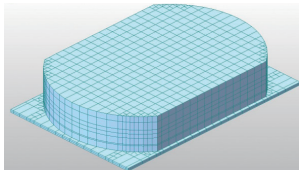
作者简介: 陈时波 (1989.09-), 男, 重庆市, 汉族, 大学本科, 工程师, 研究方向: 桥梁工程。

二、大体积混凝土施工温控技术

(一) 温度应力 Midas 模型仿真计算

1. 模型参数

主墩承台按照施工方案计划分三次浇筑成型，浇筑厚度分别为 1.0m、2.0m、3.0m。利用 Midas 软件根据设计结构尺寸及施工方案建立计算模型网格剖分如图2。



> 图2 承台计算模型图

根据施工安排，承台浇筑时间为 2 月初，根据工程区气象资料，浇筑气温接近 13℃。仿真计算中，混凝土入模温度按 20℃ 计算，环境温度设定为 13℃。承台内部自距底面 2.0m 起，沿厚度方向共布置 3 层 Φ50mm 冷却水管，各层水管沿厚度方向间隔布置，计算考虑冷却水管的影响。

在仿真计算中，其他参数参照类似项目温控经验参数执行，具体如下表所示。

表1 热力学参数

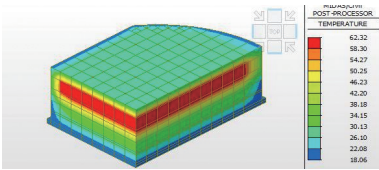
参数	取值	说明
水化速率参数	0.8	$Q(\tau) = Q_0(1 - e^{-0.8\tau})$
弹模发展速率	0.3	$E(\tau) = E_c(1 - e^{-0.3\tau})$
强度发展速率	0.3	$\sigma(\tau) = \sigma_k(1 - e^{-0.3\tau})$
封底混凝土传热	1 W / m ²	垫层混凝土
顶面散热	8 W / m ²	覆盖保温
管冷散热	380 W / m ²	内部水管

温度及温度应力计算从混凝土浇筑开始，分层浇筑时间间隔按 14 天计算，模拟整个承台施工过程的温度应力发展，冷却水管通水时间仅考虑在浇筑后的 14 天内。

2. 模拟分析

(1) 温度计算结果

按照上述设定的条件，计算可得承台内部最高温度为 62.32℃，温度峰值出现时间约为第三层混凝土浇筑后第 96 小时（浇筑后第 4 天）。



> 图3 承台第三层浇筑后最高温度（第4天）

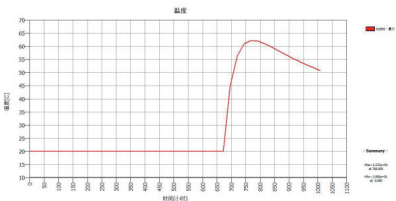
从计算结果可以得出：混凝土浇筑完成后，内部的温度相对较高，其表面自然散热较缓慢，其内部热量无法依靠自然降温进行快速释放，主要依靠冷却水管作用。按照本次浇筑混凝土的入模温度 20℃ 和绝热温升 49.46℃，最终温峰约为 62.32℃。

(2) 应力计算结果

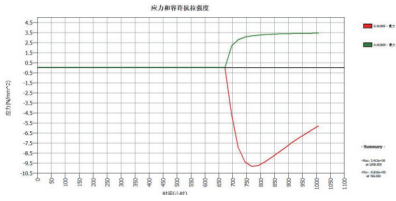
大体积混凝土完成浇筑后，随即开始水化反应，内表温度逐

渐升高，在反应前期主要表现为向各个方向膨胀变形，结构内部受外部混凝土约束，表现为压应力，结构表面受内部混凝土反作用力，表现为拉应力；而水化反应峰值过后，水化热小于放热，混凝土温度降低，体积变小，结构向中心收缩变形，混凝土表面温度趋于稳定，内层温度分层次分布，混凝土收缩变形从中心向外逐渐变大，表面受内层混凝土收缩变形，表现为压应力，压应力分布从外到内逐渐减小。

为了直观地分析承台的整个水化热过程，选取第三次浇筑承台内部中心节点节点进行时程曲线分析。



> 图4 温度变化时程图（单位：℃）



> 图5 温度应力（红色线）和容许抗拉强度（绿色线）变化时程图

由上图可知，在整个水化热过程中，承台内部和表面的温度始终小于 75℃，满足要求；且承台混凝土应力始终在容许抗拉强度以内，满足要求。

(二) 原材料选择与混凝土配合比设计

水泥水化热产生速率与水泥的比表面积有关。水泥比表面积大，水化反应就快，在浇筑完成前期阶段放出的水化热就高，故混凝土生产需选用合适细度模数的水泥。加入粉煤灰、粒化高炉矿渣等作为混凝土掺和料，既可降低水化热，还可以改善混凝土的施工性能和耐久性。

根据现场设计及大体积混凝土质量控制要求，对承台大体积混凝土的配合比进行了专项设计。主墩承台混凝土设计强度等级为 C40，配合比如表 2 所示：

表2 承台混凝土配合比设计表

成分	用量 /kg · m ³	成分	用量 /kg · m ³
水泥	219	粉煤灰	109
水	153	矿粉	109
砂	770	碎石	1020
减水剂	8.3		

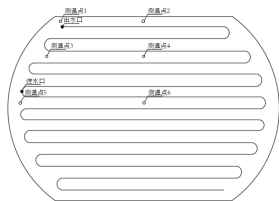
(三) 混凝土入模温度控制

在混凝土配合比及传热边界条件一定的情况下，混凝土内部温度峰值与入模温度正相关，而温度峰值越高会导致承台混凝土内表温差、温度变形和温度应力越大，因此混凝土入模温度控制非常关键。此外，入模温度也会影响混凝土水化反应速率，温度越高，水化反应越快，混凝土浇筑初期释放的水化热越多，对大体积混凝土温控不利。因此，施工中应尽可能地降低入模温度，施工中承台入模温度控制在 5~28℃。

(四) 冷却水系统

(1) 水冷管布置设计

冷却水管采用外径50mm,厚度2.5mm热传导性较好的钢管,并确保其具有一定的强度。承台每层冷却水管分别设置2个进水口和出水口。从上至下分别设置1~4层水冷管,各层水管交错布置。底层冷却水管距离承台底部及各层管间距均为130 cm,顶层冷却水管距离承台顶面80 cm。平面上冷却水管距离承台外边缘及相邻管中心距设置为150 cm。冷却水管布置如图6所示。



> 图6 冷却水管、温度测点布置图

冷却水管严格按照设计图纸进行定位安装,安装时应增加必要的辅助钢筋对其进行精准定位和固定。在浇注混凝土过程中应避免冷却水管出现堵塞、渗漏及移位等情况。采用与环境温度相近的自来水作为冷却水源,利用水箱建立循环系统,实现冷却水的输送及冷却水的回收降温。出水口的水充分降温后再重新循环进入入水口参与冷却;同时,在冷却水管系统中设置减压阀以控制后期通水速率。

混凝土浇筑覆盖冷却水管后开始通水,初始水流量控制在最大流量的50%,确保进出水口温差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 。浇筑完成后,冷却水设置为最大流量,流速 $> 25\text{ L/min}$,保证进出水口温差同样 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 。随后根据实时测温结果调整降低冷却水流量,控制降温速率不大于 2.0°C/d (早期降温不大于2.5),进出水温差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 。整个养护过程中,需保证混凝土内部最高温度 $< 75^{\circ}\text{C}$,内表最大温差 $< 20^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 测点布置

通过在混凝土中提前布置温度测点,并对浇筑完成的承台进行连续观测,指导后续养护。承台温度监控测点布置结合混凝土内部冷却水管的实际分布情况以及温度场特征等因素,同时需满足相关规范要求。本工程根据结构特点,选取1/4结构作为主要测试区域布置关键测点。采用智能化数字多回路温度巡检仪配合热敏电阻传感器进行温度检测。

温度测点布置在两层冷却管之间,分6层布置,沿承台高度方向距离承台底距离分别为10 cm,195 cm,295 cm,310 cm,455 cm,595 cm,测温点平面布置如图2所示。

水化热通常在混凝土浇筑后的100小时内达到峰值温度,因此在浇筑完成后的100 h内,每0.5h进行一次温度采集;待承台混凝土升温到最大值后,每2h进行一次温度采集。

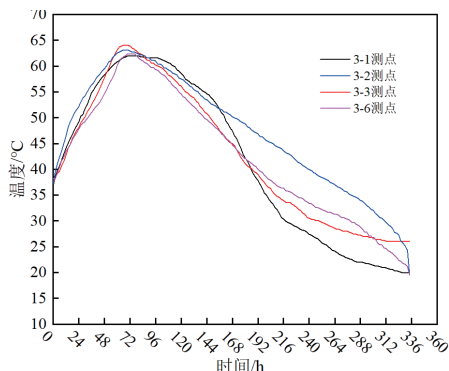


> 图7 温度检测仪及传感器

三、温控养护结果分析

混凝土浇筑后,内部温度将随着水化反应而升高,达到峰值后进入降温阶段,直到趋于稳定。受边界条件的影响,大体积混凝土内部温度相对表面以及侧面均较高,并且持续时间最长。因此,选择第三层温度测点1、2、3、6作为代表性关键测点对大体积承台混凝土浇筑后内部温度随时间变化的规律进行分析。

第三层混凝土浇筑后不同测点处温度随时间的变化曲线如图8所示。



> 图8 第三层测点温度变化曲线图

由图,在浇筑后的72 h内,混凝土处于温度上升阶段,峰值出现在承台混凝土中心区域,并且随着与边缘距离的增加而降低。第3层中心区域峰值为 64.1°C 。内部最高温度小于标准控制温度 $\leq 75^{\circ}\text{C}$,满足承台温控标准要求。

浇筑完成72 h后,承台进入降温阶段,平均降温速率为 2.7°C ,满足降温速率不超过 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 的要求。测温结果表明,所采用的温控措施具有较好的温控效果,与仿真计算结果基本吻合。

四、结论

为保证大体积承台混凝土结构施工质量,结合项目实际情况,主要通过合理分层施工、原材料选择和配合比设计、混凝土质量及浇筑控制、混凝土入模温度控制以及冷却水系统布设等温控措施,防止大体积混凝土产生危害性的温致裂缝。通过原材料选择和配合比试验,降低混凝土绝热温升和最高温度峰值;通过在承台内部设置冷却水管循环系统,削减混凝土内部温度峰值,控制内部降温速率。并基于现场温度场连续观测,指导施工养护。实际应用表明,浇筑后72 h内为升温阶段,承台大体积混凝土内部最高温度为 64.1°C ,小于标准控制温度 $\leq 75^{\circ}\text{C}$,浇筑完成72 h后,进入降温阶段,平均降温速率为 2.7°C ,满足承台温控标准要求,验证表明本项目采用的温控措施具有良好的应用效果。

参考文献

- [1]詹新彬,白晨阳,张羽,等.大体积混凝土低桩承台温度场分布及温度效应研究[J].混凝土,2024,(10):171-177.
- [2]辜光磊,许蔚,吴永红,等.大体积混凝土水管冷却温控技术的优化[J].混凝土,2021,(11):141-145.
- [3]叶晓正.大坝工程大体积混凝土施工的温控养护技术研究[J].四川水利,2024,45(05):96-100+126.

附着式升降脚手架结构与施工适配性研究 ——基于奉贤区奉贤新城16单元36-02区域 地块7#、12#楼实践

杨迎文

上海威远建筑工程有限公司，上海 202150

摘 要： 本文以奉贤新城项目为背景，对附着式升降脚手架的结构设计计算进行深入剖析，并结合现场施工实际情况，探讨其适配性。通过对脚手架各部件受力分析、荷载计算及现场施工过程中的安装、提升、使用和拆除等环节的研究，揭示设计计算与施工实践的内在联系，为提高附着式升降脚手架的安全性和施工效率提供参考依据。

关 键 词： 附着式升降脚手架；结构设计计算；适配性；安全稳定

Research on the Structural Design and Construction Adaptability of Attached Lifting Scaffolding -- Based on the Practice of Buildings 7# and 12# in Area 36-02, Unit 16, Fengxian New City, Fengxian District

Yang Yingwen

Shanghai Weiyuan Construction Engineering Co., Ltd. Shanghai 202150

Abstract： This article takes the Fengxian New City project as the background to deeply analyze the structural design calculations of attached lifting scaffolding. Combined with the actual situation of on-site construction, it explores its adaptability. Through force analysis of various scaffolding components, load calculations, and research on installation, lifting, use, and dismantling during on-site construction, this paper reveals the intrinsic connection between design calculations and construction practices. It provides a reference for improving the safety and construction efficiency of attached lifting scaffolding.

Keywords： attached lifting scaffolding; structural design calculation; adaptability; safety and stability

引言

在高层建筑施工中，附着式升降脚手架因其诸多优势得到广泛应用。奉贤新城项目作为典型案例，其7#、12#楼采用了FPT-C-1-GH18型工具式升降脚手架。为确保脚手架在施工过程中的安全稳定，需对其结构设计计算与现场施工适配性进行深入研究，以实现设计与施工的有机结合，保障项目顺利推进。

一、奉贤区奉贤新城概述

本项目为奉贤区奉贤新城16单元36-02区域地块，位于上海市奉贤新城金海街道。建设单位是上海坤迈置业有限公司，设计单位为上海城乡建筑设计院有限公司。该工程7#、12#楼主楼3层以上防护采用FPT-C-1-GH18型工具式升降脚手架，在架体上升阶段，用于防护主体结构施工，待主体结构封顶后，架体将在空中分解拆除^[1]。

二、附着式升降脚手架结构设计计算

（一）计算单元选取

选取一跨脚手架作为计算单元，考虑最大跨度6m及高度

18.0m的情况。对该计算单元内的导轨下节、立杆、三角斜撑、脚手板等各构件进行详细分析，确定其数量、规格及重量，为后续荷载统计和受力分析做准备（如表1-1）。例如，导轨下节长4.8m，重78.5kg；立杆有不同规格和长度，如4.6m和4.4m等，材质为Q235，其截面特性在计算中起关键作用。

表1-1 GH10-11型附着式升降脚手架每计算单元各构件数量及其重量

序号	名称	规格	主材规格	单量 (kg)	数量	总重 (kg)
1	导轨下节	4.8m		78.5	1	78.5
2	导轨标准节	4.2m		66.4	3	199.2
3	立杆	4.6m	□50*50*4.0	19.72	10	197.2
4	立杆	4.4m	□50*50*4.0	18.85	10	188.5
5	立杆	4.6m	□70*50*4.0	21.34	2	42.68

作者简介：杨迎文（1974.08-），男，汉族，上海人，毕业于同济大学结构工程专业，获得硕士学位，中级工程师，研究方向：结构工程及工程管理。

序号	名称	规格	主材规格	单量 (kg)	数量	总重 (kg)
6	立杆	4.4m	□ 70*50*4.0	20.16	2	40.32
7	三角斜撑		□ 50*50*3.0	4.5	16	72
8	Z字撑		□ 50*50*3.0	5.6	11	61.6
9	钢板脚手板	2m	63*40*6.0	32.8	27	885.6
10	副脚手板	2m	t=3.0	11.89	6	71.34
11	翻板	2m	t=3.0	14.4	6	86.4
12	外网片	1400*2000	0.6冲孔板	33	39	1287
13	内排水平桁架	2m	□ 50*50*4.0	36	3	108
14	内排水平桁架	2m	□ 50*50*4.0	36	3	108
15	吊点桁架			32.8	2	65.6
16	电动葫芦	7.5T		80	1	80
17	连接件等配件			43	1	43
合计						3609.08

(二) 荷载系数确定

1. 恒载

包括脚手架各构件自重, 经计算每机位自重荷载标准值为 $Q_{k\text{自}}=36.09\text{KN}$, 架体内外排自重荷载值分别为 $Q_{k\text{内}}$ 和 $Q_{k\text{外}}$ 。如钢板脚手板、副脚手板、翻板、外网片等构配件的重量在恒载中占比较大, 其重量的准确统计对整体荷载计算至关重要。

2. 活载

使用工况下考虑施工人员及材料堆放等产生的荷载, 如 $3.00\times 0.6\times 6\times 2=21.6\text{KN}$ (人员荷载) 和 $0.50\times 0.6\times 6\times 2=3.6\text{KN}$ (材料荷载)。提升工况下活载取值有所不同, 且需考虑风荷载的影响。

3. 风荷载

根据上海地区常见风压值及建筑物高度、体型系数等参数计算。基本风压 W_0 取上海地区常见值 (如 450N/m^2 , 10年一遇, 升降及坠落工况下取 250N/m^2), 通过风振系数、高度变化系数和体型系数计算得出风荷载标准值。如通过计算外网片穿孔率情况确定体型系数, 进而准确计算风荷载, 其在脚手架结构设计中强度和稳定性影响显著。

4. 计算系数

确定恒载分项系数 1.2、活载分项系数 1.4、附加安全系数 1.43、附加荷载不均匀系数 (使用工况 1.3、升降及坠落工况 2.0)、冲击系数 2.0 等, 这些系数在荷载效应组合计算中用于调整荷载取值, 以确保设计的安全性。

(三) 荷载效应组合与构件验算

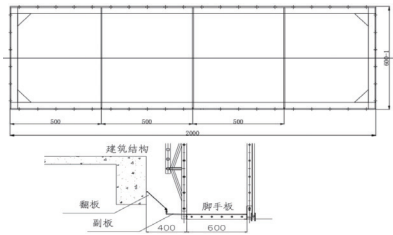
1. 架体构架验算

(1) 脚手板验算

脚手板是架体的重要定型化构件之一, 由边框、中肋、面板组焊而成, 标准板规格为 $2000\times 600\text{mm}$, 此规格为最大规格, 现仅需对此规格进行承载验算。脚手板边框为 $L63\times 40\times 6.0$ 角钢, 中肋为 50×5 扁铁, 面板为 1.8mm 厚花纹钢板。脚手板的构造尺寸如下图:

对脚手板的面板、中肋和边框分别进行承载验算。考虑脚手板自重及施工荷载作用, 按不同的受力模型 (如面板按四跨连续梁、中肋按简支梁) 计算内力和变形。例如, 面板验算时, 计算其承受的线荷载, 得出最大弯矩和挠度, 与材料允许强度和变形

限值比较, 验算其安全性。



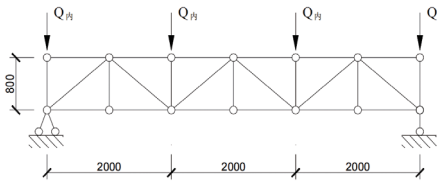
> 图 2-1 脚手板的构造尺寸

(2) 立杆验算

对内、外立杆分别进行受力分析。内立杆主要承受竖向荷载, 通过计算确定其轴力, 结合立杆截面特性和计算长度, 计算长细比并查稳定系数, 验算其强度和稳定性是否满足要求。外立杆除竖向荷载导致的轴向力外, 还需考虑风荷载产生的弯矩, 综合计算各工况组合下的组合应力, 确保强度和稳定性符合设计标准。

2. 水平支承桁架验算

水平支承桁架由方钢管焊制而成, 上下弦杆为 $\square 50\times 50\times 4.0$, 腹杆为 $\square 50\times 50\times 4.0$, 受力模型简化为铰接桁架计算, 因构件焊接连接, 节点有一定的抗弯能力, 也会导致次应力产生, 但总体而言这样的计算方式是偏于保守的, 对保证安全有利, 计算简图如下图 2-2:



> 2-2 水平支承桁架计算简图

(1) 计算简图与荷载分析

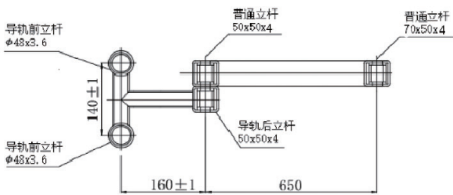
将水平支承桁架按铰接桁架计算, 分析使用、升降和坠落三种工况下的荷载, 确定单根立杆所承受的荷载, 选取最不利工况进行后续计算。如在使用工况下, 计算内、外立杆传递给水平支承桁架的荷载, 为受力分析提供数据。

(2) 受力分析与承载验算

采用 Midas 软件进行受力分析, 得到支座支力和各杆件内力。根据结果对杆件进行强度和稳定验算, 如对上下弦杆及腹杆, 计算其最大轴压力, 结合截面特性和长细比, 验算强度和稳定性, 确保水平支承桁架在各种工况下安全可靠^[2]。

3. 主框架验算

本型号装配式附着升降脚手架的主框架是由组合导轨、内立杆、外立杆、斜撑 (含主框架横杆) 构成, 其断面如下图:



> 图 2-3 附着升降脚手架的主框架断面图

(1) 模型假定与计算荷载

将主框架组合导轨与内外立杆视为竖向刚架, 采用等效刚截面简化计算。确定由水平支承桁架传递的竖向荷载及风载标准

值,分别计算使用工况和升降工况下的荷载,为后续建模分析提供准确的荷载数据。

(2) 计算简图、受力分析与承载验算

利用 Midas/Gen 软件建立主框架模型,考虑不同工况组合进行荷载加载和分析。得到各组合下结构的内力、弯矩图和综合应力图,据此对导轨、内立杆、外立杆、横杆和斜撑等构件进行强度验算。同时,考虑压杆稳定问题,计算长细比并查稳定系数,验算各构件在轴力和弯矩共同作用下的稳定性,确保主框架结构安全^[3]。

三、现场施工过程与适配性分析

(一) 施工准备阶段

在附着式升降脚手架施工中,技术准备是关键环节,需编制详尽施工方案并全面交底,让施工人员明晰架体构成、安装方案、技术要点与操作流程,组织学习确定架体机位、预留孔位置等参数,筑牢施工根基;材料与设备准备要依据施工方案,备好如 FPT-C-1-GH18 型机位等合格构配件和设备,严格检验进场材料的质量证明文件,保证材料性能契合设计计算,保障源头安全;现场准备工作同样重要,做好“三通一平”,规划材料设备堆放及临时设施搭建,安排物资进场并拟定计划,还需兼顾季节性施工准备,雨季防雨排水、冬季防寒保暖及混凝土养护等,全方位确保施工顺利推进。

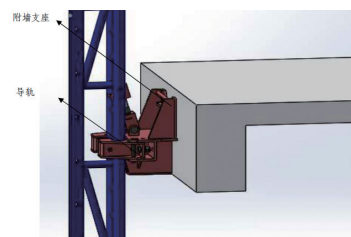
(二) 安装实施阶段

在附着式升降脚手架的安装阶段,找平架搭设至关重要,需在原临时双排外脚手架上进行,严格把控其强度、稳定性,精确控制立杆位置、水平度与平台标高,如找平架上皮距楼面 -0.5m 左右,高差及闭合差在规定范围内,为后续施工打造坚实基础。架体单元组装依平面方案在硬化地面展开,4 人一组从端部拼装,各构件安装严守设计要求,像脚手板用规定螺栓精准连接,确保单元稳固且契合力学模型。主体脱模后及时安装附墙支座, M30 螺栓固定并保证背板贴合、丝扣外露,同时安装吊挂件等部件,保证位置与连接无误,实现架体与建筑结构的可靠连接及受力传递^[4]。

(三) 提升下降阶段

在附着式升降脚手架的提升环节,提升准备工作是保障安全的重要前提。提升前需全方位检查架体,涵盖吊点、吊环等部件,保证其无损坏,并预紧链条、检查电动葫芦及工具配件,经自检整改合格后才能启动提升程序,严格遵循安全要求确保架体受力稳定(如图 3-1)。提升过程中,可整栋楼或分区分组操作,利用智能控制系统监控机位运行,保障同步性,一旦故障发生能迅速停机处理,调整导轨垂直度,且当机位荷载超设计值一定比例时,系统自动报警甚至停机,契合荷载控制与安全保护要求。升降到位后,及时进行附墙支座的安装或拆除、锁定器紧固等操作,

恢复连接与防护并检查验收,使架体在新位置稳定可靠,适配设计计算中的工况与受力变化,满足施工与安全需求^[5]。



> 图 3-1 升降脚手架附着方式

(四) 使用维护阶段

在附着式升降脚手架的使用阶段,使用荷载控制是关键要点,务必严格限制两步架和三步架同时使用时的荷载,严禁超载且保证荷载均匀分布,以防架体超出设计承载能力,切实保障使用安全。定期维护保养不可或缺,需依规定周期操作,像每周维护电动葫芦,每月全面自检架体,每次升降后保护支座并检查相关部件等,以此维持架体性能符合设计,延长其使用寿命。同时,安全防护与检查工作必须落实到位,确保安全网等防护设施完备、架体与建筑物连接稳固且底部密封良好,定期排查杆件、螺栓、防护措施及荷载等情况,及时维修或更换问题部件,使架体始终契合设计计算的安全储备与防护标准,保持安全可靠状态。

(五) 结束拆除阶段

在附着式升降脚手架拆除工作开启前,拆除准备工作至关重要。需进行详尽的安全技术交底,清晰说明拆除顺序、方法与安全要点,同时备好拆除工具,并彻底清理架体上的材料和垃圾,营造安全的拆除环境。例如在拆除前将提升装置拆除并妥善吊运至地面分类码放。拆除过程中,严格按照与组装相反的顺序操作,先拆除连接螺栓,再拆除架体单元,依据塔吊能力确定分片和单元大小,且采取在单元立杆绑缆风绳等稳定措施,确保符合结构受力和拆除力学原理,安全有序推进。拆除时还注重成品保护,避免对墙面等造成损坏,及时吊运构配件分类堆放、整修保养,妥善处理小构配件和标准件,并清理现场,保障施工全过程的完整与可持续。

四、结论

奉贤新城项目中,附着式升降脚手架的结构设计计算与施工适配性研究成果显著。设计依规范精确分析确定结构与构件参数,绘制施工技术蓝图。施工各环节严格依设计操作,从准备到拆除全程紧密适配。两者结合保障施工安全稳定、提升效率,为同类项目树立榜样,助力建筑技术发展。未来还需强化设计施工沟通协作,持续优化计算方法与工艺,提升脚手架综合性能与应用水平,推动行业持续进步。

参考文献

- [1] 朱文锋; 黄毫春; 王大任; 朱文滔; 雷明. 附着式升降脚手架在高层建筑工程中的运用 [J]. 安装, 2023(11)
- [2] 王文剑; 申楚雄; 唐潮. 基于 BIM 的附着式升降脚手架施工安全管理研究 [J]. 中国建设信息化, 2023(20).
- [3] 黄必成; 郑少星; 李宏伟; 李开燕; 刘思平. 全钢附着式升降脚手架的深化设计与施工技术 [J]. 建筑技术, 2023(16).
- [4] 王超台; 任根立; 冉永红. 附着式升降脚手架的应用研究 [J]. 河南城建学院学报, 2023(02).
- [5] 王莹. 附着式脚手架施工技术应用研究 [J]. 居舍, 2023(20).

GPS技术在海洋测绘中的运用

卢忠连

中石化石油工程设计有限公司，山东 东营 257000

摘 要： 本文深入探讨了 GPS 技术在海洋测绘中的应用，详细阐述了 GPS 技术的概念、海洋测绘的概况，分析了 GPS 技术在海洋测绘中的应用意义，包括提升测绘工作水平、节省测量时间以及促进海洋强国建设等方面，并具体介绍了其在海洋定位、水深测绘、海洋大地控制网布设、海洋灾害监测和海岸地形测量等领域的应用，展示了 GPS 技术在海洋测绘中的重要性和广阔前景。

关 键 词： GPS 技术；海洋测绘；海洋定位；水深测绘

Application of GPS Technology in Ocean Surveying and Mapping

Lu Zhonglian

Sinopec Engineering Incorporation, Dongying, Shandong 257000

Abstract： This paper delves into the application of GPS technology in ocean surveying and mapping, detailing the concept of GPS technology and the overview of ocean surveying and mapping. It analyzes the significance of GPS technology's application in ocean surveying and mapping, including improving the level of surveying and mapping work, saving measurement time, and promoting the construction of a maritime power. Specifically, it introduces its applications in ocean positioning, water depth surveying and mapping, deployment of ocean geodetic control networks, ocean disaster monitoring, and coastal topographic surveying, demonstrating the importance and broad prospects of GPS technology in ocean surveying and mapping.

Keywords： GPS technology; ocean surveying and mapping; ocean positioning; water depth surveying and mapping

一、GPS技术与海洋测绘概述

（一）GPS技术概念

GPS（Global Positioning System）即全球定位系统，是一种基于卫星导航系统的空间定位技术。其基本原理是通过地面接收设备接收多颗卫星发射的信号，利用三角测量方法精确测定接收设备所处的三维空间位置，涵盖经度、纬度和高程信息^[1]。GPS系统由空间卫星星座、地面监控系统 and 用户接收设备三大部分组成。空间卫星星座由多颗分布在不同轨道上的卫星构成，确保在地球任何位置至少能同时接收到四颗卫星的信号，从而实现全球范围内的定位覆盖。地面监控系统负责监测和控制卫星的运行状态，保证卫星信号的准确性和稳定性。用户接收设备则是安装在测量载体上，如测量船、海洋浮标等，用于接收卫星信号并进行数据处理，以获取自身的位置信息^[2]。GPS技术具有高精度、全天候、高效率等显著特点，其定位精度可根据不同的测量需求和设备性能达到米级甚至厘米级，能够在各种复杂的自然环境下稳定工作，不受天气、昼夜等因素的限制，广泛应用于交通运输、地理测绘、军事国防等众多领域，为现代社会的发展提供了重要的位置信息服务。

（二）海洋测绘概况

海洋测绘是一门综合性的学科，旨在对海洋及其邻近陆地和江河湖泊的地理信息进行测量和绘图。其主要任务包括海洋地形地貌测绘、海洋重力测量、海洋磁力测量、水深测量、海洋工程

测量等多个方面^[3]。海洋测绘的作业范围广阔，从近海的浅滩、港湾到远海的深海区域，涉及的海洋环境复杂多变，如海水的深度、盐度、温度、海流、海浪等因素都会对测量工作产生影响。在海洋地形地貌测绘中，需要精确测量海底的起伏形态、岛屿和礁石的分布等信息，为海洋资源开发、海洋工程建设提供基础地形数据。海洋重力测量和磁力测量则用于研究地球的重力场和磁场在海洋区域的分布特征，对于地质勘探、海洋地球物理研究等具有重要意义。水深测量通过测量海底到海面的垂直距离，绘制出详细的水深地形图，为航海安全保障、海洋渔业捕捞、海底管线铺设等提供关键数据。

二、GPS技术在海洋测绘中的应用意义

（一）提升测绘工作水平

传统的海洋测绘方法，如天文定位、陆标定位等，受限于观测条件和仪器精度，定位误差较大，难以满足现代海洋测绘高精度的要求。而 GPS 技术凭借其先进的卫星定位原理，能够实时、精确地确定测量船的位置，误差范围极小，为后续的测量工作提供了可靠的起始数据^[4]。在绘制海洋地图时，高精度 GPS 定位使得测量点的坐标更加准确，从而使地图上的海洋地形地貌、岛屿分布等信息更加精准，为海洋工程建设、航海导航等提供了更具参考价值的数据。例如，在港口航道的测绘中，精确的 GPS 定位能够确保航道的宽度、深度等参数的测量精度，避免因数据误

差导致的船舶航行安全隐患,提高港口运营的安全性和效率。同时, GPS 技术还可以与其他海洋测绘仪器设备相结合,如多波束测深仪、侧扫声呐等,实现多种测量数据的同步采集和融合处理,进一步提高海洋测绘成果的质量和完整性,推动海洋测绘技术向更高水平发展^[5]。

(二) 节省更多测量时间

传统的测绘方法由于定位过程繁琐、受环境因素影响大,往往需要耗费大量的时间来完成测量任务。而 GPS 技术的快速定位功能极大地缩短了测量时间。测量船在海上作业时,只需开启 GPS 接收机,即可在短时间内获取自身的精确位置信息,无需像传统方法那样进行复杂的天文观测或陆标测量计算,减少了测量过程中的等待时间和操作步骤。此外,在大面积的海洋测绘项目中,利用 GPS 技术可以实现多艘测量船的协同作业,通过合理规划测量航线和任务分配,同时对不同区域进行测量,大大提高了测量效率,缩短了整个项目的工期^[6]。例如,在对一片广阔的海域进行水深测绘时,多艘配备 GPS 设备的测量船可以按照预定的网格状航线快速展开测量工作,快速获取大面积海域的水深数据,相比传统的单船逐点测量方式,节省了大量的时间和人力物力成本,使海洋测绘工作能够更高效地完成,及时满足海洋开发与管理的需求^[7]。

(三) 促进海洋强国建设

精准的海洋测绘数据是海洋资源开发利用的基础,通过 GPS 技术获取的高精度海洋地理信息,能够帮助国家更科学地规划海洋资源的开发布局,提高海洋资源的开发效率和效益。在海洋油气资源勘探中,准确的海洋地形和地质构造数据可以指导勘探船的作业位置,降低勘探成本,增加油气资源的发现概率,推动海洋能源产业的发展,增强国家的能源保障能力。在海洋渔业方面,详细的海洋环境和渔场分布信息有助于渔民合理安排捕捞作业,提高渔业产量,促进海洋渔业的可持续发展^[8]。同时,在海洋权益维护方面,精确的海洋测绘成果是划定海洋边界、专属经济区等的重要依据, GPS 技术能够确保这些边界的精确测定和标识,为国家海洋权益的维护提供有力的技术支持,防止海洋权益受到侵犯。此外,先进的海洋测绘技术也是发展海洋军事力量的关键因素之一,为舰艇导航、海洋战场环境构建等提供精确的地理信息,提升国家的海洋军事防御和作战能力,从经济、安全等多个方面全面助力海洋强国建设,增强国家在全球海洋事务中的竞争力和影响力。

三、GPS 技术在海洋测绘中的具体应用

(一) GPS 技术在海洋定位中的应用

在海洋测量作业中,测量船需要准确知道自身在海洋中的位置,以便进行后续的测量工作。GPS 接收机安装在测量船上,通过接收卫星发射的信号,利用卫星轨道参数和信号传播时间等信息,解算出测量船的三维坐标,包括经度、纬度和高程^[9]。无论是在近海的港口航道测量、海洋工程建设的前期勘察,还是在远海的海洋科学考察、海洋资源勘探等活动中, GPS 定位都能为测

量船提供高精度、实时的位置信息。在近海区域, GPS 定位精度可以满足港口设施建设、航道疏浚等工程对测量精度的要求,确保测量船在狭窄的航道和港口水域内准确行驶和定位,避免碰撞事故的发生,保障港口作业的安全和高效。在远海作业中,即使远离陆地参考点, GPS 技术依然能够依靠卫星星座的全球覆盖特性,精确确定测量船的位置,为远洋测绘任务提供可靠的位置基准^[10]。而且,随着技术的不断发展,差分 GPS (DGPS) 技术的应用进一步提高了海洋定位的精度,通过在已知位置设置基准站,对卫星信号进行差分修正,将定位精度提升到亚米级甚至更高水平,满足了海洋测绘中对高精度定位的需求,为海洋测绘的各项工作奠定了坚实的基础。

(二) GPS 技术在水深测绘中的应用

GPS 技术与回声测深仪等设备相结合,实现了高效、精确的水深测量。回声测深仪通过向海底发射声波并接收反射回来的声波信号,根据声波传播的时间计算出海底到海面的深度。而 GPS 技术则负责确定测量船的平面位置。在测量过程中,测量船沿着预定的测线航行, GPS 接收机实时记录测量船的位置信息,同时回声测深仪不断测量船下方的水深数据。通过将两者的数据进行同步采集和处理,能够精确绘制出海底的地形起伏状况,生成高精度的水深地形图^[11]。 GPS 与回声测深仪相结合的测量方式,克服了传统水深测量方法中定位不准确、测量效率低的问题。在大面积的海域测量中,能够快速获取海量的水深数据,并且通过 GPS 的高精度定位,保证了数据的准确性和空间位置的精确性,水深测绘成果广泛应用于海洋航道维护、海底电缆铺设、海洋石油开采平台建设等海洋工程中,为工程设计和施工提供了详细、准确的海底地形数据,保障了海洋工程的安全实施,降低了工程建设风险,提高了海洋资源开发利用的可行性和效率。

(三) GPS 技术在海洋大地控制网布设中的应用

GPS 技术是构建海洋大地控制网的重要手段。通过在海岛、海岸以及海洋中的礁石等稳定的地物上设立 GPS 控制点,利用 GPS 测量技术精确测定这些控制点的三维坐标。在测量过程中,采用静态 GPS 测量方法,将 GPS 接收机长时间安置在控制点上,连续接收卫星信号,通过对观测数据的精密处理,获得高精度的控制点坐标。然后以这些控制点为基础,通过高精度的 GPS 观测和数据处理,构建起覆盖整个测区的海洋大地控制网。这一控制网为海洋测绘的各项工作提供了统一的坐标基准,使得不同时期、不同测量单位获取的海洋测绘数据能够准确融合,提高了海洋测绘成果的兼容性和一致性。在海洋大地测量、海洋重力测量、海洋磁力测量等工作中,都需要依托海洋大地控制网进行坐标转换和数据整合,确保测量数据的准确性和可靠性。同时,海洋大地控制网的建立也为海洋科学研究、海洋资源开发等提供了稳定可靠的基础数据平台,为深入了解海洋地质构造、地球物理场分布等提供了精确的坐标框架,推动了海洋测绘和海洋科学研究的协同发展。

(四) GPS 技术在海洋灾害监测中的应用

海洋灾害频发对人类生命财产安全和海洋生态环境造成了严重威胁, GPS 技术在海平面变化监测方面,通过在沿海地区设

置 GPS 监测站，长期连续观测监测站的高程变化，结合验潮站的数据，可以精确监测海平面的升降情况。海平面上升是全球气候变化的重要表现之一，对沿海地区的生态环境、城市建设和经济发展都带来了诸多挑战。GPS 监测数据能够为海平面变化研究提供准确的时空信息，帮助科学家预测海平面上升的趋势和影响范围，为沿海地区制定应对海平面上升的策略提供科学依据。在海岸侵蚀监测中，GPS 技术能够实时监测海岸线的位置变化。将 GPS 接收机固定在海岸线上的关键位置，定期测量其坐标信息，通过对比不同时期的测量数据，可以分析海岸侵蚀的速率和范围。海岸侵蚀会导致土地流失、海岸防护设施损坏等问题，利用 GPS 技术的监测结果，可以及时采取有效的防护措施，如建设海堤、种植红树林等，保护沿海地区的生态环境和人类活动安全。在海啸预警系统中，分布在海洋中的 GPS 浮标可以实时监测海水的水位变化，当海底发生地震等引发海啸的地质灾害时，海啸波会引起海水水位的异常变化，GPS 浮标能够迅速捕捉到这种变化，并将数据通过卫星通信传回陆地监测中心，为海啸预警争取宝贵时间，减少海啸灾害对沿海地区造成的损失，保障沿海居民的生命财产安全，维护海洋生态环境的稳定。

（五）GPS 技术在海岸地形测量中的应用

在海岸地形测量中，利用 GPS 接收机结合全站仪等测量设备，能够快速获取海岸线上各种地形地物的三维坐标信息，包括

沙滩、礁石、海堤、港口设施等。通过高精度的 GPS 测量，可以详细绘制出海岸带的地形地貌图，清晰地反映出海岸的起伏变化、地形坡度等信息。在沿海城市的规划建设中，准确的海岸地形数据可以指导城市的布局和基础设施建设，如滨海公路、海滨公园的选址和设计，避免因地形不明导致的建设风险和资源浪费。在港口规划方面，GPS 技术能够精确测量港口的水深、码头的位置和高程等信息，为港口的建设和扩建提供科学依据，确保港口设施的合理布局和安全运行，提高港口的运营效率和吞吐能力。同时，在海岸带资源开发和管理中，详细的海岸地形信息有助于合理规划旅游开发、渔业养殖等活动，提高海岸带资源的综合利用价值，促进沿海地区的经济发展和生态保护协调共进，推动沿海地区的可持续发展。

四、结语

GPS 技术给海洋测绘带来变革机遇，以高精度和高效率提升测绘水平，节省时间成本，为海洋强国建设助力，在多个关键领域尽显优势，推动技术创新进步，随着科技发展，将与遥感、GIS 等技术融合，拓展应用领域，在海洋资源开发、环境保护、权益维护及科研等方面持续发挥核心作用，促进海洋事业迈向辉煌。

参考文献

[1] 张彩霞, 朱夕波. GNSS 技术在海洋测绘中的应用研究 [J]. 水上安全, 2023, (09): 61-63.
[2] 林祥伟. GPS 测量技术在海洋测绘中的运用分析 [J]. 住宅与房地产, 2021, (25): 214-215.
[3] 林祥伟. GPS 测量技术在海洋测绘中的运用分析 [J]. 数字通信世界, 2021, (09): 184-185.
[4] 吴泽献. 海洋测绘通信技术在航道疏浚工程测量中的实践 [J]. 四川水泥, 2020, (09): 191-192.
[5] 洪泽. GPS 技术在海洋测绘中的运用效果研究 [J]. 科技创新与应用, 2020, (08): 168-169.
[6] 李满富. 海洋测绘中 GPS 技术的运用探索 [J]. 科技资讯, 2022, 20 (22): 83-86.
[7] 齐晓迪. 多波束测绘系统在现代海洋测绘中的应用研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44 (08): 200-203.
[8] 辜文军. 在地质测绘中应用现代测绘技术的作用分析 [J]. 有色金属设计, 2020, 47 (03): 112-113+118.
[9] 王光学. GPS 在海洋测绘中的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2020, 5 (01): 54-55.
[10] 解洋, 秦思远, 刘煜. 浅析 GPS 在海洋测绘中的应用 [J]. 科学技术创新, 2020, (01): 57-58.
[11] 于晓东, 海洋遥感测绘信息处理技术研究与应用. 山东省, 山东天元信息技术有限公司, 2020-03-29.

智能化机械设备维保体系构建与实施策略

徐驰

天津滨海概念人力资源信息科技有限公司，天津 300000

摘 要： 本研究深入探讨了智能化机械设备维保体系的构建与实施策略。首先，文章明确了智能化机械设备的概念，并对其在现代生产中的发展状况进行了全面分析，突出了其在工业进步中的重要作用。随后，详细阐述了智能化机械设备维保体系构建的必要性及实施途径，包括构建原则、框架结构、主要内容与方法，为精准制定和有效执行维保策略提供了理论依据。进一步地，提出了包括预防性维护、故障预测与健康管理等在内的综合维保策略。文章最后探讨了维保流程优化、质量控制、成本控制及信息化管理等实施策略，旨在提升维保效率及设备运行的可靠性。本研究为智能化机械设备维保领域提供了理论指导与实践参考，对于提高企业生产效率和设备管理水平具有显著意义。

关 键 词： 智能化机械设备；维保体系；构建；实施策略；预防性维护

Construction and Implementation Strategy of Intelligent Machinery and Equipment Maintenance System

Xu Chi

Tianjin Binhai Concept Human Resources Information Technology Co., Ltd. Tianjin 300000

Abstract： This study delves into the construction and implementation strategies of an intelligent machinery and equipment maintenance system. Initially, the article clarifies the concept of intelligent machinery and equipment, and comprehensively analyzes its development status in modern production, highlighting its significant role in industrial progress. Subsequently, it elaborates on the necessity and implementation pathways of constructing an intelligent machinery and equipment maintenance system, including construction principles, framework structure, main content, and methods. This provides a theoretical basis for accurately formulating and effectively executing maintenance strategies. Furthermore, it proposes a comprehensive maintenance strategy encompassing preventive maintenance, fault prediction and health management, maintenance resource allocation, and personnel training and management. The article concludes by exploring implementation strategies such as maintenance process optimization, quality control, cost control, and information management, aiming to enhance maintenance efficiency and equipment operational reliability. This study offers theoretical guidance and practical references for the field of intelligent machinery and equipment maintenance, and holds significant implications for improving enterprise production efficiency and equipment management levels.

Keywords： intelligent machinery and equipment; maintenance system; construction; implementation strategy; preventive maintenance

引言

随着科技的飞速发展，智能化机械设备在各个领域的应用日益广泛，已成为推动我国产业结构调整 and 转型升级的重要力量。智能化机械设备具有高效、精确、自动化程度高等特点，能显著提高生产效率和产品质量。然而，与此同时，智能化机械设备的高复杂性和对运行环境的要求也使得其维护保养工作面临巨大挑战。

当前，我国智能化机械设备的维保体系尚不完善，维保工作存在一定的盲目性和滞后性，导致设备故障率较高，影响了企业的正常生产和经济效益。因此，如何构建一套科学、合理的智能化机械设备维保体系，并制定有效的实施策略，成为当前亟待解决的问题。

一、智能化机械设备概述

智能化机械设备不仅代表了制造业的未来趋势，更是实现工业自动化和智能化的核心。以下是对智能化机械设备的概述，包

括其定义和发展现状。

（一）智能化机械设备定义

智能化机械设备，顾名思义，是指那些集成了先进感知、分析、推理、决策和控制功能的机械装置。它们通过融合制造技

术、信息技术和智能技术，展现出制造业的智能化、数字化和网络化特征。在日常的生产生活中，机械智能化技术有一个极大的优势，那就是相对于传统的人类手动机械制造来说它具有更高的质量和可靠性^[1]。这些设备不仅能够提高生产效率和产品质量，还能在节能环保、安全生产等方面发挥重要作用，是推动传统产业升级改造的重要工具。

（二）智能化机械设备发展现状

为了促进我国工业化的发展，机械工程的发展一直受到党和国家的重视^[2]。审视智能化机械设备的发展现状，可见一幅洋溢着活力与创新的技术画卷。随着人工智能、物联网、大数据等新一代信息技术与先进制造技术的深度融合，所以智能化机械设备伴随着工程的需求而快速地发展起来^[3]。从产业规模、关键技术到零部件的自主化程度，再到产品质量，各方面都取得了显著进步。据统计，2019年我国智能装备产业产值达到17776亿元，较2015年几乎翻倍，这一数据充分展示了行业的强劲发展势头。

机械工程智能化控制的技术主要包括编程技术、控制技术、自动化技术等多种技术^[4]。智能制造作为智能化机械设备的重要组成部分，其发展受到了全球范围内的广泛关注。它通过将新一代信息通信技术与先进制造技术相结合，实现了设计、生产、管理、服务等制造全过程的智能化。这种智能化不仅体现在产品本身，还体现在生产装备、流程管理以及企业间的互动模式上。全球范围内，智能制造装备的发展趋势，如德国的工业4.0和美国的工业互联网装备，都预示着智能化机械设备将在全球制造业中扮演越来越重要的角色。

二、智能化机械设备维保体系构建

构建一套完善的智能化机械设备维保体系，不仅能够保障设备的正常运行，还能有效降低维护成本，延长设备使用寿命。以下是对智能化机械设备维保体系构建的详细阐述，包括构建原则、框架、内容和方法。

（一）维保体系构建原则

在构建智能化机械设备的维保体系时，首要任务是恪守一系列核心原则。这些原则包括前瞻性，即维保体系应具备预见性，能够针对潜在问题提前制定解决方案；系统性，维保体系应覆盖设备的全生命周期，从设计、安装到运行、报废各个阶段；经济性，维保体系应在保证设备性能的同时，尽可能降低维护成本；可操作性，维保体系应易于理解和执行，确保维护工作的顺利进行。

（二）维保体系构建框架

在明确了构建原则之后，接下来是维保体系的框架设计。按照目标明确、全面成套、结构合理、动态开放、政策一致、国际接轨等原则构建智能农机装备标准体系框架^[5]。组织结构要清晰明确，确保维保工作有专人负责；责任分配要合理，确保每个环节都有人负责，避免责任盲区；流程设计要科学，确保维护工作有序进行；资源配置要充足，确保维保工作所需的人力、物力、财力得到保障。构建“远程、智能、共享”的设备智能运维管理

新模式，重塑设备运维价值链，实现设备管理价值最大化^[6]。

（三）维保体系构建内容

维保体系的内容是构建过程中的核心部分，它涵盖了预防性维护、故障排除、备件管理、技术更新、人员培训等多个方面。预防性维护旨在通过定期检查、保养来预防设备故障；故障排除则是在设备出现问题时，能够迅速定位并解决问题；备件管理要确保关键备件的及时供应；技术更新则是跟随设备技术的发展，不断优化维保技术；人员培训则是提升维保团队的专业能力，以适应不断变化的维保需求。

（四）维保体系构建方法

关键在于，维保体系构建的方法论同样具有至关重要的地位。这包括制定详细的维保计划，采用先进的维保技术和工具，建立完善的维保档案，以及实施持续改进。维保计划的制定要结合设备的具体情况和实际运行状况；维保技术和工具的选择要注重实效性和先进性；维保档案的建立要详实准确，便于查询和分析；持续改进则是通过不断总结经验，优化维保体系，提高维保效率。

三、智能化机械设备维保策略

在智能化机械设备的高效运行背后，维保策略的制定与执行起着至关重要的作用。一套科学合理的维保策略不仅能够保障设备的持续稳定工作，还能有效降低维修成本，提升企业的整体竞争力。以下是对智能化机械设备维保策略的深入探讨，包括预防性维护、故障预测与健康管理、维保资源配置以及维保人员培训与管理。

（一）预防性维护策略

预测性维护是以状态为依据的维修，是对设备进行连续在线的状态监测及数据分析，诊断并预测设备故障的发展趋势，提前制定预测性维护计划并实施检维修的行为^[7]。工程设备的稳定运行是建筑工地安全施工的重要保障^[8]。该策略的核心在于“防患于未然”，通过定期地检查、保养、更换易损件等方式，提前发现并解决潜在的故障问题。预防性维护不仅能够减少突发性故障的发生，还能延长设备的使用寿命，降低因设备故障带来的生产中断风险。实施预防性维护策略时，需根据设备的具体类型和工作环境，制定个性化的维护计划，确保维护工作的针对性和有效性。

（二）故障预测与健康管理策略

新一代人工智能技术的发展与应用装备积累了大量数据，推动着故障预测与健康管理（PHM）进入了工业大数据时代^[9]。通过运用物联网、大数据分析、人工智能等技术，对设备的运行数据进行实时监控和分析，预测设备可能出现的故障和健康状态。这种策略使得维保工作从传统的被动响应转变为主动预防，大大提高了维保的精准性和效率。健康管理系统的建立，能够为设备提供全面的健康评估，为维护决策提供科学依据。

（三）维保资源配置策略

维保资源配置策略则是确保维保工作顺利进行的物质保障。

这包括合理规划维保所需的人力、物力、财力等资源，确保在设备出现问题时能够迅速响应。资源配置策略需考虑设备的复杂程度、关键性、故障率等因素，对于关键设备和易损件，应保证充足的备件库存和专业的维护工具，以减少设备停机时间。

（四）维保人员培训与管理策略

最终，维护保养人员的培训与管理策略对于增强维保团队的整体能力起着决定性作用。随着智能化机械设备的技术含量不断提高，对维保人员的专业知识和技能要求也在增加。企业应定期组织专业培训，提升维保人员的故障诊断能力、维护操作技能和应急处理能力。同时，通过建立激励机制和管理制度，提高维保人员的工作积极性和责任感，确保维保工作的质量和效率。

四、智能化机械设备维保实施策略

在智能化机械设备日益成为工业生产中不可或缺的核心力量之际，如何确保这些设备的高效、稳定运行，成为企业运营管理的重要课题。维保实施策略作为保障设备性能的关键环节，其优化、质量控制、成本控制以及信息化管理等方面，对于提升整体维保效果具有重要意义。以下是对智能化机械设备维保实施策略的详细探讨。

（一）维保流程优化

线下维修过程中，存在诸多缺点^[10]。从根本上讲，维保流程的优化是提高维护保养效率的基础所在。通过对现有维保流程的深入分析，找出流程中的瓶颈和冗余环节，实现流程的简化和标准化。优化的维保流程应具备清晰的步骤、明确的职责划分和高效的协调机制，确保从设备检查、故障诊断、维修作业到后续跟踪的每一个环节都能高效衔接，减少不必要的等待时间和资源浪费，从而提升整体的维保响应速度和服务质量。

（二）维保质量控制

进一步而言，维护保养质量控制是保障设备可靠性的关键要

素。质量控制策略应贯穿于维保的全过程，从维修材料的选择、维修工艺的应用，到维修结果的验收，都需严格执行标准化的质量控制流程。通过定期的质量检查、评估和反馈，及时纠正维保过程中的偏差，确保每一次维修都能达到预期的效果，从而保障设备的长期稳定运行。

（三）维保成本控制

维保成本控制则是企业在实施维保策略时不可忽视的一环。合理控制维保成本，不仅能够减轻企业的财务负担，还能提高维保工作的性价比。这要求企业在制定维保计划时，充分考虑成本效益比，通过采用先进的维保技术、合理的备件库存策略和预防性维护措施，减少突发性故障和重复维修的发生，从而有效控制维保成本。

（四）维保信息化管理

至关重要的是，维保工作的信息化管理是推动维保作业现代化进程的关键手段。通过建立信息化管理平台，实现维保数据的集中收集、存储、分析和应用，可以大大提高维保工作的透明度和决策的科学性。信息化管理不仅能够实时监控设备状态，还能为维保人员提供便捷的维修指南和知识库支持，提升维保工作的精准性和效率。

五、结束语

总结起来，本文针对智能化机械设备维保体系构建与实施策略进行了系统研究。通过深入剖析智能化机械设备的特点和维护需求，构建了一套科学、合理的维保体系，并提出了相应的实施策略。本研究对于提高智能化机械设备运行效率、降低故障率、延长使用寿命具有重要意义。虽然本文的研究范围和深度有限，但希望能为我国智能化机械设备维保领域的发展提供有益借鉴，为企业创造更大的经济效益。未来研究可在此基础上，进一步拓展和深化，以适应不断发展的智能化机械设备维护需求。

参考文献

[1]王瑞洋, 邵文华, 张丽娜. 机械智能化的发展趋势 [J]. 湖北农机化, 2020, (15): 146-147.
[2]朱君. 机械智能化现状及发展趋势 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2020, (15): 185-186.DOI: 10.13487/j.cnki.imce.018101.
[3]杨晓冬. 机械工程智能化发展的现状及未来趋势 [J]. 化工管理, 2019, (29): 13-14.
[4]唐健. 机械工程智能化发展的现状及未来趋势 [J]. 内燃机与配件, 2019, (01): 217-218.DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2019.01.108.
[5]胡小鹿, 梁学修, 张俊宁, 等. 中国智能农机装备标准体系框架构建与研制建议 [J]. 智慧农业 (中英文), 2020, 2(04): 116-123.
[6]钢铁行业设备智能运维系统解决方案研究及应用 [J]. 中国冶金, 2023, 33(09): 135.
[7]祝旭. 故障诊断及预测性维护在智能制造中的应用 [J]. 自动化仪表, 2019, 40(07): 66-69.DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2019030334.
[8]崔灿. 预防性维护设备管理系统研究 [D]. 湖北工业大学, 2021.DOI: 10.27131/d.cnki.ghugc.2021.000447.
[9]金晓航, 王宇, ZHANG Bin. 工业大数据驱动的故障预测与健康管理 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(05): 1314-1336.DOI: 10.13196/j.cims.2022.05.005.
[10]杨佳杭, 李明颖, 王德权, 等. 设备智能维保系统的研发 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, (05): 96-98+102.DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2021.05.022.

高速重载工况下轴承与联轴器协同优化设计

魏巍, 冯卫国, 岳国艳, 章俊杰

襄阳宇清传动科技有限公司, 湖北 襄阳 441000

摘要： 高速重载工况中机械设备的平稳运行受到了很多挑战，而轴承和联轴器作为关键组成部分，它们的性能好坏直接关系到设备的整体效能。本文深入分析了二者在此工况下的特性，论述了协同优化设计的需求，并揭示了其中存在的配合精度不够高和振动噪声较大等问题，并有针对性地提出了包括结构优化，材料选型和润滑改进在内的策略，目的在于促进系统可靠性的提高和使用寿命的延长，以及有利于产业升级。

关键词： 高速重载；轴承；联轴器；协同优化设计

Coordinated Optimization Design of Bearings and Couplings under High-speed and Heavy-load Conditions

Wei Wei, Feng Weiguo, Yue Guoyan, Zhang Junjie

Xiangyang YUQING Transmission Technology Co., Ltd. Xiangyang, Hubei 441000

Abstract： The stable operation of mechanical equipment under high-speed and heavy-load conditions faces many challenges. As key components, the performance of bearings and couplings directly affects the overall efficiency of the equipment. This paper deeply analyzes the characteristics of these two components under such conditions, discusses the need for coordinated optimization design, reveals issues such as insufficient cooperation accuracy and large vibration noise. Targeted strategies, including structural optimization, material selection, and lubrication improvement, are proposed to system reliability and extend service life, thereby contributing to industrial upgrading.

Keywords： high-speed and heavy-load; bearings; couplings; coordinated optimization

引言

伴随着现代工业向着高速化和重载化的方向快速发展，航空航天，轨道交通以及大型机械制造等诸多领域都对机械设备性能提出了越来越苛刻的要求。在复杂的工作条件下，轴承是支承旋转部件和联轴器用来联接不同轴系以传递动力的关键元件之一，它不可能孤立达到最佳性能。仅依赖单一的优化轴承或联轴器在某些方面，很难满足由于高速重载导致的高负荷、高转速和高可靠性的需求。以高铁列车动力传动系统为例，如果轴承和联轴器配合不佳，很容易诱发振动增大，磨损过快，甚至出现突发故障等问题，危害行车安全。所以，对二者进行协同优化设计研究具有非常现实的意义，也是确保装备高效平稳运行和促进工业进步的关键途径。

一、高速重载工况下轴承与联轴器的特点

（一）高负荷承载特性

高速重载的特点是轴承需要承受巨大的径向和轴向负荷。就风力发电机而言，它的主轴轴承需要支承由叶片旋转所产生的庞大轴向推力和由于风速变化而产生的径向力等载荷，载荷可达几十吨乃至更高。对联轴器而言，与高速旋转和重载轴系相连，需要传递相同数量级的扭矩，其内部结构需要有高强度的抗扭能力，类似于大型船舶推进轴系联轴器，需要可靠地传输主机几万·米量级扭矩以确保船舶航行动力传输的稳定性^[1]。

（二）高速运转适应性

在高速运转的工作条件下轴承的转速往往超过每分钟几千转次。对于航空发动机的主轴承，其工作转速能够超过20000rpm，

这意味着轴承需要拥有出色的动态平衡特性、低摩擦系数，并能减少高速旋转带来的离心力和陀螺力矩等负面效应，以确保其稳定工作。联轴器，在高速运转时，要克服不平衡质量所诱发的震动，它所联接零件的动刚度和阻尼特性都需要进行精细的设计，例如高速离心机联轴器，应以高转速平稳地传递动力以免发生共振而损坏装置。

（三）精度要求严苛

轴承径向跳动，轴向窜动的准确性直接影响着设备的加工精度或者运行的平稳性。精密机床主轴轴承中，要求径向跳动精度达到微米级以确保被加工工件表面质量。联轴器联接两轴时同轴度精度也是一个至关重要的问题，造纸机械高速卷绕系统联轴器同轴度的微小偏差均可造成纸张张力不均匀，起皱甚至断裂等现象，从而影响产品质量^[2]。

作者简介：魏巍（1986.05-），男，汉族，湖北襄阳，本科，机械工程师，研究方向：联轴器和轴承设计和加工。

（四）散热与润滑难题

高转速，重载导致轴承，联轴器的摩擦生热剧增。汽车发动机涡轮增压器轴承在高温，高速的环境中，如果散热不畅，润滑油的黏度下降，氧化增加，磨损增大，寿命急剧下降。联轴器内各相对运动部件之间还需要有效地润滑和散热，象矿山破碎机大功率联轴器一样，如果润滑不充分，温度过高将导致橡胶弹性元件的老化和金属部件的热变形而影响其动力传递性能。

（五）可靠性需求突出

由于设备的维护成本和停机损失较大，轴承和联轴器必须具有高可靠性。石油开采用抽油机系统需要轴承及联轴器在恶劣野外环境中长期平稳工作，经常更换故障不仅会提高成本而且会影响原油开采效率。它的设计需要综合考虑冗余，抗疲劳和耐腐蚀等诸多因素才能确保几年乃至几十年的可靠服役。

（六）动态特性复杂

在高速重载时，系统振动，冲击响应比较复杂。轧钢机在运行过程中，轴承和联轴器在轧制力的冲击作用下，速度起伏较大，振动模式复杂，并涉及到轴系扭转振动和弯曲振动的耦合作用。这些动态特性是互相影响的，如果没有进行深入的研究和优化，将会引起共振，噪声的增加，加快零件的疲劳损坏和降低整个装置的性能^[3]。

二、高速重载工况下轴承与联轴器协同优化设计的必要性

（一）提升系统整体性能

孤立设计容易导致零件之间的性能失配。如在工业机器人的关节部位中，如果轴承的刚度和联轴器的扭转刚度不能协调一致，将造成关节运动的精度降低和响应滞后等问题。协同优化能够将二者的动态特性综合考虑，使得系统能够在高速重载指令的情况下准确动作，有利于提高机器人的工作效率和作业精度以适应复杂生产任务的要求。

（二）延长设备使用寿命

协同设计可以从根本上降低磨损，疲劳失效的发生。在水泥回转窑这种连续运转设备上，通过对轴承和联轴器材质，润滑方式的合理搭配以及接触应力的优化分布可以显著缓解零件表面磨损，推迟了疲劳裂纹的起裂，使设备大修周期由常规几年延长到较长一段时间，减少了企业设备更新成本^[4]。

（三）增强设备运行稳定性

在轴承和联轴器协同情况较好的情况下，可以有效地抑制振动和噪声的传递。例如在地铁车辆牵引系统中，对轴承隔振性能和联轴器柔性缓冲设计进行优化，可以减弱电机振动对车体的传递并减小车内噪声，本实用新型提高了旅客乘坐舒适性的同时降低了由于振动而导致部件松动和疲劳断裂的危险，确保了行车平稳。

（四）降低设备维护成本

协同优化的组件适配性更高，减少了故障概率。以火电发电机组为例，精确设计的轴承和联轴器，减少由于过热和不对中等原因造成的失效，每天巡检和维修工作量减少一半，备品备件替

换频率明显下降，每年都节约了相当大的人力物力成本，增加了电厂的经济效益。

（五）满足复杂工况需求

各行业高速重载工况有较大区别。深海采矿装备中，面对高压，低温，强腐蚀和动力传输等复杂环境，对轴承和联轴器进行了密封，防腐和耐冲击等协同优化设计，使其能够适应极端工况的变化，确保深海资源的顺利开采作业，扩大人类资源开发的界限^[5]。

三、高速重载工况下轴承与联轴器协同优化现存问题

（一）设计理念差异

轴承设计中多聚焦滚动体和滚道的接触力学，润滑特性研究；联轴器的设计重点是扭矩传递，连接刚度的确定。两者在专业领域的知识上是相对独立的，在航空发动机的研制过程中，轴承团队和联轴器团队各自进行优化，整合后往往会产生轴系共振和润滑干涉等现象，由于在高速重载条件下，缺少统一考虑二者协同作用的动，热耦合设计思想^[6]。

（二）配合精度难以保障

在实际组装过程中，由于加工误差，安装工艺等因素，轴承和联轴器之间配合精度会出现较大波动。机床制造过程中即使轴承，联轴器的单体精度合格，安装完成后同轴度也会超差，造成设备开机即产生振动，发热等异常现象，降低关键部件的使用寿命，来自于没有高精度相互配合的工艺保障体系和实时检测调整手段。

（三）材料匹配性欠佳

高速重载要求材料具有综合性能，轴承需要高硬度，耐磨和抗疲劳材料，联轴器还需要同时考虑强度和韧性。但是现有的选材往往是顾此失彼的，例如矿山机械重载联轴器所选用的高强度钢虽然具有足够的抗扭性，却缺乏足够的韧性，这和匹配轴承材料的热膨胀系数相差较大，当工况发生变化时由于热应力的作用触发了配合松动而影响了系统的可靠性^[7]。

（四）润滑系统协同不足

润滑需求不同，但是联系密切。轴承多为油雾，油，气润滑，重点是滚动体的细微间隙的填补；联轴器的润滑重点是对大范围滑动面的保护。在风电设备上，往往由于没有协调好二者对润滑流量，压力的要求，存在轴承缺油和磨损的同时联轴器油池油温升高，润滑油劣化等问题，导致连锁故障的发生，缺少一体化的润滑设计方案。

（五）动态特性分析不全面

高速重载条件下振动，冲击涉及到多物理场耦合问题，目前的分析往往是对模型进行简化处理。例如在汽车变速器轴系中，对轴承和联轴器的动态特性的研究只考虑了扭转振动而忽略了弯曲振动和轴向窜动的耦合作用，使得优化设计之后仍然存在高速啸叫现象、换挡冲击的研究，由于没有准确模拟出复杂工况下的实际动态响应。

（六）缺乏多目标优化方法

现代工程领域中，要想真正做到优化并非易事，需要从各个

方面综合考虑承载能力, 转速稳定性, 使用寿命和成本控制几个关键目标。传统优化方法通常采用对单目标一一突破然后折中的处理方式, 就高速列车动力系统而言, 首先着眼于轴承承载性能优化, 此后又开始对联轴器刚度进行调节, 但在全面考虑阶段, 各单项指标难以同时满足理想情况, 完全不能切合高速重载情境对系统综合性能提出的苛刻要求, 究其根源, 是由于没有一个科学, 系统的整体策略来实现多目标的优化^[8]。

四、高速重载工况下轴承与联轴器协同优化策略

(一) 建立统一设计理念

形成跨学科的队伍, 整合机械设计, 力学, 材料学和传热学的相关知识。本课题组在某航天飞行器姿态控制系统的研制过程中, 自课题开始便对高速旋转部件的运行状态进行了联合解剖, 并考虑了轴承滚动体动力学和联轴器的柔性传动等特点, 在系统工程方法的基础上构造了一个统一的数学模型, 该模型综合覆盖了热, 力和动态耦合因素的影响, 从而建立了协同优化的理论基础^[9]。

(二) 优化配合精度控制

引入了轴承滚道的超精密磨削和联轴器端面的磨铣等高精度加工工艺以控制微米级的尺寸公差。在装配环节中, 利用激光同轴度检测, 对工装进行智能调整, 并对校正情况进行实时监控。在船舶尾轴系统的安装过程中, 据此对轴承和联轴器的相互配合进行精准控制, 以保证轴系运行顺畅, 降低装配误差引起的振动噪声并延长首次检修间隔时间。

(三) 强化材料匹配选型

在高温重载燃气轮机研制这一关键过程中, 基于苛刻的高速重载参数需求, 研制小组开始了精密选材旅程。针对核心部件——轴承, 通过在庞大的材料数据库中进行逐层筛选和比选, 最后确定了使用陶瓷滚动体和高温合金套圈相结合的解决方案, 陶瓷滚动体具有优良的低摩擦特性并配合高温合金套圈优异的耐高温能力为轴承高效运转构筑了坚实的基础。而联轴器这一部分, 选用了镍基合金材质的联轴器, 并且经过反复研究对它的热处理工艺进行了优化, 对热膨胀系数进行了准确的调节, 让它能够和轴承进行完美的配合。然后, 借助于先进模拟软件对其进行全方位的验证, 进而经过多轮次台架试验实战检验, 保证了各组件在极端热环境中能够紧密地配合、平稳无误的动力传递为燃气轮机可靠工作提供了保障。

(四) 构建一体化润滑体系

为了确保大型注塑机动力传动系统平稳工作, 一种新设计的一体化润滑模块诞生了。本模块可实现油液的统筹分配, 核心是利用集中供油泵为全系统供给稳定的油源。面对轴承、联轴器等多种工作状态, 智能流量阀展现出了其卓越的性能。它能够根据各个部分的即时需求, 精准地调整润滑的剂量和压力, 确保关键部位都能获得最佳的润滑效果。同时模块中精心制作的油温和油质监测传感器进行实时把关, 发现异常情况后, 即时对冷却和过滤系统进行反馈控制, 既使润滑协同有效进行, 又大大延长油液使用寿命, 构筑注塑机连续运转之基础。

(五) 深化动态特性综合分析

利用多物理场耦合仿真软件综合考虑了轴系的扭转, 弯曲, 轴向振动和热变形等因素。例如对高速磨床主轴系统建立了包括轴承油膜刚度和联轴器弹性元件等在内的精细有限元模型并对加工过程中的动态激励进行了仿真, 根据仿真结果对其结构进行了优化, 调节轴承的预紧, 联轴器的刚度有效地抑制了共振和促进了加工表面质量的提高。

(六) 推行多目标优化算法

现代智能算法在盾构机刀盘驱动系统优化设计过程中表现出了较强的效能。遗传算法模拟出生物进化的遗传, 变异和选择机制, 粒子群优化算法依靠粒子之间信息共享和协同运动寻找最优解。这些智能算法以轴承承载能力, 联轴器传动效率, 系统可靠性和成本等为重点优化对象, 一头扎在繁杂的参数空间中开始了寻优之旅。经过多次的迭代计算, 它们不断地筛选出劣势的解决方案, 并逐渐形成了 Pareto 的最优解集合。工程师们则可以根据特定项目的苛刻要求, 从解集中谨慎取舍, 准确地选择出最合适的方案, 并最终实现对盾构机刀盘驱动系统整体性能的最大限度优化^[10]。

五、结语

高速重载工况下轴承与联轴器的协同优化设计是提升现代机械设备性能的关键环节。通过深入剖析其特点、明确协同优化必要性、正视现存问题, 进而采取针对性强的优化策略, 如统一设计理念、严控配合精度、匹配材料、完善润滑与动态分析、运用科学算法、规范标准制定等, 有望打破当前设计局限, 实现两者完美协同。这不仅能够保障设备在苛刻工况下可靠运行、延长寿命、降低成本, 还将推动高端装备制造产业迈向新高度, 为各领域技术突破提供坚实的机械基础支撑, 助力我国从制造大国向制造强国稳步迈进。

参考文献

- [1] 于晓东, 高维铖, 伍广鹏, 等. 高速重载工况下静压推力轴承的热特性表征 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2020, 48(09): 79-85.
- [2] 俞扬飞, 樊洪辉, 陈晓萌, 等. 高速重载工况下滑动轴承结构对性能的影响分析 [J]. 计量与测试技术, 2019, 46(06): 1-4.
- [3] 卢黎明, 谷开, 唐俊涛, 等. 高速重载滚动轴承动态有限元对比分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019, (07): 26-29+33.
- [4] 李文霞, 魏士杰, 安理会, 等. 高速重载燃油泵齿轮副疲劳寿命预测方法研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (20): 196-198.
- [5] 丛韬, 付秀琴, 张斌, 等. 简析高速重载工况对车轮轮辋疲劳裂纹萌生的影响 [J]. 铁道机车车辆, 2014, 34(05): 24-27.
- [6] 顾聪聪, 刘送永, 姚遥, 等. 高速重载码垛机器人动力学仿真 [J]. 包装工程, 2021, 42(07): 186-194.
- [7] 王宇. 高速重载静压推力轴承腔型效应研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [8] 高维铖. 高速重载立车静压滑枕支承性能研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [9] 彭波, 孔文泰, 贾磊, 等. 高速重载滑滚摩擦副表面损伤的力学特性 [J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(03): 75-82.
- [10] 郭溪泉. 高速线材精轧机油膜轴承 [J]. 太原重型机械学院学报, 2004, (S1): 18-20.

基于智能技术的煤矿机电运输系统设计

杨玉伟

陕西彬长胡家河矿业有限公司, 陕西 咸阳 713602

摘 要： 本研究聚焦基于智能技术的煤矿机电运输系统设计。通过构建包含感知层、数据处理层、控制层与应用层的系统架构，实现对运输设备全方位监测与智能调控。精心选型智能运输设备、传感器与控制设备，优化运输流程，如精准规划路线、智能调度任务、构建无人化轨道运输体系并实现运输定时定位。同时，设计安全监控与预警系统保障运行安全，利用智能定位技术对煤矿井下作业设备、人员进行实时定位监控。通过智能技术的应用，旨在提高煤矿机电运输系统的效率、可靠性和安全性，为煤矿企业的高效生产提供有力保障。

关 键 词： 智能技术；煤矿；机电；运输系统；传感器

Design of Coal Mine Electromechanical Transportation System Based on Intelligent Technology

Yang Yuwei

Shaanxi Binchang Hujiahe Mining Co., Ltd. Xianyang, Shaanxi 713602

Abstract： This study focuses on the design of coal mine electromechanical transportation system based on intelligent technology. By constructing a system architecture that includes a perception layer, data processing layer, control layer, and application layer, comprehensive monitoring and intelligent regulation of transportation equipment can be achieved. Carefully select intelligent transportation equipment, sensors, and control devices, optimize transportation processes, such as precise route planning, intelligent task scheduling, building unmanned rail transportation systems, and achieving transportation timing and positioning. At the same time, design a safety monitoring and early warning system to ensure operational safety, and use intelligent positioning technology to perform real-time positioning and monitoring of coal mine underground operation equipment and personnel. Through the application of intelligent technology, the aim is to improve the efficiency, reliability, and safety of coal mine electromechanical transportation systems, providing strong guarantees for the efficient production of coal mining enterprises.

Keywords： intelligent technology; coal mines; mechanical and electrical; transportation system; sensor

煤矿机电运输系统是煤矿生产的重要环节，其运行效率和安全性直接影响到整个煤矿的生产效益和人员安全。传统的煤矿机电运输系统存在自动化程度低、设备故障率高、运输效率受限以及安全管理难度大等问题。而智能技术的兴起为解决这些问题提供了新的途径，通过引入智能传感器、物联网、大数据分析、人工智能等先进技术，可以实现煤矿机电运输系统的智能化升级，提高系统的整体性能，推动煤矿行业向智能化、高效化方向发展。

一、煤矿机电运输系统设计需求

（一）高效运输能力需求

煤矿生产规模庞大，要求机电运输系统具备高效的物料与人员运输能力。需能在单位时间内运输大量煤炭、矿石以及各类设备、材料等，以满足井下开采、加工等环节的连续性作业需求。运输线路应合理规划，减少运输瓶颈与迂回，确保运输流程顺畅无阻，最大程度提高运输效率，降低运输时间成本，保障煤矿整

体生产节奏稳定高效。

（二）高可靠性与稳定性需求

煤矿环境恶劣，机电运输系统需在高粉尘、高湿度、复杂地质条件等环境下长期稳定运行。设备应具备高可靠性，减少故障发生频率与维修时间^[1]。关键设备如运输皮带机、提升机、电机车等需有冗余设计或备用机组，在突发故障时能迅速切换，避免运输中断引发生产停滞。同时，系统应具备良好的抗干扰能力，应对井下电磁干扰、震动等不利因素，确保信号传输准确、控制

作者简介：杨玉伟（1987.12-），男，河南省永城市，大学本科，机电工程师，研究方向：煤矿主运输系统机电设备管理。

指令及时有效执行，保障运输作业安全可靠。

（三）精准的自动化控制需求

为提高运输效率与安全性，系统应实现精准自动化控制。能够依据运输物料的种类、数量自动调整运输设备的运行参数，如皮带机的速度、提升机的提升速度与负载平衡等。运输过程中的装卸、转运环节应实现自动化衔接，减少人工干预，降低人为失误带来的安全风险。此外，自动化控制还应涵盖设备的远程监控与操作功能，方便地面调度人员实时掌握井下运输设备的运行状态，并能在必要时进行远程应急操作与调整^[2]。

二、系统架构

本次煤矿机电运输系统智能化设计，由以下感知层、数据处理层、控制层、应用层构成。

感知层是整个系统的基础，主要由各种智能传感器组成。这些传感器分布在煤矿机电运输设备的各个关键部位，用于采集设备的运行参数、环境信息等数据。在运输皮带机上安装温度传感器、速度传感器、张力传感器等，可实时监测皮带的运行状态；在电机上安装振动传感器、电流传感器，用于监测电机的工作情况；在巷道内设置瓦斯传感器、粉尘传感器等，监测环境安全状况。传感器采集到的数据通过无线传输或有线网络传输到数据处理层。

数据处理层负责对感知层传来的海量数据进行处理和分析。采用大数据处理技术，对数据进行清洗、整理、存储和挖掘。通过建立数据模型，分析设备的运行趋势、故障特征等信息。利用机器学习算法对历史数据进行训练，建立设备故障预测模型，提前发现潜在的故障隐患^[3]。同时，数据处理层还与煤矿企业的管理信息系统（MIS）进行数据交互，为企业的生产决策提供数据支持。

控制层根据数据处理层的分析结果，对煤矿机电运输设备进行智能控制。通过可编程逻辑控制器（PLC）、分布式控制系统（DCS）等智能控制设备，实现对运输设备的启停、速度调节、运输路线切换等操作。当运输皮带机出现超载或跑偏等异常情况时，控制层能够及时调整电机的转速或启动纠偏装置，确保设备的正常运行。控制层还可以实现设备的远程控制，操作人员可以在地面监控中心对井下设备进行远程操作，提高了操作的便捷性和安全性。

应用层主要面向煤矿企业的管理人员和操作人员，提供各种智能化的应用功能。包括设备运行监控界面，可实时显示设备的运行状态、参数信息等；故障报警与诊断系统，当设备出现故障时，能够及时发出警报并提供故障诊断报告，帮助维修人员快速定位和排除故障；运输调度管理系统，根据生产计划和设备运行情况，合理安排运输任务，优化运输路线，提高运输效率；安全管理系统，对环境安全数据进行监测和分析，制定安全防范措施，保障煤矿生产安全。

三、系统硬件设计

（一）智能运输设备

1. 智能带式输送机

采用具有智能调速、自动张紧、跑偏检测与自动纠偏等功能

的带式输送机。智能调速系统可根据输送物料的量 and 皮带的负载情况自动调整电机转速，实现节能运行。自动张紧装置能够实时监测皮带的张力，保持皮带的合适张紧度，延长皮带使用寿命。跑偏检测与自动纠偏装置利用传感器检测皮带的跑偏情况，并及时启动纠偏机构进行纠正，确保皮带稳定运行。

2. 智能电机车

智能电机车配备有先进的导航系统、自动驾驶功能和远程通信模块。导航系统可利用激光雷达、摄像头等传感器对巷道环境进行感知，实现电机车的精确定位和自主导航。自动驾驶功能可根据预设的运输路线和运行参数，自动控制电机车的启停、加速、减速和转向等操作。远程通信模块则可实现电机车与地面监控中心的实时数据交互，方便监控人员对电机车的运行状态进行远程监控和调度^[4]。

（二）智能传感器

选用高精度的温度传感器、压力传感器、流量传感器等，提高数据采集的准确性（见图1）。例如，高精度温度传感器能够精确监测设备关键部位的温度变化，及时发现设备的过热隐患；高精度压力传感器可用于监测液压系统、气动系统的压力情况，确保系统正常运行^[5]。采用集多种功能于一体的传感器，如同时具备温度、湿度、瓦斯浓度检测功能的传感器，减少传感器的数量和安装空间。多功能传感器还可以通过数据融合技术，提高对复杂环境参数的监测精度和可靠性。

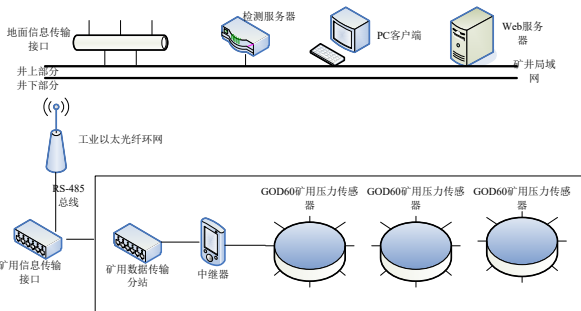


图1 煤矿机电运输设备智能监测

（三）智能控制设备

PLC具有可靠性高、编程灵活、控制功能强等优点，广泛应用于煤矿机电运输系统的控制。通过编写控制程序，实现对运输设备的逻辑控制、顺序控制和过程控制。PLC还可以与其他智能设备进行通信，组成分布式控制系统，提高系统的整体控制性能。智能变频器用于控制电机的转速，实现电机的节能调速运行。它能够根据负载的变化自动调整输出频率和电压，使电机始终工作在最佳效率状态^[7]。同时，智能变频器还具有过流、过压、过载等多种保护功能，提高电机运行的安全性。

四、煤矿机电运输系统功能实现

（一）运输路线规划

利用智能技术对煤矿井下的运输路线进行优化规划。根据矿井的巷道布局、运输设备的分布以及物料的运输需求，通过算法计算出最优的运输路线。采用最短路径算法或多目标优化算法，在满足运输安全和效率的前提下，尽量减少运输距离和运输时间。同时，

考虑到设备的维护和检修需求，合理规划备用运输路线，当主运输路线出现故障时，能够及时切换到备用路线，确保运输的连续性。

（二）运输任务调度

建立智能运输任务调度系统，根据生产计划和设备运行状况，合理安排运输任务。系统首先对运输需求进行分析，确定物料的种类、数量、运输起点和终点等信息。然后，根据运输设备的能力和状态，将运输任务分配到合适的运输设备上^[8]。在调度过程中，充分考虑设备的维护计划、人员的排班情况以及运输的优先级等因素。对于紧急的生产物资优先安排运输，对于正在进行维护的设备不安排运输任务。通过智能调度，提高运输设备的利用率，减少运输等待时间，提高运输效率。

（三）无人化轨道运输体系

构建无人化轨道运输体系是提升煤矿机电运输智能化水平的关键举措。采用智能电机车作为运输载体，其配备先进的导航系统、自动驾驶功能和远程通信模块。导航系统利用激光雷达、摄像头等传感器对巷道环境进行精确感知，构建三维地图，实现电机车的精准定位与自主导航^[9]。自动驾驶功能依据预设的运输路线和运行参数，自动控制电机车的启停、加速、减速和转向等操作，无需人工驾驶干预。同时，借助远程通信模块，地面监控中心可实时掌握电机车的运行状态，并能远程下达指令，实现对运输过程的全面监控与灵活调度。

（四）物料配送管理

采用智能物料配送管理系统，实现对物料的精准配送。在物料仓库设置智能识别装置，对物料进行编码和标识。当有运输任务时，系统根据运输需求自动生成物料配送清单，并指导叉车或其他搬运设备将物料准确地装载到运输设备上。在运输过程中，通过定位技术对物料的运输位置进行实时跟踪，确保物料能够按时、准确地送达目的地。同时，系统还可以对物料的库存情况进行实时监控，及时提醒采购部门补充库存，避免因物料短缺而影响生产。

（五）运输定时定位

为了进一步优化运输管理，引入运输定时定位系统。通过在运输设备和物料上安装高精度定位标签，结合井下定位基站网络，能够实时获取运输对象的位置信息，并精确记录其运输时间。这不仅有助于精确掌握物料的运输进度，确保生产环节的紧密衔接，还能在设备或物料出现异常情况时，迅速确定其所在位置，及时采取应对措施。当运输的煤炭在途中发生洒落或运输设备偏离预定路线时，系统可立即发出警报并提供准确位置信息，方便工作人员快速定位问题源头并进行处理^[10]。

五、安全监控预警

（一）设备故障预警

通过对设备运行数据的实时监测和分析，建立设备故障预警模型。利用机器学习算法对大量的历史故障数据和正常运行数据进行训练，提取设备故障的特征和规律。当设备运行数据出现异常变化，且符合故障预警模型的特征时，系统及时发出故障预警信号。当电机的振动幅度、温度、电流等参数超出正常范围时，系统预测电机可能即将发生故障，并提前通知维修人员进行检查

和维护，避免设备突然故障导致生产中断。

（二）环境安全监测与预警

在煤矿井下环境中设置多种环境传感器，对瓦斯浓度、粉尘浓度、一氧化碳浓度、温度、湿度等环境参数进行实时监测。当环境参数超过安全阈值时，系统立即发出警报，并启动相应的应急措施。当瓦斯浓度超标时，系统自动切断相关区域的电源，启动通风设备进行通风换气，防止瓦斯爆炸事故的发生。同时，系统将环境安全数据上传到地面监控中心，方便管理人员及时了解井下环境状况，制定相应的安全管理措施。

（三）人员安全监控

利用智能定位技术对煤矿井下作业人员进行实时定位监控。为作业人员配备智能定位终端，通过井下的定位基站实现人员位置的精确跟踪。系统可以实时显示人员的分布情况、运动轨迹等信息，当发生人员被困或迷失等紧急情况时，能够快速确定人员位置，组织救援。此外，还可以设置人员接近危险区域报警功能，当人员靠近采掘工作面、运输设备危险部位等区域时，系统发出警报，提醒人员注意安全。

六、结语

综上所述，基于智能技术的煤矿机电运输系统设计是煤矿智能化建设的重要组成部分。通过构建合理的系统架构，选用先进的智能设备，优化运输流程，建立完善的安全监控与预警系统，并进行系统集成与调试，可以实现煤矿机电运输系统的智能化升级，提高运输效率、降低设备故障率、增强运输安全性，为煤矿企业的高效、安全生产提供有力支撑。未来，随着科技的不断进步，煤矿机电运输系统将迎来更多技术的深度融合与创新应用，人工智能与物联网的结合将更加紧密，实现设备之间的智能协同与自主决策。同时，也将更加注重绿色可持续发展，实现降耗增效，减少能源浪费。

参考文献

- [1] 袁超，冯立，杨洪科. 浅谈煤矿机电运输中智能化技术的应用[J]. 中国设备工程，2024,(22):38-40.
- [2] 刘体操，黄青，康虎，等. 煤矿机电设备智能化管理研究[J]. 矿山机械，2024,52(02):64-68.
- [3] 马宏伟，段优优，薛旭升，等. 煤矿智能单轨吊研究进展与关键技术[J]. 工矿自动化，2023,49(06):57-67.
- [4] 张柏. 智能化技术对煤矿机电运输系统优化提升的推动作用[J]. 内蒙古煤炭经济，2023,(08):109-111.
- [5] 鲍久圣，章全利，葛世荣，等. 煤矿井下无人化辅助运输系统关键基础研究及应用实践[J]. 煤炭学报，2023,48(02):1085-1098.
- [6] 高金良. 雁宝能源第三煤矿智能矿山建设实践与探索[J]. 工矿自动化，2022,48(S2):46-50.
- [7] 吴旗开. 煤矿轨道运输智能监控系统的设计及应用分析[J]. 机械管理开发，2022,37(10):246-247.
- [8] 崔若凡. 智能化技术对煤矿机电运输系统优化提升的推动作用[J]. 能源与节能，2022,(02):209-211.
- [9] 刘孝军，任文清. 基于MES系统的煤矿智能综合管控平台探讨[J]. 煤炭科学技术，2021,49(S2):257-262.
- [10] 杨洁. 智能控制技术在煤矿机电设备中的应用——评《煤矿井下智能设备电气控制实用技术》[J]. 矿业研究与开发，2020,40(01):168.

900MW 压水堆核电站三十年改造后厂用降压变与辅变电源之间切换试验控制过程

潘志勇

大亚湾核电运营管理有限公司, 广东 深圳 518124

摘 要 : 900MW 压水堆核电站仪控系统运行近 30 年, 需要对常规岛 KRG/KCO 系统、核岛 SIPV 控制系统以及其他仪控系统进行改造升级, 升级完后需要验证厂用电源切换的时间和顺序正确。降压变与辅变电源之间的切换试验为三十年大修二号机 DCS 改造后首次进行真实电源切换的试验, 用于验证在手动和故障条件下厂辅变切换功能满足设计要求, 厂用电源切换的时间和顺序正确。由于该试验为首次试验, 执行频度较低, 涉及区域、系统较广, 主控室负责居中协调和风险控制, 因此有必要对试验执行的良好方法进行总结, 以提高试验执行的准确性与高效性。

关 键 词 : 900MW 压水堆核电站仪控系统; 厂用电源; 辅变电源; 切换试验

Switthe test Control Process between the Step-Down Transformer and Auxiliary Transformer Power Supply

Pan Zhiyong

Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518124

Abstract : The instrument and control system of 900MW PWR nuclear power plant has been operating for nearly 30 years, which needs to upgrade the conventional island KRG / KCO system, nuclear island SIPV control system and other instrument and control systems. After the upgrade, it is necessary to verify that the time and order of power source switching are correct. The switching test between the step-down transformer and auxiliary transformer power supply is the first real power switching test after the transformation of DCS of the machine after 30 years of overhaul. It is used to verify that the switching function of the auxiliary transformer meets the design requirements and the time and order of the power source switching are correct. Since the test is the first test, the execution frequency is low, involving areas and a wide system, the main control room is responsible for the center coordination and risk control, so it is necessary to summarize the good method of test execution to improve the accuracy and efficiency of the test execution.

Keywords : 900MW pressurized water reactor nuclear power plant instrument and control system; plant power source; auxiliary transformer power supply; switching test

引言

本文主要介绍 900MW 核电站厂用电的正常运行方式, 厂用电系统为核电站的附属设备提供安全可靠的电源。通过四种供电的类型来完成, 分别为两路外电源与两路内电源进行配合互补使用。同时本文还重点介绍了因 DCS 改造后, 需要进行失电的各种工况进行模拟切换。待机组满足送电后, 需要进行真实的电源切换, 从 500KV 切换至 220KV, 同时确认两路内电源柴油机能正常启动。来满足各种工况下的时间要求和设备的可靠性^[1]。

一、900MW 压水堆核电厂厂用电系统介绍

(一) 900MW 压水堆核电站内部用电系统基本功能

厂用电系统主要功能是在任何工况下 (正常或事故工况下), 为电站的附属设备提供安全可靠的电源, 并为与核安全有关的系统和设备提供应急电源, 以保证核电站的安全运行^[2]。

如果 26kV 母线失去电源或者失去厂用变压器 A, 则由 220 kV 电网经辅助变压器向永久性、应急和共用附属设备供电。如果主电网和辅助电网均失去时, 则由柴油发电机组向应急附属设备供电^[3]。

根据核运行上游文件 FSAR 的要求: 核电站的内部供电系统和电源的设计与设备具有高度的供电可靠性。它必须满足以下基本要求:

作者简介: 潘志勇 (1982.08-), 男, 汉族, 湖北省洪湖市人, 大亚湾核电运营管理有限公司, 工程师, 大学本科, 研究方向: 核电运行。

1.首先要有两套相互独立的外部电源作为厂用电的工作电源和协助电源；设计中考虑到两个外部电源同时发生故障的概率。

2.设置两组紧急安全可靠母线，并各自配有一台应急柴油发电机组作为厂内电源的正常情况下由厂用工作电源或厂用辅助电源供电；厂用电系统能承受瞬时过电压并限制母线短路容量，设备能承受1550 kA的对称短路故障电流^[4]。

(二) 厂用电运行方式

正常工况运行：核电站在换料后启动、正常停堆和发电期间由26 kV母线通过降压变压器供电给中压厂用电母线，保证MX岛、NX核岛和BOP外围辅助厂房设备的正常用电。发电机带厂用电8小时基本负荷运行。在发电机变压器组的高压开关跳闸与电网解列后，可使机组运行仅向厂用辅助设备供电，供电时间不限，且与切换到厂用电负荷运行时所需的功率大小无关^[5]。

(三) 厂用电自动切换装置

在工作电源失去后，永久配电盘LG2(LG3)将自动慢速切换到由辅助电源供电，自动切换装置的延时要求是保证工作母线段上电动机的反馈电压衰减至一定值，以防止由于电动机反馈电压过高而产生冲击电源，导致切换失败；应急安全配电盘LHA和LHB的母线电压失去后0.9 s将启动相应的柴油发电机组，当母线电压失去的持续时间达7s时则自动跳开电源断路器001JA，延时1.5 s后闭合柴油发电机的电源进线断路器002JA，由柴油机向应急安全母线供电^[6]。

(四) 正常停堆和启动方式

正常停堆和启动时的供电方式：只有两个厂外电源(400 kV/500 kV和220 kV)都正常可用时才允许反应堆启动。这时负荷开关处于断开位置1号机组由400 kV，2号机组由500 kV)线路通过起降压作用的主变压器和降压变压器保证向厂内供电。辅助变压器与220 kV线路是接通的，但与6.6 kV中压母线连接的断路器是断开的。应急盘LHA和LHB由LG2和LG3供电^[7]。

(五) 功率运行

负荷开关闭合，将发电机经主变压器连接到超高压线路。通过负荷开关，发电机向400 kV(或500 kV)线路和降压变压器供电。如图1所示，除负荷开关闭合外，其他所有断路器与上图状态相同。

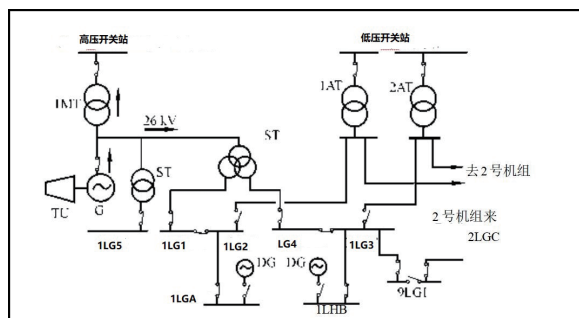


图1：900WM核电站厂用电供电图

二、试验过程中的控制

降压变与辅变电源之间的切换试验：为三十年大修二号机DCS改造后首次进行真实电源切换的试验，用于验证在手动和

故障条件下厂辅变切换功能满足设计要求，厂用电电源切换的时间和顺序正确。由于该试验为首次试验，执行频度较低，涉及区域、系统较广，主控室负责居中协调和风险控制，因此有必要对试验执行的良好方法进行总结，以提高试验执行的准确性与高效性^[8]。

(一) 试验目的、准则和试验内容

试验目的：本试验的目的是验证在手动和故障条件下厂辅变切换功能满足设计要求，厂用电电源切换的时间和顺序正确。

试验准则：厂用电电源应在以下几种情况下由厂用变压器向辅助变压器自动切换。1.汽机保护系统动作(GSE)与两个EHVB断开；2.发电机出口断路器跳闸(GSY001JA)与厂用配电盘LG2/3欠压1.2s；3.厂用配电盘进线开关跳闸(LG1/4001JA)与厂用配电盘LG2/3欠压1.2s；4.厂用配电盘LG2/3欠压5s；5.开关切换时间满足 $1.5s < t < 2.5s$ 。

试验内容：该试验在降压变压器可用后就进行，它包括下列阶段：1.手动切换(ST→AT和AT→ST)：检查切换顺序的正确性，尤其是由永久配电盘LG2/3向机组配电盘LG1/4供电的可能性。2.自动切换：在所有运行状态下启动自动切换，以验证时间延迟和切换顺序的正确性^[9]。

(二) 试验前准备

建立试验组态和试验变量设置在试验位置，便于后续直观和快速检查动作情况一随时可执行；梳理ZDXLGR002(D9LGR辅变倒GEV主变供电)与PT2GTM016准备部分和结束恢复部分重合项一随时；根据机组情况准备A/B列负荷切换操作单和恢复时操作单一提前一天准备；本次操作单有：PTR单泵双冷时切泵；DEG切换；DEL/SEC/RRI切换；SLT停运及启动(试验后报警需制冷复位)；MX南北行车电源切换；DVN003/006ZV停运及启动；LCB/LBB切换RD单；新旧6.6KV开关操作单；主控室现有报警拍照留底一试验前；PTLGI001要求倒送电，PT2GTM016需要切回主变，所以PT需要进行提前准备^[10]。

(三) 试验步骤

机组初态：主变送电、LG1/LG4由9LGR供电、LG1/LG4001JA未推入，解除LG6相关隔离，LG6001TB送电。

执行ZDXLGR002和PT2GTM016-A前提条件部分，同时将负荷切换至B列运行(注意识别遗留的前提条件是否影响ZDXLGR002，如不影响可同步执行ZDXLGR002和PT2GTM016-A前提条件准备)；将柴油机闭锁。

进行PT2GTM016-A试验部分：MIC强制GSE(汽机跳闸信号001SY/101SY)为0，OME模拟GSY001JA合闸GSY001JATP1=0；主控001TL切换至辅变供电功能验证：主控操作LG2001TL置于“TA”位置，将配电盘LG2切换至辅变供电，主控核对切换时间满足。LG1001JA合闸时倒送电闭锁信号验证：要求就地操作LG2001JA置试验位并处于分闸状态(避免后续闭锁信号异常出现主变辅变合环运行)。主控操作LG2002TL置于“TA”位置检查LG2001JA保持分闸。LG2002TL倒送电功能验证：就地试验盒操作将LG1001JA断开，主控操作LG2002TL置于“TA”位置，将LG1切换到辅变供电。

倒送电时LG2001TL“TS”位置闭锁验证：主控操作LG2001TL置于“TS”位置，确认开关未动作保持倒送电；主控操作LG2001TL置于“TA”位置取消信号。倒送电时LG1001JA合闸闭锁：地试验盒操作LG1001JA合闸，确认LG1001JA无法合闸；恢复：主控操作LG2002TL置于“TS”位置（LG2001JA开关断开），就地操作LG2001JA推入工作位置，就地试验盒操作LG1001JA合闸。主控001TL切换回主变供电功能验证：操作LG2001TL置于“TS”位置，将配电盘LG2切换至厂变供电，确认切换时间符合要求。

KPR厂辅电源手动切换试验：LG2101/102CC选择KPR；操作LG2101TL置于“TA”位置，将配电盘LG2切换至辅变供电，确认切换时间符合要求；操作LG2102TL置于“TA”位置，将LG1切换到辅变供电；操作LG2101TL置于“TS”位置，验证倒送电时闭锁信号；操作LG2101TL置于“TA”位置取消信号；操作LG2102TL置于“TS”位置，就地试验盒操作LG1001JA合闸，操作LG2101TL置于“TS”位置，将配电盘LG2切换至厂变供电，确认切换时间符合要求。

0s通道触发A列切换试验（汽机保护系统GSE动作与失去500kV电源导致电源切换）：GSY001JATP1=0（负荷开关打开）与模拟GEW001JATP1=1（GEW开关断开信号触发）与GSE001SY1=1（汽机跳闸信号），检查配电盘LG2切换至辅变供电，确认切换时间符合要求，取消GEW开关断开信号和汽机跳闸；

2.5s闭锁试验：就地试验盒操作将LG1001JA断开，主控操作LG2001TL置于“TS”位置，检查LG2切换至厂变供电后又切回辅变并且时间满足要求，就地试验盒操作LG1001JA合闸，主控操作LG2001TL置于“TS”位置，将配电盘LG2切换至厂变供电；

5s通道触发A列切换试验（厂用配电盘失压（LG2）导致电源切换）：就地模拟LG2母线失压（LG2001JA分闸后立即取消LG2母线失压模拟），检查LG2切换至辅变供电并核对切换时间；主控操作LG2001TL置于“TS”位置，将配电盘LG2切换至厂变供电；

1.2s通道触发A列切换试验（发电机出口断路器跳闸（GSY001JA）与厂用配电盘失压（LG2）导致电源切换）：模拟GSY001JA分闸+模拟LG2母线失压（LG2001JA分闸后立即取消LG2母线失压模拟），检查LG2切换至辅变供电并核对切换时间；模拟2GSY001JA合闸；主控操作LG2001TL置于“TS”位置，将配电盘LG2切换至厂变供电；

1.2s通道触发A列切换试验（厂用配电盘进线开关跳闸（LG1001JA）与母线失压（LG2）导致电源切换）：与PTLGI001同步执行。解除LHP柴油机闭锁；就地模拟LG1001JA过流保护动作，检查配电盘LG2切换至辅变供电且时间满足；2LHP启动后给出停运信号，要求现场停运；主控操作LG2002TL置于“TA”位置，确认倒送电信号被闭锁；复位LG1001JA过流保护，LG1001JA合闸，操作LG2001TL置于“TS”位置，将配电盘LG2切换至厂变供电并停运柴油机。

（四）试验总结与反思

试验的风险主要是系统失电导致的影响和电路合环影响：分为正常切换导致失电和切换异常时LGB和LHA长时间失电引入的风

险。为正常切换导致失电，试验前需要将运行的重要负荷切换至另一列，将可以停运的负荷尽量停运；为避免切换异常LGB和LHA长时间失电，风险措施中要求故障时将开关切换回上一状态，但是未提可能的LHA切换至柴油机运行时的恢复，该点需要增加预案。合环运行的防御：初始在试验位置必须操作到位进行核对逻辑正常。

该试验需要主控、电气7m、柴油机三个区域的协同配合，所以应提前召开开工前会，详细介绍试验目的，试验过程，风险/对策和经验反馈，澄清疑点，并分发对应规程给各区域主管。在试验期间按照步骤进行三段式沟通，避免出现执行步骤不一致。

执行试验中需要与专业频繁进行信息沟通，而专业执行的是工作包，程序中的步骤没法形成沟通点，需要与其进行三段式沟通，确认其模拟的点，避免走错间隔，模拟完要主控进行核对。

试验期间一定要熟悉每阶段的节点，在电气和现场可以进行操作时提前发出指令，然后用“试验日志”进行计算时间，可以减少时间。

人员分工：机组长监护一名RO进行操作，执行操作的RO主要专注执行的操作正确性，负责机组状态与值内配合人员沟通协调。安排另一名RO负责主控室的报警清理，因倒电期间可能会有之前未分析到的设备跳闸等情况，因此需要一名RO专注清理异常报警，确保倒电后设备恢复正常。机组长除了监护，还需要对接外专业配合协调。同时也要对预案的熟悉，遇到异常情况组织保驾人员分析处理。现场需要两组人员，一组人员进行试验的条件执行，如：电气盘的初态与试验后设备恢复。另一组人员进行配合柴油机的启停操作与柴油机异常相应。一组隔离办人员进行多次的开关操作与KPR盘上的操作。

三、结束语

本次试验在前期准备进行了充分的模拟与验证，在试验的执行阶段一次成功完成，确保的整个DCS改造的成功试验完成。为900WM核电厂验证在手动和故障条件下厂辅变切换功能满足设计要求，厂用电源切换的时间和顺序正确性，为核电站安全运行提供重要可靠的保障。

参考文献

- [1] 张斯帝. 核电厂低压配电系统对于安全级DCS运用的分析[J]. 电气技术与经济 2024, 24(10)102-106.
- [2] 黄素, 文徐思敏, 陈日昱. 核电厂可靠性分析的标准研究[J]. 自动化仪表 2021, 42(08) 106-110.
- [3] 薛萌, 何鹏, 周运来. 核电厂应急柴油发电机安全级电气保护配置研究[J]. 高科技与产业化 2024, 30(09) 72-73.
- [4] 魏巍, 彭钰. 核电厂辅变空载运行期间辅助电源单相断相故障特征分析及应对措施[J]. 核科学与工程 2023, 43(03) 686-694.
- [5] 李金芳, 许春辉. 核电厂优先电源分析[J]. 产业与科技 2013, 12(02) 58-60.
- [6] 胡彦令, 李彦华, 唐启军. 核电厂动力电源切换试验实施顺序探讨[J]. 工业技术创新. 2016, 03(02) 252-254.
- [7] 孔静, 张奇. 压水堆核电厂应对全厂断电的电源设计[J]. 核安全. 2017, 16(01) 75-81.
- [8] 王春生. 大亚湾核电站的电气系统[J]. 核动力工程. 1989(01) 24-29+67.
- [9] 陈海燕, 李小华, 柯国土. 广东大亚湾核电站厂用电力系统可靠性分析[J]. 原子能科学技术. 1997(05) 6.
- [10] 董恩兴. 核电机组失去厂外电源的应急响应[J]. 机电信息. 2020(14) 128-129.

智能算法在交通机电设备故障预测与维护中的应用

张世冀

德清县交通工程建设有限公司, 浙江 湖州 313200

摘 要： 随着现代交通系统的快速发展，交通机电设备在保障交通流畅和安全方面发挥着至关重要的作用。但是这些设备一旦发生故障，不仅会影响交通的正常运行，甚至可能导致交通事故，带来极大的社会和经济损失。本文旨在探讨智能算法在交通机电设备故障预测与维护中的应用，重点分析如何通过数据采集、特征提取、智能预测模型构建以及决策生成等技术手段，提升交通机电设备的运行效率和安全性。研究成效表明，基于智能算法的故障预测系统显著提升了设备的健康管理水平，并减少了由于设备故障带来的额外维护成本。

关 键 词： 智能算法；交通机电设备；故障预测；维护措施

Application of Intelligent Algorithms in Fault Prediction and Maintenance of Transportation Mechanical and Electrical Equipment

Zhang Shiji

Deqing County Transportation Engineering Construction Co., Ltd. Huzhou, Zhejiang 313200

Abstract： With the rapid development of modern transportation systems, transportation electromechanical equipment plays a crucial role in ensuring smooth and safe traffic. However, once these devices malfunction, it will not only affect the normal operation of traffic, but may even lead to traffic accidents, causing great social and economic losses. This article aims to explore the application of intelligent algorithms in the prediction and maintenance of faults in transportation electromechanical equipment, with a focus on analyzing how to improve the operational efficiency and safety of transportation electromechanical equipment through technical means such as data collection, feature extraction, intelligent prediction model construction, and decision generation. The research results show that the fault prediction system based on intelligent algorithms significantly improves the health management level of equipment and reduces the additional maintenance costs caused by equipment failures.

Keywords： intelligent algorithm; transportation electromechanical equipment; fault prediction; maintenance measures

前言

传统的交通机电设备维护模式通常依赖定期检查和故障后修复，存在着维护时效性差、成本高、效率低等问题。定期检查往往忽视了设备在某些特定运行条件下的潜在故障，而故障后修复则可能导致设备长时间停运，影响交通系统的正常运作。这种传统的“事后维保”模式无法满足现代交通系统对设备稳定性和高效性的需求。随着信息技术、人工智能和大数据分析技术的不断发展，基于智能算法的故障预测与维护方法逐渐成为研究的热点^[1]。智能算法，如支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、神经网络（NN）等，能够通过实时监测设备的运行数据，分析设备的健康状态，提前预测潜在的故障，避免了设备因故障引发的突发性停运和交通事故。通过对相关技术的深入研究与实践应用，本研究希望为交通机电设备的智能化管理提供理论支持与技术指导，为推动智能交通系统的发展贡献力量。

一、交通机电设备故障预测与维护体系

随着交通运输业的快速发展，交通机电设备（如交通信号灯、自动收费系统、监控摄像头、智能停车管理系统等）在智能交通系统中扮演着至关重要的角色。这些设备的运行可靠性直接关系到交通系统的效率、安全性及经济性^[2]。因此，如何有效进

行故障预测与维护，以延长设备使用寿命、减少故障发生率、优化维修成本，已成为智能交通领域的核心问题。

设备状态监测与数据采集技术是故障预测与维护体系的基础，通过部署多种传感器（如温度、振动、压力、流量传感器等），实时监测设备的运行状态，收集关键数据。这些数据通常包括设备的工作电流、电压、温度、转速等物理参数，能够反映

作者简介：张世冀（1992.02-），女，本科，初级职称，交通工程管理，德清县交通工程建设有限公司，邮编：313200，研究方向：交通（机电设备）。

出设备的健康状况，现代传感器网络采用无线传输技术和边缘计算，不仅能够提高数据采集的效率，还能够实时传输数据，供后续分析使用。通过对设备的运行数据进行深入分析，利用模式识别技术发现设备可能存在的异常状态。常用的技术包括基于机器学习和深度学习的故障诊断方法^[3]。

故障预测与健康管理技术则着眼于预测设备的未来运行状况，提前识别潜在故障风险。通过对设备历史运行数据的回归分析和时间序列分析，构建设备故障预测模型，识别设备在未来某一时刻发生故障的可能性。健康管理则侧重于评估设备的长期健康状况，采用基于数据驱动模型（如数字孪生技术）对设备进行健康评估，从而实现设备的全生命周期管理^[4]。智能维护与优化调度技术使得故障维修更加高效，可以实时监控设备状态，结合故障预测结果，智能维护系统能够自动生成维护计划，合理安排维护时间和资源，避免传统的周期性检修或事后修复模式。智能调度系统通过大数据分析、人工智能算法优化资源配置，确保维修工作及时高效地完成。

二、交通机电设备故障预测与维护的智能算法的应用

（一）数据采集与预处理

在交通机电设备中，常见的数据采集对象包括设备的工作电流、温度、振动、压力、负载、转速等多种传感器数据，环境因素如温湿度、空气压力等也可能对设备性能产生影响，因此应当将这些外部条件一并纳入监测范围，数据采集的过程通常需要通过多种传感器和采集模块来完成。针对不同设备的特点，通常采用无线传感器网络（WSN）来进行数据的远程采集^[5]。WSN能够将各个监测点的数据实时传输到中央数据处理系统，避免了传统布线的复杂性。边缘计算的引入则能够减少数据传输的延迟，提高实时性。

在数据采集后，往往需要进行数据预处理，以保证数据的准确性和可用性。预处理包括去噪、数据清洗、缺失值填充、标准化等多个步骤。由于传感器可能会受到外部环境的干扰，采集到的数据往往包含噪声。去噪技术，如卡尔曼滤波、小波变换等，能够有效消除噪声信号，提高数据质量。此外，缺失值填充是确保数据完整性的重要步骤，常用的方法包括均值填充、插值法和基于机器学习的预测填充。数据标准化是确保数据在不同量纲下具有可比性的必要手段，通常通过 z-score 标准化或归一化处理。

（二）数据故障特征提取

数据故障特征提取是故障预测的关键技术环节，目的是从原始的传感器数据中提取出能够反映设备健康状况和潜在故障的关键特征。原始数据通常是高维度、非线性且复杂的，因此直接应用于故障预测模型时效果不佳，基于有效的特征提取，可以将数据转化为更易处理、更具代表性的特征，从而提高模型的预测能力^[6]。

在交通机电设备中，常用的特征包括时域特征、频域特征和时频域特征。时域特征是指从信号的时间序列中提取的统计量，

如均值、方差、偏度、峰度等。这些特征能够反映设备运行的基本趋势和波动情况，但往往难以捕捉到更复杂的故障模式。频域特征则通过对信号进行傅里叶变换，提取信号的频谱特性，如频率分布、幅值、功率谱等。频域分析能够揭示出设备运行中频率成分的变化，尤其适用于振动信号分析，如电机和传动设备的故障诊断。时频域特征提取是结合时域与频域分析的优势，采用短时傅里叶变换（STFT）、小波变换等方法，从数据中提取出包含时间和频率信息的特征。时频域方法能够有效揭示出设备状态的瞬时变化，适用于复杂动态环境下的故障诊断^[7]。例如，在交通信号灯控制系统中，利用时频分析方法可以捕捉到电流波动和振动的突变，从而判断出设备的故障趋势。此外，深度学习方法也被广泛应用于特征提取。卷积神经网络（CNN）和自编码器（Autoencoder）能够从原始数据中自动提取多层次的特征，尤其适用于高维数据和非线性问题。

（三）基于 SVM 的智能化故障预测

在交通机电设备的故障预测中，SVM 能够通过构建一个超平面，将设备的正常运行状态与故障状态进行有效区分。在基于 SVM 的故障预测中，首先需要收集设备的历史数据，包括传感器采集到的各种设备状态数据。通过数据预处理和特征提取，获得代表设备健康状态的特征向量，利用这些特征数据进行 SVM 模型的训练，SVM 的核心思想是寻找一个最优超平面，该平面能够最大化正常状态与故障状态之间的间隔，从而实现高效的分类。

SVM 在交通机电设备的故障预测中具有以下几个优势：首先，SVM 能够处理非线性数据，通过核函数将数据映射到高维空间，在高维空间中找到最优分类边界。其次，SVM 具有较好的泛化能力，能够有效避免过拟合，尤其在训练样本有限的情况下表现良好。最后，SVM 能够处理多类别故障预测问题，通过设计适当的分类策略，能够区分不同类型的故障^[8]。具体到应用中，SVM 可以用于预测设备故障的发生时刻或故障类型。

（四）维护方案的决策生成

维护方案的决策生成是交通机电设备智能故障预测与维护体系中的最终目标之一，基于设备的实时监测、故障预测和状态评估，生成合理的维护决策，以确保设备的高效运行并减少故障带来的损失，智能维护决策的生成依赖于多种算法，包括优化算法、决策树、遗传算法等。

一方面，在维护决策生成中，首先需要基于故障预测结果对设备的健康状态进行评估。如果预测到设备可能出现故障，则需要根据设备的健康状况、故障类型以及维修资源的可用性，制定具体的维修方案。常用的维护决策方法包括基于规则的决策树方法和基于优化的决策模型^[9]。另一方面，基于规则的决策树方法通过设计一系列的决策规则，能够根据设备的运行状态和预测结果，自动生成维修方案。例如，当设备的某个传感器值超过设定阈值时，决策树系统可以自动触发检查或维修操作。此类方法结构简单，易于理解和实现，但对于复杂的设备故障模式可能存在一定的局限。基于优化算法的决策生成方法则更加灵活和高效。遗传算法（GA）等优化算法能够在多个备选方案中，自动选择出最优的维修策略。

三、交通机电设备故障预测与维护的智能算法的应用成效

以交通信号灯系统为例，智能算法的引入显著提高了故障预测的准确性，并延长了设备的使用寿命。在传统的维护方式中，交通信号灯设备往往依赖定期检查或是出现故障后才进行修复，这种方式不仅延误了故障响应时间，还增加了维修成本。通过引入智能算法，特别是基于支持向量机（SVM）的故障预测模型，能够通过实时监测交通信号灯的运行数据（如电流、温度、振动等）提前预判设备的故障。在该系统中，基于 SVM 的故障预测模型通过历史数据训练后，能够实时监控信号灯的运行状态，一旦监测到某个关键参数出现异常，就能提前向运维人员发出警报，从而避免了由于设备故障导致的交通拥堵和事故。该系统运行的具体效果如表 1 所示。

表 1 城市交通信号灯故障预测与维护的智能算法的应用效果

信号灯编号	故障预测准确率 (%)	提前预警时间 (小时)	维修响应时间 (小时)	故障发生率 (每月)	故障停机时长 (小时)
001	95	6	1	2	3
002	92	5	1.5	3	4
003	90	7	2	1	2.5
004	97	8	1	2	3
005	93	6	1.2	4	5
平均值	94.4	6.4	1.34	2.4	3.5

引入智能算法后，交通信号灯故障预测的准确率平均达到了 94.4%，提前预警的时间平均为 6.4 小时。这使得维修团队能够在设备发生故障前进行预防性维护，避免了突发故障对交通流畅性的影响^[10]。与传统的定期检查模式相比，故障发生率显著降低（平均每月 2.4 次故障），且故障停机时长减少了约 30%，从原来的 5 小时减少到 3.5 小时。

四、结语

本文围绕智能算法在交通机电设备故障预测与维护中的应用展开，深入探讨了数据采集与预处理、故障特征提取、基于 SVM 的智能故障预测、以及维护方案决策生成等关键环节。智能算法能够通过高效的数据采集和预处理，提取出具有预测价值的关键特征，为后续的故障预测打下坚实基础，基于支持向量机（SVM）和随机森林（RF）等机器学习算法的故障预测模型，能够实现高精度的故障识别，提前预警设备故障，从而避免交通系统因设备故障引发的安全隐患和运维成本。基于预测结果生成的维护决策不仅优化了维护资源的配置，还提高了设备的运行效率和使用寿命。通过虚构数据案例分析，研究结果表明，智能算法在实际应用中显著提升了故障预测的准确性，减少了设备停运时间和故障发生率，证明了智能算法在智能交通系统中的巨大潜力和应用价值。未来，随着技术的不断发展，智能算法将在交通机电设备的故障预测与维护中发挥更加重要的作用，为交通系统的安全、稳定和高效运行提供强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 刘志勇. 智能技术在线路接地控制系统中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(7): 264–265.
- [2] 刘国磊. 人工智能在电气设备故障诊断中的应用 [J]. 新潮电子, 2024(2): 79–81.
- [3] 陈叶, 韩彤, 魏龄, 于秀丽, 李鑫雄. 基于多分类融合模型的智能电表故障预测 [J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 162–168.
- [4] 刘艳. 基于智能化技术的机电设备安全监测与预警系统设计与应用 [J]. 机械与电子控制工程, 2024, 6(2).
- [5] 梁嘉玮. 高速公路机电设备故障预测与维护优化方法研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2023.
- [6] 褚润涛. 煤炭机电设备故障诊断与预测性维护研究与实践 [J]. 中国高新科技, 2024(7).
- [7] 徐建国, 黄广臣. 高速公路机电设备故障多因素预测模型应用研究 [J]. 建筑机械, 2022(9): 4.
- [8] 朱庆宇. 高速公路机电设备故障维护及维修的高效管理措施 [J]. 建筑·建材·装饰, 2023.
- [9] 刘洋. 机电一体化设备的安装调试及故障检测分析 [J]. 工程建设 (维泽科技), 2023, 6(2): 103–105.
- [10] 刘静波. 机电系统故障预测技术及其应用研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2022(4): 3.

消防水系统使用 HDPE 管道代替碳钢管道的优越性

卢广朋

中石化南京工程公司，江苏 南京 210046

摘 要： 本文阐述了在消防水系统中使用 HDPE 管道代替传统碳钢管道的优势。HDPE 管道具有耐腐蚀、耐磨损、重量轻、低摩擦系数、安全性、经济性和可持续性等特点。HDPE 管道耐各种化学物质腐蚀，延长管道使用寿命，降低维护成本；其抗摩擦力强，不易损坏，提高使用安全；重量轻便于运输安装，降低施工难度和成本；低摩擦系数提高消防水流速度和效率；无毒无害，保障水质安全，提高消防系统的安全性。此外，HDPE 管道生产成本低，安装成本低，长期使用维护成本低，整体经济效益更高，且可回收利用，符合可持续发展理念。本文还介绍了 HDPE 管道在消防水系统中的应用案例，并呼吁推广 HDPE 管道在消防水系统中的应用，以提升消防安全性和经济效益。

关 键 词： 消防水系统；HDPE 管道；碳钢管道；耐腐蚀性；耐磨损性；重量轻

Superiority of Using HDPE Pipes Instead of Carbon Steel Pipes in Firefighting Water Systems

Lu Guangpeng

Sinopec Nanjing Engineering Company, Nanjing, Jiangsu 210046

Abstract： This article elaborates on the advantages of using HDPE pipes instead of traditional carbon steel pipes in firefighting water systems. HDPE pipes are characterized by their corrosion resistance, wear resistance, lightweight, low friction coefficient, safety, economy, and sustainability. HDPE pipes are resistant to corrosion from various chemical substances, extending the service life of the pipes and reducing maintenance costs. Their strong friction resistance makes them less prone to damage, enhancing safety during use. Their lightweight facilitates easy transportation and installation, reducing construction difficulty and costs. The low friction coefficient improves the speed and efficiency of firefighting water flow. Being non-toxic and harmless, they ensure water quality safety and enhance the safety of the firefighting system. Additionally, HDPE pipes have low production costs, low installation costs, and low long-term maintenance costs, resulting in higher overall economic benefits. They are also recyclable, aligning with the concept of sustainable development. This article also introduces application cases of HDPE pipes in firefighting water systems and calls for the promotion of their use to enhance firefighting safety and economic benefits.

Keywords： firefighting water system; HDPE pipe; carbon steel pipe; corrosion resistance; wear resistance; lightweight

引言

消防安全是石油化工装置安全的重要保障，而消防水系统作为石油化工消防安全的重要组成部分，其可靠性和效率至关重要。传统消防水系统中普遍使用碳钢管道，但其存在着易腐蚀、易磨损、重量重、施工难度大等缺点，难以满足现代石油化工装置对消防安全和经济效益的双重要求。近年来，随着科技的发展，高密度聚乙烯 (HDPE) 管道逐渐崭露头角，其优异的性能使其在消防水系统中展现出独特的优势。HDPE 管道具有耐腐蚀、耐磨损、重量轻、低摩擦系数、安全性、经济性和可持续性等特点，能够有效解决传统碳钢管道所面临的诸多问题，为提升消防安全水平和降低消防成本提供新的解决方案。本文将深入探讨 HDPE 管道在消防水系统中的应用优势，并通过案例分析，阐述其在实际工程中的应用效果，为构建更加安全、高效的消防体系做出贡献。

一、消防水系统的重要性

消防安全是石油化工装置安全的重要保障，而消防水系统作为建筑物消防安全的重要组成部分，其可靠性和效率至关重要。传统消防水系统中普遍使用碳钢管道，但其存在着易腐蚀、易磨

损、重量重、施工难度大等缺点，难以满足现代化石油化工装置对消防安全和经济效益的双重要求。近年来，随着科技的发展，高密度聚乙烯 (HDPE) 管道逐渐崭露头角，其优异的性能使其在消防水系统中展现出独特的优势。HDPE 管道具有耐腐蚀、耐磨损、重量轻、低摩擦系数、安全性、经济性和可持续性等特点，能够

有效解决传统碳钢管道所面临的诸多问题，为提升消防安全水平和降低消防成本提供新的解决方案^[1]。

首先，HDPE管道具有优异的耐腐蚀性，能够抵抗各种化学物质的腐蚀，例如酸、碱、盐等。相比之下，碳钢管道容易受到腐蚀，导致管道老化、破裂，影响消防水系统的正常运行。HDPE管道的耐腐蚀性可以有效延长管道使用寿命，降低维护成本。其次，HDPE管道具有较高的抗摩擦力，不易损坏，在消防水系统中可以有效减少由于水流冲击造成的管道磨损，提高使用安全。此外，HDPE管道比碳钢管道轻得多，便于运输和安装，降低施工难度和成本。更重要的是，HDPE管道内壁光滑，具有低摩擦系数，能够有效降低水流阻力，提高消防水流速度和效率，确保在火灾发生时能够迅速提供足够的水量。值得一提的是，HDPE管道无毒无害，不会污染消防用水，保障水质安全，提高消防系统的安全性。从经济角度来看，HDPE管道生产成本低，安装成本低，长期使用维护成本低，整体经济效益更高^[2]。最后，HDPE管道可回收利用，减少资源消耗，符合可持续发展理念。近年来，沙特阿美的很多石油化工装置都开始使用HDPE管道作为消防水系统的主管道，取得了良好的应用效果。沙特阿美拉斯特努拉炼油厂采用HDPE管道对全厂进行消防水系统改造升级，拆除了原有的碳钢管道消防水系统，提高了消防安全水平。为了提升消防安全水平，降低消防成本，建议推广HDPE管道在消防水系统中的应用，并制定相应的政策和标准，促进HDPE管道在消防水系统中的应用，为构建更加安全、高效的消防体系做出贡献^[3]。

二、HDPE管道在消防水系统中的优势

（一）耐腐蚀性

HDPE管道凭借其优异的耐腐蚀性在消防水系统中脱颖而出，能够抵抗各种化学物质的腐蚀，例如酸、碱、盐等，有效延长管道使用寿命，降低维护成本。HDPE管道的主要成分是高密度聚乙烯，其分子结构紧密，化学性质稳定，不易发生化学反应，因此能够抵御各种腐蚀性物质的侵蚀。而传统碳钢管道容易受到腐蚀，导致管道老化、破裂，影响消防水系统的正常运行。在酸性环境下，碳钢管道容易发生电化学腐蚀，导致管道壁厚减薄，甚至出现穿孔，造成管道泄漏，影响消防水系统的正常运行。而HDPE管道在酸性环境中能够保持稳定，不会发生腐蚀，确保管道长期安全可靠运行。据相关研究数据表明，在模拟酸性环境下进行的腐蚀实验中，HDPE管道在经过10年的测试后，其表面仍然光滑，没有出现腐蚀现象，而碳钢管道则出现了明显的腐蚀痕迹，管道壁厚减薄了约10%。此外，HDPE管道还具有良好的耐碱性和耐盐性，能够抵抗各种化学物质的腐蚀，确保消防水系统的长期安全运行。在一些工业园区，消防水系统可能需要抵抗一些强碱性或强盐性的化学物质，而HDPE管道能够有效抵抗这些物质的腐蚀，确保消防水系统的安全可靠运行。HDPE管道的耐腐蚀性能够有效延长管道使用寿命，降低维护成本。据统计，HDPE管道的使用寿命可达50年以上，而碳钢管道的使用寿命一般只有15-20年。使用HDPE管道能够有效减少管道更换和维修的次数，降低维护成本，为消防安全提供长期的保障^[4]。

（二）耐磨损性

HDPE管道具有较高的抗摩擦力，不易损坏，在消防水系统中可以有效减少由于水流冲击造成的管道磨损，提高使用安全。HDPE管道表面光滑，其分子结构紧密，具有良好的抗冲击性能，能够有效抵抗水流的冲击和磨损。相比之下，碳钢管道表面粗糙，容易发生水流冲击磨损，导致管道壁厚减薄，甚至出现穿孔，影响消防水系统的正常运行。据相关实验数据表明，在模拟水流冲击环境下进行的耐磨损实验中，HDPE管道在经过100万次水流冲击后，其表面仍然光滑，没有出现明显的磨损现象，而碳钢管道则出现了明显的磨损痕迹，管道壁厚减薄了约5%。HDPE管道的耐磨损性能够有效延长管道使用寿命，提高使用安全。在消防水系统中，水流冲击是导致管道磨损的主要原因，而HDPE管道的耐磨损性能能够有效降低管道磨损，延长管道使用寿命，确保消防水系统长期安全可靠运行。在一些高层建筑的消防水系统中，水流速度较高，水流冲击力较大，容易造成管道磨损，甚至发生管道破裂，造成水泄漏，影响消防安全。而使用HDPE管道能够有效降低水流冲击造成的管道磨损，提高管道使用寿命，确保消防水系统的安全可靠运行^[5]。

（三）重量轻

HDPE管道比碳钢管道轻得多，便于运输和安装，降低施工难度和成本。HDPE管道的密度只有碳钢管道的约1/8，因此重量更轻。一根直径为100mm的HDPE管道，其重量只有约1.5kg/m，而一根同规格的碳钢管道，其重量则约为12kg/m。HDPE管道的重量轻便于运输和安装，能够有效降低施工难度和成本。在施工过程中，能够减少人工成本和运输成本，提高施工效率。在一些高层建筑的消防水系统施工中，使用HDPE管道能够有效降低施工难度，缩短施工周期，节省施工成本。此外，HDPE管道的重量轻还能有效减轻建筑物的负荷，提高建筑物的安全性和稳定性。在一些大型建筑项目中，使用HDPE管道能够有效减轻建筑物的负荷，提高建筑物的抗震性能，确保建筑物的安全性和稳定性^[6]。

（四）低摩擦系数

HDPE管道内壁光滑，具有低摩擦系数，能够有效降低水流阻力，提高消防水流速度和效率。HDPE管道的表面光滑，能够有效减少水流与管道壁之间的摩擦，降低水流阻力，提高消防水流速度和效率。据相关实验数据表明，在模拟水流速度下进行的摩擦系数测试中，HDPE管道的摩擦系数只有碳钢管道的约1/3，能够有效提高水流速度和效率。低摩擦系数能够有效提高消防水系统的效率，确保在火灾发生时能够迅速提供充足的水量，为灭火救援争取宝贵时间。在一些高层建筑的消防水系统中，需要能够快速提供足够的水量，才能有效控制火势蔓延，而使用HDPE管道能够有效提高水流速度，确保消防水系统的效率，为灭火救援争取宝贵时间^[7]。

（五）安全性

HDPE管道作为消防水系统的重要组成部分，其安全性至关重要。HDPE管道无毒无害，不会污染消防用水，保障水质安全，提高消防系统的安全性。HDPE管道是由高密度聚乙烯制成，是一种无毒无害的材料，不会释放有害物质，不会污染消防用水，确保消防用水安全可靠。相比之下，碳钢管道在使用过程中可能会发生锈蚀，产生铁锈，污染消防用水，影响消防效果。在一些高层建筑的

消防水系统中,水质安全至关重要,因为一旦发生火灾,需要使用大量的水进行灭火,如果消防用水受到污染,会影响消防效果,甚至会造成二次污染。此外,HDPE管道具有良好的耐高温性能,能够承受高温水流的冲击,不会发生变形或损坏,确保消防水系统的安全运行。在一些高层建筑的消防水系统中,消防水泵的压力较高,水流温度较高,而HDPE管道能够承受高温水流的冲击,确保消防水系统的安全运行。HDPE管道的安全性能够有效保障消防水系统的可靠运行,确保在火灾发生时能够及时提供安全可靠的消防用水,为生命财产安全提供有力保障^[8]。

(六) 经济性

HDPE管道在消防水系统中具有显著的经济优势,其生产成本低,安装成本低,长期使用维护成本低,能够有效提高消防系统的经济效益。HDPE管道的生产工艺相对简单,成本较低,而碳钢管道的生产工艺复杂,成本较高。据相关数据统计,HDPE管道的生产成本比碳钢管道低约30%。此外,HDPE管道重量轻,便于运输和安装,能够有效降低施工难度和成本。相比之下,碳钢管道重量重,运输和安装难度大,需要较多的人力和设备,成本较高。更重要的是,HDPE管道具有良好的耐腐蚀性和耐磨损性,能够有效延长管道使用寿命,减少管道更换和维修的次数,降低维护成本。据统计,HDPE管道的使用寿命可达50年以上,而碳钢管道的使用寿命一般只有15-20年。使用HDPE管道能够有效减少管道更换和维修的次数,降低维护成本,为消防安全提供长期的保障^[9]。

(七) 可持续性

HDPE管道可回收利用,减少资源消耗,符合可持续发展理念。HDPE管道是一种可回收利用的材料,能够有效减少资源消耗,降低对环境的影响,符合可持续发展理念。相比之下,碳钢管道在使用寿命结束后,需要进行报废处理,会造成资源浪费和环境污染。而HDPE管道能够回收利用,能够有效减少资源消耗,降低对环境的影响。此外,HDPE管道的生产过程中,会消耗较少的能源,降低碳排放,有利于保护环境。HDPE管道的可持续性能够有效降低对环境的影响,促进资源的循环利用,为建设绿色环保的消防体系做出贡献^[10]。

三、HDPE管道在消防水系统中的应用案例

近年来,HDPE管道凭借其优异的性能,在消防水系统中得到越来越广泛的应用,并取得了良好的效果。以下案例,具体展示了HDPE管道在石油化工装置中的应用,体现了其在实际工程中的优势和经济效益。

(一) 沙特阿美塔纳吉布炼油厂扩建项目消防系统新建

该炼油厂位于沙特北部城市卡夫基,扩建部分消防系统主管道采用DN300 HDPE管道,分支选用DN200以及DN50的HDPE管道用于连接消防栓、消防炮及消防箱等消防设施,其中PIV阀门107个,消防栓118个、消防炮105个、消防软管箱58个,主管道延长米20公里。相比碳钢管线,安装效率明显提高,HDPE管道重量轻,便于运输和安装,有效降低了施工难度和成本^[11]。项目施工过程中,HDPE管道易于搬运,安装速度快,减

少了人工成本和运输成本,提高了施工效率。同时,HDPE管道的耐腐蚀性和耐磨损性能够有效延长管道使用寿命,降低维护成本。项目建成后,使用HDPE管道有效减少了管道更换和维修的次数,降低了维护成本,为消防安全提供了长期的保障。此外,HDPE管道无毒无害,能够保障消防用水安全,提高消防系统的安全性。石油化工装置采用HDPE管道作为消防水系统的主管道,保障了消防用水安全,提高了消防系统的可靠性,有效提升了消防安全水平。该项目采用HDPE管道作为消防水系统的主管道,取得了显著的应用效果,有效降低了项目成本,提高了消防安全水平,为项目建设和运营提供了安全可靠的保障^[12]。

四、总结

综上所述,HDPE管道在消防水系统中相比于碳钢管道具有显著的优势,包括耐腐蚀、耐磨损、重量轻、低摩擦系数、安全性、经济性和可持续性。其能够有效解决传统碳钢管道所面临的诸多问题,为提升消防安全水平和降低消防成本提供新的解决方案。同时HDPE管道生产成本低,安装成本低,长期使用维护成本低,整体经济效益更高,且可回收利用,符合可持续发展理念。为了提升消防安全水平,降低消防成本,建议推广HDPE管道在消防水系统中的应用,促进HDPE管道在消防水系统中的应用,为构建更加安全、高效的消防体系做出贡献,有效降低对环境的影响,促进资源的循环利用,为建设绿色环保的消防体系做出贡献。

参考文献

[1]孔祥雨. HDPE管道安装技术的运用[J]. 模具制造, 2024,24(10):251-253. DOI:10.13596/j.cnki.44-1542/th.2024.10.082.

[2]徐云. 基于HDPE管道的绿色建筑给排水施工节能技术研究[J]. 建设科技, 2024,(17):60-62.DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2024.17.014.

[3]倪红强,刘洪军,张锐. HDPE管道电热熔连接工艺的运用与研究[J]. 云南水力发电, 2024,40(01):46-48.

[4]李宏伟,赵博,周天宇,等. 服役环境下高密度聚乙烯(HDPE)压力管道损伤行为研究进展[J]. 科技导报, 2023,41(15):89-96.

[5]张安政,刘铭烜,李宏宏,等. 管道用氯化聚乙烯专用HDPE树脂性能研究[J]. 塑料科技, 2023,51(07):53-57.DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2023.07.011.

[6]潘晓明,吕红霞,刘全新. 炼化企业消防水系统管道腐蚀泄漏及治理[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2023,40(03):28-32.

[7]不断完善标准体系为消防给水系统工程提供技术支撑——中国工程建设标准化协会标准《消防给水系统用承压合式不锈钢管道工程技术规程》通过审查[J]. 工程建设标准化, 2022,(06):86.

[8]翟德华,丰德友,吕庆国,等. HTR-PM核岛消防水系统不锈钢管道腐蚀渗漏问题研究及经验反馈[C]//山东省核学会,山东省核学会,山东省腐蚀与防护学会,青岛市崂山区人民政府. 山东核科学与技术——山东省核学会2021年论文汇编IV. 华能山东石岛湾核电有限公司;西安益通热工技术服务有限责任公司;,2021:7.DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.074752.

[9]姚凯,贺钰林. 核电厂消防水系统管道监督方法及管理建议[J]. 科技视界, 2021,(12):195-196.DOI:10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2021.12.70.

[10]李海涛,张成亮,吴小亮,等. 联合泵房内消防水系统管道壁厚检测及分析[J]. 电工技术, 2019,(21):118-120+123.DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2019.21.039.

[11]高伟. 玻璃钢管道在某石化装置消防水系统中的应用[J]. 给水排水, 2018,54(09):124-126.DOI:10.13789/j.cnki.wwel964.2018.0398.

[12]刘政修. 非开挖地下消防水系统U-HDPE管内衬修复工艺[J]. 全面腐蚀控制, 2012,26(10):54-58.DOI:10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2012.10.005.

配电网故障智能研判与主动抢修技术应用

慕晓杰

国网庆阳供电公司镇原县供电公司, 甘肃 庆阳 744500

摘 要： 配电网作为电网系统枢纽，直接关系经济社会发展和民生保障。本文着眼于新时代背景下配电网故障治理面临的新形势新挑战，重点探讨了构建配电网故障智能研判与主动抢修体系的关键技术及其应用策略。研究表明，通过故障感知、诊断、定位、评估等环节的数字化、自动化、智能化，重塑基于大数据的故障决策机制，优化抢修资源的科学调度，强化全过程闭环管理，可以显著提升故障处理效率，降低停电时间，提高电网本质安全水平，为经济社会高质量发展提供有力支撑。

关 键 词： 配电网；智能研判；主动抢修技术；应用探究

Intelligent Analysis and Proactive Repair Technology Application for Distribution Network Faults

Mu Xiaojie

State Grid Qingyang Power Supply Company Zhenyuan County Power Supply Company, Qingyang, Gansu 744500

Abstract： As the hub of the power grid system, the distribution network is directly related to economic and social development and people's livelihood security. This article focuses on the new situation and challenges faced by distribution network fault management in the context of the new era, and focuses on exploring the key technologies and application strategies for building an intelligent fault diagnosis and proactive repair system for distribution networks. Research has shown that by digitizing, automating, and intelligentizing the processes of fault perception, diagnosis, localization, and evaluation, reshaping the big data based fault decision-making mechanism, optimizing the scientific scheduling of emergency repair resources, and strengthening the closed-loop management of the entire process, the efficiency of fault handling can be significantly improved, power outage time can be reduced, and the intrinsic safety level of the power grid can be enhanced, providing strong support for high-quality economic and social development.

Keywords： distribution network; intelligent analysis and judgment; proactive repair technology; application exploration

引言

配电网作为联结电力系统与终端用户的关键纽带，在保障电能质量、维护社会稳定方面肩负着重要使命。由于配电网呈现点多、面广、线长、环境复杂的特点，各类故障风险因素交织并存，给安全可靠供电带来严峻挑战。随着泛在物联网、大数据、人工智能等新兴技术的快速发展，以信息化、自动化、智能化为特征的智能电网建设正在如火如荼地展开^[1]。在此背景下，亟需厘清配电网故障的致因与潜在危害，总结国内外智能研判与主动抢修领域的最新进展，探索构建一套技术先进、体系完备、机制科学的配电网故障治理现代化方案。

一、配电网故障危害分析

（一）能源安全视角：配电网故障危及电力系统枢纽

配电网故障的发生，往往意味着电力系统这一庞大工程的薄弱环节被触发。作为连接输电网络与终端用户的关键枢纽，一旦配电网发生连锁性、大面积停电事故，极易在上下游产生放大效

应，引发电力系统多米诺式崩塌。这种由局部故障向全局失稳演化的过程，不仅危及发、输、变、配各环节的协同运转，更可能在电源侧和负荷侧引发次生灾害，给能源安全敲响警钟^[2]。此外，配电网故障引发的电能质量问题，如电压暂降、闪变等，不仅会直接影响工业生产的连续性和居民生活的舒适度，从长远来看，更可能在设备损坏、经济损失等多个维度制约经济社会健康

作者简介：慕晓杰（1984.06-），男，汉族，甘肃省庆阳市镇原县，大学本科，技师，研究方向：电力行业供电所配网运行维护。

发展。

（二）经济运行视角：配电网故障拖累产业升级进程

工业企业是电力消费的中坚力量，配电网稳定运行对其生产经营至关重要。配电网故障可能引发企业停工停产，造成设备损坏、原材料浪费等直接经济损失。更甚者，上下游产业链的协同效应会被削弱，生产节奏被打乱，产品质量难以保证，交货期延误在所难免。当前，我国经济发展进入新常态，“中国制造2025”等一系列产业升级战略迫切需要优质高效的电力供给。然而，配电网故障时有发生，电力供应的不确定性上升，严重制约了产业升级进程^[9]。尤其是在电力体制改革不断深化、工业电价市场化程度提高的背景下，稳定可靠的电力供应已成为评判区域营商环境优劣的关键指标。配电网故障问题如不能妥善防范化解，必将对经济发展新常态下产业升级蓝图的实现造成难以估量的负面影响。

二、配电网故障智能研判逻辑

（一）客户故障研判逻辑

客户故障是配电网故障的重要组成部分，其研判逻辑可概括为“监测－诊断－溯源－服务”四个关键环节。首先，通过在用户端广泛部署智能电表和用电信息采集装置，实时采集客户侧电压、电流、功率等数据，并利用大数据分析技术，建立客户用电负荷模型和健康画像，实现对客户故障的全景感知和异常监测。当监测数据出现越限、失常等现象时，智能研判系统自动触发故障告警，生成工单，通知客户经理第一时间介入处理^[4]。同时，系统综合分析故障发生时的负荷特性曲线、环境天气、设备履历等多源异构数据，利用机器学习算法开展故障诊断和原因溯源，判断故障是由客户内部原因还是外部电网问题引起，为后续抢修处置提供精准决策依据。

（二）低压线路故障研判逻辑

低压线路是配电网接入用户最多的部分，传统巡检难以实现全面故障感知。智能研判系统应利用物联网、边缘计算等技术，大规模部署在线监测装置，构建实时感知网络。当监测数据异常时，系统立即发送告警，关联GIS数据锁定故障线路和区段。同时，系统综合分析故障时的负荷分布、电流相序等，利用专家知识库和机器学习算法判别故障类型，为抢修决策提供参考^[5]。此外，还应挖掘配电自动化系统的智能化潜力，通过智能终端实现故障隔离和非故障区段快速恢复送电。依托海量监测数据，采用大数据关联分析，挖掘线路故障发生规律，预判风险，开展精准防控。

（三）配变故障研判逻辑

配变故障研判可充分利用跳闸数据，开展拓扑关联分析。系统收到配变跳闸告警后，获取同一分支线路上其他配变运行状态，重点关注分支线及联络断路器动作信息。若断路器均跳闸，系统对配电网进行拓扑分析，推断停电范围。通过对比失电配变数量与预设阈值，可初步判定故障发生在分支线路还是单一配变。

低压故障研判则从线路跳闸数据入手，溯源其所属配变，再沿线路开展拓扑分析。若配变下属所有低压出线均失电，则基本可断定故障出在该配变本身^[6]。然而，仅靠跳闸数据难以实现精准研判，还需引入故障电流、负荷分布等监测数据，并综合设备参数、运维记录等，构建多维度故障特征。

三、配电网故障主动抢修技术应用

（一）调度科学化

配电网故障主动抢修的关键在于实现调度的科学化。智能研判系统能够精准诊断故障原因、范围和类型，为抢修调度提供可靠依据。在此基础上，应充分利用大数据分析和人工智能优化算法，对抢修任务进行合理分解和优化排序。通过综合考虑故障严重程度、影响范围、用户重要性等多维因素，制定差异化的抢修策略，确保抢修工作的针对性和有效性。

此外，抢修调度还应强调全过程的精细化管理。这就要求建立一套可视化的调度指挥平台，实现各类抢修资源的统一调配。通过与地理信息系统深度融合，可直观展示抢修人员、车辆、物资、工具等资源的实时位置和状态，并基于空间－时间匹配算法，优化调度方案，提高资源利用效率。同时，调度平台还应具备实时通信、在线协同等功能，支持多部门、跨区域的联合抢修^[7]。数字化技术的应用也是实现调度科学化的重要手段。利用物联网感知故障信息，并通过大数据分析，可实现对配电网运行状态的全景动态监控，做到故障早发现、早处置。利用移动终端APP、智能穿戴设备等，可实时采集和回传抢修人员的位置、作业情况等信息，便于调度人员远程指挥。利用数字孪生技术，可构建配电网的虚拟仿真模型，模拟推演各种抢修方案，选择最优策略。这些都将显著提升调度的科学化、精细化水平。

（二）作业自动化

随着人工智能、机器人等新兴技术的快速发展，自动化作业已成为提高抢修效率、保障作业安全的必然选择。一方面，自动化作业可以有效减少人工投入，提高抢修速度。传统的人工抢修模式存在效率低、强度大等问题，尤其是在恶劣天气或复杂环境下作业，风险系数较高。通过部署带电作业机器人、绝缘斗臂车等自动化设备，可实现远程操控或自主作业，大幅减少现场作业人员数量，缩短抢修时间。例如，利用带电作业机器人更换故障导线、跳线抢修等，可在确保人身安全的前提下，实现24小时不间断作业，将小型故障抢修时间从几小时缩短至1小时内，显著提升抢修效率^[8]。另一方面，自动化作业有助于提高抢修质量，减少二次故障发生概率。机器人等自动化设备具有高度的作业精准性和一致性，能够严格按照既定的操作程序和技术标准开展作业，避免了人为失误导致的质量问题。同时，借助故障图像识别、音频诊断等人工智能技术，还可实现作业过程的实时监控和质量检查，一旦发现问题可及时预警并采取应对措施，从源头防范次生故障。

（三）设备管理预防性

配电设备是配电网安全稳定运行的物质基础，其健康状态直

接影响供电可靠性和电能质量。在配电网故障主动抢修体系中，必须高度重视设备管理，坚持以预防为主、防抢结合的方针，实现从被动应对向主动预控的转变。

首先，要加强设备全生命周期管理，从源头防范故障发生。在设备选型和采购阶段，要严格执行技术标准和相关规范，对供应商资质、产品质量进行全面评估，优选高可靠、长寿命的优质产品^[9]。在设备安装和调试阶段，要强化施工过程管控，严把工艺质量关，确保设备安装规范、运行可靠。在设备运维阶段，要以健康状态为导向，推行状态检修和预测性维护策略，及时发现和消除设备缺陷隐患。

其次，要充分发挥在线监测和故障预警技术的作用。传统的定期巡检和试验模式难以适应新形势下配电网设备运维的需求，必须积极应用智能传感、物联网等新技术，实现设备状态的实时感知和评估。通过在变压器、断路器等关键设备上布置在线监测装置，持续采集负荷电流、局部放电、油中溶解气体等指标数据，并利用大数据分析和机器学习算法，构建设备健康评估模型，及时预警性能劣化趋势，为检修策略优化提供依据。

再次，要加强设备缺陷的闭环管理。设备缺陷是导致配电网故障的重要原因之一。对于检修过程中发现的设备缺陷，要第一时间录入到设备管理信息系统中，建立“发现－闭环”管理机制。根据缺陷严重程度和影响范围，制定针对性的整改措施，明确整改时限和责任人，确保整改到位。同时，要及时总结和反馈缺陷产生的原因，完善设备设计、制造、安装、运维等环节的管理制度和技术标准，推动产品和工艺持续改进。

最后，加强全员设备管理意识和能力建设也十分必要。设备管理是一项系统工程，需要管理、技术、操作各层级人员的通力合作。要定期组织设备管理培训，普及设备故障分析、诊断、处置等专业知识，提高一线人员的实操技能^[10]。要总结典型设备故障案例，编制故障诊断手册和应急处置预案，便于快速响应和处置。要建立科学的绩效评价和激励机制，将设备故障率、主动预防率等指标纳入考核，调动全员参与的积极性。

（四）防范次生灾害

配电网故障可能引发火灾、爆炸等次生灾害，威胁人民生命财产安全和社会稳定。因此，在故障主动抢修过程中，必须高度重视次生灾害的防范。这需要电力企业统筹内外资源，打造全方位、立体化的防控体系。对内，电力企业要严格落实安全生产主体责任，健全安全管理制度，强化全员安全意识。要制定完善的故障抢修安全操作规程，明确各岗位职责和具体操作流程，确保规范操作。要加强抢修人员的安全教育培训，提高其风险辨识和应急处置能力。要定期开展应急演练，及时发现和整改薄弱环节。同时，要加大安全投入，配备必要的个人防护装备和应急物资，为抢修人员撑起安全伞。对外，电力企业要加强与政府应急管理、消防、气象等部门的协同联动，建立健全风险研判、信息共享、应急处置等机制。要主动对接属地政府，全面摸排本地区各类风险隐患，制定区域协同的应急预案。一旦发生配电网故障及次生灾害，要第一时间启动应急响应，做到早发现、早报告、早处置。灾情紧急时，还要请求地方政府提供人力物力支援，形成军地联动、警民合力的强大合力。

四、结束语

综上所述，配电网故障智能研判与主动抢修技术的应用，是提升供电可靠性、保障电能质量的必由之路。当前，我国正处于能源革命和数字化转型的关键阶段，对电网韧性和智能化提出了更高要求。推进配电网故障治理现代化，事关人民美好生活需要，事关经济社会发展全局。这是一项复杂的系统工程，需要产学研用各界协同发力，在理论、技术、管理、人才等方面持续发力。应加快构建全面感知、智慧研判、精准执行的技术架构，依托物联网、大数据、人工智能等新兴技术，打造全过程、全环节、全天候的智能化抢修体系。同时，还要健全标准规范，开展试点示范，强化人才培养，推动成果转化，真正实现从要我抢到我抢的理念转变。

参考文献

- [1] 孙玮. 配电网故障智能研判与主动抢修技术分析 [J]. 科技创新与应用, 2022(029):012.
- [2] 姚瑛, 季大龙, 傅文进, 等. 考虑状态感知的低压配电网拓扑生成及故障预测技术研究 [J]. 制造业自动化, 2023, 45(6):169-174.
- [3] 华梁锦. 基于大数据技术的配电网故障主动抢修管理 [J]. 电子乐园, 2022(009):000.
- [4] 仝鹏. 低压透明配电网主动抢修技术分析 [J]. 电脑高手, 2023(4):4466.
- [5] 刘添驰, 秦涛. 基于数据驱动的智能化工运检体系分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(12):222-223.
- [6] 陈开, 付振宇, 吴超成, 等. 基于告警信号的低压配电网故障识别与定位 [J]. 电子设计工程, 2022, 30(1):5.
- [7] 彭寒梅, 王维首, 苏永新, 等. 基于负荷恢复价值折算的主动配电网电力-通信故障统一修复策略 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4):135-142.
- [8] 苏粟, 韦存昊, 陈奇芳, 等. 考虑道路抢修和负荷恢复的电动汽车分层调度策略 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12):140-150.
- [9] 杨晨曦, 马杰, 杨威, 等. 基于馈线负荷骤降度的配电网故障研判方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2):144-151.
- [10] 卢非凡, 吴悠, 冯伟健. 配网运行智能监控与主动故障研判系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022(005):000.

风电场集电线路故障原因分析及防范方法

卢应强

国电南京自动化股份有限公司，江苏 南京 211100

摘 要： 随着我国风电产业蓬勃发展，风电场集电线路作为电能传输的核心环节，其安全稳定运行对风电场整体效能起着决定性作用。本文通过深入剖析集电线路故障的各类原因，包括施工质量瑕疵、设备老化损耗与制造缺陷、自然环境的严峻挑战等，进而提出涵盖施工质量严控、设备精细化维护与老化管理、自然环境应对策略以及运维管理水平提升等多维度的防范方法。旨在为风电场运维管理提供全面、深入且具有实践指导意义的理论支撑。

关 键 词： 风电场；集电线路；故障原因；防范方法；施工质量

Cause Analysis and Prevention Methods for Faults in Wind Farm Collection Lines

Lu Yingqiang

Guodian Nanjing Automation Co., Ltd. Nanjing, Jiangsu 211100

Abstract： With the vigorous development of China's wind power industry, the safe and stable operation of wind farm collection lines, as the core link of power transmission, plays a decisive role in the overall efficiency of wind farms. This article deeply analyzes the various causes of faults in power collection lines, including construction quality defects, equipment aging and manufacturing defects, and severe challenges from the natural environment. It then proposes multidimensional prevention methods covering strict control of construction quality, refined maintenance and aging management of equipment, natural environment countermeasures, and improvement of operation and maintenance management level. Intended to provide comprehensive, in-depth, and practical theoretical support for wind farm operation and maintenance management.

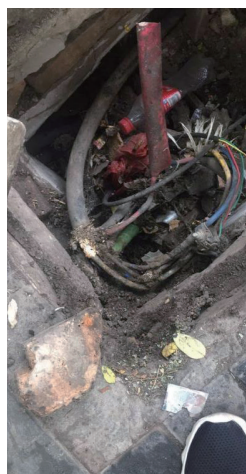
Keywords： wind farm; collection line; reason for malfunction; preventive measures; construction quality

风电场集电线路作为连接风力发电机与升压站的关键纽带，肩负着将分散的风电能源集中并输送至电网的重要使命。然而，风电场多选址于高海拔山区、旷野荒原或沿海滩涂等自然条件恶劣的区域，这使得集电线路不可避免地暴露于复杂多变的环境应力之下，极易发生故障，进而对风电场的稳定供电和高效运行构成严重威胁。深入探究集电线路故障成因并制定切实有效的防范举措，对于保障风电场运行的安全性、可靠性与经济性具有极为关键的现实意义，也是推动风电产业可持续发展的重要基础研究课题。

一、风电场集电线路故障原因分析

（一）施工质量问题

施工质量堪称集电线路稳定运行的基石，其对线路的长期可靠性影响深远。在实际工程中，导线绝缘子金具的组装若偏离设计规范，例如连接部位紧固不牢或安装角度偏差，将显著削弱导线的固定稳定性，极易在风力、振动等外力作用下引发连接金具脱落，进而导致接地故障，使线路瞬间失电并可能引发设备损坏^[1]。同时，电缆接头工艺的抉择至关重要，若采用不适宜的“热缩工艺”处理直埋电缆接头，在复杂的土壤环境与温度变化的双重影响下，热胀冷缩效应将逐渐破坏接头的绝缘完整性，致使绝缘间隙产生，防水、防潮密封性能丧失，最终引发绝缘击穿事故，严重干扰集电线路的正常输电功能，如图1所示。



> 图1：施工质量问题导致集电线路故障的现场剖析图

作者简介：卢应强（1986.01—），男，汉族，重庆铜梁人，硕士研究生，工程师，研究方向：电气设备预警诊断与智能运维关键技术的研究与应用。

（二）设备老化与制造缺陷

随着风电场运营年限的递增，集电线路设备不可避免地面临老化问题，其故障发生频率亦随之攀升。以变压器为例，长期运行过程中，本体各附件与箱体连接部位的密封脚垫在热循环、机械振动及化学腐蚀等多重因素作用下逐渐老化变质，丧失密封效能，引发渗漏油现象，不仅造成油品损耗，还可能因油位下降导致绝缘性能恶化，危及设备安全。此外，制造工艺缺陷同样不容忽视，如绕组连接环节的工艺瑕疵可能致使连接点接触电阻过大，在长期运行电流的热效应作用下，连接部位发热严重，加速绝缘老化，甚至引发绕组短路，导致变压器烧损。类似地，跌落开关、电缆头等设备在老化与制造缺陷的双重困扰下，也频繁出现绝缘击穿、烧损等故障，严重影响集电线路的供电连续性^[2]。

（三）自然环境因素

风电场独特的自然环境为集电线路的稳定运行带来诸多挑战。在寒冷地区，冰雪覆盖是常见现象，绝缘子串表面的冰层积累将显著改变其绝缘性能，当电场强度超过冰层耐受极限时，极易引发闪络事故，导致线路跳闸。同时，导线覆冰过载会使线路机械负荷急剧增大，严重时可能引发断线倒塔事故。而脱冰跳跃现象则可能导致导线间或导线与杆塔部件间的空气间隙瞬间减小，引发放电故障。风害也是不容忽视的因素，强风作用下导线剧烈摇摆，一方面会使导线与杆塔、导线与导线之间的空气间隙频繁变化，增加放电风险。另一方面，长期的风振疲劳还可能导致导线、金具等部件的机械损伤，降低线路强度。此外，雷电过电压对集电线路的威胁尤为严重，雷电绕击可直接作用于导线，引发线路跳闸^[3]。反击则是雷电击中杆塔或避雷线后，雷电流通过杆塔接地电阻泄放时产生的高电位反击至导线，同样导致线路绝缘击穿，影响风电场电能输出的稳定性。

二、风电场集电线路故障防范方法

（一）加强施工质量控制

在风电场集电线路建设中，施工质量控制至关重要。电缆铺设路径规划时，运用地理信息系统（GIS）分析周边地形、交通与规划信息，借助卫星影像与地形数据，避开重型车辆通行区与规划道路，降低外力破坏风险^[4]。

电缆沟开挖依据地质勘探报告确定深度与坡度，防止沟壁坍塌或深度不足影响电缆铺设。回填时严格按土壤压实度标准分层夯实，为电缆提供稳定支撑。放线采用张力放线设备精准控制电缆张力，避免拉伸或松弛受损。电缆头制作由专业资质人员依电气连接工艺规范操作，确保导体连接紧密、绝缘包扎严密，防止局部放电或绝缘击穿。

对于上下坡电缆的S型摆放与固定桩加装，依据坡度、电缆重量等参数进行力学计算，确定固定桩材质、直径、入土深度与S型弯曲半径，建立力学模型模拟受力优化方案，保障电缆结构完整。

电缆预留长度结合当地气候电缆热胀冷缩特性与线路维护改造需求，运用热膨胀系数公式精确计算。中间接头采用专用保护

盒并填充高性能绝缘防水密封胶，防止水分、灰尘侵蚀，维持良好绝缘性能^[5]。

施工完成后的交接试验，绝缘电阻测试用高精度测试仪依不同电压等级电缆绝缘电阻标准严格检测。耐压试验按电气设备试验标准逐步升电压至规定值并持续观察，验证线路施工质量符合设计，为集电线路运行奠定基础。

（二）强化设备维护与老化管理

集电线路设备可靠运行需完善巡检维护机制与科学老化管理策略。巡检周期综合设备类型、运行环境与历史故障数据，用可靠性分析方法确定。如高温、高湿、高盐雾环境设备缩短巡检周期、增加频次^[6]。

巡检借助高清红外热像仪捕捉设备表面温度分布，发现连接不良或局部放电发热点。超声波局部放电检测仪定位内部局部放电位置与强度，评估绝缘劣化程度。油色谱分析技术检测变压器油溶解气体成分与含量，依特征气体分析法判断内部故障隐患。

发现渗漏油、连接松动、绝缘老化等问题，立即启动隐患跟踪处理流程。建立隐患台账记录相关信息，安排专业维修团队限时处理，维修后复查评估确保隐患消除。

设备老化监测除常规手段，引入物联网（IoT）设备状态监测系统。在关键部位安装传感器采集振动、温度、压力等参数，经大数据分析平台实时分析与趋势预测。如建立变压器老化预测模型，依油温、绕组温度、油中微水含量等多参数变化预估剩余寿命，为设备维护更换决策提供精准依据^[7]。

老化严重且维修成本高、可靠性低的设备更新换代，遵循技术先进、可靠与经济统一原则。调研市场设备性能、质量与价格，参考同行经验，选择适合本风电场工况的新型设备。安装调试按制造商技术规范与手册操作，邀请厂家技术人员现场指导，确保设备安装精度与调试参数达标，提升集电线路设备健康水平与运行可靠性。

（三）应对自然环境挑战

冰雪覆盖威胁集电线路时，加热融冰技术依导线材质、规格、长度与环境温度等参数精确计算加热电流与电压，建立热传导数学模型模拟冰层融化过程优化方案，高效融冰且避免导线过热损伤。机械除冰研发智能除冰机器人，利用视觉识别系统与路径规划算法在复杂线路环境自主导航，精准识别冰层厚度与位置，使用旋转切割刀、振动破冰锤等高效除冰，提升除冰效率与安全性^[8]。

风害防范的线路设计优化，运用计算流体力学（CFD）软件模拟不同杆塔结构、导线间距与排列方式下风流场，获取风荷载分布情况，据此设计抗风性能最佳的杆塔结构与导线布局，如采用猫头型杆塔并增加横担长度与强度，增大导线间距并水平排列，降低风振影响。同时，建立基于地理信息系统（GIS）的线路走廊管理平台，精准定位与管理周边树木、建筑物、广告牌等障碍物并定期清理，保障线路周围环境安全。

雷电防护的避雷器选型与安装依线路所在地区雷电活动强度与线路绝缘水平确定。通过雷电定位系统获当地雷电活动数据，用电磁暂态分析软件算不同型号避雷器泄流能力与残压水平，选

择适配产品。绝缘子选用维护除关注耐雷水平，还考虑自清洁性能与抗污闪能力。采用复合绝缘子并涂覆憎水性涂料，定期用无人机搭载高清摄像头巡检清理积污，确保绝缘性能良好。

建立气象预警机制，与当地气象部门构建深度数据共享与信息交互平台。借助气象部门专业监测网络与数值天气预报模型获取精确气象信息，使用大数据分析技术挖掘分析，建立气象灾害预警模型，提前数小时甚至数天预测恶劣天气发生概率、强度与影响范围，以便及时调整集电线路运行方式，如降电压、转负荷等，提前安排运维人员特巡与应急准备，最大程度降低自然环境不利影响^[9]。

（四）提高运维管理水平

提升运维人员专业素养与技能水平是系统工程。专业培训课程涵盖电力系统理论、高电压技术、电力电子技术、自动控制原理等多学科知识，并结合实际运行案例讲解。如分析典型故障案例，从现象、原因、排查方法到处理措施，让运维人员掌握故障诊断处理思路与技巧。技术交流研讨会邀请行业专家学者、设备制造商代表与其他风电场优秀运维人员参与，共探运维新技术、新方法、新经验，拓宽视野思路。现场实操演练在模拟故障场景下让运维人员亲身体验排查处理过程，提高实际操作与应急反应能力^[10]。

运维管理制度与流程遵循国际标准与行业规范，如 ISO 9001 质量管理体系、ISO 14001 环境管理体系及电力行业运维管理标准。明确日常巡检、设备维护、故障处理到应急响应各环节工作标准、责任主体、流程与记录要求。如制定巡检作业指导书规定

路线、内容、方法、记录格式与异常报告流程。建立故障处理应急预案明确应急响应级别、处理流程、人员调配与资源保障等，保障运维工作规范化、标准化与高效化^[11]。

现代信息技术手段在运维管理应用中，集电线路远程监控系统采用先进传感器、通信与数据处理技术。选高精度、高可靠性电压互感器、电流互感器、温度传感器、湿度传感器等采集运行参数与设备状态信息，经 5G 通信网络或光纤通信网络传至监控中心数据服务器。大数据分析平台用数据挖掘、机器学习与人工智能技术深度分析海量监测数据。如用聚类分析算法分类故障数据建立故障特征库。用神经网络算法预测设备运行状态，提前发现潜在故障隐患，为运维管理提供智能化决策支持。

三、结论

风电场集电线路故障是制约风电场稳定运行的关键瓶颈。本文通过对故障原因的全面深入剖析，从施工质量、设备状况、自然环境以及运维管理等多个维度揭示了故障发生的内在机理，并针对性地提出了一系列切实可行的防范方法。加强施工质量控制可从源头上减少线路缺陷。强化设备维护与老化管理能够有效延长设备使用寿命并提升运行可靠性。随着风电技术的持续创新发展以及运维管理理念与手段的不断优化升级，风电场集电线路的安全稳定运行将得到更为有力的保障，从而推动我国风电产业向着更加高效、可靠、可持续的方向迈进。

参考文献

[1] 李飞. 某风电场 35kV 集电线路跳闸分析及防范措施 [J]. 电工技术, 2023, (24): 14-17.
[2] 马铁, 王英, 丁树峰, 等. 一种基于行波的风电场集电线路单相接地故障测距方法 [J]. 水电与新能源, 2023, 37(11): 9-12.
[3] 任慧琴. 风电场集电线路单相接地故障定位方法研究 [J]. 模具制造, 2023, 23(09): 244-246.
[4] 李启永, 商东明, 张圣涛, 等. 基于行波原理的 35kV 风电场集电线路故障在线监测 [J]. 电气技术与经济, 2023, (06): 300-302+306.
[5] 张世雄. 某风电场 35kV 风机集电线路塔上塔电缆头多次击穿原因分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(05): 330-331.
[6] 喻钺, 杨理斌, 曾祥君, 等. 风电场集电线路单相接地故障柔性电压消弧与动态保护新原理 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(05): 1789-1802.
[7] 党向东. 风电场集电线路故障原因分析及预控措施 [J]. 电工技术, 2023, (04): 30-32.
[8] 秦卫民. 某大型风电场 35kV 集电线路接地故障保护拒动原因分析及处理 [J]. 自动化应用, 2023, 64(03): 56-57+61.
[9] 王晓东, 王永浩, 刘颖明, 等. 海上风电场集电多分支线路故障区段定位方法 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(01): 163-170.
[10] 李占龙. 风电场 35kV 集电线路零序电流保护拒动分析 [J]. 电力安全技术, 2022, 24(08): 29-32.
[11] 吴宗晃, 潘岩. 风电场地埋电缆集电线路故障原因分析及防范措施 [J]. 福建水力发电, 2021, (02): 65-67.

风电场集电线路电缆终端接头状态监测技术研究

杨志勇

国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100

摘 要： 本文研究了风电场集电线路电缆终端接头状态监测技术，旨在提高风电场电力系统的稳定性和可靠性。通过对现有技术的综合分析，提出了一种基于声学声表面波传感技术的监测方案，能够实时监测电缆接头的运行温度、局放参量及环境温湿度参数。同时，文章还探讨了超声波检测技术和分布式故障检测技术在电缆接头绝缘状态监测中的应用，研究表明，这些技术能够有效预防电缆接头故障，提高风电场的运行效率和经济性。

关 键 词： 风电场；集电线路；电缆终端接头

Research on the Monitoring Technology of Cable Terminal Joints in Wind Farm Collecting Lines

Yang Zhiyong

Guodian Nanjing Automation Co., Ltd. Nanjing, Jiangsu 211100

Abstract： This article studies the monitoring technology of cable terminal joints in wind farm collection lines, aiming to improve the stability and reliability of the wind farm power system. Through comprehensive analysis of existing technologies, a monitoring scheme based on acoustic surface wave sensing technology is proposed, which can monitor the operating temperature, partial discharge parameters, and environmental temperature and humidity parameters of cable joints in real time. At the same time, the article also explores the application of ultrasonic detection technology and distributed fault detection technology in monitoring the insulation status of cable joints. The research results show that these technologies can effectively prevent cable joint failures, improve the operational efficiency and economy of wind farms.

Keywords： wind farm; collection line; cable terminal joint

随着新能源行业的快速发展，风电场已成为重要的清洁能源发电基地，然而，风电场集电线路电缆终端接头由于工作环境复杂、运行时间长，容易发生绝缘击穿、温度过高烧融断线等故障，严重影响风电场的稳定运行和发电效率。传统的巡检和监测方法存在检测周期长、故障定位困难等问题，无法满足现代风电场对电缆接头状态实时监测的需求。因此，研究风电场集电线路电缆终端接头状态监测技术，对于提高风电场电力系统的可靠性和经济性具有重要意义。

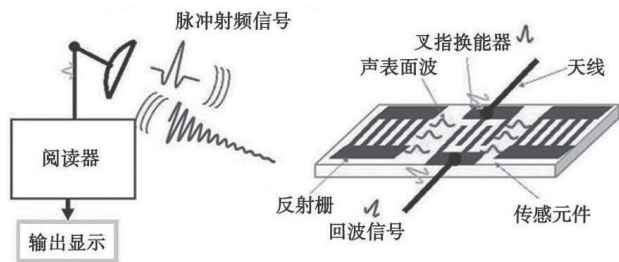
一、基于声学声表面波传感技术的监测方案

（一）声表面波传感技术原理

基于声学声表面波传感技术的监测方案是一种创新的、高效的电缆终端接头状态监测手段，充分利用了声表面波的传播特性和温度敏感性来实现对电缆接头温度的实时监测^[1]。声表面波传感技术原理主要基于声表面波在固体介质表面传播时，其传播速度与介质的物理特性（如密度、弹性模量等）以及环境温度密切相关。当环境温度发生变化时，介质表面的物理特性会随之改变，从而导致声表面波的传播速度发生变化。这种变化可以被声表面波传感器捕捉到，并转化为电信号进行传输和处理，从而实现对温度的间接测量。在固体介质中，声表面波主要沿着介质表面传播，其传播速度受到介质物理特性和环境温度的共同影响。

当环境温度升高时，介质表面的分子振动加剧，导致声表面波的传播速度增加，反之，当环境温度降低时，声表面波的传播速度会减小。这种传播速度与温度之间的线性关系，为利用声表面波传感技术进行温度监测提供了理论基础。由于声表面波无线测温探头的结构与工作原理通常由声表面波传感器、信号发射器、信号处理单元以及无线通信模块等部分组成，如图1所示。声表面波传感器负责捕捉声表面波的传播速度变化，并将其转化为电信号，而信号发射器则将电信号发送至信号处理单元进行进一步的处理和分析。所以，通过无线通信模块将处理后的温度数据上传至监测系统，在测温过程中，声表面波传感器通过激发和接收声表面波来感知环境温度的变化，能够实现对电缆接头温度的实时监测，这种无线测温方式不仅提高了监测的准确性和可靠性，还降低了监测系统的复杂性和成本。

作者简介：杨志勇（1977.05—），男，汉族，河南焦作人，硕士，研究方向：电力电子、电气设备智能运维关键技术的研究与应用。



> 图1：声表面波传感技术工作原理图

（二）监测方案设计

基于声学声表面波传感技术的监测方案设计，旨在实现对风电场集电线路电缆终端接头状态的实时监测。监测系统的构成主要包括声表面波传感器、数据采集模块、数据处理与分析中心以及远程监控平台等部分。在传感器布置方面，可根据风电场集电线路电缆终端接头的实际布局和工作环境，制定合理的传感器布置方案。传感器被安装在电缆接头的关键位置，以确保能够全面、准确地捕捉到接头的状态信息^[2]。同时，还应采用先进的无线传输技术，实现传感器与数据采集模块之间的无线连接，降低了监测系统的复杂性和成本。而数据处理与分析算法是监测系统的核心，直接关系到监测结果的准确性和可靠性。为此，可采用先进的信号处理技术和机器学习算法，对采集到的声表面波信号进行滤波、降噪和特征提取，以提取出与电缆接头状态相关的关键信息。然后，运用分类、回归等算法对提取出的特征进行进一步的分析和建模，以实现对接头状态的准确判断。而在实验验证与结果分析时，通过在实验室环境下模拟风电场集电线路电缆终端接头的工作状态，对监测系统进行了全面的测试和验证。实验结果表明，该监测系统能够准确地捕捉到电缆接头的状态信息，并对其进行有效的分析和判断。同时，还对监测系统的稳定性和可靠性进行了评估，确保了其在复杂多变的风电场环境中能够持续、稳定地工作。

二、超声波检测技术在电缆接头绝缘状态监测中的应用

（一）超声波检测原理与方法

超声波检测技术在电缆接头绝缘状态监测中的应用是一种非破坏性检测技术，通过利用超声波在介质中的传播特性，检测超声波与介质内部缺陷相互作用产生的反射、散射等现象，从而评估电缆接头的绝缘状态。当超声波在介质中传播时，会遇到不同介质界面或介质内部缺陷时，会发生反射、折射、散射等现象，而通过检测这些现象，可以推断出介质内部的结构和缺陷信息^[3]。在电缆接头绝缘状态监测中，通常使用脉冲反射法进行检测，该方法利用超声波在介质中的传播速度和遇到缺陷时的反射特性，通过测量超声波的往返时间和反射波幅值等参数，来评估电缆接头的绝缘状态。超声波的传播特性与介质缺陷的关系是超声波检测技术的关键，在电缆接头中，绝缘材料的内部缺陷如裂纹、气泡、夹杂物等，会改变超声波的传播路径和传播速度，从而产生反射波或散射波。这些反射波或散射波的幅值、相位和频

率等特征参数，与缺陷的类型、大小、位置等密切相关。通过分析这些特征参数，可以实现对电缆接头绝缘状态的有效监测。

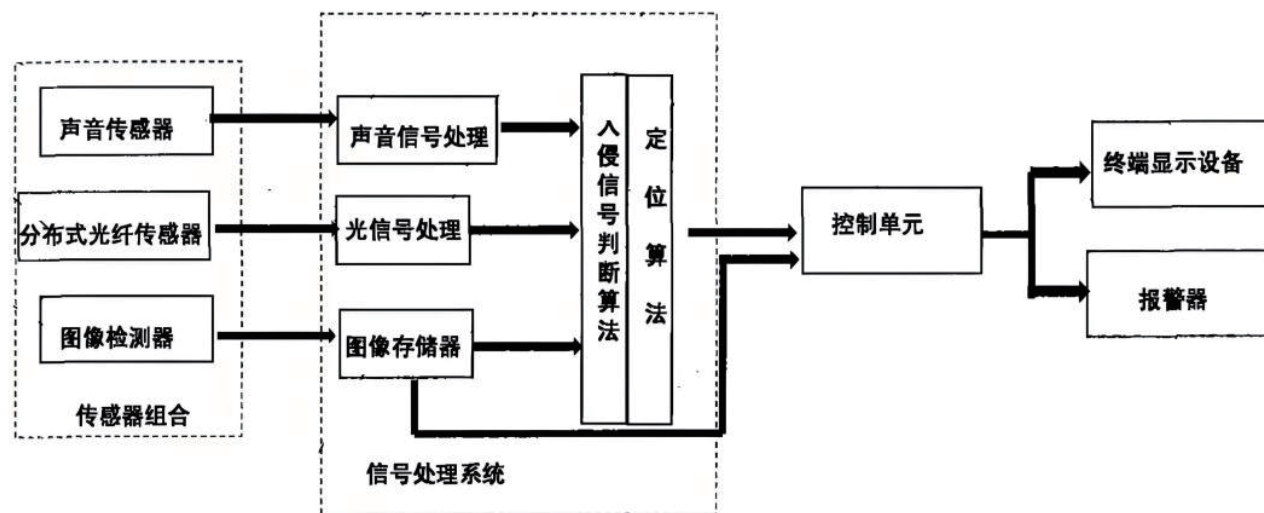
（二）监测方案设计

在对超声波检测方案的设计时，首先需要考虑监测点的选择与布置，由于电缆接头是电力系统中的关键部件，其绝缘状态直接影响到整个系统的安全运行，因此监测点的选择应基于电缆接头的结构特点、工作环境以及历史故障数据等因素进行综合考量^[4]。通常，监测点会布置在电缆接头的关键位置，如接头本体、绝缘层与导体之间的界面等，以确保能够全面、准确地捕捉到超声波信号。并且，为了提高监测的准确性和可靠性，还应根据实际需要设置多个监测点，以形成多点监测网络。其次，在数据采集与处理流程方面，超声波检测设备会接收从监测点反射回来的超声波信号，并将其转换为电信号进行记录。这些信号包含了电缆接头内部缺陷的信息，如缺陷的位置、大小、类型等。为了提取这些信息，需要对采集到的数据进行预处理，包括滤波、去噪、放大等步骤，以提高信号的信噪比和分辨率。然后，利用先进的信号处理技术和算法对预处理后的数据进行深入分析，以识别出潜在的缺陷特征。最后，根据超声波信号的特征参数，如反射波的幅值、相位、频率等，可推断出电缆接头内部是否存在缺陷以及缺陷的类型和严重程度^[5]。为了准确判断缺陷，需要制定一套科学的判定标准，这些标准通常基于大量的实验数据和统计分析结果，并结合电缆接头的实际运行情况和安全要求来确定。通过对比实际监测数据与判定标准，可实现对电缆接头绝缘状态的准确评估，并为后续的维护和修复工作提供有力的支持。

三、分布式故障检测技术在电缆接头故障定位中的应用

（一）分布式故障检测原理与方法

分布式故障检测技术在电缆接头故障定位中，通过在电缆沿线设置多个分布式检测单元，可实现对电缆接头故障的快速、准确定位。这种技术基于故障行波在电缆中的传播特性，通过检测故障行波到达各个检测单元的时间差和波形特征，来确定故障点的位置^[6]。分布式故障检测原理与方法的核心在于利用故障行波的传播特性进行故障定位。当电缆接头发生故障时，会产生故障行波，这些行波会以一定的速度在电缆中传播。分布式检测单元沿着电缆布置，能够捕捉到这些行波的传播过程，通过测量故障行波到达各个检测单元的时间差，可计算出故障点与各个检测单元之间的距离，同时，结合故障行波的波形特征，如幅值、频率等，可进一步确认故障的类型和严重程度。分布式检测单元通常由传感器、信号处理电路和数据传输模块等组成，传感器负责捕捉电缆中的故障行波信号，将其转换为电信号进行传输。信号处理电路则对接收到的电信号进行预处理，包括滤波、放大、去噪等步骤，以提高信号的信噪比和分辨率。数据传输模块则将处理后的信号传输至中央处理器或远程监控中心，进行进一步的分析和处理，如图2所示。



> 图2: 分布式故障检测原理图

(二) 故障定位方案设计

分布式故障检测技术在电缆接头故障定位中的应用是一种创新且高效的解决方案，旨在实现对电缆接头故障的精确、快速定位，以保障电力系统的稳定运行^[7]。为了实现这一目标，需要设计一套完整的故障定位方案，该方案涵盖了故障定位系统的构成与功能、故障行波的检测与识别方法以及故障点定位算法与实现等关键环节。故障定位方案设计首先需要考虑电缆接头的分布特点、工作环境以及故障类型等因素，以确定故障定位系统的整体架构和部署策略。故障定位系统通常由多个分布式检测单元、中央处理器以及远程监控中心等组成，这些组件通过有线或无线方式连接，形成一个完整的监测网络^[8]。分布式检测单元负责捕捉电缆中的故障行波信号，并将其传输至中央处理器进行进一步处理和分析，而中央处理器则根据接收到的信号，运用先进的算法和模型，计算出故障点的具体位置，并将结果发送至远程监控中心进行显示和报警。由于分布式检测单元作为系统的前端设备，其构成主要包括传感器、信号处理电路和数据传输模块等部分，传感器负责捕捉电缆中的故障行波信号，信号处理电路则对接收到的信号进行预处理，以提高信号的信噪比和分辨率。数据传输模块则负责将处理后的信号传输至中

央处理器。中央处理器则具备强大的数据处理和分析能力，能够运用先进的算法和模型，对接收到的信号进行深度挖掘和分析，以实现故障点的精确定位。

而故障行波是电缆接头故障时产生的一种特殊信号，其传播速度和波形特征等参数与故障点的位置和类型密切相关。因此，通过检测和分析故障行波的参数，可实现对故障点的有效识别^[9-10]。

四、结束语

本文通过研究风电场集电线路电缆终端接头状态监测技术，并提出了一种基于声学声表面波传感技术的监测方案。该方案能够实时监测电缆接头的运行温度、局放参量及环境温湿度参数，具有检测精度高、可靠性好、免维护等优点。同时，文章还探讨了超声波检测技术和分布式故障检测技术在电缆接头绝缘状态监测中的应用，为风电场电缆接头状态监测提供了多种技术手段，有助于提高风电场的运行效率和经济性，为风电行业的可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 朱永利, 彭华, 胡智强. 基于 VPMCD 的中性点经低阻接地风电场集电线路单相接地智能区段定位 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2022, 49(03): 1-8.
- [2] 王凡武, 康磊, 张书哈, 等. 关于高原风电场集电线路防雷研究 [J]. 云南水力发电, 2021, 37(09): 122-125.
- [3] 张意. 35kV 电缆型集电线路振荡波技术研究 [J]. 电工技术, 2021, (15): 98-100.
- [4] 杜来会, 房新栋, 程飞, 等. 风电场集电线路行波故障测距与系统设计 [J]. 电气技术与经济, 2021, (03): 32-35.
- [5] 党旭亮, 邓忠建, 牛朝东. 集电线路地理电缆故障快速检测研究与应用 [J]. 河南电力, 2021, (S1): 83-86.
- [6] 马小伟. 山区风电场集电线路过河方案研究 [J]. 中国科技投资, 2021, (14): 116-117.
- [7] 谭显亮. 一起风电场电缆分支箱接地事故分析 [J]. 电世界, 2021, 62(05): 18-19.
- [8] 王坤. 风电场集电线路工程施工常见问题分析及对策建议 [J]. 电气时代, 2021, (04): 16-18.
- [9] 刘玮. 沿海山地风电场集电线路故障分析及治理 [J]. 自动化应用, 2021, (02): 91-93.
- [10] 阮佳磊. 35kV 集电线路直埋式电缆施工的探索 [J]. 四川水泥, 2021, (01): 113-114.

电力价格波动对用户行为的影响及应对策略

周黎¹, 朱鹏飞²

1. 武汉供电公司, 湖北 武汉 430000

2. 武汉市供电公司青山供电中心, 湖北 武汉 430000

摘 要 : 当前电力价格的波动对用户行为产生显著影响, 这不仅关系到用户的经济利益, 还影响到整个电力市场的稳定性和可持续发展。针对于此本文首先分析了电力价格波动因素, 随后说明了电力价格波动对用户行为的影响, 并针对于当前减少电力价格波动开展中遇到的问题, 提出了相应的优化策略。通过政府出台相应政策与绿色能源基建的开展, 期望能为电力价格的温度提供帮助。

关 键 词 : 电力价格波动; 用户行为; 用电行为影响

The Impact of Electricity Price Fluctuations on User Behavior and Corresponding Strategies

Zhou Li¹, Zhu Pengfei²

1. Wuhan Power Supply Company, Wuhan, Hubei 430000

2. Qingshan Power Supply Center of Wuhan Power Supply Company, Wuhan, Hubei 430000

Abstract : The fluctuation of current electricity prices has a significant impact on user behavior, which not only relates to the economic interests of users, but also affects the stability and sustainable development of the entire electricity market. In response to this, this article first analyzes the factors of electricity price fluctuations, then explains the impact of electricity price fluctuations on user behavior, and proposes corresponding optimization strategies for the problems encountered in reducing electricity price fluctuations. Through the government's implementation of corresponding policies and the development of green energy infrastructure, it is expected to provide assistance for the temperature of electricity prices.

Keywords : fluctuation of electricity prices; user behavior; the impact of electricity consumption behavior

引言

随着全球能源结构的转型和可再生能源的快速发展, 电力价格的波动性日益成为影响用户行为的重要因素。用户在面对电价波动时, 会调整其用电模式和消费习惯, 以减少电费支出和提高能源使用效率。然而这种调整并非总是积极的, 有时可能会导致电力需求的不稳定, 进而影响电网的运行安全和电力市场的健康发展。因此, 研究电力价格波动对用户行为的影响, 以及如何通过有效的应对策略来引导用户行为, 对于保障电力系统的稳定运行和促进能源的可持续利用具有重要意义。

一、电力价格波动分析

(一) 电力价格波动的成因

针对于当前的市场大环境, 导致现在电力价格波动的成因复杂多样, 往往除去供需之间关系之外, 还受到多种因素的影响。其中能源成本的变动是影响电力价格的重要因素。例如煤炭、天然气和石油等传统能源价格的波动会直接影响到火力发电的成本。当这些能源价格上涨时, 电力成本也会随之增加, 进而推高电力价格。其次政策和法规的调整也会对电力价格产生影响。政府对电力行业的补贴政策、环保要求、税收政策等都可能改变电

力公司的运营成本, 从而影响电力价格。例如, 政府对可再生能源的补贴增加, 可能会降低风能、太阳能等清洁能源的发电成本, 进而影响整体电力市场的价格结构。

(二) 电力价格波动的特征

电力价格波动的特征通常也会受到多种因素的影响。具体而言在当前电力需求往往具有明显的季节性和时间性特征, 例如如夏季和冬季就是季节性的用电高峰, 以及白天和夜晚的用电差异, 这些都会导致电力价格在不同时间段出现波动。其次燃料成本, 尤其是对于火力发电为主的国家, 煤炭和天然气价格的波动会直接影响电力成本和价格。此外政策调控, 如政府对可再生能

作者简介: 周黎 (1979.10-), 男, 汉族, 湖北武汉, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电力营销方面, 新能源, 电价电费。

源的补贴、碳排放交易制度等，也会对电力价格产生重要影响。

（三）价格波动对电力市场的影响

对于电力市场环境而言，电力的价格波动是影响市场稳定性和参与者行为的关键因素。这是因为电力价格的波动不仅反映了供需关系的变化，还与政策调整、技术进步、天气条件以及市场结构等因素密切相关。当电力价格发生剧烈波动时，往往会直接对电力市场的稳定运行带来挑战，影响电力公司的盈利能力和投资决策，同时也会影响消费者的利益和电力系统的可靠性。例如电力价格的波动会直接影响电力公司的经营状况。在电力价格高涨时可以发现电力公司可能会获得较高的利润，从而激励其增加投资和扩大生产规模。然而价格的不稳定也会增加企业的经营风险，导致投资决策的不确定性^[1]。

二、电力价格波动对用户行为的影响

（一）涨价导致用户节约用电

在全球范围内，电力价格的波动同样对用户行为产生了显著的影响。比如当电力价格上涨时，就会导致用户往往会采取节约用电的措施以减少电费支出。这时的家庭用户可能会更加注意日常用电习惯，在日常用电中会注意关闭不必要的灯光和电器，减少空调和暖气的使用时间，以及选择能效更高的家用电器。除此之外电力价格的波动还可能促使用户更加关注智能电网和智能家居技术的发展。这些技术可以帮助用户实时监控和管理家庭或企业的电力使用情况，从而更有效地控制电力消费。

（二）涨价促使用户投资可再生能源

当电力价格发生波动而涨价时，就会导致消费者和企业都会感受到经济压力，这会促使他们寻找替代方案以减少对传统电网的依赖。在这一背景下对于家庭用户来说，他们可能会更加关注节能措施，比如更换为节能灯泡、购买高效能家电、改善房屋的保温性能等。这些措施虽然初期需要一定的投资，但长期来看能够显著降低电力消耗从而减少电费支出。除此之外涨价还会促使用户投资可再生能源。具体而言太阳能和风能等可再生能源技术变得更加吸引人，因为它们可以减少用户对传统电力供应的依赖，从而降低长期的能源成本。家庭用户可能会考虑安装太阳能光伏板，而企业则可能投资于更大规模的可再生能源项目，如风力发电或生物质能发电。这些投资虽然需要较大的前期投入，但随着技术的进步和成本的降低，投资回报期正在缩短，吸引力也在增加^[2]。

（三）降价激发用户增加用电量

而随着电力价格的下调，用户对电力消费的态度和行为同样发生了显著变化。在降价之下会直接减轻了家庭和企业的经济负担，使得原本因成本考虑而减少用电的用户开始重新评估他们的用电需求。许多家庭开始增加对家用电器的使用，比如更频繁地使用空调、洗衣机和烘干机等，从而提高了整体的用电量。企业方面，降价激励了那些对电力成本敏感的行业，如制造业和服务业，他们开始扩大生产规模延长工作时间，甚至投资于新的设备和技术，这些都直接导致了用电量的增加。

（四）降价导致用户减少节能措施

电力价格的下降在短期内可能会导致用户减少节能措施，因为较低的电力成本降低了用户节约能源的经济激励。具体而言当市场电力价格下降时，用户可能会认为使用更多的电力并不会显著增加他们的电费支出，从而减少了对节能设备和行为的采用。例如家庭用户可能会减少对节能灯泡和高效家电的使用，企业用户可能会减少对节能技术的投资，甚至可能会增加对电力消耗较大的设备的使用时间。然而这种现象可能会随着时间的推移而改变。用户可能会逐渐意识到，尽管电力价格较低，但长期来看节能措施仍然能够带来显著的经济效益^[3]。

三、减少电力价格波动中的阻碍

（一）电力市场信息不对称问题

在如今的电力市场中，信息不对称问题的存在往往是直接导致价格波动的重要因素之一。信息不对称指的是市场中某些参与者拥有比其他参与者更多或更准确的信息。在电力市场中，这可能表现为发电企业对成本结构的了解比消费者更为透彻，或者电网运营商对电力供需状况的掌握比市场其他参与者更为全面。这种信息的不平等分布，容易导致市场决策的偏差，进而影响电力价格的稳定。

（二）电力基础设施投资不足

随着现在全球能源需求的不断增长，使得电力基础设施的现代化和扩展变得至关重要。然而当前的许多国家和地区面临着电力基础设施投资不足的问题，这不仅限制了电力供应的可靠性，还阻碍了经济的持续发展。具体而言电力基础设施投资不足会直接导致了电网老化、输电损耗增加以及供电不稳定等一系列问题。这些问题在电力价格波动中起到了推波助澜的作用，增加了市场的不确定性。除此之外电力基础设施的不足还使得电网难以应对需求高峰，导致在用电高峰期电力供应紧张，价格飙升。此外由于缺乏足够的储能设施和智能电网技术，电力系统无法有效地平衡供需关系，进一步加剧了价格波动^[4]。

（三）可再生能源整合的挑战

尽管可再生能源整合为减少对化石燃料的依赖和降低温室气体排放提供了巨大潜力，但在整合过程中仍面临诸多挑战。这是因为可再生能源如风能和太阳能往往在获取的过程中具有间歇性，这意味着它们的发电量受天气和时间的影响，不能像传统电厂那样稳定供电。因此需要开发高效的储能技术来平衡供需，但目前储能技术的成本仍然较高，且尚未达到大规模应用的水平。除此之外可再生能源的电网基础设施往往需要进行大规模升级以适应新能源接入。而现有的电网设计主要是为了单向输送电力，而可再生能源的整合需要电网能够处理双向流动的电力，这就要求电网具备更高的灵活性和智能化水平。

（四）政策与监管框架的不稳定性

除去上述问题之外在减少电力价格波动的过程中，政策与监管框架的不稳定性也是一个显著的阻碍。具体而言政策的频繁变动会导致市场参与者难以预测未来的市场环境，从而影响他们的

投资决策。例如政府可能会在短期内调整补贴政策或税收优惠，这将直接影响电力生产成本和市场价格。当电力企业无法准确预知这些政策变化时，他们可能会推迟或取消投资计划，导致电力供应的不稳定^[5]。

四、减少电力价格波动的优化策略

（一）加强市场透明度

当前电力公司为了减少电力价格波动，实施的优化策略中加强市场透明度是关键。这就要求电力公司应建立一个全面的信息披露机制，确保所有市场参与者能够实时获取电力供需、价格走势、天气预报等关键信息。在具体的实施过程中电力公司需要通过建立一个集中的信息平台减少信息不对称，从而使市场参与者能够做出更为理性的决策。除此之外监管机构应加强对电力市场的监管力度，确保所有交易活动的公开、公平和透明。对于任何操纵市场、囤积居奇等不正当行为，应严格查处，以维护市场的正常秩序。同时监管机构还应定期发布市场分析报告，对市场运行情况进行深入分析，为市场参与者提供参考^[6]。

（二）提供财政补贴和税收优惠

在近些年来的减少电力价格波动的优化策略中，政府已经采取了多项措施以稳定市场，其中提供财政补贴和税收优惠是核心内容之一。所以需要政府通过财政补贴，直接对电力生产成本进行补偿，尤其是需要对于那些使用可再生能源的发电企业。这样的补贴政策不仅鼓励了清洁能源的开发和利用，还帮助这些企业抵御了市场价格波动的风险，保证了电力供应的稳定性。而在减少电力价格波动的策略中，税收优惠政策也起到了至关重要的作用。政府对电力行业实施了减税、免税或税收抵免等措施，降低了企业的运营成本。例如，风能、太阳能等可再生能源项目给予所得税减免，对进口的先进电力设备和技术实行关税减免，这些都极大地激发了企业的投资热情，促进了电力行业的技术进步和产业升级。

（三）制定合理的储能政策和技术标准

为了减少电力价格波动，制定合理的储能政策和技术标准是至关重要的。这就要求政府应根据当前的市场环境出台相应的激励政策，鼓励储能技术的研发和应用。例如可以提供税收减免、

补贴或低息贷款等措施，以降低储能系统的安装和运营成本。而在电力有关的技术标准方面，还应制定统一的储能系统性能和安全标准，进一步去确保电力公司储能设备的质量和可靠性。这包括电池的充放电效率、循环寿命、安全性能等关键指标。同时应建立储能系统的检测和认证体系，确保所有储能产品在进入市场前都经过严格测试和评估。

（四）制定长期稳定的能源政策

随着当前全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严峻，制定长期稳定的能源政策显得尤为重要。而在这一背景下相关部门实施优化策略之一是通过多元化能源结构、增强能源储存能力和推广智能电网技术来实现。其中多元化能源结构是减少电力价格波动的关键。相关部门通过增加可再生能源的比例，如风能、太阳能和水能，可以降低对传统化石燃料的依赖，从而减少因国际市场价格波动带来的影响。除此之外增强能源储存能力是稳定电力价格的另一重要策略。相关部门可以通过大规模部署电池储能系统、抽水蓄能电站和其他形式的储能技术，实现在电力需求低时储存能源，在需求高峰时释放从而平抑价格波动。最后推广智能电网技术也是优化电力价格波动的重要手段。智能电网能够实时监控电力供需情况，优化电力分配，减少能源浪费，并提高电网的稳定性和效率。政府应鼓励电力公司投资智能电网技术，并制定相应的标准和规范，确保技术的兼容性和安全性^[7]。

五、结语

综上所述，当前电力价格波动是一个复杂的现象，受到多种因素的影响，包括传统能源价格、政策法规、市场供需关系、季节性变化、技术进步以及天气条件等。电力价格的波动不仅影响电力市场的稳定性，还对电力公司的经营决策和消费者行为产生深远的影响。为了减少价格波动，需要从多个层面采取措施，包括加强市场透明度、提供财政补贴和税收优惠、制定合理的储能政策和技术标准、以及制定长期稳定的能源政策。通过这些措施，可以促进电力市场的健康发展，提高能源效率，降低环境影响，并最终实现电力价格的稳定。未来相信随着技术的不断进步和政策的逐步完善，电力市场将更加成熟，电力价格波动问题将得到有效控制，为社会经济的可持续发展提供坚实的基础。

参考文献

- [1] 吴伟. 电力零售市场改革谨防“孤岛危机”[J]. 中国电力企业管理, 2024, (10): 48-52.
- [2] 梅宇, 苏绍霞. 电力工程项目采购风险管理及应对策略研究[J]. 天津经济, 2024, (02): 78-80.
- [3] 王宏刚, 陈浩林, 唐进, 等. 电力影响全国碳市场交易价格波动和风险的路径研究[J]. 能源, 2023, (07): 68-75.
- [4] 廖睿灵. “买卖”电力, 今年有啥新变化?[N]. 人民日报海外版, 2023-02-01(011).DOI:10.28656/n.cnki.nrmrh.2023.000311.
- [5] 孟思琦, 孙仁金, 郭风. 可再生能源发电份额对德国市场化电价的影响[J]. 资源科学, 2021, 43(08): 1562-1573.
- [6] 马铁钉. 价格波动风险下的综合能源系统市场机制设计[D]. 燕山大学, 2021.DOI:10.27440/d.cnki.gysdu.2021.001188.
- [7] 廖睿灵. 新型电力系统, 适配“波动”新能源[N]. 人民日报海外版, 2024-10-17(004).DOI:10.28656/n.cnki.nrmrh.2024.003540.

高速公路桥梁工程施工中的质量控制

王永成

张家口路缘公路工程有限责任公司, 河北 张家口 075000

摘 要： 高速公路桥梁工程施工质量控制是确保工程结构安全、耐久和稳定的关键。施工过程中，需要针对材料、施工工艺、设备和施工人员等多个方面进行严格把控。通过建立健全的质量管理体系，强化过程监督与检查，实施标准化操作，能够有效避免施工中常见的质量问题。质量控制的实施不仅有助于提高桥梁的使用寿命，还能减少后期维护成本，从而确保高速公路桥梁工程的顺利进行与运营。

关 键 词： 高速公路桥梁；施工质量控制；质量管理体系；工程安全；施工监督

Quality Control in Expressway Bridge Construction

Wang Yongcheng

Zhangjiakou Luyuan Highway Engineering Co., Ltd. Zhangjiakou, Hebei 075000

Abstract： Quality control in expressway bridge construction is crucial to ensure the safety, durability, and stability of the engineering structure. During the construction process, strict control is required over various aspects such as materials, construction techniques, equipment, and construction personnel. By establishing a sound quality management system, strengthening process supervision and inspection, and implementing standardized operations, common quality issues during construction can be effectively avoided. The implementation of quality control not only helps to increase the service life of bridges but also reduces maintenance costs in the later stages, thus ensuring the smooth progress and operation of expressway bridge projects.

Keywords： expressway bridges; construction quality control; quality management system; engineering safety; construction supervision

引言

随着交通需求的不断增长，高速公路桥梁作为关键的基础设施，其施工质量直接影响到整个公路网络的安全性与畅通性。然而，桥梁施工过程中涉及的复杂因素，使得质量控制成为一项极具挑战性的任务。材料选择、施工技术、人员素质等多个环节的每一个细节都可能影响到最终的工程质量。因此，如何在施工阶段实施严格的质量控制，保障桥梁的结构稳定与长期使用，是当前桥梁工程领域亟需解决的重大课题。

一、高速公路桥梁工程施工中的质量管理体系

在高速公路桥梁工程施工中，质量管理体系的建设是确保施工质量、提高工程安全性和使用寿命的关键。一个完善的质量管理体系能够系统地指导施工过程中的各项工作，确保各环节的操作符合设计要求和施工规范。该体系的核心在于全面监控施工的每个环节，确保从项目立项到竣工的各阶段都能按照既定标准执行。通过制定科学的质量管理制度，建立完善的责任分工与协调机制，可以提高施工过程的透明度，减少潜在的质量隐患，确保桥梁的施工质量达标^[1]。

在实施质量管理体系时，质量控制不仅仅停留在施工后期的检验阶段，更应贯穿整个施工过程。首先，施工前的准备阶段是质量管理体系的基础，需要详细制定施工计划、明确质量目标，

并进行风险评估和预防措施。其次，施工过程中必须加强对施工工艺、施工人员、设备及材料等各方面的监督与控制。通过定期检查施工进度、监测材料的质量、严格按照技术规范进行施工操作，可以有效预防施工中可能出现的质量问题。此外，施工过程中的人员培训尤为重要，施工人员应具备相应的专业知识与技能，熟悉施工规范和质量控制要求，避免因人为操作不当造成的质量事故。

施工后期的质量检验与验收工作是质量管理体系的重要环节。通过对每一个施工环节进行严格的质量检查，及时发现并整改存在的质量问题，确保最终工程符合设计要求和使用寿命。同时，质量管理体系还应具备持续改进的机制，不仅针对现有问题进行整改，还要从每一次的质量控制实践中总结经验，优化质量管理流程。通过不断优化和完善质量管理体系，可以提高高速公路

路桥梁工程的整体质量，减少后期维护和修复的成本，延长桥梁的使用寿命，确保道路交通的安全性和稳定性^[2]。

二、施工过程中材料的质量控制措施

在高速公路桥梁工程施工过程中，材料的质量控制是确保工程结构稳定、耐用的关键环节。桥梁工程涉及的材料种类繁多，包括混凝土、钢材、沥青等，每一种材料的质量直接影响到工程的整体安全性与使用寿命。因此，从施工前期开始，材料的采购、存储、运输以及现场使用的各个环节都需要严格控制，以确保所使用的材料满足设计要求和技术标准。首先，施工单位应当选择符合国家标准的正规供应商进行采购，避免因低质量材料导致工程质量问题。在采购时，要对材料的来源、生产工艺、质量检验报告等进行严格审核，确保每一种材料都符合桥梁工程的特殊需求^[3]。

在施工过程中，材料的质量控制不仅仅局限于采购环节，还涉及到材料的运输和存储。材料在运输过程中可能会遭受污染、损坏或变质，因此应采取有效的包装与防护措施，确保运输过程中的安全。同时，材料在存储过程中需要特别注意环境条件的控制，防止受潮、受热或受到其他外界因素的影响。例如，钢材应保持干燥，避免因湿气而导致生锈；水泥等易吸湿的材料应存放在通风良好且干燥的环境中。为了确保材料的质量，施工现场应设立专门的材料库房，并定期检查库存材料的状态，发现问题及时采取补救措施，防止不合格材料进入施工环节。

施工阶段的材料质量控制还要求对现场使用的材料进行严格检验和监督。对于混凝土、砂石等基础性材料，施工单位需定期进行取样检测，确保材料的配比和强度符合设计要求。在施工过程中，监理人员应对每一批次的混凝土进行现场抽样检测，确保其抗压强度和耐久性达到预定标准。此外，钢材、沥青等其他重要材料也应进行必要的性能测试和实验，确保其符合设计要求。为了防止因不合格材料对施工进度和质量的影响，施工单位应建立完善的管理档案，对每一种材料的来源、规格、检验结果及使用情况等进行详细记录，并在施工过程中进行跟踪监督^[4]。通过这一系列材料质量控制措施，能够有效保证高速公路桥梁工程的施工质量，避免因材料问题而导致的质量事故或安全隐患。

三、施工工艺与技术对桥梁质量的影响

在高速公路桥梁工程中，施工工艺与技术的选择对桥梁质量起着至关重要的作用。桥梁的结构复杂、施工难度大，因此，采用合适的施工工艺和技术是确保工程质量的关键。首先，施工工艺直接影响到桥梁的结构稳定性与耐久性。对于不同类型的桥梁，选择合适的施工方法至关重要。比如，在复杂地质条件下，采用适合的基础施工工艺，如桩基施工方法，能够确保桥梁的基础稳固，防止后期出现沉降或倾斜等问题。同时，施工技术要求也需根据设计要求进行严格执行，例如，钢筋混凝土桥梁施工中，混凝土浇筑的工艺、钢筋的配置等都需要精确控制，确保桥

梁的结构强度和承载能力达到设计标准^[5]。

施工技术的先进性和规范性也是影响桥梁质量的重要因素。随着科技的进步，许多新型施工技术逐步应用于桥梁建设中，如预应力技术、现代化的自动化施工设备等。这些技术不仅能提高施工效率，还能提高桥梁施工的精度。例如，预应力混凝土桥梁采用的张拉技术，可以显著提高桥梁的承载力和抗裂性，减少因结构沉降或温差变化导致的裂缝。同时，自动化设备的使用能够减少人工操作失误，确保施工过程的精度和一致性。因此，采用先进施工技术是提升桥梁施工质量、降低安全隐患的有效途径，同时还能提高施工效率，减少人为错误，确保工程按期完成。

施工工艺和技术的合理应用还需依赖于施工团队的专业素质和技术经验。在施工过程中，技术人员需要严格按照设计要求和施工规范操作，确保每一道工序的质量。例如，混凝土浇筑时，控制好施工温度、湿度以及浇筑的层次与时间，防止出现混凝土分层、气孔等缺陷。此外，施工过程中还应工艺进行实时监控，通过检查和调整施工技术，及时发现潜在的质量问题并进行修正。通过对施工工艺的精细管理，可以有效降低施工中的失误，提升桥梁的整体质量。因此，施工工艺与技术的选用和实施直接影响到桥梁的安全性、耐久性与稳定性，因此，工程建设中必须对这些技术环节给予足够的重视^[6]。

四、施工人员培训与管理在质量控制中的作用

在高速公路桥梁工程中，施工人员的培训与管理对质量控制起着至关重要的作用。施工人员的专业素质直接影响到施工工艺的执行效果，进而影响到工程的整体质量。首先施工人员的培训是确保施工质量的基础。只有通过系统的培训，施工人员才能掌握必要的专业技能和操作规范，了解材料特性、施工流程及设备使用方法，避免因操作不当导致质量问题。例如，在桥梁施工中，混凝土浇筑、钢筋绑扎等工序对操作精度要求极高，施工人员必须熟悉相关的技术要求和质量标准，才能确保每一环节都达到预定的质量要求。此外，施工人员的培训还应包括质量管理知识的普及，使其充分理解质量控制的重要性，增强其责任意识和质量意识^[7]。

施工人员的培训也是确保施工质量的关键一环。施工管理者需要对施工人员的工作进行细致的安排与监督，确保每一位工作人员都能严格按照规定的流程 and 标准执行任务。在施工过程中，施工人员的岗位分工必须明确，避免因人员不熟悉工作要求或责任不清而导致工作疏漏。同时，施工管理者还需定期对施工人员进行技术复训和考核，确保其技术水平保持在合格或更高水平。通过有效的管理，及时发现并纠正施工中的不规范操作，保证施工过程的高效性和质量^[8]。

施工人员的培训和管理应结合现场实际情况，灵活调整。在施工过程中，桥梁项目往往面临复杂的施工环境和不断变化的施工条件，因此，管理者需要根据项目进展和现场实际情况，动态调整人员配置和任务分配。此外，还需注重施工团队的协作与沟通，确保各个工种之间的配合默契，避免因沟通不畅造成质量问

题。管理者应定期组织工程质量检查和反馈会议，对施工过程中出现的质量问题进行分析总结，及时传达给施工人员，促使其改进操作。通过这样的管理模式，可以提高施工人员的执行力和整体施工质量^[9]。

总的来说，施工人员的培训与管理不仅是保证施工质量的重要措施，而且对施工过程中的各项操作规范和技术要求的落实至关重要。只有通过持续的培训和严格的管理，施工人员才能在保证施工质量的同时，提升施工效率，为桥梁工程的顺利完成奠定坚实的基础。

五、高速公路桥梁施工质量控制面临的挑战与对策

高速公路桥梁施工质量控制面临许多挑战，主要源自施工过程中的复杂性、材料的多样性以及施工技术的不断变化。首先施工环境和地质条件的差异性是影响质量控制的一大难题。在不同地区，桥梁建设面临的地质环境差异可能导致施工过程中出现不可预见的困难，影响施工进度和质量。此外，随着高速公路交通量的增加和交通方式的变化，桥梁设计要求和技术标准不断提升，施工过程中可能会出现技术难度较大、施工精度要求高的情况，这些都给质量控制带来巨大挑战。

材料质量的控制也是施工过程中面临的重要挑战。尽管在采购环节采取了严格的质量检查，但材料在运输、存储和现场使用过程中，依然可能会受到污染、损坏或不符合规范的情况发生，影响最终工程的质量。尤其在大规模的桥梁建设中，材料的种类繁多、批次较多，这要求施工单位进行更为精细的管理和监督。加之施工过程中材料的性能要求严格，任何细微的误差都可能导致桥梁结构不稳定或耐久性下降。因此，如何确保每一批材料的质量符合要求，是施工质量控制中的一个关键难题。材料管理不

仅仅是检查其规格和合格证书，还包括对材料的适应性、储存条件以及施工过程中对其使用状况的实时监控。只有全程严格控制，才能确保工程质量不受影响^[10]。

面对这些挑战，采取有效的对策是保障施工质量的关键。首先，应加强施工现场的管理，确保施工过程中的每一个环节都严格按照标准执行。为此，必须完善质量管理体系，确保从项目立项、设计到施工各阶段的质量控制工作都能够得到有效落实。其次，加强人员培训和技术支持是解决质量控制问题的重要手段。通过对施工人员的专业培训和技术提升，确保每位施工人员都能熟练掌握施工工艺，避免因操作不当导致的质量问题。此外，采用先进的施工技术和现代化设备也是提升施工质量的有效途径。通过引入新型施工工艺，如预应力技术、自动化施工设备等，能够提高施工精度，减少人为失误，并确保桥梁的结构稳定性与耐用性。最后，施工单位要加强对材料质量的管理，强化材料采购、运输和使用过程中的质量控制，通过严格的检验和抽样检测，确保每一种材料的质量符合设计要求。通过综合施策，能够有效应对高速公路桥梁施工质量控制中的挑战，确保工程的顺利完成。

六、结语

高速公路桥梁施工质量控制是保障工程安全、耐久和高效运行的关键。面对施工中的复杂挑战，如地质差异、材料管理和技术难题，必须采取有效对策，强化施工过程中的每一环节。从完善质量管理体系、加强施工人员培训到引入先进技术设备，都能有效提升施工精度，减少风险。通过科学的质量控制方法和严格的管理措施，能够确保桥梁施工质量达到设计标准，为高速公路交通的安全性和持续性提供有力保障。

参考文献

- [1] 杨鼎, 王绪正. 高速公路桥梁施工质量控制及常见问题解决措施 [J]. 云南水力发电, 2017, 33(S2): 93-95.
- [2] 张浚磊. 高速公路桥梁中钢结构的施工质量控制 [J]. 交通世界, 2017(27): 136-137.DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2017.27.066.
- [3] 毕鹏. 唐廊高速公路桥梁拼宽施工质量控制 [J]. 交通世界, 2017(36): 110-111+184.DOI: 10.16248/j.cnki.11-3723/u.2017.36.051.
- [4] 付浩. 高速公路桥梁工程施工质量控制要点研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42(02): 117+119.DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2019.02.062.
- [5] 李海龙. 高速公路桥梁工程施工管理过程及质量控制 [J]. 建材与装饰, 2020(06): 261-262.
- [6] 穆文元. 高速公路桥梁工程施工质量管理 [J]. 设备管理与维修, 2020(08): 54-56.DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2020.04D.28.
- [7] 冯果. 公路路基和桥梁工程施工中的质量控制情况阐述与分析 [J]. 运输经理世界, 2022(15): 86-88.
- [8] 崔亚超. 公路路基和桥梁工程施工中的质量控制对策 [J]. 建筑技术开发, 2022, 49(14): 134-136.
- [9] 钟合超. 高速公路桥梁工程施工质量管理与控制分析 [J]. 运输经理世界, 2023(26): 74-76.
- [10] 吴澄. 高速公路日常养护工程施工及质量控制 [J]. 工程建设与设计, 2024(20): 223-225.DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2024.10.273.

市政工程施工道路与桥梁连接处的设计与施工研究

黄凯

宁波高专建设监理有限公司, 浙江 宁波 315100

摘 要： 本论文旨在探讨市政工程施工道路与桥梁连接处设计及施工过程中所面临的挑战，以及应对这些挑战的策略。通过对桥头引道设计合理性、软土地基处理规划设计、施工方案科学性的深入分析，提出了确保该连接部位结构安全性和耐久性的设计标准和施工方法。文章系统地阐述了道路与桥梁连接处从规划到施工完成的各个阶段的技术要点，并强调了在这一特定区域实施高质量工程建设的重要性。本文的研究成果对于提高市政交通基础设施建设水平具有重要的指导意义。

关 键 词： 市政工程；道路桥梁连接；结构设计；施工技术

Design and Construction Study of Road and Bridge Connection in Municipal Engineering

Huang Kai

Ningbo High School Construction Supervision Co., Ltd. Ningbo, Zhejiang 315100

Abstract： This paper aims to explore the challenges faced in the design and construction of road and bridge junctions in municipal engineering, and the strategies to meet these challenges. Through the in-depth analysis of the design rationality of bridge approach, the planning design of soft land foundation treatment and the scientific construction scheme, the design standard and construction method to ensure the safety and durability of the connection part are put forward. This paper systematically expounds the technical points of the road-bridge connection from planning to construction completion, and emphasizes the importance of implementing high-quality engineering construction in this specific area. The research results of this paper have important guiding significance for improving the level of municipal transportation infrastructure construction.

Keywords： municipal engineering; road and bridge connection; structural design; construction technology

引言

市政工程作为城市发展的基础支撑，其质量直接影响到城市的运行效率和社会经济效益。其中，道路与桥梁连接处作为市政交通网络中的关键节点，承担着衔接不同交通方式的重要任务，对整个系统的流畅性起着至关重要的作用。由于该连接部位需承受车辆荷载频繁变动带来的复杂应力状态，加之自然环境因素的影响，因此，其设计与施工的质量直接关系到整个市政交通设施的安全性、可靠性和使用寿命^[1-4]。

一、市政工程施工道路与桥梁连接处设计的重要性

鉴于道路与桥梁连接处在市政交通体系中扮演的角色至关重要，它不仅是两个不同性质结构物之间的物理链接点，更是保障交通安全顺畅不可或缺的一环。一方面，良好的连接设计可以有效减少因车辆跨越边界时产生的冲击力，降低交通事故发生率；另一方面，合理的构造布局有助于分散荷载压力，防止局部应力集中造成的损害。此外，考虑到现代城市发展进程中不断涌现的新要求，如环境保护、景观协调等方面，一个精心规划的道路与桥梁连接处还能起到美化城市面貌、提升居民生活质量的作用。

综上所述，重视并加强对此类特殊地段的设计研究是推动市政工程高质量发展不可或缺的一部分。

二、市政工程施工道路与桥梁连接处的设计与施工问题

（一）桥头引道设计的合理性

桥头引道作为连接桥梁主体与普通公路段落的关键部分，其几何形状和尺寸参数的选择至关重要。如果引道坡度设置不合理，可能会导致车辆行驶过程中产生过度颠簸或刹车失灵等问题；而宽度不足则可能影响大型车辆转弯半径，造成交通拥堵甚

作者简介：黄凯（1989.03-），男，汉族，浙江省宁波市，本科，工程师，研究方向：市政桥梁工程。

至安全隐患。因此,在进行桥头引道设计时,应当综合考量交通流量特性、地形地貌特征以及周边建筑物分布等因素,通过精确计算确定最适宜的线形和平面布置方案,以实现最佳的功能效果^[5]。同时,还需注意与既有道路网的兼容性,避免因新建引道而引发新的矛盾冲突。

（二）软土地基处理的规划设计

鉴于许多市政工程项目选址位于地质条件较为复杂的地区,特别是存在大量软土层的情况下,如何妥善解决地基承载力不足的问题成为道路与桥梁连接处设计中的一大难点。软土地基因其高压缩性、低强度等特点,在外力作用下容易产生较大的变形量,进而影响上部结构的稳定性。针对这种情况,需要采取有效的加固措施来改善地基性能,例如采用桩基础、预压法或是化学改良剂等方式。但在具体实施前,必须进行全面细致的地质勘察工作,准确掌握地下岩土层的具体情况,以便为后续的地基处理方案提供可靠的依据。另外,考虑到长期使用过程中可能出现的变化,还应预留一定的调整空间,确保整个工程具备足够的适应能力和抗风险能力^[6]。

（三）施工方案的科学性

科学合理的施工方案是保证道路与桥梁连接处工程质量的前提条件之一。施工过程中涉及多个专业领域的交叉作业,包括但不限于土木工程、给排水工程、电气工程等,各工序之间相互关联且紧密配合。任何一个环节出现问题都可能导致整体进度延误或质量缺陷。因此,在编制施工组织计划时,除了要严格遵循相关规范和技术标准外,还应充分考虑现场实际情况,制定出切实可行的操作流程。特别是在面对复杂多变的施工现场环境时,更需要灵活调整施工策略,及时解决遇到的各种突发状况。此外,施工单位还应当建立健全质量管理体系,加强对原材料采购、设备维护等方面的管控力度,确保所有参与人员都能严格按照既定方案执行任务,从而为最终交付合格的产品奠定坚实的基础。

三、市政工程道路与桥梁连接处的设计与施工策略

（一）道路与桥梁连接处设计

（1）设计标准

道路与桥梁连接处的设计必须依据国家现行的相关法律法规和技术指南,结合项目所在地的具体条件进行个性化定制。这不仅涉及到结构安全方面的考量,还包括耐久性、经济性以及美观性等多个维度的要求。在确立设计指标时,应充分参考国内外先进经验,力求达到国际一流水平^[7,8]。同时,还要注重长远发展规划,预留适当的扩展余地,以适应未来可能出现的变化趋势。

（2）搭板设计

考虑到车辆经过桥梁与道路交界处时会施加额外的压力,有必要在此位置增设一层特殊的过渡构件——搭板。搭板的主要功能在于缓解来自上方的动态荷载对下方基础结构造成的不利影响,同时起到引导水流、保护路面的作用。其长度、厚度及材质选择均需根据实际工程需求慎重决定。通常情况下,较长的搭板可以更好地吸收震动能量,但同时也增加了材料成本和施工难度;相反,较短的

搭板虽然易于安装,却无法提供足够的缓冲效果。因此,在设计过程中,必须权衡各方面因素,找到最优解^[9,10]。

（3）台背回填

台背即指桥梁两端支座背后的区域,该部分回填质量的好坏直接影响到整个连接部位的整体性能。理想的回填材料应该具备良好的压实性、较低的压缩模量以及优良的水稳性。目前常用的有级配碎石、水泥稳定土等。无论选用何种材料,都必须保证其符合设计规定的物理力学性质。施工时,应采用分层填筑的方法,每层都要经过严格的压实检测,确保密度均匀一致。

（4）材料设计

材料的选择对于道路与桥梁连接处的持久耐用至关重要。在挑选混凝土、钢材以及其他辅助材料时,不仅要考虑它们的基本力学性能,还要兼顾耐腐蚀性、耐磨性等因素。高性能混凝土因其优异的工作性能和长寿命特点而被广泛应用于此类工程当中。与此同时,随着新材料技术的发展,越来越多新型复合材料也开始进入人们的视野。这些材料往往具有重量轻、强度高、加工方便等优点,能够在一定程度上简化施工工艺,降低成本支出。

（5）防护设计

为了抵御外界恶劣环境因素对道路与桥梁连接处造成的侵蚀破坏,必须对其进行有效的防护处理。常见的防护措施包括设置排水系统、喷涂防腐涂层、安装防撞栏杆等。排水系统的设计应当遵循“疏导为主、拦截为辅”的原则,确保雨水能够迅速排出,避免积水浸泡引起地基软化。防腐涂层则主要用于金属构件表面,通过形成致密的保护膜来阻止氧气和水分侵入,延缓锈蚀进程。至于防撞栏杆,则是为了提高行车安全性而设置的被动防护装置,其结构形式和布置间距同样需要精心规划,以期达到最佳的防护效能。

（6）过渡设计

过渡设计是指在道路与桥梁连接处创造一种平滑的转换机制,使得车辆可以在两个不同类型的结构之间平稳过渡。这种设计不仅有助于减轻车辆行驶过程中的颠簸感,还可以有效降低轮胎磨损程度,延长道路使用寿命。在过渡段的设计中,应当重点考虑纵坡变化、横断面形态以及路面纹理等因素。一般来说,较小的纵坡坡度和渐进式的横断面调整可以使车辆更容易适应路况改变;而粗糙度适中的路面纹理则能在保持良好抓地力的同时减少噪音污染。

（二）道路与桥梁连接处施工

（1）优化施工流程

施工流程的优化旨在通过合理安排各项工序,提高工作效率,缩短工期,降低施工成本。在道路与桥梁连接处的施工中,尤其需要重视各专业工种之间的协同作业,确保每一个环节都能够无缝衔接。例如,在进行基础开挖的同时,就可以同步开展预制构件的生产准备工作;当主体结构完成后,紧接着就可以转入附属设施的安装阶段。此外,利用现代化信息技术手段建立智能化管理系统也是实现施工流程优化的有效途径之一。

（2）做好施工准备

充分的施工准备是确保工程顺利进行的基础。这包括但不限

于场地清理、临时设施建设、原材料储备等方面的工作。在正式开工之前，必须对拟建场地进行全面细致的调查评估，清除所有障碍物，平整场地，为机械设备进场创造有利条件。临时设施建设则涵盖了办公区、生活区以及物料堆放区等功能区域的规划布局，既要满足基本的生活和工作需求，又要尽量减少对周围环境的影响。至于原材料储备，不仅要保证数量充足，还要严格把控质量关，杜绝不合格产品流入施工现场。

（3）回填施工方法

回填施工是道路与桥梁连接处建设中的重要组成部分，其质量好坏直接影响到整个工程的稳固性。根据不同的工程要求，可以选择合适的回填材料和施工方法。比如，在软土地基条件下，可以采用轻质泡沫混凝土作为回填材料，既能减轻自重又能增强地基承载力；而对于硬质地基，则更多地倾向于使用级配良好的砂砾石。无论是哪种材料，施工时都应按照规定程序进行分层摊铺、碾压，确保每一层都能达到预定的密实度标准。

（4）台背压实施工

台背压实施工是一项技术含量较高的工作，其目的是为了消除或减小台背与桥台之间的间隙，提高两者的结合紧密度。施工过程中，通常会采用注浆法或挤密桩法等工艺。前者是通过向台背空隙注入水泥砂浆或其他胶凝材料，使其填充空隙并与周围土壤固结为一体；后者则是利用振动锤击打的方式将特制的桩体打入台背，借助桩体自身的膨胀作用来挤压周围的土体，从而达到

压实的目的。无论采用哪种方法，都需要事先进行详细的勘察测量，确定最有利的施工位置和参数设置。

（5）桥梁加固施工

随着时间推移，部分早期建成的桥梁可能会出现不同程度的老化现象，如钢筋锈蚀、混凝土剥落等，这对桥梁的安全运行构成了潜在威胁。为此，有必要适时开展桥梁加固施工，以恢复并提升其承载能力。加固措施的选择取决于桥梁的具体病害类型，一般包括增加截面尺寸、粘贴碳纤维布、更换受损构件等多种方式。在实施加固工程时，必须充分考虑到原有结构的特点，避免对其造成二次损伤。同时，还需要对加固后的桥梁进行全面检测评估，确认其各项性能指标均已达到或超过设计要求后方可投入使用。

四、结束语

通过对市政工程道路与桥梁连接处设计与施工问题的深入探讨，本文揭示了该领域内存在的诸多挑战，并提出了一系列针对性强且行之有效的解决方案。道路与桥梁连接处的设计与施工不仅仅是一个单纯的技术问题，它还涉及到经济学、社会学等多个学科的知识范畴。在实践中，必须坚持科学严谨的态度，从宏观角度出发，统筹兼顾各方利益，确保每一个决策都能经得起时间的考验。

参考文献

[1]高伟国. 市政工程道路与桥梁连接处的设计与施工研究 [J]. 工程建设与设计, 2024,(16):218-220.
[2]黄开豪. 市政工程中的道路与桥梁连接处设计与施工工艺研究 [J]. 汽车周刊, 2024,(09):226-228.
[3]罗振鹏,孔德胜,向阳,等. 市政工程中道路与桥梁连接处设计与设计情况综述 [J]. 中国设备工程, 2023,(03):246-248.
[4]淦家爽. 市政工程中道路与桥梁连接处设计施工的研究 [J]. 运输经理世界, 2022,(27):98-100.
[5]管文中. 市政工程中道路与桥梁连接处设计方案及施工工艺 [J]. 工程建设与设计, 2022,(06):97-99.
[6]黄丹静. 市政工程中道路与桥梁连接处的设计与施工分析 [J]. 工程技术研究, 2021,6(24):149-152.
[7]祁亮. 市政工程中道路与桥梁连接处设计施工的研究 [J]. 四川建材, 2021,47(02):170-172.
[8]淦家爽. 市政工程中道路与桥梁连接处设计施工的研究 [J]. 运输经理世界, 2022,(27):98-100.
[9]王喆,张晓波,张义振. 交通工程中道路与桥梁连接处设计施工分析 [J]. 运输经理世界, 2022,(18):87-89.
[10]管文中. 市政工程中道路与桥梁连接处设计方案及施工工艺 [J]. 工程建设与设计, 2022,(06):97-99.

市政高架桥梁桥墩立柱和盖梁装配式施工技术应用研究

何渊

宁波高专建设监理有限公司，浙江 宁波 315100

摘 要：随着城市化进程的加速推进，市政基础设施建设成为提升城市承载能力和改善居民生活质量的关键环节。本文以某市新建高架桥梁工程为例，探讨了预制桥墩立柱和盖梁装配式施工技术的应用实践，通过详尽分析预制构件的装配工艺、施工要点及精准测量定位技术，揭示了该施工方法在缩短工期、提高工程质量、降低环境污染等方面的优势，并结合实际案例阐述了相关施工技术的具体实施策略与效果评估。

关 键 词：装配式施工；桥墩立柱；盖梁；精准测量定位

Research on the Application of Prefabricated Construction Technology of Bridge Pier Column and Cover Beam of Municipal Elevated Bridge

He Yuan

Ningbo High School Construction Supervision Co., Ltd. Ningbo, Zhejiang 315100

Abstract：With the acceleration of the urbanization process, the construction of municipal infrastructure has become a key link to improve the carrying capacity of cities and improve the quality of life of residents. This paper to a city new elevated bridge engineering as an example, discusses the application of prefabricated pier column and cover beam prefabricated construction technology, through the detailed analysis of prefabricated assembly process, construction points and accurate measurement and positioning technology, reveals the construction method in shortening the construction period, improve the engineering quality, reduce the environmental pollution, and combined with the actual case of related construction technology implementation strategy and effect evaluation.

Keywords：assembly construction; bridge pier column; cover beam; accurate measurement and positioning

引言

鉴于传统现浇混凝土结构在市政高架桥梁建设中存在施工周期长、质量控制难度大、对环境影响显著等问题，装配式施工技术作为一种新型的建筑工业化生产模式逐渐受到广泛关注。本研究旨在通过对预制桥墩立柱和盖梁装配技术及其施工过程中的关键问题进行深入探讨，为推动我国市政工程建设领域的技术创新提供理论支持和技术参考^[1]。

一、工程概况

某市的城市交通网络扩展计划框架下，一座全长约20公里，设计行车速度80千米/小时，双向六车道的市政高架桥梁项目被提上日程。此项目不仅对于缓解城市中心区段的交通压力具有重要意义，而且是连接城市多个功能区域的重要纽带。考虑到工程所处地理位置的特殊性以及周边环境的影响，决定采用预制桥墩立柱和盖梁的装配式施工方案，以实现高效、环保、安全的建设目标。项目预计总工期36个月，其中包含预制构件制作时间6个月，现场安装时间24个月，其余为准备和收尾工作。整个工程共需预制桥墩立柱500根，每根平均高度15米，重量约120吨；预制盖梁200片，单片最大跨度30米，重达200吨。通过引入先进的BIM技术和智能管理系统，确保了从设计到施工全过程的信

息透明化和管理的精细化。

二、预制桥墩立柱和盖梁装配技术

（一）预制桥墩立柱装配技术

针对预制桥墩立柱的装配技术，首先需要强调的是其基于工厂化生产的特性。在专业化的预制构件生产基地内，严格按照国家现行标准和规范要求对原材料选择、模具加工、钢筋绑扎、混凝土浇筑等工序操作。特别是对于钢筋保护层厚度、混凝土振捣密实度以及表面平整度等关键参数，均采取了严格的监控措施，以保证出厂产品的高质量。此外，在运输过程中，为了防止因颠簸造成的损伤，特制了专用的固定装置，确保每个构件都能完好无损地运抵施工现场。到达指定位置后，利用大型起重机完

作者简介：何渊（1990.04-），男，汉族，本科，中级，研究方向：市政工程，房屋建筑工程。

成精确吊装就位，期间还涉及到临时支撑体系的搭建、水平垂直方向调整等多项复杂作业，直至所有立柱稳固竖立于预定基础上^[2-4]。

（二）预制盖梁装配技术

预制盖梁装配技术同样体现了现代化建筑业的发展成果。盖梁作为桥梁结构中的重要组成部分，其预制过程不仅注重外形尺寸精度控制，更加强调内部预应力筋束布置合理性。在预制厂内，通过精心设计的钢模板体系实现了盖梁外观的一致性和内部结构的优化配置。当预制件达到强度要求并经过严格的质量检验后，将被小心翼翼地装载至特制平板车上送往工地。在现场装配阶段，除了常规的吊装流程外，还需特别关注临时支架的设计安装，它不仅要满足承载力需求，还要便于后续工序的操作。同时，为了保证盖梁安装后的整体线形美观和平顺过渡，采用了精密全站仪配合激光测距仪进行实时监测调整，确保每一跨盖梁都准确无误地坐落在相应立柱顶端之上^[5-6]。

三、预制桥墩立柱和盖梁装配式施工要点

（一）施工前期的准备工作

在正式开展预制桥墩立柱和盖梁的装配式施工之前，必须做好充分而细致的前期准备工作。这包括但不限于对施工场地进行全面清理和平整处理，确保地面坚实平整，能够承受重型机械和材料堆放的压力；根据设计方案提前规划好构件运输路线，避免出现交通拥堵或道路损坏情况；建立完善的质量安全管理体系，明确各级管理人员职责权限，加强对一线作业人员的技术培训和安全教育；最后但同样重要的是，要做好与地方政府部门及相关利益方之间的沟通协调工作，争取获得最大程度的理解和支持。

（二）预制桥墩立柱的吊装

预制桥墩立柱的吊装是一项技术含量高且风险较大的施工作业。由于单个立柱的高度可达数十米，重量超过百吨，因此在吊装过程中必须采用高性能的起重设备，并由经验丰富的专业团队负责指挥调度。吊装前，技术人员会仔细核对每一个细节，如起吊点的选择、索具的安全系数、风速变化等因素，确保万无一失。起吊时，则严格按照既定程序逐步操作，先缓慢提升一定高度进行试吊检查，确认无误后再继续升高直至完全脱离地面。

（三）预制盖梁的吊装

1. 预制盖梁临时支架制作安装

预制盖梁吊装前，必须先完成临时支架的制作安装工作。临时支架不仅是盖梁吊装过程中的重要辅助设施，也是保障施工安全的关键因素之一。根据具体的工程地质条件和设计要求，选用合适的钢材作为主要构建材料，并按照特定规格切割加工成所需形状。然后，通过焊接或螺栓连接等方式将其组装成稳定可靠的支撑结构。安装时，需特别注意支架底部基础的加固处理，确保在整个施工期间不会发生沉降或倾斜现象。

2. 预制盖梁安装

当临时支架安装完毕并通过验收后，便可以开始预制盖梁的吊装安装作业。与立柱吊装类似，盖梁吊装同样需要依赖大型起

重机来完成。不同之处在于，由于盖梁长度较长且自重大，所以在起吊过程中更加考验操作人员的专业技能和协作能力。吊装前，要对盖梁进行全面检查，确保其外观完好无损，内部预应力筋束状态正常。起吊时，应采用多点捆绑方式，使受力均匀分布，避免局部变形。随着起重机缓缓升起，盖梁逐渐离开地面，并沿预定路径平稳移动至指定位置上方^[7-8]。此时，地面工作人员立即启动精确测量仪器，对盖梁的位置进行微调校正，直至完全符合设计要求。之后，使用高强度螺栓或其他形式的连接件将盖梁牢固地固定在两侧立柱之间，形成完整的桥梁结构单元。

（四）盖梁湿接缝的施工

1. 湿接缝钢筋连接

盖梁湿接缝是指相邻两片预制盖梁之间通过现场浇筑混凝土形成的连续连接部位。为了增强湿接缝的整体性和耐久性，在施工初期就要做好钢筋连接工作。通常情况下，会在预制盖梁端部预留出一定数量的纵向钢筋，用于与相邻盖梁上的对应钢筋相连接。连接方式主要有搭接焊、套筒灌浆连接等几种。无论采用哪种方法，都必须保证连接部位的抗拉强度不低于母材本身，且连接面清洁无污物，以确保良好的粘结性能。

2. 湿接缝预应力施加

在完成钢筋连接后，接下来就是对湿接缝施加预应力。这是为了抵消后期由于车辆荷载作用而产生的拉应力，进而延长桥梁使用寿命。预应力施加一般采用张拉千斤顶配合锚固系统来进行。具体操作时，首先要按照设计图纸要求准确安装千斤顶和锚具，然后逐步加大油压，使钢绞线产生弹性伸长，直到达到规定的张拉力值为止。值得注意的是，在张拉过程中要保持匀速加载，并密切观察各项参数变化，一旦发现异常情况应及时停止作业并查找原因。完成张拉后，还需及时进行封锚处理，防止水分侵入导致锈蚀。

3. 湿接缝吊模施工

湿接缝吊模施工是确保混凝土浇筑质量和外观效果的重要环节。所谓吊模，即指利用悬挂式模板代替传统的支护结构来进行混凝土成型的一种施工方法。相比而言，这种方法具有安装拆卸便捷、占用空间小、不影响其他工序等特点。在实际操作中，吊模的选型和布置要综合考虑湿接缝宽度、高度以及周边环境等多种因素，力求做到既满足施工要求又经济合理。同时，为保证混凝土浇筑时吊模不发生变形或移位，还需对其刚度和稳定性进行严格检验^[9]。

4. 湿接缝混凝土施工

最后一步是对湿接缝进行混凝土浇筑施工。考虑到湿接缝位于高空作业环境中，因此在选择混凝土配合比时，既要保证其具有良好的流动性，又要兼顾早期强度发展速度快的特点。通常会选择添加适量减水剂和早强剂来优化混凝土性能。浇筑前，要彻底清除湿接缝内的杂物，并用水湿润基层表面，但不得积水。浇筑过程中，应分层连续进行，每层厚度控制在30cm左右，并用插入式振动棒充分振捣密实。为防止混凝土泌水现象发生，可在表面覆盖塑料薄膜保湿养护。待混凝土终凝后，再拆除吊模，并按照规定的时间间隔逐步放松预应力筋，使其自然收缩复位。

四、装配式施工过程精准测量定位技术

（一）桥墩立柱预埋筋定位

桥墩立柱预埋筋定位是装配式施工中非常重要的一个步骤，它直接关系到后续盖梁安装能否顺利完成。在预制厂内，技术人员会依据设计图纸，在立柱底部精确预留出若干组预埋筋，并对其进行编号标记。当立柱吊装到位后，就需要利用全站仪、水准仪等先进测量工具对其进行三维坐标复核，确保每个预埋筋的位置偏差不超过 $\pm 5\text{mm}$ 。同时，为了便于后续操作，还会在预埋筋周围绘制清晰的标识线，指示出正确的对接方向。此外，考虑到天气变化可能带来的误差影响，建议在早晚温差较小的时间段内进行这项工作，以提高定位精度。

（二）双立柱平面位置控制

双立柱平面位置控制是为了确保同一跨桥梁两侧立柱能够在同一轴线上准确就位。为此，施工方通常会预先在地面上设置若干个基准控制点，并通过全站仪建立统一的空间坐标系。在立柱吊装过程中，技术人员会不断对照这些控制点，实时调整立柱的姿态，直至其平面位置偏差控制在允许范围内（通常不超过 $\pm 10\text{mm}$ ）。为了进一步提高定位准确性，还可以借助激光测距仪等辅助设备，对两根立柱之间的距离进行精确测量，确保它们之间的间距符合设计要求。

（三）桥墩立柱垂直度控制

桥墩立柱垂直度控制同样是装配式施工中不可忽视的关键点。由于立柱高度较大，即使是很小的角度偏差也会导致顶部位置出现明显偏移，从而影响整个桥梁结构的安全性和稳定性。因此，在立柱吊装完成后，必须立即对其进行垂直度检测。目前，常用的方法是使用铅垂线法或经纬仪法。前者适用于较短的立

柱，通过在立柱顶部悬挂一根细绳，使其自由下垂并与地面投影点重合来判断是否垂直；后者则更适用于较高大的立柱，通过测量立柱顶部和底部两个点之间的夹角来计算垂直度偏差^[10]。

（四）盖梁安装精度控制

盖梁安装精度控制主要包括横向位置、纵向位置以及标高等方面的精确调整。为了实现这一目标，施工团队会综合利用多种现代测量技术和工具。例如，在横向位置控制方面，可以通过全站仪对盖梁两端点坐标进行跟踪监测，确保其偏离值不超过 $\pm 15\text{mm}$ ；在纵向位置控制上，则依靠激光测距仪快速获取盖梁中心线与设计轴线之间的距离差异，并据此作出相应调整；至于标高控制，则需要借助水准仪精确测定盖梁底面各点相对于基准面的高度差，确保其起伏波动幅度保持在 $\pm 5\text{mm}$ 以内。此外，为了验证盖梁安装后的整体线形是否平滑流畅，还会采用三维扫描仪进行全方位扫描对比，一旦发现问题即可及时纠正。

五、结束语

综上所述，通过以上对市政高架桥梁桥墩立柱和盖梁装配式施工技术的详细论述，可以得出以下几点结论：首先，装配式施工技术的应用有效提升了桥梁建设的速度和效率，减少了现场作业时间和劳动强度，降低了对周边环境的影响。其次，通过严格的质量管理和技术手段，预制构件的制造精度得到了显著提高，为后续安装提供了可靠保障。再者，精准测量定位技术的应用，确保了各个结构部件之间的精确对接，提高了整个桥梁结构的安全性和稳定性。最后，本研究通过对实际工程案例的分析，验证了装配式施工技术在市政高架桥梁建设中的可行性和优越性，为同类项目提供了有益借鉴。

参考文献

- [1] 马起柱. 市政高架桥梁桥墩立柱和盖梁装配式施工技术探讨 [J]. 四川水泥, 2023, (01): 274-276.
- [2] 陈骏, 程剑, 伍永祥, 等. 装配式混凝土结构工具式集成施工方法应用研究 [J]. 施工技术, 2018, 47(22): 56-59.
- [3] 刘小丹. 高架桥梁立柱及盖梁装配式施工技术探析 [J]. 江西建材, 2024, (05): 234-235+238.
- [4] 王艳, 吴燕开. 预制桥梁墩柱拼装及钢筋连接套筒灌浆施工技术 [J]. 科技资讯, 2024, 22(05): 128-131.
- [5] 宋紫明. 全预制装配式连续梁桥一体化架设关键技术研究 [J]. 科学技术创新, 2024, (02): 183-186.
- [6] 刘四田, 邵亚腾, 王连红. 新型预制装配式桥墩盖梁设计思路探讨 [J]. 公路, 2023, 68(09): 217-222.
- [7] 杨雅淋, 申铁军. 装配式桥梁墩柱快速成型工艺与施工组织分析 [J]. 交通科技与管理, 2023, 4(08): 101-103.
- [8] 申铁军. 小间距加筋复合桥台结构优势及施工技术要点分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(05): 79-80+83.
- [9] 申铁军, 汪晓勇. 人工挖孔桩成孔新型定位装置的应用研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(08): 126-127.
- [10] 祁亮. 市政工程中道路与桥梁连接处设计施工的研究 [J]. 四川建材, 2021, 47(02): 170-172.

质量是无需投资的效益

童明华

身份证号: 370305193502120711

摘 要：历史上发生房屋倒塌或桥梁坍塌，轻则造成财产损失，重则危害生命，究其原因，除了天灾人祸之外，施工质量低劣是其主要原因。可见质量的重要性。效益是靠质量来获得。为此实行全面质量控制显得尤为重要。这就是本文要探讨的要点。

关 键 词：质量；全面质量控制；设计管理；设计控制；施工管理

Quality is a Benefit That Requires No Investment

Tong Minghua

ID: 370305193502120711

Abstract：Historically, house or bridge collapses have resulted in property damage in lesser cases and endangered lives in more severe cases. Apart from natural disasters and human factors, poor construction quality is the main reason behind these incidents. This underscores the importance of quality. Benefits are gained through quality. Therefore, implementing comprehensive quality control is particularly important. This is the main point to be discussed in this article.

Keywords：quality; total quality control; design management; design control; construction management

引言

在建筑工程领域，质量始终是核心关注点。全面质量控制涵盖多方面关键要素，在设计管理阶段，需精准把握建设单位需求与要求，依规范设计并合理规划周期，筛选优秀方案且协调各方矛盾，及时因应变化调整设计；施工管理方面，合理规划周期与计划，充分做好前期场地、材料、机具等准备工作；而施工质量控制更是重中之重，严格遵循施工规范，确保材料合格，重视混凝土强度试验、焊接检测等环节，妥善处理地基问题，对不合格分项工程及时整改。本文将深入探讨全面质量控制各环节要点及其对建筑工程质量保障与效益提升的重要意义，为建筑行业质量管控提供全面的理论与实践参考。

一、全面质量控制之一设计管理

设计管理在全面质量控制中起引领作用，它关联多方要素，决定项目走向。此环节需精准把握需求，依法规创新，合理规划，科学选案，协调矛盾，并灵活应变，为工程筑牢根基。

（一）明晰建设需求

设计管理始于深入了解建设单位多元需求，其涵盖功能布局、空间等多维度且相互关联。建筑工程队工程设计图有严格的要求，对工程的设计和绘制进行反复的讨论，对工程不合理的方面进行反复的设计，在工程设计中的每一处细节都要进行审查和检验，对于工程过程中出现的各项问题都要及时地进行调查，出现问题后及时调整从图纸和工程相互分析。如果图纸出现了严重的错误，那么工程将无法进行^[1]。

（二）依规范巧设计

设计工作务必严格遵循相关规范，这些规范是对长期实践经

验的总结以及众多科研成果的提炼，涵盖了结构安全、节能、消防、防水等诸多关键领域的标准要求^[2]。设计人员在设计时，一方面要以规范为准则，另一方面积极发挥创新能力与技术专长对方案进行优化。例如在结构设计方面，通过严谨分析，选用适配的结构体系与材料，在确保稳固性的同时降低建设成本；在电气设计领域，依据精确的负荷计算规划线路走向，保障电力系统运行既安全又高效，使设计方案在合规基础上实现效益最大化。

（三）规划设计周期与计划

合理规划设计周期并制定规范计划对设计工作的有序开展起着关键保障作用。确定周期时，需全面综合项目规模大小、技术复杂程度、所需资源多寡以及可能面临的外部环境等多方面因素。设计计划应将整个设计过程细致拆解，清晰明确各阶段关键任务、时间节点以及预期成果，同时构建起有效的监控反馈机制^[3]。例如在概念设计阶段，着重聚焦于快速确定项目独特的风格框架，且节奏紧凑以迅速锚定方向；而详细设计阶段，则深入

探究各专业领域的精细环节，严格把控各专业间的协同作业进度，确保设计工作高效流畅推进。

（四）遴选优质设计方案

遴选优质设计方案的过程，旨在实现多项目标间的精妙平衡。这需要依托一套科学严谨的评估体系，从多维度进行考量。创新维度注重方案是否能突破传统思维局限，为使用者创造独特体验与视觉亮点；合理性着重审视功能布局的流畅性、空间利用的高效性等^[4]；经济性致力于在满足质量要求的前提下降低建设与运营成本；可实施性则重点考察其与现有施工技术条件及资源环境的匹配程度。通过多轮细致的比选与专业评审，最终精准确定最契合项目需求的最佳设计方案。

（五）统合设计施工目标，化解双方矛盾

设计与施工目标的统一以及双方矛盾的有效协调对项目顺利推进起着决定性作用。设计过程中需充分考量施工的可行性与成本因素，施工方则应深入领会设计意图。在实际操作中，由于双方所处立场与关注重点存在差异，易产生诸多矛盾。例如设计变更更可能导致施工进度滞后与成本增加，而施工方也会提出利于施工操作的优化建议^[5]。因此，必须建立高效的沟通协调机制，如定期召开工程例会、组织技术交底与问题协商会议等，及时交换信息，平衡双方利益诉求，促进设计与施工的协同合作，保障项目有序开展。

（六）因势变更设计

在施工进程中，因地质状况与前期勘察不符、极端天气突发干扰施工进度，抑或新型材料涌现提供更优选择等状况时有发生。设计团队务必迅速行动，基于实际情形深入剖析，严谨遵循既定的变更设计审批流程，确保变更后的设计方案既能契合质量规范要求，又能与项目整体目标相适配^[6]。同时，及时且精准地将变更信息传递给施工方、建设单位等相关各方，有效协调各方行动，最大程度削减设计变更对项目推进带来的负面影响，保障项目平稳有序前行。

二、全面质量控制之一设计控制

设计控制在全面质量控制里占据关键地位，其成效直接关联项目走向。此环节需从多方面着力，精准探需、精研计划、协同施工并构建质控系统，从而保障设计质量过硬，为工程奠基。

（一）精准探需依规设计

设计团队以系统调研与专业沟通，深度挖掘建设单位在功能、空间、使用、运营等多方面需求，转化为设计参数与指标。同时严格遵循各类设计规范、标准与法规，从结构稳定到消防、电气、环保节能等细节精心设计，确保方案合法、安全且可持续，以需求为导向、规范为准绳打造设计蓝图。

（二）精研计划有序推进

制定覆盖项目全过程的设计计划至关重要。需综合考量项目规模、复杂度、技术难度与资源状况，大型项目可分阶段层级设计，明确各阶段任务、时间、责任人与成果^[7]。并建立监控反馈机制，定期检查进度，及时纠偏，保障设计按计划稳步推进，按

时交付高质量成果，使设计过程有条不紊、高效有序。

（三）协同施工应变修改

设计与施工紧密相连，协同影响质量进度。设计方应主动构建与施工方的沟通协作平台，设计阶段吸收施工经验优化方案，施工中密切关注现场，响应施工方需求^[8]。遇地质、环境、材料供应等变化，迅速组织分析研究，依严格变更流程制定修改方案，平衡质量、进度与成本，达成设计施工动态协同，保障项目顺利推进。

（四）全面质控系统构建

全面质量控制体系庞大复杂，设计控制子系统需完善质量管控体系。先依项目总体要求与建设单位期望明确设计质量目标，涵盖创新、合理、经济等方面。再结合标准规范与项目实际制定质量标准与验收规范。设计中通过多层面审查、评审与审核监控方案各环节，及时纠错。最后健全评估反馈机制，客观评价成果，总结经验以完善体系，提升设计质量，推动全面质控进阶，为高品质工程筑牢根基。

三、全面质量控制之三：施工管理

施工管理是全面质量控制的核心执行环节，关乎工程成败。它整合多方资源，精细规划施工时程，妥善筹备场地、材料与机具，精心编制设计，以严谨科学之法，保障施工高效有序推进。

（一）酌定施工时程与规划

确定合理施工周期与精准施工计划是施工管理首要。需综合多因素考量，大型项目要合理分配各阶段时间^[9]。施工计划应细化任务，明确里程碑、工作内容、顺序与责任人，像高层建筑施工按顺序推进各工程阶段，保障进度与资源优化配置。

（二）筹谋施工前设计编制

施工前期准备与施工组织设计编制极为关键。准备工作涵盖勘查现场及周边环境、会审设计图纸。施工组织设计是系统规划，包括总体部署、方法选择、进度安排、资源需求及质量安全措施制定，如大型桥梁施工依据结构与条件确定施工方法并规划资源与应急预案，提升效率、降低风险、保障质量。

（三）整备建材保障供应足

材料准备是施工管理物质基础。施工前依计划与设计精确计算材料量并制定采购计划，采购时严格筛选供应商，考察生产工艺等多方面^[10]。建立仓储管理，施工中监控消耗并及时补货调配，如水泥采购注重多环节考察，确保材料质量稳定、供应连续及时，避免因材料影响工程。

（四）整饬场地达成三通平

场地准备是施工前提。水通要依施工用水确定供水系统；电通需按设备功率规划供电布局；路通构建便捷交通网络；场地平整依设计与地形确定土方调配方案，使场地满足施工规范，为基础施工等奠定基础，各方面均对施工顺利开展意义重大。

（五）集齐施工机具与护具

施工机具与护具准备关乎效率与安全。依工艺和工程配备齐全先进机具，如夯实机、搅拌机等各有其用，同时准备安全防护

用品并配备起吊机具。建立机具管理档案，定期维护检测，确保机具良好运行，为施工提供设备保障，推动施工顺利开展。

施工管理各环节紧密相连、相辅相成，从时程规划到场地、材料、机具准备等工作，均是构建高质量建筑工程的重要组成部分，共同为实现施工目标奠定坚实基础并保驾护航。

四、全面质量监控之四：施工质量的控制

施工质量控制是建筑工程的核心环节，直接关乎工程的安全性、耐久性与功能性。以下将对施工质量控制的六个关键要点进行概括阐述。

（一）依规施工作业

施工规范是确保施工质量的根本依据，它涵盖建筑施工全流程各工序的技术与操作要求。从基础定位放线到屋面防水处理，施工人员必须依据规范开展工作。在混凝土浇筑中，遵循规定顺序、振捣方法与时间以保障密实均匀；钢筋连接时，依规规范选方式并达强度与锚固标准。施工人员需经专业培训与考核，熟悉规范并严格按工艺流程、参数及检验标准操作，如此方能保障施工质量稳定可靠，杜绝违规操作引发的隐患与事故。

（二）严选合格建材

施工材料及制品质量决定建筑实体质量。采购时，构建严格供应商筛选评估机制，审查其资质信誉、生产与质控体系，优先选择口碑好、质量稳且符合标准规范的供应商。对每批进场材料严格检验验收，如检测水泥强度等级等指标、钢材屈服与抗拉强度等参数，核查构配件规格尺寸等质量证明文件等。同时强化材料运输、存储与使用管理，防受潮、锈蚀与变质致质量下滑。唯有材料合格且使用得当，才能筑牢高质量建筑的物质基础，避免因材料问题引发的结构、墙体等质量缺陷。

（三）验硷强度方

混凝土强度关联建筑结构承载与安全。使用前须有强度试验报告支撑。配合比设计依工程与结构需求及原材料性能科学计算试验确定，生产时精准计量原材料并控制搅拌时间与均匀性。浇筑现场按规制作养护试件，在特定条件下养护并于龄期内抗压试验。仅当强度达标，混凝土才可用于对应部位施工。此强度试验控制机制可保障混凝土承载作用，预防强度不足引发结构破坏与事故。

参考文献

- [1]尹永强. 浅析建筑工程全面质量管理及控制要点[J]. 现代物业(中旬刊), 2019,(12):133.DOI:10.16141/j.cnki.1671-8089.2019.12.128.
- [2]史鑫. 建筑全过程工程质量管理与控制要点浅析[J]. 四川建筑, 2023,43(04):314-315.
- [3]姜金龙. 建筑工程全面质量管理和质量控制研究[J]. 房地产世界, 2023,(13):76-78.
- [4]李斌. 房屋建筑工程质量管理要点及控制措施研究[J]. 住宅与房地产, 2023,(11):110-112.
- [5]吴光红. 全面质量管理理论下建筑工程质量风险控制研究[J]. 工程与建设, 2022,36(06):1838-1840+1873.
- [6]唐晓红. 全面质量管理在某建筑工程质量安全风险控制中的应用研究[J]. 居舍, 2022,(20):121-124.
- [7]王龙. 简析建筑工程施工质量管理方法及控制要点[J]. 居舍, 2021,(27):153-154.
- [8]王超. 建筑工程防水施工质量管理控制要点及对策[J]. 质量与市场, 2021,(07):57-59.
- [9]左绪勇. 全面质量管理理论下建筑工程质量风险控制研究[D]. 安徽建筑大学, 2021.DOI:10.27784/d.cnki.gahjz.2021.000178.
- [10]黄洪振. 建筑工程施工质量管理方法及控制要点分析[J]. 住宅与房地产, 2020,(24):137.

（四）检焊质优达标

焊缝质量是金属结构连接可靠与稳定的关键。焊接前评定工艺，依母材材质等确定参数并制定规程。施工时，持证焊工依规程操作保外观质量。完工后，综合运用外观与无损探伤检测全面查焊缝质量。外观察表面裂纹等缺陷，无损探伤探内部状况，分析探伤结果判断缺陷详情。仅焊缝检测合格，焊接结构才可投入使用，保障建筑结构在荷载下的安全可靠。

（五）夯实地基根基

地基是建筑之基，其处理质量至关重要。施工前详勘地质，掌握土层分布与性质及水位信息，依此设计处理方案，可选换填垫层、强夯或桩基础等方法。施工中，严格依选定理工方法的技术流程操作，如强夯控夯锤参数加固地基，桩基础控成孔、钢筋笼与混凝土浇筑质量保桩身完整承载。施工全程及完工后进行质量检测监测，如承载力检测与沉降观测，及时处理问题，为上部结构施工与使用打造稳固地基，防沉降、失稳致建筑开裂倒塌。

（六）速改分项劣差

及时整改质量不合格分项工程是工程质量保障的纠错关键。建立质量检查验收制度，分项完工后依标准规范严格验收。发现不合格立即组织人员专家剖析原因，或工艺错或材料劣或操作误等。据此定整改方案，明确措施、责任人与期限。措施含返工、修补加固、材料设备更换等，整改时强化监控保质量达标。记录存档整改情况，为质量追溯与经验总结奠基。借此机制消除萌芽或限制局部问题，防累积扩大，稳步提升工程质量达目标。

五、结束语

总之，全面质量控制贯穿建筑工程的设计与施工全过程，各个环节紧密交织、相互影响。设计管理与设计控制为工程绘制蓝图并确立质量基准，施工管理则将设计付诸实践，而施工质量控制更是保障工程品质的核心防线。从精准把握建设需求到严谨依规作业，从精选建材到妥善处理地基，从优化设计方案到及时整改问题，每一步都凝聚着对质量的不懈追求。唯有全面落实各环节质量控制要点，持续优化管理流程与技术手段，强化各参与方的协同合作与责任担当，才能铸就安全可靠、经久耐用且功能完备的建筑精品，在满足社会发展需求的同时，推动建筑行业迈向高质量、可持续发展的新征程。

燃煤电厂热工自动化系统安全性与可靠性分析

袁嘉欣

内蒙古白音华铝电有限公司自备电厂，内蒙古 锡林郭勒盟 026200

摘 要： 燃煤电厂热工自动化系统作为电厂运行的中枢，其安全性与可靠性直接关系到电厂的生产效率和稳定运行。本文通过分析燃煤电厂热工自动化系统在设备老化管理、控制系统软硬件优化、供电系统可靠性保障、人为因素控制以及系统风险评估与防范等五个方面的安全性与可靠性策略，旨在提出有效的改进措施，以提升燃煤电厂热工自动化系统的整体性能。

关 键 词： 燃煤电厂；热工自动化系统；安全性；可靠性

Safety and Reliability Analysis of Thermal Automation System in Coal-Fired Power Plant

Yuan Jiaxin

Inner Mongolia Baiyinhu Aluminum & Electric Co., Ltd. Self-supplied Power Plant, Xilin Gol League, Inner Mongolia 026200

Abstract： As the center of power plant operation, the safety and reliability of the thermal automation system of coal-fired power plant are directly related to the production efficiency and stable operation of the power plant. This paper analyzes the safety and reliability strategies of the thermal automation system of coal-fired power plants in five aspects: equipment aging management, control system software and hardware optimization, power supply system reliability guarantee, human factor control, and system risk assessment and prevention, and proposes effective improvement measures to improve the overall performance of the thermal automation system of coal-fired power plants.

Keywords： coal-fired power plants; thermal automation system; security; reliability

燃煤电厂热工自动化系统通过传感器、控制器和执行机构等设备，实现对热力系统和机械设备的自动化控制。然而，由于长期运行、设备老化、人为操作失误等因素，系统的安全性及可靠性面临挑战。因此，深入分析燃煤电厂热工自动化系统的安全性及可靠性，提出针对性的改进策略，对于保障电厂的稳定运行和提高生产效率具有重要意义。

一、设备老化管理策略

（一）定期维护

为了确保生产线的顺畅运行和延长设备的使用寿命，企业应建立全面的定期设备维护制度。这一制度的核心在于对关键设备进行定期、系统的检查和维护工作。通过制定详细的维护计划和时间表，可以确保每一项维护工作都得到及时、有效的执行。在执行定期维护时，技术人员需要运用专业的检测工具和方法，对设备的各项性能指标进行全面评估。他们不仅要关注设备的当前运行状态，还要通过历史数据的对比，及时发现并预测可能存在的老化问题。一旦发现潜在的设备老化风险，维护人员应立即采取措施进行处理，如更换磨损部件、调整设备参数等，以防止问题进一步恶化。此外，定期维护还包括对设备的清洁、润滑和紧固等工作，以消除因积尘、松动等引起的故障隐患。通过这一系列的维护措施，企业可以有效地降低设备老化带来的风险，确保生产线的持续稳定运行^[1]。

（二）更新升级

在设备老化管理策略中，更新升级是一项至关重要的措施。随着技术的不断进步和生产需求的日益提升，许多设备在达到或超过其设计寿命后，性能和安全性往往无法满足当前的生产要求。针对这类设备，企业应及时进行评估，并根据评估结果制定更新或升级计划。更新设备意味着引入更先进、更高效的设备，以提升生产效率和产品质量。而升级设备则是在现有设备的基础上进行技术改造，以增强其性能和安全性。无论是更新还是升级，企业都需要充分考虑设备的兼容性、可靠性和成本效益等因素。同时，为了确保新设备或升级后的设备能够顺利融入现有的生产体系，企业还需要进行充分的调试和测试工作。通过这一系列的措施，企业可以有效地应对设备老化带来的挑战，确保生产的持续稳定进行。

（三）备件管理

备件管理在设备老化管理策略中扮演着至关重要的角色。为了确保关键设备在突发故障时能够迅速恢复运行，企业必须建立

作者简介：袁嘉欣（1997.05-），女，汉族，内蒙古自治区锡林郭勒盟，大学本科，助理工程师，燃煤电厂热工自动化专业以及风电、光伏等新能源发电领域。

完善的备件管理制度。一制度的核心在于对备件进行科学分类、合理储备和及时更新。企业需要根据设备的运行状况和故障历史，确定哪些备件是关键的，哪些备件是常用的，并据此制定相应的储备计划^[2]。同时，为了确保备件的质量和可靠性，企业还需要与优质的备件供应商建立长期合作关系，确保备件能够及时供应。此外，备件管理制度还包括对备件的定期检查和测试，以确保其性能完好、安全可靠。通过这些措施，企业可以在设备出现故障时迅速更换备件，将故障对系统的影响降到最低，从而保障生产的连续性和稳定性。

二、控制系统软硬件优化策略

（一）软件升级

在快速迭代的科技时代，控制系统软件的升级成为确保系统稳定性和安全性的关键一环。企业应制定并执行严格的软件升级计划，定期对控制系统软件进行更新。软件升级的主要目的之一是修复已知的安全漏洞和性能缺陷。随着技术的不断进步，新的安全威胁和性能瓶颈不断涌现，而软件开发商通常会通过发布更新来应对这些问题。因此，及时升级软件可以有效提升控制系统的安全性和运行效率。此外，软件升级还可能带来新功能或性能改进，从而帮助企业更好地应对生产过程中的挑战^[3]。在升级过程中，企业应确保备份原始数据，并测试升级后的系统兼容性，以避免潜在的风险。通过持续的软件升级，企业可以确保控制系统始终保持在最佳状态，为生产提供强有力的支持。

（二）硬件优化

硬件作为控制系统的基石，其质量和配置直接关系到系统的整体性能和稳定性。因此，在优化控制系统时，硬件优化是不可忽视的一环。为了实现硬件优化，企业应选择高质量的硬件设备。这些设备应具备出色的处理能力和高度的可靠性，以确保系统在面对复杂任务时能够稳定运行。同时，企业还应根据实际需求，对硬件配置进行合理规划，避免资源浪费和性能瓶颈。此外，硬件优化还包括提高系统的抗干扰能力。在生产环境中，控制系统可能会受到各种外部因素的干扰，如电磁噪声、振动等。因此，在设计和选择硬件设备时，企业应充分考虑其抗干扰性能，以确保系统在各种环境下都能稳定运行^[4]。通过硬件优化，企业可以进一步提升控制系统的性能和稳定性，为生产提供更加可靠的支持。

（三）逻辑优化

在控制系统的软硬件优化中，逻辑优化扮演着至关重要的角色。一个完善的控制逻辑是确保系统稳定运行、减少误动作和故障发生的基础。为了实现逻辑优化，企业需要对现有控制逻辑进行深入分析，识别并改进其中的不合理之处。这包括调整控制参数、优化控制策略以及完善异常处理机制等。通过这些措施，企业可以使控制系统的运行更加符合实际需求，提高系统的稳定性和可靠性。同时，逻辑优化还需要考虑系统的可扩展性和可维护性。随着生产需求的不断变化，控制系统可能需要不断升级和扩展。因此，在优化控制逻辑时，企业应确保其具有良好的可扩展

性和可维护性，以便在未来能够方便地添加新功能或修改现有逻辑。通过逻辑优化，企业可以进一步提升控制系统的性能和稳定性，为生产提供更加高效、可靠的保障。

三、供电系统可靠性保障策略

（一）冗余设计

在供电系统中，冗余设计是提升系统可靠性的重要手段。冗余电源设计意味着在系统中配置额外的电源设备，作为主电源的备份。当主电源因故障或其他原因无法供电时，冗余电源能够迅速切换并接管供电任务，确保系统的不间断运行。冗余电源设计不仅提高了供电系统的可靠性，还减少了因电源故障导致的系统停机时间^[5]。同时，通过合理的冗余配置，还能实现负载均衡，延长电源设备的使用寿命。因此，在关键设备的供电系统中，冗余设计已成为不可或缺的一部分，为系统的稳定运行提供了坚实的保障。

（二）电源质量监测

电源质量是供电系统稳定运行的关键。为了确保供电系统的可靠性，必须对电源质量进行实时监测。这包括监测电压的稳定性、电流的波动情况以及频率的偏差等。通过实时监测，可以及时发现电源质量存在的问题，如电压波动、电压不稳或电源中断等。一旦发现这些问题，应立即采取措施进行处理，如调整电源电压、更换电源设备或启动备用电源等。这样可以有效避免电源问题对系统造成损害，确保供电系统的连续性和稳定性。同时，电源质量监测还能为系统的维护和优化提供数据支持，进一步提升系统的可靠性。

（三）防雷击措施

雷电天气对供电系统的稳定运行构成严重威胁。为了保障系统在雷电环境下的安全性，必须加强防雷击措施。这包括在供电系统中安装避雷针、避雷器等防雷设备，以有效吸收和分散雷电能量，减少雷电对系统的冲击。同时，对供电线路和设备进行合理的接地处理，确保雷电电流能够迅速泄入大地，避免对系统造成损害^[6]。此外，还应定期对防雷设备进行检查和维护，确保其处于良好工作状态。通过加强防雷击措施，可以显著提升供电系统的防雷击能力，确保系统在雷电天气下也能稳定运行，为生产和生活提供可靠的电力保障。

四、人为因素控制策略

（一）加强培训

人为因素在设备运行和维护中起着至关重要的作用。为了确保设备的安全稳定运行，企业必须加强对操作人员的培训。企业应定期组织系统操作和维护的培训课程，邀请专业人员对操作人员进行系统的指导和讲解。培训内容不仅包括设备的操作技能和维护方法，还应涵盖设备的安全操作规程和应急处置措施。通过培训，操作人员可以深入了解设备的运行原理和维护要点，提高自身的技能水平和安全意识。同时，企业还应鼓励操作人员积极

参与培训，并提供相应的奖励机制，以激发其学习热情。通过加强培训，企业可以确保操作人员具备足够的技能和知识，为设备的稳定运行提供有力保障。

（二）操作规程

在人为因素控制策略中，建立完善的操作规程和应急预案至关重要。操作规程是指导操作人员正确、规范地执行各项任务的依据，它详细规定了设备的操作流程、注意事项和故障处理方法。企业应结合设备的特性和运行要求，制定详细、清晰的操作规程，并通过培训和考核确保操作人员熟练掌握^[7]。同时，为了应对可能出现的故障和突发情况，企业还应制定应急预案，明确应急处理流程 and 责任人，确保操作人员在面对故障时能够迅速、准确地做出反应，将故障影响降到最低。通过完善的操作规程和应急预案，企业可以进一步提高操作人员的应对能力和设备的安全稳定性。

（三）监督与考核

在人为因素控制策略中，加强对操作人员的监督和考核是确保操作规程得到有效执行的关键环节。企业应建立完善的监督机制，通过现场巡查、视频监控等方式，对操作人员的操作行为进行实时监督，确保其严格按照操作规程进行操作。同时，企业还应定期对操作人员进行考核，评估其操作技能和安全意识水平。考核结果可以作为操作人员绩效奖惩的依据，激励其不断提高自身能力和素质。通过严格的监督和考核，企业可以进一步减少人为失误，提高设备的安全性和稳定性，为生产提供有力保障^[8]。

五、系统风险评估与防范策略

（一）风险评估

为了确保系统的安全稳定运行，企业必须定期进行风险评估。风险评估是一项系统性的工作，旨在识别系统中潜在的安全隐患和故障模式。企业应组织专业人员，运用科学的方法和工具，对系统的各个方面进行全面、深入的分析和评估。通过风险评估，可以发现系统中存在的薄弱环节和潜在风险，为制定防范

措施提供科学依据。同时，风险评估还应结合系统的实际情况和运行要求，制定针对性的防范措施，以减少安全隐患和故障的发生。通过定期的风险评估，企业可以不断提升系统的安全性和稳定性，为生产提供有力保障^[9]。

（二）安全防护

在系统风险评估与防范策略中，安全防护是至关重要的一环。为了保障系统的安全稳定运行，企业必须加强系统的安全防护措施。一方面，企业应建立完善的防火墙体系，通过配置合理的安全策略，有效阻止外部攻击和恶意软件的入侵。另一方面，企业还应部署入侵检测系统，实时监测和分析系统的网络流量和行为，及时发现并处置潜在的安全威胁。同时，企业还应加强对内部人员的安全管理，通过权限控制、操作审计等措施，防止内部误操作对系统的影响。通过加强安全防护，企业可以进一步提升系统的安全性和稳定性，确保生产的安全进行。

（三）应急演练

在系统风险评估与防范策略中，应急演练是不可或缺的一环。为了提高操作人员在面对突发事件时的应对能力和协作能力，企业应定期组织应急演练。应急演练可以模拟真实场景中的突发事件，让操作人员在实际操作中熟悉应急预案的流程和要求。通过演练，操作人员可以深入了解应急处理的方法和技巧，提高应对突发事件的能力^[10]。同时，应急演练还可以加强操作人员之间的沟通和协作，提升团队的整体应急响应能力。

六、结论

燃煤电厂热工自动化系统的安全性与可靠性是电厂稳定运行和生产效率的重要保障。通过实施设备老化管理、控制系统软硬件优化、供电系统可靠性保障、人为因素控制以及系统风险评估与防范等策略，可以有效提升燃煤电厂热工自动化系统的整体性能。未来，应持续关注系统的发展趋势和技术创新，不断优化和改进系统设计和运行管理，以适应电厂生产需求的变化和技术进步的要求。

参考文献

- [1] 郑泽聪. 热控自动化在电厂热工系统中的应用分析 [J]. 电气技术与经济, 2024, (09): 179-181.
- [2] 吴安纬. 浅析电厂热控自动化系统运行的稳定性 [J]. 中国设备工程, 2024, (03): 122-124.
- [3] 高飞. 发电厂热工自动化系统中的新技术应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(08): 236-237. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2023.08.107.
- [4] 梁雪. 火电厂热工自动化 DCS 控制系统的应用浅析 [J]. 中国设备工程, 2023, (14): 53-55.
- [5] 李丽. 电厂热控自动化系统运行稳定性的研究 [J]. 自动化应用, 2023, 64(10): 94-96.
- [6] 孙智清. 电厂热工自动化系统检修常见问题及处理措施分析 [J]. 应用能源技术, 2023, (05): 21-24.
- [7] 梁泉. 电厂热控自动化系统运行的稳定性研究 [J]. 中国设备工程, 2022, (20): 143-145.
- [8] 梁馨月. 电厂热工自动化系统改造技术分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(01): 245-246+252. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.01.087.
- [9] 林木. 电厂热控自动化系统运行的稳定性分析 [J]. 技术与市场, 2022, 29(01): 98-99.
- [10] 李宽广. 火电厂热工自动化系统设计中节能减排技术的应用探析 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (18): 170-171. DOI: 10.13487/j.cnki.imce.021159.

核电厂大修质量大监督网络模式探讨

张燕青

大亚湾核电运营管理有限公司质保部，广东 深圳 518124

摘 要： 换料大修是核电厂一项非常重要的生产活动，每次大修需要执行成千上万的工作，而且部分检修工作由合作伙伴负责，检修过程的质量控制特别关键。通过“电厂—单位—部门—工作层”四层级质量网络有效运作，构建质量大监督网络，可以提前将大量潜在的安全质量问题消灭在萌芽状态，助力大修整体实现质量卓越目标。

关 键 词： 核电厂；大修；质量；大监督网络

Exploration of a Quality Supervision Network Model for Nuclear Power Plant Overhauls

Zhang Yanqing

Quality Assurance Department of Daya Bay Nuclear Power Operation Management Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518124

Abstract： Refueling and overhaul is a critical production activity for nuclear power plants. Each overhaul involves tens of thousands of tasks, some of the maintenance work being carried out by partner organizations. Quality control during these processes is particularly crucial. By effectively operating a four-level quality network comprising "plant-unit-department-work layer," a robust quality supervision network can be established. This network can identify and address numerous potential safety and quality issues early, contributing to the overall goal of achieving excellence in the quality of overhauls.

Keywords： nuclear power plant; overhaul; quality; extensive supervision network

引言

换料大修是核电厂一项非常重要的生产活动，时间紧、参修组织及人员多、交叉作业多和耦合风险控制复杂、工作量大，质量过程控制特别关键^[1]。大亚湾核电经过近百年核电运营的探索，大修质量管理水平有了显著提升。但近几年因人因失误造成大修检修质量问题时有发生，通过目前仅电厂质量保证监督部门独立监督的方式，已无法满足公司高质量发展的需求^[2]。

一、大修质量监督的现状分析

（一）主要依靠电厂质保人员独立监督，未调动参修全员参与监督

质量保证部门作为核电厂的独立监督部门，一直以来根据大修工期的长短，每次大修都投入5-7人执行独立监督^[3]，投入人力有限，无法实现全范围全过程监督；合作伙伴的质量保证部门投入1-2人参与内部监督，同时还需要兼职QC组长等工作；各合作伙伴单位和接口专业未充分利用内部技术力量进行内部自查，内部自查存在随意性，无法获取及分享内部检查数量及质量。

（二）合作伙伴质量监督缺少大修监督目标和监督计划

大修监督目标为监督工作提供方向，监督计划以明确合适的监督时间和重点^[4]，但历史大修监督过程中，合作伙伴的质量保证部门并未制定监督目标和监督计划，导致监督方向不明确，监督重点不突出，监督随意性较强；或者制定的监督目标和监督计划笼统，没有明确具体要监督的内容及频次，监督的项目都是随

机安排，不同阶段的监督重点不突出，且计划编写后无审批控制，不具有操作性。

（三）合作伙伴质量保证人员在大修中实际监督情况缺少展示与评价

历史每家合作伙伴都会配置2-3名质量保证人员，负责大修现场监督，无法查看各家单位质量保证人员实际现场监督的频次、发现的问题数量及质量，也无法衡量合作伙伴质量保证人员在大修监督中的工作质量及履职尽责情况。

（四）合作伙伴质量保证人员发现问题仅用于单位内部反馈

历史每家合作伙伴单位质量保证人员在发现问题后，只是在本单位内部进行分析和反馈，各单位无法获悉其他单位近期都有哪些典型的质量问题，无法做到典型问题的分析反馈价值实时分享，存在明显的单位信息壁垒^[5]。

（五）合作伙伴质量保证人员的培训授权和现场监督能力存在不足

以往各家合作伙伴的质量保证人员由各单位自主选择，本公

作者简介：（1985.01—），男，汉族，广东省揭阳市，大亚湾核电运营管理有限公司，工程师，大学本科，研究方向：核电质量保证。

司未介入管理，人员可能从其他岗位直接转岗过来，因为缺少培训授权及资格管理的相关要求，导致各家合作伙伴质量保证人员的质量意识、现场监督能力参差不齐。

（六）各合作伙伴单位和接口专业的内部自查缺少规范性管理

各合作伙伴单位和接口专业作为相应工作的执行层，对工作过程及技术要求都非常了解，通过内部自查可以发现较多深层次的技术问题，但内部自查存在随意性，无法获得每天检查次数及质量情况，也未将典型问题进行分享，从而供其他单位或专业进行反馈性检查及纠正。

二、核电厂大修质量大监督网络运作模式

为解决上述问题，经过多次大修的实践及摸索，大亚湾公司通过“电厂-单位-部门-工作层”四层级质量管理，实现纵深防御、逐层压实、逐级验证的监督评价体系，通过网络充分发挥提前探测与纠正偏差的作用，全员参与，抓早抓小，实施高透明度下的质量问题探测工作，建立了大修质量大监督网络动作模式（模式图见图1）。该模式要求工作层自主管理，全员自查自纠、自主改进；各部门/单位编写并实施质量管理方案，进行内部质量网络的自我检查评价；各单位的质量保证人员组成大监督网络，协同参与质量网络运作监督评价；电厂质保人员执行独立监督，对质量网络运作监督评价和体系维护。

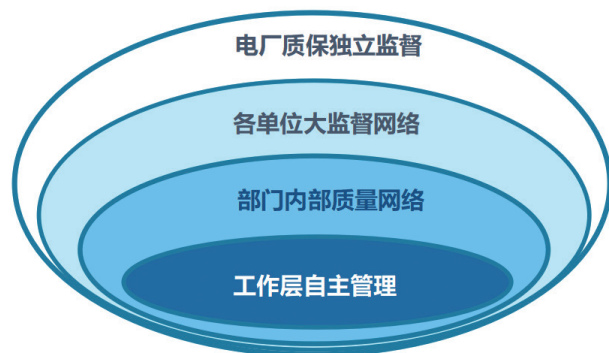


图1 大修质量大监督网络运作模式图

第一圈层是工作层自主管理^[6]。工作层指的是对工作准备和实施产生直接影响的相关人员，包括具体某项工作的准备人、校核审查人、执行人、监督人（监护人、QC），工作层是质量的首要把关屏障，通过自检、互检、独立检查等动作，确保工作准备与执行过程的质量偏差得以及时发现和纠正。

第二圈层是部门内部质量网络。各单位/部门层面通过组织编制与实施质量管理方案来系统性管理本单位/部门相关活动的质量，并通过管理巡视、QC巡视、专项检查等手段，抽查探测相关活动质量管控情况，对工作层（第一圈层）相关岗位的职责履行情况进行评价。

第三圈层是各单位大监督网络。大监督网络由各单位质保等监督人员组成，通过各单位内部质保抽查具体项目执行情况、对组织运作情况进行监督、对重要事件进行调查等方式开展，其目的是评价验证本单位大修质量网络运作有效性以及质量管理方案

落实情况，并对本单位（第一/二圈层）相关岗位履职履责情况进行评价。

第四圈层是电厂质保独立监督^[7]。通过电厂质保独立抽查具体项目执行情况、对组织运作情况进行监督、对重要事件进行调查等方式开展，其目的是评价验证电厂大修整体质量网络运作有效性以及质量管理方案落实情况，并对大修（第一/二/三圈层）相关岗位履职履责情况进行评价。

（一）运作模式的基本原则

网络覆盖了全体参修人员，以标准化的体系监督大纲为依托，组织各层级质量网络编制针对性的监督检查方案，责任到人，并开展逐级监督检查评价，推进质量自主化管理真正落地，实现问题“探测-纠偏-改进”的自我循环，促进质保体系有效性提升。基本原则如下：

（1）全员参与：全员参与是质量管理基本原则之一^[8]，只有发动员工自主管控质量、检查质量、改进质量，才能有效实现质量0人因目标。

（2）责任驱动：责任是核电有别与其他常规企业的明显特征，也是质量自主化管理的关键抓手，通过建立完整的责任链条、履责标准动作和评价机制，确保从前端履责^[9]。

（3）风险导向：识别质量高风险活动和人群，制定针对性管控方案。

（4）逐级监督：通过质量网络层层运作、逐级监督评价，及时探测质量网络运作存在的问题，促进质量网络长久有效运作，持续提升运作效能。

（5）统一目标：统一的目标是各级管理线和监督线能够统一思想、整合资源、协同运作的前提，所有人员围绕质量0人因卓越目标，相互补位、相互支持、相互促进。

（6）可知可控：通过可知、可知、可展示的基本原则，使质量管理状况显性化、可视化、透明化，既使得管理者清楚现场的质量管理状况，有利于作出基于数据的正确决策，同时有利于提升全员自我管理质量的积极性，促进质量网络高效运作。

（二）运作模式的具体措施举例

（1）协助合作伙伴建立监督计划、制定能力提升专项培训计划

大修开始前，为解决合作伙伴质量监督缺少大修监督目标和监督计划的问题，公司牵头对各家合作单位大修监督项目和监督频度提出了具体的要求^[10]。在监督项目选择方面，制定了项目选择的原则，将监督项目划分为必监督项、重点监督项、随机监督项。针对不同的项目类别，给出了不同的监督频次要求，其中的必监督项要求100%检查，重点监督项要求抽查比例不低于50%，随机监督项要求抽查比例不低于20%。各家合作单位按照此原则识别当次大修项目清单，制定监督计划项目清单提交大亚湾公司质保审查通过后方可实施。

合作伙伴质量保证人员的培训授权和现场监督能力存在不足的问题，公司质保制定合作伙伴质量管理人员在本公司质保部进行培养的机制。开发多门现场监督技能培训教材，借助线上、线下开展理论与实操培训，开展相关授权，以促进合作单位监督能力提升。对于培训考核通过人员给予授权，不通过人员调离质保

岗位或延期授权。为统一监督方法，质保完成了现场监督检查指引单的编写，在监督网络群共享，供各家合作单位质保人员现场监督中应用。

(2)通过每天早会和每周协调会展示网络监督情况及典型问题反馈

大修实施过程中，为了解决合作伙伴质量保证人员在大修中实际监督情况缺少展示与评价、发现问题仅用于单位内部反馈的问题，大亚湾公司质保要求各家合作伙伴按大修前制定的监督计划开展现场监督工作，并建立监督跟踪表对各单位质保监督人员进行管理，要求每个监督员当日完成监督后必须录入监督数据，质保每日统计各家单位的监督数据，分类归纳分析，合作单位质保发现的典型问题在次日的大修管理层早上汇报反馈，实现信息共享。每周两次召开质保监督网络协调员会议，会上汇报近期检查进展情况，分享典型问题及检查经验，对于发现问题较好的质保监督人员及时在网络监督群中给与点评，发放大修质保监督给力卡。

(3)通过汇总展示发现问题数量和比值以促进各层级网络加强监督

为了调动各层级网络人员积极开展监督，通过独立监督发现的问题数量与各专业/单位自查发现的问题数量进行比较，来评价网络运作的效能，并作为验证和推进责任落实的手段。如各层级质量网络监督检查结果按1:7:49的总体数量分布原则进行评价

(即电厂质保独立监督发现1个问题时，相关合作单位内部质保能发现7个问题，相关单位内部自查自纠能发现49个问题)，评价结果在管理周会等渠道进行展示，以便管理者及时采取行动，督促各层级质保体系有效发挥作用。

三、核电厂大修质量大监督网络运作成效

大亚湾公司在 D223和 D123两个三十年大修推动质量大监督网络，调动各层级网络人员实施监督检查次数累计超5万人次，提前消除大量在萌芽状态的质量问题，并通过一系列措施，最终两个三十年大修的全部质量指标都达到了卓越目标。

四、结论

大亚湾公司通过大修质量大监督网络的建立，实现纵深防御、逐层压实、逐级验证的监督评价体系，通过网络充分发挥提前探测与纠正偏差的作用，全员参与，抓早抓小，实施高透明度下的质量问题探测工作，提前将大量潜在的质量问题消灭在萌芽状态，助力大修整体实现质量卓越目标。同时此模式为一种通用的管理模式，进行适当修改并推广到日常相关生产活动的管控中，具有较好的推广和复制价值。

参考文献

[1] 管云龙. 大修管理 [M]. 原子能出版社, 2003年.
[2] 赵德智. 核电厂换料大修中质量保证监督工作方法的探讨 [J]. 福建质量管理, 2019(15): 155-156.
[3] 葛瑾骏, 范希森. 以流程为核心的大修质量保证监督模式探索 [J]. 大亚湾核电期刊. 2016(3):71-73.
[4] 王威. 核电机组换料大修质量监督实践 [J]. 中国科技信息. 2016(11):109-110.
[5] 宋媛媛. 泰山核电大修质保项目制管理方法和实践 [J]. 管理学家, 2018(9):4.
[6] 克里斯·麦克切斯尼等. 高效能人士的执行4原则 [M]. 中国青年出版社, 2023年.
[7] 程梓琨. 核电厂加强大修质保监督管理质量的方法 [J]. 设备管理与维修, 2021(16):72-73.
[8] 中国质量协会. 全面质量管理(第四版) [M]. 中国科学技术出版社, 2022年.
[9] 黄国韶, 陈凤杰. 核电厂群堆模式下的大修质量保证监督 [J]. 科技视界, 2016(25):2.
[10] 章拓鑫, 李娟, 朱玉隆等. 核电厂大修工作文件包质保监督方式的探索与实践 [J]. 中国核电, 2022(5):5.

浅谈调度精细化管理在煤矿安全生产中的作用

谢兰新

乌苏四棵树煤炭有限责任公司，新疆 乌苏 833000

摘 要： 鉴于当前煤矿安全事故频发、形势严峻的现状，亟需采取有力措施提升安全管理水平。作为煤矿安全生产管理的核心，调度管理的科学化、精细化程度备受关注。本文首先阐述了调度精细化管理对于强化安全风险管控、优化生产组织模式、提升本质安全水平的重要意义。然后，全面分析了调度精细化管理在煤矿安全生产中的具体应用，包括健全制度体系、优化计划编排、创新管控方式等方面。最后，就如何进一步深化调度精细化管理、助力煤矿高质量发展提出建议，以期为煤矿企业安全管理实践提供参考。

关 键 词： 煤矿；安全生产；调度管理；精细化管理；作用

Discussion on the Role of Refined Scheduling Management in Coal Mine Safety Production

Xie Lanxin

Wusu Sikeshe Coal Co., Ltd. Wusu, Xinjiang 833000

Abstract： Given the current situation of frequent and severe coal mine safety accidents, it is urgent to take effective measures to improve the level of safety management. As the core of coal mine safety production management, the scientific and refined level of scheduling management has attracted much attention. This article first elaborates on the importance of refined scheduling management in strengthening safety risk control, optimizing production organization models, and enhancing intrinsic safety levels. Then, a comprehensive analysis was conducted on the specific application of refined scheduling management in coal mine safety production, including improving the institutional system, optimizing plan arrangement, and innovating control methods. Finally, suggestions are put forward on how to further deepen the fine management of scheduling and assist in the high-quality development of coal mines, in order to provide reference for the safety management practice of coal mining enterprises.

Keywords： coal mine; safety production; scheduling management; refined management; effect

引言

煤矿作为我国重要的基础能源产业，在国民经济发展中占据着举足轻重的地位。然而，由于煤矿生产的特殊性和复杂性，安全生产形势依然严峻。近年来，全国煤矿事故多发频发，给国家和人民群众的生命财产安全带来重大损失。如何有效遏制重特大事故，防范化解安全生产风险，提升本质安全水平，已成为摆在煤炭企业面前的重大课题^[1]。在此背景下，调度管理作为煤矿安全生产管理的核心和关键，其科学化、精细化水平备受关注。

一、调度精细化管理在煤矿安全生产中的作用

（一）强化风险分级管控，筑牢安全防线

调度精细化管理通过强化风险分级管控，为煤矿安全生产筑牢了坚实防线。它要求煤矿企业全面识别和评估生产过程中的风险因素，运用科学方法对各类风险进行分级、分类管控。在此基础上，构建多维度、立体化的风险防控体系，将重大风险点、关

键薄弱环节作为调度管理的重中之重，实施精准监测和动态跟踪，及时发现和消除事故隐患^[2]。这种基于风险的精细化调度模式，从源头上遏制和杜绝了安全生产事故的发生。它促使煤矿企业树立风险意识，强化风险管理，在生产过程中始终保持高度警惕，真正将安全生产落到实处。同时，风险分级管控为调度决策提供了依据，使调度指令更加科学、精准，有效提升了调度管理水平。可以说，强化风险分级管控是调度精细化管理发挥作用的

作者简介：谢兰新（1982.04-），男，汉族，河南省郸城县人，大学本科，研究方向：煤矿安全管理方面。

关键所在，是保障煤矿安全生产的有力抓手。

（二）优化生产组织模式，提升本质安全水平

调度精细化管理通过优化生产组织模式，在提升煤矿本质安全水平方面发挥了重要作用。传统煤矿生产组织存在计划性不强、衔接不畅等问题，导致生产秩序混乱，安全隐患频发。调度精细化管理从全局出发，统筹兼顾各生产环节，精心编排采掘接续、设备运行等计划，实现了采掘平衡、接续有序，从根本上消除了生产安全隐患^[3]。同时，调度精细化管理强化了人机环管综合防控。通过合理调配人力资源，规范员工操作行为，加强重点区域管控，有效遏制了“三违”行为；加强机电、供电、通风等系统管理，提高了系统运行的本质安全水平。这些措施最大限度地降低了人的不安全行为和物的不安全状态导致事故的风险。此外，调度精细化管理还为安全管理注入了新动力。一些煤矿企业利用物联网、大数据、人工智能等技术，建立起智能化调度管控平台，实现了风险隐患的实时感知、智能预警和精准处置。这种创新模式推动煤矿开采实现由被动应对向主动预防转变，极大提升了企业抵御和化解安全风险的能力。

（三）深化标准化管理，激发内生安全动力

标准化是实现精细化管理的基础和前提。调度精细化管理以标准化为抓手，在生产各环节、各层面建立起全面系统的标准体系，明确了安全生产责任，规范了生产调度流程，为调度工作提供了可遵循、可考核的准绳，使安全管理有据可依，不留盲区和死角^[4]。标准化为调度人员和一线员工的安全行为提供了明确指引。通过建立健全安全生产规章制度和操作规程，使每一项工作、每一个环节、每一道工序都有规可循、有章可依，最大限度减少违规违章行为。同时，调度精细化管理注重将安全标准内化为全员的自觉行动。企业通过加强培训教育，组织安全知识竞赛、事故案例警示等活动，增强员工安全意识和技能，增强责任感和使命感，更为重要的是，标准化管理强化了安全绩效考核和责任追究。调度精细化管理将安全生产目标层层分解，纳入绩效考核体系。对达不到标准要求的，严格实施问责追究，以严厉的奖惩措施传导压力，倒逼责任落实。在标准引领和绩效牵引下，调度人员、一线员工严格按章操作、遵章守纪蔚然成风，有力促进了企业安全文化建设，激发了煤矿安全发展的内生动力。

二、调度精细化管理在煤矿安全生产中的应用

（一）健全调度管理制度体系，夯实安全基础

完善的调度管理制度是实现精细化管理、保障煤矿安全生产的重要基石。建立健全以安全为导向的调度管理制度体系，是规范调度行为、提高调度管理水平的关键举措。这一制度体系应涵盖调度机构设置、人员配备、职责权限、指挥流程、纪律要求、奖惩问责等方面，构建起严密、规范、有序的调度工作运行机制^[5]。健全的制度能够有效弥补人治的随意性和不确定性，形成行之有效的长效机制，为调度工作的标准化、程序化、精细化奠定坚实基础，从而最大限度地消除安全隐患，把各类事故风险降到最低。

具体而言，煤矿企业应从以下几个方面着手，健全完善调度管理制度：一是明确调度管理架构，合理设置调度机构，配备足够数量、结构合理的专职调度人员，细化岗位职责，厘清管理权限。二是规范调度指挥流程，制定可操作、易执行的调度工作规程，对事故灾难预警、应急处置、信息报告、安全确认、指令下达等关键环节提出明确要求^[6]。三是强化调度纪律，建立健全调度值班、会议、文档管理、交接班等各项规章制度，做到令行禁止、令停即停。四是严格责任追究，将调度工作纳入安全生产责任制考核，对玩忽职守、违规指挥等行为从重处罚，以责任倒逼调度规范。制度的生命力在于执行，在健全调度管理制度的同时，还要注重抓好制度的贯彻落实。要加强制度的宣贯培训，使调度人员充分理解制度内涵，熟练掌握制度规定的程序和方法。要狠抓制度执行情况的监督检查，加大违规行为的查处力度，坚决杜绝制度执行虚化、空转现象。要定期评估制度执行效果，及时发现问题，持续改进完善制度。

（二）优化生产计划编排，实现系统协同

煤矿安全生产的精细化管理，要求在生产组织方面做到统筹兼顾、科学安排、合理衔接。传统的生产计划编排往往存在全局观念不强、系统思维缺乏等问题，导致采掘接续不畅、生产组织紊乱，极易引发安全事故。为此，煤矿企业必须树立系统优化理念，通过精心编排生产计划，优化资源配置，协调各生产要素，实现采、掘、机、运、通等系统间的同步联动、高效协同，从而最大限度地消除生产过程中的不安全因素，把事故风险控制在萌芽状态^[7]。

煤矿调度部门在编排生产计划时，可以从以下几个方面着手：

1. 统筹规划采掘衔接：要以保障采掘平衡、采掘接续为目标，合理安排采区布局和采掘比例，科学测算工作面产能，严格控制工作面数量，做到采掘矿量、掘进进度、采切眼进度的动态匹配，避免采多掘少或掘多采少现象^[8]。同时，要加强地质条件复杂区域、采掘接续地段的会审把关，制定专项施工方案，确保采掘作业安全平稳进行。

2. 协调机电设备运行：机电设备是煤矿生产的重要保障，其安全可靠运行直接关系到整个生产系统的正常运转。调度部门要充分评估设备状态，合理安排检修计划，确保安全设备、重要设备的检修质量和运转效率。要加强设备运行参数监测，及时发现异常情况，制定应急预案，避免设备带病运转或非计划停机影响生产。

3. 优化辅助系统调度：煤矿生产离不开通风、压风、排水、供电等辅助系统的有力支撑。调度部门要统筹兼顾辅助系统，科学编排作业计划，严格落实各项安全技术措施。比如，精心调配通风系统，保证各采区、工作面通风质量；合理安排压风机组启停，避免停风作业；加强排水系统巡检，及时处理积水；优化供电方式，控制非计划停电等。

4. 强化生产过程管控：调度部门要加强生产计划执行情况的跟踪检查，对照计划及时纠偏，对重点工序、关键环节实施全过程动态管控。要严格兑现安全确保措施，加大现场安全检查力

度，及时消除事故隐患。要健全信息共享机制，加强与相关部门的沟通协调，形成生产组织合力，确保计划顺利实施。

只有树立全局优化、系统协同的理念，从点的合理安排到线的有序衔接，再到面的整体优化，才能实现采掘平衡有序、设备运行可靠、系统保障有力的良好局面。这对于从源头上防范化解煤矿安全生产重大风险，推动本质安全水平不断提升具有重要意义。

（三）创新调度管控方式，提高防灾避险能力

创新调度管控方式，提高防灾避险能力是煤矿安全精细化管理的重要方面。传统的调度管控模式已难以适应日益复杂的生产环境和安全管理需求，亟需以新理念、新技术、新方法为支撑，全面创新调度管控手段，切实增强煤矿灾害预警、应急处置和风险管控能力^[9]。

具体而言，运用物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术武装调度管理，是创新之道。通过在采掘工作面、巷道等重点区域部署压力、瓦斯、水害等多参数监测传感器，构建灾害监测与预警体系，实现灾害征兆的早发现、早预报、早处置。同时，建设集环境感知、数据分析、辅助决策于一体的智能化调度平台，打造虚实交互的矿山孪生系统，增强调度工作的精准性、时效性。此外，大力推行远程智能化生产，利用5G、VR/AR等新技术，将地面调度中心与井下作业现场无缝连接，实现采掘设备的远程监控、故障诊断与自动化操作，最大限度减少一线员工与危

险环境的直接接触^[10]。同时，建立完善的调度大数据管理机制，加强生产全流程数据采集、挖掘与分析，为调度优化决策、方案编制等提供数据支撑，提升调度工作的科学化、精细化水平。调度管控方式的变革创新绝非一蹴而就，既需要企业加大资金投入、完善技术设施，也需要调度人员更新理念、提升技能，更需要全员积极参与、形成合力。

三、结束语

调度精细化管理是煤矿企业提升安全生产管理水平，实现本质安全的重要途径和有效抓手。通过强化风险分级管控、优化生产组织模式、创新管理方式方法、加强队伍能力建设等举措，为煤矿安全生产保驾护航。新时代煤矿企业高质量发展对安全生产提出了更高要求。面对新形势、新任务、新挑战，煤矿企业必须以时不我待的紧迫感，以改革创新、奋发有为的责任感，坚定不移推进调度精细化管理，努力开创煤矿安全发展新局面。实践证明，调度管理的每一次突破和进步，都将引领煤矿安全生产迈上新的台阶。站在“双碳”目标的新起点，煤矿企业唯有不断深化调度精细化管理，持续优化生产运行、提升整体效能，才能在高质量发展轨道上行稳致远，为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系贡献应有力量。

参考文献

[1] 张丹丹. 煤矿综采设备安全生产及精细化管理方法研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(7): 37.
[2] 龙守伦. 煤矿通风安全的现代化管理 [J]. 石油石化物资采购, 2024(4): 155-157.
[3] 韩海刚, 韩文庭, 郭辉, 等. 浅析煤矿经营管理中的精细化管理 [J]. 电脑爱好者 (校园版), 2023(9): 223-224.
[4] 杨昶. 高质量发展下的煤矿安全装备检测检验 [J]. 陕西煤炭, 2023, 42(1): 210-212.
[5] 汪杰, 李晓华, 郑功勋, 等. 基于云平台的煤矿智能运维服务系统研究 [J]. 煤矿机械, 2023, 44(8): 191-194.
[6] 李宝华. 新形势下煤矿安全生产标准化管理模式及建设探讨 [J]. 户外装备, 2023: 207.
[7] 张海林. 基于本质安全的煤矿安全精细化管理应用研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(15): 99-101.
[8] 杨光东. 煤矿企业安全环保精细化管理实践 [J]. 环境经济, 2023(9): 48-49.
[9] 刘波. 大湾煤矿瓦斯抽采精细化示范实践研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(003): 000.
[10] 杨征, 杨小勇, 王宇, 等. 区域安全评估模型在煤矿安全管理中的应用研究 [J]. 工矿自动化, 2024, 49(12): 94-101, 129.

城镇燃气工商业用户运行安全风险防范研究

赵冀川

高安市天然气有限公司，江西 高安 330811

摘 要：近年来，我国燃气消费量持续以较高速度增长，也给燃气安全运行带来挑战，特别是工商业用户燃气事故极易造成重大生产安全事故发生，给人民生命安全财产损失造成重大损失。文章分析了城镇燃气工商业用户特点，论述了城镇燃气工商业用户安全管理的重要性，剖析了城镇燃气工商业用户风险及原因，并提出了几点城镇燃气工商业用户安全管理措施。得出：城镇燃气企业在智慧燃气、设计建设、检查培训、专岗负责、分类管理等五个方面进行工商业用户管理，才能降低消除燃气事故，促使燃气行业的安全健康发展。

关 键 词：燃气爆炸；用户管理；本质安全；分类管理；技能培训

Research on the Operation Safety Risk Prevention of Urban Gas Industrial and Commercial Users

Zhao Jichuan

Gao'an City Natural Gas Co., LTD. Gao'an, Jiangxi 330811

Abstract： In recent years, China's gas consumption continues to grow at a high speed, which also brings challenges to the safe operation of gas. In particular, gas accidents for industrial and commercial users are easy to cause serious production safety accidents, causing heavy losses to the loss of people's life safety and property. This paper analyzes the characteristics of urban gas industrial and commercial users, discusses the importance of safety management of urban gas industrial and commercial users, analyzes the risks and reasons of urban gas industrial and commercial users, and puts forward several safety management measures of urban gas industrial and commercial users. It is concluded that urban gas enterprises manage industrial and commercial users in five aspects: smart gas, design and construction, inspection and training, special post responsibility, and classified management, so as to reduce and eliminate gas accidents and promote the safe and healthy development of the gas industry.

Keywords： gas explosion; user management; intrinsically safety; classified management; skill training

引言

随着我国已经进入碳排放达峰的关键时期，“碳达峰、碳中和”对清洁能源行业中长期发展产生一系列深刻的影响。近年来，我国天然气消费量持续以较高速度增长。根据国家发改委公布的数据，2022年我国天然气消费量为3,663亿立方米，根据国家能源局预测数据，预计我国2025年天然气消费规模有望达到4300-4500亿立方米，2030年天然气消费规模将达到5500-6000亿立方米，工商业燃料、城市天然气和天然气发电成为推动我国天然气市场增长的主要动力。

一、城镇燃气快速发展，也给燃气安全运行带来挑战

根据《全国燃气事故分析报告(2022年·全年综述)》2022年全年共收集到媒体报道的国内(不含港澳台)燃气事故802起，造成66人死亡，487人受伤，其中较大事故10起。与燃气相关的交通运输事故60起，造成7人受伤。事故分布在全国30个省份^[1]、249个城市。按气源种类统计：全年发生天然气事故270

起，死亡18人，受伤89人；液化石油气事故450起，死亡45人，受伤294人；气源待核实事故82起，死亡3人，受伤104人。按事故类型统计：居民用户事故457起，死亡35人，受伤307人；工商用户事故123起，死亡28人，受伤153人，其中，餐饮用户事故104起，死亡28人，受伤143人；管网事故212起，死亡3人，受伤26人；厂站事故10起，受伤1人^[2]。

2023年6月21日20时40分许，宁夏银川市兴庆区富洋烧

作者简介：赵冀川(1989.05-)，男，汉族，河北武邑人，工程师，大学本科，研究方向：城市燃气、城镇燃气管道保护、管道工程施工、管道运行安全管理。

烤店发生燃气爆炸事故。事故已造成31人死亡、7人受伤。事故发生后，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平高度重视并作出重要指示，宁夏银川市兴庆区富洋烧烤店发生燃气爆炸事故，造成多人伤亡，令人痛心，教训深刻。要全力做好伤员救治和伤亡人员家属安抚工作，尽快查明事故原因，依法严肃追究责任。通过事故和《全国燃气事故分析报告(2022年·全年综述)》数据不难发现工商业用户燃气事故极易造成重特大生产安全事故发生的最主要因素^[3]。一件件血淋淋燃气爆炸事故，也给当今城镇燃气管理企业单位和工商业用户提出更高要求。城镇燃气在安全运行中燃气供需双方检查管控不力，会形成更多安全隐患严重影响燃气安全运行。当前随着工商业用气快速回升，用气量大幅增加，燃气安全将面临更大压力和挑战，燃气安全形势严峻复杂。要牢固树立安全发展理念，坚持人民至上、生命至上，以“时时放心不下”的责任感，抓实抓细工作落实，盯紧苗头隐患，全面排查风险制定工作方案。重点加强工商业用户检查排查安全隐患，有效防范重特大生产安全事故发生，切实保障人民群众生命财产安全^[4]。

通过多年来与燃气工商用户调研中发现易导致事故的原因有以下几个方面：一是工商业用户内燃气管道设计不合理，导致从根本上存在安全隐患风险；二是施工单位未严格按照设计要求进行施工，导致安全隐患；三是工商业用户因自己不是燃气专业人员为由导致推诿、不想管、甚至不管，使工商业用户内燃气管道、燃气设备管理安全意识不强，存在厂内私自占压、改管等安全隐患；四是工商业用户一线负责维护人员更换频繁，导致燃气安全管理断档存在安全隐患风险。通过梳理上述工商业用户存在的问题，城镇燃气公司与工商业用户可以通过以下几个方面提升安全管理，保障工商业用气安全^[5]。

二、城镇燃气企业通过智慧燃气建设提升工商业用户安全管理

城镇燃气企业可以基于智慧燃气安全监控平台通过用户燃气监控设备数据实时上传，服务器将数据采集和存储分析技术，可以有效解决工商业燃气使用过程中的压力不稳、压力过低、超压送气、燃气泄露等危险情况，将燃气泄漏和安全隐患风险降到最低。通过大数据与工商业用户相关智能设备连接实现自动化技术应用。工商业用户场所的燃气泄漏达到实时警报，以及对燃气泄漏位置的准确定位，实现自动化关闭燃气总阀门并向报警用户和城镇燃气企业发送报警信息，有效缩短城镇燃气企业应急响应和故障修复时间。方便工商业用户实时通过手机智能终端等及时查看燃气的使用情况，更好地保障工商业用户燃气使用的安全性，从技术角度完善燃气管理的安全性机制，有效减少燃气事故^[6]。

三、工商业用户在设计建设时期加强管理提高本质安全

因工商业用户每个现场情况都不一样，无规律可言，且涉及

人员密度大，一旦发生事故后果十分严重，这就要求城镇燃气企业在给工商业用户设计阶段按照《城镇燃气设计规范》要求进行加强管道线路设计和核审，特别是在保障安全的前提下在考虑节省资金优化线路。工商业用户内管道设备设计审核时要提高燃气管线设备的本质安全，既考虑管线阀门等设备方便操作，又考虑管线安全稳固。在人员密集场所要充分利用泄漏报警、自动切断和防爆通风连锁装置保障用气安全，建设阶段要严格按照设计图纸进行燃气管道施工，确保工商业用户内燃气管道设备的本质安全^[7]。

四、城镇燃气企业定期开展检查培训提升用户安全管理水平

城镇燃气企业对工商业用户基本采用每半年开展一次入户安检，如果工商业用户完全依托城镇燃气每半年的检查周期，来检查发现处理安全隐患，肯定不能达到及时发现及时处理目的。为保障工商业用户用气安全从以下几个方面开展燃气设备管理工作：一是重点要将工商业用户内燃气管线设备日常安全检查、隐患排查和维护保养工作落实给燃气使用管理人员^[8]。工商业用户一线生产管理人员每日在现场对燃气管线设备更加熟悉，只有加强定期日常燃气检查，及时发现安全隐患上报给城镇燃气企业，联合消除燃气安全隐患，才能保障工商业用户的用气安全。二是城镇燃气企业要加大对工商业用户安全培训，提高工商业用户安全用气管理水平。通过培训提升工商业用户燃气管理人员、现场操作人员的安全意识、加强燃气安全隐患的识别能力以及培训紧急情况下的应急措施能力。

五、工商业用户推动开展燃气管理专（兼）岗机制

城镇燃气企业配合工商业用户开展设立燃气管理专（兼）岗，城镇燃气企业有义务定期开展培训，让工商业用户燃气管理专（兼）岗掌握必备的燃气安全检查基础知识和用户内燃气管网走向、燃气设备设施正确使用操作和维护保养工作等工作。工商业用户燃气管理专（兼）岗每日定期巡查厂内计量调压撬装设备、检查埋地管线标识、架空管线运行状态、管线设备泄漏和其他燃气燃烧装置设备运行状态，每月定期维护保养调压设备、法兰连接螺栓、丝扣连接燃气管道进行保养检查。只有把工商业用户内每项燃气管理工作都落实到人，固定人员管理，才能将工商业用户用气安全工作落实落细^[9]。

六、城镇燃气企业对工商业用户分类考核管理

城镇燃气运行企业可以将工商业用户分类建档，将每家工商业用户半年进行一次考核评估，通过考核评估将用户进行分类管理。工商业用户有专兼职燃气管理人员、燃气相关设备维护较好用户列为A类；将工商业用户不设立专兼职燃气管理人员、对燃气相关设备维护维护欠佳、存在安全风险（未达到安全隐患）燃

气安全意识淡薄的用户分为 B 类。城镇燃气企业针对 A 类、B 类工商业用户分类管理工作：一是可以在合同中约定对于工商业用户在用气期间未履行本企业内相关燃气设备的运行管理的 B 类用户，提高销售单价，倒逼工商业用户重视燃气设备安全管理。对工商业燃气设备维护较好 A 类用户适当降低销售燃气销售单价，为真抓燃气安全、落实安全隐患排查的工商业用户降低运行成本，通过实实在在的优惠引导工商业用户落实燃气责任，共谋安全发展；二是燃气企业对工商业燃气设备维护较好 A 类用户定期检查须符合相关规定要求开展定期检查。针对安全意识淡薄的 B 类工商业燃气用户，城镇燃气企业应加强巡查频次（可根据现场情况确定频次，但不少于每月一次），对于发现安全风险（未达到安全隐患）及时下发隐患整改，消除安全风险，对于发现不配

合、不处理工商业燃气企业，根据《城镇燃气管理条例》要求及时进行停止供气，确保工商业用户的人身财产安全^[10]。

七、结论

工商业是当地经济发展主旋律，燃气安全涉及城市里的每一个人，随着经济复苏，燃气事故频发，只有城镇燃气企业做好引导，当地政府加强监管，工商业用户提高安全意识，只有通力合作配合共同加强对工商业燃气用户的管理，才能降低消除燃气事故，促使燃气行业的安全健康发展。城镇燃气企业不但有责任为当地政府降低燃气安全风险和防止燃气安全事故发生，也要为当地营造良好的营商环境和经济发展奉献力量。

参考文献

-
- [1] 方召君. 城镇燃气管道阀门设计选型研究 [J]. 大众科技, 2023, 25(11): 69-71.
- [2] 张斌. 城镇燃气管道安全监管现状及建议实践思考 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022(14): 58-59.
- [3] 卓亮. 城镇燃气管道安全隐患与风险管控 [J]. 化工管理, 2020(01): 67-68.
- [4] 王文想. 数据分析技术在城镇燃气管道安全管控的应用 [J]. 煤气与热力, 2023(11): 40-43.
- [5] 郝鹏骞. 城镇燃气管道安全隐患与风险管控 [J]. 建材与装饰, 2020(19): 229+231.
- [6] 王文想. 数据分析技术在城镇燃气管道安全管控的应用 [J]. 煤气与热力, 2023, 43(11): 40-43.
- [7] 田川, 宋悦, 王一君. 城镇燃气管网安全运营的问题及解决措施研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(19): 95-97.
- [8] 张鹏, 肖博文, 宋文琦, 等. 城镇燃气管道个人及社会风险可接受标准研究 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10): 1-7.
- [9] 吕达, 韩非, 刘传庆. 城镇燃气管道数据对齐方法及应用研究 [J]. 中国特种设备安全, 2023, 39(S2): 21-26+47.
- [10] 崔文豪, 江国建. 城镇燃气无人值守调压计量撬的应用前景 [J]. 山东化工, 2023, 52(18): 198-200+204.

基于数据分析的汽车零部件供应商质量管理与评价研究

路文

天津市新琦汽车服务有限公司, 天津 300000

摘 要：经济全球化加剧了汽车行业竞争，竞争焦点已从制造商间转向供应链间。汽车零部件供应商作为供应链的关键环节，其质量管理水平直接影响汽车制造商的竞争力。本文首先分析汽车零部件供应商质量管理现状，指出存在的问题，并探讨数据挖掘技术在质量管理中的应用。接着，构建基于数据挖掘技术的质量管理系统框架，涵盖数据收集与预处理、算法选择、模型构建等。进一步深入研究，建立了质量评价指标体系，并提出基于关联规则挖掘和聚类分析的评价方法。最后，对全文进行了总结，并对未来的研究方向进行了展望。

关 键 词：汽车零部件；供应商质量管理；数据挖掘技术；质量评价指标体系；关联规则挖掘

Research on the Quality Management and Evaluation of Auto Parts Suppliers Based on Data Analysis

Lu Wen

Tianjin Xinqi Automobile Service Co., Ltd. Tianjin 300000

Abstract： Economic globalization has intensified the competition in the automobile industry, and the focus of competition has shifted from between manufacturers to between supply chains. As a key link of the supply chain, the quality management level of auto parts suppliers directly affects the competitiveness of automobile manufacturers. This paper first analyzes the current situation of quality management of auto parts suppliers, points out the existing problems, and discusses the application of data mining technology in quality management. Then, the quality management system framework based on data mining technology is constructed, covering data collection and pre-processing, algorithm selection, model construction and so on. The quality evaluation index system was established, and the evaluation method based on association rule mining and cluster analysis was proposed. Finally, the paper is summarized and prospects the future research directions.

Keywords： auto parts; supplier quality management; data mining technology; quality evaluation index system; association rule mining

引言

随着汽车行业的快速发展和市场竞争的加剧，汽车制造商对零部件供应商的质量要求越来越高。传统的质量管理方法往往依赖于人工经验和统计工具，难以全面、准确地反映供应商的质量水平。数据挖掘技术作为一种新兴的数据分析手段，可以从大量的数据中提取有价值的信息和知识，为质量管理提供了新的思路和方法。本文旨在运用数据挖掘技术对汽车零部件供应商的质量数据进行深入分析和挖掘，构建科学的质量评价指标体系，提出有效的质量评价方法，为汽车制造商提供决策支持，提高供应链的整体质量水平^[1]。

一、汽车零部件供应商质量管理现状分析

（一）汽车零部件供应商质量管理概述

汽车零部件供应商质量管理是指汽车制造商为确保其零部件供应商提供的产品符合规定的质量标准、性能要求和交货期等要求，而实施的一系列管理活动。这些活动包括供应商的选择、评价、监控和改进等。

汽车零部件供应商的质量水平直接影响到汽车制造商的产品质量和市场竞争力。如果零部件存在质量问题，不仅会导致汽车制造商的产品召回、客户投诉等负面影响，还会增加其生产成本

和维修成本。因此，加强汽车零部件供应商的质量管理对于提高汽车制造商的产品质量和竞争力具有重要意义。

（二）汽车零部件供应商质量管理存在的主要问题

1. 质量管理体系不完善

一些汽车零部件供应商尚未建立完善的质量管理体系，缺乏系统的质量管理流程和规范。这导致在质量管理过程中存在漏洞和缺陷，难以保证零部件的质量稳定性和一致性。

2. 质量数据收集和分析能力不足

一些汽车零部件供应商在质量数据收集和分析方面存在不足，无法全面、准确地掌握零部件的质量状况。这导致难以及时

发现和解决质量问题，也无法为质量改进提供有力的数据支持。

3. 质量评价方法和标准不统一

当前，汽车制造商对零部件供应商的质量评价方法和标准存在不统一的问题。不同的汽车制造商可能采用不同的评价方法和标准，这导致供应商在应对不同客户时存在困难，也不利于供应链的整体质量提升。

4. 质量信息沟通和协同不足

汽车制造商和零部件供应商之间的质量信息沟通和协同存在不足。双方之间缺乏及时、有效的信息交流，导致在质量问题出现时难以及时解决和处理。同时，双方在质量改进方面的协同也存在不足，难以形成合力推动供应链整体质量的提升^[9]。

（三）数据挖掘技术在质量管理中的应用

1. 质量数据分析和预测

数据挖掘技术可以对大量的质量数据进行分析和挖掘，发现其中的规律和趋势，为质量预测提供有力的支持。例如，可以通过时间序列分析等方法对零部件的质量数据进行预测，及时发现潜在的质量问题。

2. 质量异常检测和诊断

数据挖掘技术可以应用于质量异常检测和诊断方面。通过对质量数据进行聚类分析、关联规则挖掘等方法，可以发现异常数据点和异常模式，进而对质量问题进行定位和诊断。

3. 质量改进和优化

数据挖掘技术还可以应用于质量改进和优化方面。通过对质量数据进行关联分析、因子分析等方法，可以发现影响质量的关键因素和因素之间的关系，为质量改进提供有力的支持。同时，还可以利用数据挖掘技术对质量改进方案进行优化和评估，提高改进效果。

二、基于数据挖掘技术的汽车零部件供应商质量管理体系构建

（一）系统框架设计

基于数据挖掘技术的汽车零部件供应商质量管理体系框架主要包括以下几个部分：

1. 数据收集与预处理模块

该模块负责收集汽车零部件供应商的质量数据，并进行预处理和清洗。数据可以来源于供应商的生产记录、检测记录、客户投诉等渠道。预处理过程包括数据清洗、数据转换和数据集成等步骤，以确保数据的质量和一致性。

2. 数据挖掘算法选择模块

该模块负责选择适合汽车零部件供应商质量管理的数据挖掘算法。根据具体的需求和数据特点，可以选择不同的算法进行挖掘和分析。例如，可以选择关联规则挖掘算法发现质量数据之间的关联关系；选择聚类分析算法对供应商进行分类和评估等。

3. 模型构建与验证模块

该模块负责构建质量管理的数据挖掘模型，并进行验证和优化。在构建模型时，需要根据具体的问题和数据特点选择合适的模型和参数。然后，利用验证数据集对模型进行验证和优化，以确保模型的准确性和可靠性^[9]。

4. 结果解释与应用模块

该模块负责对挖掘结果进行解释和应用。挖掘结果可能包括质量问题的原因、影响因素、改进措施等。通过对挖掘结果的解释和应用，可以为汽车制造商提供决策支持，帮助其改进质量管理流程和提高产品质量^[4]。

（二）数据挖掘算法的选择与实现

在选择数据挖掘算法时，需要考虑算法的有效性、准确性和可解释性等因素。以下是一些常用的数据挖掘算法及其在汽车零部件供应商质量管理中的应用：

1. 关联规则挖掘算法

关联规则挖掘算法可以发现质量数据之间的关联关系。例如，可以分析不同零部件之间的故障关联性，找出常见的故障模式和故障原因。通过关联规则挖掘，汽车制造商可以更好地理解零部件之间的相互影响关系，为质量改进提供有力的支持。

2. 聚类分析算法

聚类分析算法可以对零部件供应商进行分类和评估。通过对供应商的质量数据进行聚类分析，可以将供应商分为不同的类别，如优秀供应商、一般供应商和差劲供应商等。这有助于汽车制造商更好地了解供应商的质量水平，为其选择和评价供应商提供有力的支持。

3. 分类算法

分类算法可以对质量数据进行分类和预测。例如，可以根据历史数据建立分类模型，对新的零部件进行分类和预测。这有助于汽车制造商及时发现潜在的质量问题，并采取相应的措施进行处理。

4. 时间序列分析算法

时间序列分析算法可以对质量数据进行时间序列分析和预测。通过对零部件的质量数据进行时间序列分析，可以发现质量数据的变化趋势和周期性规律。这有助于汽车制造商更好地了解零部件的质量稳定性，为质量改进提供有力的支持^[5]。

（三）质量数据收集与预处理

质量数据收集与预处理是构建基于数据挖掘技术的汽车零部件供应商质量管理体系的关键步骤之一。以下是一些常用的数据收集与预处理方法：

1. 数据收集方法

数据收集方法包括手动输入、自动采集和第三方数据获取等。手动输入是指通过人工方式将质量数据输入到系统中；自动采集是指利用传感器、检测设备等自动采集质量数据；第三方数据获取是指从其他渠道获取相关的质量数据，如客户反馈、市场调研等。

2. 数据预处理方法

数据预处理方法包括数据清洗、数据转换和数据集成等。数据清洗是指对原始数据进行处理，去除重复数据、缺失数据和异常数据等；数据转换是指将原始数据转换为适合数据挖掘算法处理的形式；数据集成是指将不同来源的数据进行整合和集成，形成完整的数据集。

3. 数据质量评估方法

数据质量评估方法包括完整性检查、准确性检查和一致性检查等。完整性检查是指检查数据是否完整，没有遗漏；准确性检查是指检查数据是否准确，没有错误；一致性检查是指检查数据

是否一致，没有矛盾。通过数据质量评估，可以确保数据的质量和可靠性，为后续的数据挖掘和分析提供有力的支持。

三、汽车零部件供应商质量评价研究

（一）质量评价指标体系构建

构建科学的汽车零部件供应商质量评价指标体系是评价其质量水平的基础。以下是一些常用的质量评价指标：

1. 产品质量指标

产品质量指标包括零部件的合格率、不合格品率、返工率等。这些指标可以反映零部件的质量稳定性和一致性，是评价供应商产品质量水平的重要依据。

2. 交货期指标

交货期指标包括供应商的准时交货率、交货周期等。这些指标可以反映供应商的交货能力和效率，是评价供应商供应链管理水平的依据。

3. 服务质量指标

服务质量指标包括供应商的售后服务质量、问题解决能力等。这些指标可以反映供应商的服务水平和响应速度，是评价供应商服务质量的重要依据。

4. 持续改进指标

持续改进指标包括供应商的质量改进计划、改进措施执行情况等。这些指标可以反映供应商的持续改进能力和意愿，是评价供应商质量管理水平的依据。

（二）基于数据挖掘技术的质量评价方法

基于数据挖掘技术的质量评价方法可以对汽车零部件供应商的质量数据进行深入分析和挖掘，为评价其质量水平提供有力的支持。以下是一些常用的基于数据挖掘技术的质量评价方法：

1. 关联规则挖掘法

关联规则挖掘法可以发现质量数据之间的关联关系。例如，可以分析不同零部件之间的故障关联性，找出常见的故障模式和故障原因。通过关联规则挖掘，可以揭示供应商质量数据之间的内在联系，为评价其质量水平提供新的视角和方法。

2. 聚类分析法

聚类分析法可以对零部件供应商进行分类和评估。通过对供应商的质量数据进行聚类分析，可以将供应商分为不同的类别，如优秀供应商、一般供应商和差劲供应商等。这有助于汽车制造商更好地了解供应商的质量水平，为其选择和评价供应商提供有力的支持。

3. 分类预测法

分类预测法可以对质量数据进行分类和预测。例如，可以根据历史数据建立分类模型，对新的零部件进行分类和预测。通过分类预测，可以及时发现潜在的质量问题，并采取相应的措施进行处理。同时，还可以利用分类预测法对供应商的质量水平进行预测和评估，为汽车制造商的决策提供有力的支持。

4. 时间序列分析法

时间序列分析法可以对质量数据进行时间序列分析和预测。通过对零部件的质量数据进行时间序列分析，可以发现质量数据的变

化趋势和周期性规律。这有助于汽车制造商更好地了解零部件的质量稳定性，预测未来的质量趋势，并为质量改进提供有力的支持。

（三）质量评价实施步骤

基于数据挖掘技术的汽车零部件供应商质量评价实施步骤包括以下几个阶段：

1. 数据准备阶段

数据准备阶段包括数据收集、数据清洗和数据预处理等步骤。首先，需要收集供应商的质量数据，包括产品质量数据、交货期数据、服务质量数据和持续改进数据等。然后，对数据进行清洗和预处理，去除重复数据、缺失数据和异常数据，确保数据的质量和一致性。

2. 数据挖掘模型构建阶段

数据挖掘模型构建阶段包括选择合适的数据挖掘算法、构建数据挖掘模型等步骤。根据具体的需求和数据特点，选择合适的算法进行挖掘和分析。例如，可以选择关联规则挖掘算法发现质量数据之间的关联关系；选择聚类分析算法对供应商进行分类和评估等。然后，利用收集到的数据构建数据挖掘模型，并进行模型验证和优化，确保模型的准确性和可靠性。

3. 质量评价实施阶段

质量评价实施阶段包括数据输入、模型运行和结果输出等步骤。将预处理后的数据输入到数据挖掘模型中，运行模型进行质量评价。根据模型的输出结果，对供应商的质量水平进行评估和分析。例如，可以利用关联规则挖掘的结果揭示质量数据之间的内在联系；利用聚类分析的结果对供应商进行分类和评估等。

4. 结果解释与应用阶段

结果解释与应用阶段包括对挖掘结果进行解释、制定改进措施和决策支持等步骤。对挖掘结果进行解释和分析，找出影响供应商质量水平的关键因素和原因。然后，根据分析结果制定相应的改进措施和计划，如优化生产工艺、加强质量监控等。同时，将挖掘结果和改进措施提供给汽车制造商，为其决策提供有力的支持。

四、结束语

本文深入探讨了基于数据挖掘技术的汽车零部件供应商质量管理与评价。通过分析现状，指出主要问题，并介绍数据挖掘技术在质量管理中的应用。构建了质量管理体系框架，详细阐述了数据挖掘算法选择、数据收集与预处理等关键步骤。进一步建立了质量评价指标体系，提出基于关联规则挖掘和聚类分析的评价方法。总之，该研究领域充满挑战与前景，通过持续探索，可为汽车制造商提供更科学、有效的质量管理与评价方法，推动汽车行业持续发展。

参考文献

- [1] 杨宝冬. 汽车零部件供应商质量管理分析[J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2023(4): 0152-0155.
- [2] 雷蕾. 浅析汽车零部件供应商质量管理策略[J]. 时代汽车, 2019(6): 132-134.
- [3] 李顺初. 汽车零部件供应商质量管理对策分析[J]. 时代汽车, 2020(12): 153-154.
- [4] 康新龙, 尚伟. B汽车供应商质量管理研究[J]. 中国标准化, 2018(1): 132-135.
- [5] 胡健. 汽车零部件质量管理的相关讨论[J]. 时代汽车, 2018(8): 142-143.