

# 现代工程学

## Modern Engineering



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2024 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



## Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co., Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

# 现代工程学

Modern Engineering

第1卷 第9期 2024年11月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

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

网址: <https://www.artdesignp.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:

- 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。
- 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。
- 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。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。



## 机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

- |     |  |  |
|-----|--|--|
| 001 | 锚杆台车自动锚固控制系统的开发与实验验证<br>Development and Experimental Verification of the Automatic<br>Anchoring Control System for Anchor Trolley  | 顾松林<br>Gu Songlin                                |
| 004 | 皮带机物料水分率在线检测方法与研究<br>Study on the Method and Device for Online Detection of Moisture<br>Content of Belt Conveyor Material  | 李晨曦<br>Li Chenxi                                 |
| 007 | 聚丙烯生产工艺危险性分析及安全措施<br>Risk Analysis and Safety Measures of Polypropylene Production Process   | 刘勇<br>Liu Yong                                   |
| 010 | 基于齿轮箱轴承失效影响因素相关探究<br>Research on the Influencing Factors of Gearbox Bearing Failure  | 栾博翰<br>Luan Bohan                                |
| 013 | 机电安装项目精细化管理方法与实践应用<br>Refined Management Methods and Practical Applications for Mechanical and<br>Electrical Installation Projects   | 孙健, 丁国祥, 马强<br>Sun Jian, Ding Guoxiang, Ma Qiang |
| 016 | 齿轮箱关键加工设备(如滚齿机、磨齿机)预防性维护体系构建<br>Construction of a Preventive Maintenance System for Key Processing Equipment of<br>Gearboxes (Such as Gear Hobbing Machines<br>and Gear Grinding Machines) | 朱孟壮<br>Zhu Mengzhuang                            |
| 019 | 齿轮箱维修中的常见失效模式与修复工艺<br>Common Failure Modes and Repair Processes<br>in Gearbox Maintenance  | 王睿鸿<br>Wang Ruihong                              |
| 022 | 齿轮箱常见失效模式分析与预防措施研究<br>Analysis of Common Failure Modes of Gearboxes and Research<br>on Preventive Measures   | 颜宇飞<br>Yan Yufei                                 |

## 信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

- |     |  |                                    |
|-----|--|------------------------------------|
| 025 | 混凝土3D打印连续螺旋线路径规划算法研究<br>Research on Continuous Spiral Path Planning Algorithm<br>for Concrete 3D Printing  | 刘嘉正<br>Liu Jiazheng                |
| 028 | 基于智能技术的电力调度自动化系统设计与实现<br>Design and Implementation of Power Dispatching Automation<br>System Based on Intelligent Technology   | 赵方园<br>Zhao Fangyuan               |
| 031 | 低温冷凝技术在油品储运系统 VOC 减排中的应用研究<br>Research on the Application of Low-temperature Condensation Technology<br>in VOC Reduction of Oil Storage and Transportation Systems       | 孙健<br>Sun Jian                     |
| 034 | 建筑智能化系统网络安全体系分析<br>Analysis of Network Security System of Intelligent Building System  | 张金宇<br>Zhang Jinyu                 |
| 037 | 多模联动, 语义贯通——大模型跨模态信息融合的创新技术路径<br>Multi-modal Interaction and Semantic Integration<br>_An Innovative Technical Path for Cross-modal<br>Information Fusion in Large Models | 李少华, 张正<br>Li Shaohua, Zhang Zheng |
| 040 | 雨水花园在市政景观中的应用及生态效益分析<br>Analysis of the Application and Ecological Benefits<br>of Rain Gardens in Municipal Landscapes   | 苏海洋<br>Su Haiyang                  |
| 043 | 移动作业终端在电力营销业务场景中的运用分析<br>The Application of Mobile Operation Terminals<br>in Power Marketing Business Scenarios is Divided   | 赵方园<br>Zhao Fangyuan               |



# 锚杆台车自动锚固控制系统的开发与实验验证

顾松林

安百拓（南京）建筑矿山设备有限公司，江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090001

**摘要：** 随着矿山和隧道工程的快速发展，锚杆支护作为一种有效的加固手段，在保障工程安全方面发挥着重要作用。然而，传统锚杆支护作业依赖人工操作，存在锚固位置不准确、作业效率低、劳动强度大等问题。为解决这些问题，本文提出了一种锚杆台车自动锚固控制系统，旨在实现锚杆支护作业的自动化和智能化。该系统集成了先进的自动控制技术、传感器技术和数据融合技术，能够自动计算锚固参数、控制机械臂运动，并实时监测作业状态。通过实验验证，该系统表现出良好的控制性能和作业效率，具有广泛的应用前景。

**关键词：** 锚杆台车；自动锚固；控制系统；实验验证

## Development and Experimental Verification of the Automatic Anchoring Control System for Anchor Trolley

Gu Songlin

Epiroc (Nanjing) Construction & Mining Equipment Co. Ltd. Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract：** With the rapid development of mining and tunnel engineering, anchor bolt support, as an effective reinforcement method, plays a significant role in ensuring engineering safety. However, traditional anchor bolt support operations rely on manual operations, which have problems such as inaccurate anchoring positions, low operation efficiency, and high labor intensity. To address these issues, this paper proposes an automatic anchoring control system for anchor bolt trolleys, aiming to achieve the automation and intelligence of anchor bolt support operations. This system integrates advanced automatic control technology, sensor technology and data fusion technology, capable of automatically calculating anchoring parameters, controlling the movement of the robotic arm, and monitoring the operation status in real time. Through experimental verification, this system demonstrates excellent control performance and operational efficiency, and has broad application prospects.

**Keywords：** anchor bolt trolley; automatic anchoring; control system; experimental verification

### 一、技术开发

#### （一）系统设计原则

在锚杆台车自动锚固控制系统的开发过程中，我们遵循了一系列核心设计原则以确保系统的可靠性、高效性和易用性。首先，系统采用了模块化设计理念，使得各个功能模块既能够独立运行，又能相互协同工作，便于后期的维护与升级。其次，安全性被置于首位，通过多重安全保护机制，确保在复杂工况下操作人员和设备的安全。此外，系统还注重了实时性与稳定性，确保在各种工况下都能快速响应并稳定运行。最后，考虑到用户友好性，系统设计时注重了人机交互的便捷性，使得操作人员能够轻松上手并高效完成锚固作业<sup>[1]</sup>。

#### （二）自动控制模块分析

##### 1. 锚固参数智能计算

在锚杆台车自动锚固控制系统的技术开发中，锚固参数智能计算是核心组成部分，它直接影响着整个系统的精确性和自动化水平。这一功能基于地质力学模型和大数据分析，能够根据作业现场的地质条件，如岩石的强度、层理走向、地下水位等参数，

实时计算出最佳的锚固深度、锚索张力和锚固力矩等关键数据。

通过先进的算法，系统能够综合考虑多种地质因素，确保计算结果的准确性和可靠性。这种智能化的计算方式，不仅提高了作业效率，还大大减少了因人为判断失误而导致的安全风险。此外，锚固参数智能计算模块还具备自我学习和优化的能力，能够根据实际作业过程中的数据反馈，不断调整和完善计算模型，以适应更复杂多变的地质环境。这一创新技术的应用，标志着锚杆台车自动锚固控制系统在智能化和自动化方面迈出了重要的一步<sup>[2]</sup>。

##### 2. 机械臂运动控制

在锚杆台车自动锚固控制系统中，机械臂运动控制是核心技术之一，它决定了锚固作业的精确度和效率。机械臂需能精确模拟预设的运动轨迹，以确保锚杆能准确无误地植入到预定位置。这涉及到高精度的伺服驱动、动态路径规划以及实时的反馈控制。同时，结合机器视觉技术，机械臂能实时调整运动路径，以适应地下环境的微小变化<sup>[3]</sup>。

此外，动态路径规划算法的应用，使得机械臂能够在复杂多变的地下环境中，快速且准确地规划出最优的运动路径。这一算法不仅考虑了地质条件、锚杆位置等静态因素，还融入了机械臂

自身的运动学特性和动力学约束，确保了运动轨迹的可行性和高效性。实时的反馈控制系统，则通过集成多种传感器，如位置传感器、力传感器等，实时监测机械臂的运动状态和受力情况，一旦发现偏差或异常情况，立即进行调整和纠正，从而保证了锚固作业的稳定性和安全性。

### （三）传感器与数据融合

在锚杆台车自动锚固控制系统中，传感器与数据融合是关键技术之一，它确保了系统对复杂工况的精确感知和智能决策。通过高精度的传感器，如压力传感器、位移传感器和环境监测传感器，系统能够实时监测锚固过程中的关键参数，如钻进力、锚杆位置和周围环境的稳定性<sup>[4]</sup>。

数据融合技术则整合了来自不同传感器的多源信息，通过先进的数据处理算法，消除噪声并提高信息的准确性。例如，当传感器数据表明钻进力异常增大时，系统能够快速判断可能是遇到了地下异常结构，从而调整锚固策略以确保锚固效果。

此外，数据融合技术还能实现多传感器间的互补和校验，进一步提升系统的可靠性和鲁棒性。例如，位移传感器和压力传感器的数据可以相互验证，确保锚杆位置的准确性和钻进力的合理性。这种综合感知能力，使得锚杆台车自动锚固控制系统能够在复杂多变的地下环境中，做出更为精准和智能的决策，从而大大提高了锚固作业的质量和效率。

## 二、系统实现

### （一）硬件平台构建

#### 1. 锚杆台车改装

在锚杆台车自动锚固控制系统的技术开发过程中，硬件平台构建中的锚杆台车改装是至关重要的一步。改装工作旨在将传统的锚杆台车升级为具备自动化控制能力的新型设备。这涉及到对原有机械结构的改造，以适应新的传感器和控制系统的安装，同时保持设备在复杂地质条件下的稳定性和可靠性<sup>[5]</sup>。

改装过程包括对台车的动力系统、传动系统以及工作装置进行全面升级。动力系统方面，引入了更高效的发动机和传动装置，以提高台车的整体性能和作业效率。传动系统的优化确保了动力传递的平稳性和精确性，这对于实现锚杆的精准定位至关重要。

工作装置的改装则更加复杂，需要精确调整机械臂的结构和动作逻辑，以便与新的控制系统无缝对接。这一过程中，特别注重了机械臂的灵活性和稳定性，确保在复杂多变的地下环境中，能够准确执行各种锚固动作。同时，对台车的整体结构进行了加固处理，以提高其承载能力和抗冲击能力，确保在长时间高强度作业下的可靠性。

#### 2. 控制系统集成

在控制系统集成部分，我们着重解决了锚杆台车自动锚固过程中的核心挑战。通过深度融合机械、电子和软件工程，我们构建了一个高效、精确的自动化系统。控制系统集成了高精度的传感器，如力矩传感器和位置传感器，以实时监测锚固过程中的各项参数，确保每个步骤都在预设的精确参数范围内进行。例如，我们引用了

PID 控制理论，设计了控制算法，以调整机械臂的动作，使其能够根据地地质条件变化进行动态调整，确保锚固的稳定性。

在软件系统开发中，我们创建了一个直观的用户界面，操作人员可以通过触摸屏轻松设定作业参数和工作模式。此外，系统还集成了故障诊断和自我修复功能，能够在检测到异常时自动调整或向远程操作中心发送警报。为了提升人机交互体验，我们采用了直观的图形化编程，使得非专业技术人员也能快速理解和操作控制系统<sup>[6]</sup>。

### （二）软件系统开发

#### 1. 人机交互界面

一个直观且用户友好的人机交互界面是确保操作人员能够高效、准确地使用锚杆台车自动锚固控制系统的关键。设计团队需要考虑到不同技术水平的操作员，界面应简洁明了，同时提供丰富的操作提示和错误反馈。例如，可以采用色彩编码来区分不同状态的设备，或者利用图标和动画来直观展示机械臂的实时动作。此外，界面应支持自定义设置，允许用户根据个人习惯调整显示参数和工作流程，以提高工作效率。

为了进一步提升用户体验，我们还集成了语音控制功能，使得操作人员可以通过语音指令来控制系统，这在嘈杂或需要双手操作的工作环境中尤为重要。同时，系统提供了详尽的操作日志和数据分析功能，帮助操作人员了解设备的使用情况和性能表现，从而进行针对性的维护和优化。总的来说，这个人机交互界面旨在提供全面、灵活且易于操作的控制体验，以满足各种复杂工况下的需求<sup>[7]</sup>。

#### 2. 控制算法实现

在锚杆台车自动锚固控制系统中，控制算法的实现至关重要。我们采用了先进的控制策略，结合锚杆台车的实际工作场景，开发了高效且稳定的控制算法。该算法能够实时接收来自传感器的数据，如机械臂的位置、速度以及锚杆的拉力等，然后根据预设的控制逻辑和参数，计算出最优的控制指令，以驱动机械臂完成精确的锚固操作。

为了实现更精细的控制，我们还引入了自适应控制算法，能够根据工作环境的变化自动调整控制参数，从而保持系统的稳定性和准确性。此外，为了避免因设备故障或操作失误导致的安全事故，我们还设计了多重安全保护机制，如超限报警、紧急停机 etc，确保系统在任何情况下都能安全运行<sup>[8]</sup>。

在控制算法的实现过程中，我们充分利用了现代计算技术的优势，采用了高性能的处理器和优化的算法结构，以提高系统的实时性和响应速度。同时，我们还对算法进行了严格的测试和验证，确保其在实际应用中能够表现出优异的性能。

## 三、实验验证

### （一）试验场建设与测试环境

#### 1. 模拟工况设定

在实验验证阶段，模拟工况设定是评估锚杆台车自动锚固控制系统性能的关键环节。为了模拟实际地下工程的复杂环境，我们设计了多种工况，包括不同地质结构和空间限制条件。例如，我们模



拟了软岩、硬岩以及破碎带等不同地质条件下的锚固操作，以检验系统在不同地质结构下的适应性和稳定性。同时，我们还考虑了地下空间狭小、光线不足等特殊环境，设计了相应的模拟工况，以评估系统在受限空间内的操作灵活性和准确性。通过这些模拟工况的设定，我们能够全面而准确地评估锚杆台车自动锚固控制系统的性能，为后续的优化和改进提供有力的数据支持<sup>[9]</sup>。

### 2. 安全防护措施

在锚杆台车自动锚固控制系统的研究与开发过程中，安全防护措施是至关重要的一个环节。系统设计必须遵循“安全第一，预防为主”的原则，确保在实际操作中能有效避免意外伤害和设备损坏。为了实现这一目标，我们采取了多重安全防护措施。首先，在系统硬件层面，我们为锚杆台车配备了紧急停止按钮和过载保护装置，一旦系统出现异常或操作人员需要紧急停机，可以立即触发这些装置，以保护设备和人员的安全。其次，在软件层面，我们设计了故障预警和诊断系统，通过实时监测系统的运行状态，及时发现并预警潜在的故障，为操作人员提供足够的时间采取应对措施。此外，我们还对操作人员进行了严格的安全培训，确保他们熟悉系统的安全操作规程，能够在紧急情况下正确应对，减少事故的发生概率。

## （二）控制性能评估

### 1. 锚固精度分析

在锚杆台车自动锚固控制系统的开发中，锚固精度分析是评估技术创新效果的关键环节。通过精确计算和控制锚固参数，系统能够确保锚杆准确无误地置入预设位置，从而提高支护效果和施工质量。为了全面评估锚固精度，我们采用了多种测试方法。首先，在实验室内模拟了多种工况条件，对不同地质结构和锚固需求进行了系统测试。通过对比理论计算值和实际锚固位置，我们分析了系统的误差来源，并进行了针对性的优化。其次，在现场应用中，我们利用高精度测量设备对锚杆位置进行了实时监测，进一步验证了系统的锚固精度。测试结果表明，锚杆台车自动锚固控制系统在多种工况下均表现出较高的锚固精度，能够满足工程实际需求，为支护工程提供了可靠的技术保障。

### 2. 操作效率对比

在锚杆台车自动锚固控制系统的实践探索中，操作效率对比

是评估技术创新效果的关键指标。传统的手动锚固作业依赖于工人经验，效率低下且易受人为因素影响。通过引入自动化控制，我们旨在提升锚杆置入的速度和准确性。为了量化操作效率的提升，我们设计了对比试验。一方面，我们记录了手动锚固作业下完成特定任务所需的时间，并分析了影响作业效率的关键因素。另一方面，在相同工况下，我们使用锚杆台车自动锚固控制系统进行了作业效率测试。通过对比两组数据，我们发现自动化控制系统显著缩短了锚杆置入的时间，同时减少了人为操作失误，提高了整体支护作业的效率。这一结果表明，锚杆台车自动锚固控制系统在提升操作效率方面具有显著优势<sup>[10]</sup>。

## （三）现场应用试验

在现场应用试验阶段，锚杆台车自动锚固控制系统经历了严格的实地验证，以确保其在复杂工况下的可靠性和效率。试验团队在多个具有代表性的矿山和隧道施工现场进行了试验，涵盖了多种地质条件，如岩石硬度变化、断层破碎带等。通过长时间的连续作业测试，系统展现出了出色的稳定性和适应性。在各种复杂地质条件下，锚杆台车自动锚固控制系统均能够准确快速地完成锚固作业，未出现明显的故障或性能下降。此外，试验团队还收集了大量的运行数据，用于进一步优化系统性能和提升用户体验。这些数据包括锚固深度、锚杆倾斜角度、作业时间等关键指标，为后续的系统改进提供了依据。现场应用试验的成功，不仅验证了锚杆台车自动锚固控制系统的可靠性和效率，也为该技术的广泛应用奠定了坚实基础。

## 四、结束语

锚杆台车自动锚固控制系统的成功开发与实验验证，标志着我国在隧道和矿山施工自动化领域取得了重要进展。该系统不仅提高了锚固作业的精度和效率，还显著降低了施工人员的劳动强度和安全风险。通过严格的实验验证，我们证明了该系统在各种复杂工况下的可靠性和稳定性。未来，我们将继续深化对该系统的研究，不断优化其性能，以满足更多样化的施工需求。同时，我们也期待该技术能够为隧道和矿山施工行业带来更多的创新和变革，推动整个行业的持续发展。

## 参考文献

- [1] 李红红. 机械自动化在矿山机械制造中的应用策略探讨 [J]. 中国金属通报, 2021, (01): 69-70.
- [2] 徐勤亮. 自动锚杆钻车三角钻臂轨迹规划方法研究 [D]. 煤炭科学研究总院, 2020.D01: 10.27222/d.cnki.gmkzy.2020.000030.
- [3] 李力恒. 智能化锚杆钻车自动寻孔定位控制系统的开发 [D]. 太原理工大学, 2023.D01: 10.27352/d.cnki.gylgu.2023.001057.
- [4] 刘华英. 智能化矿用锚杆钻车自动钻进与锚固控制系统的开发 [D]. 太原理工大学, 2023.
- [5] 范要辉. 锚杆台车自动化控制研究与展望 [J]. 煤矿机械, 2021, 42(11): 70-72.
- [6] 孙骥. 隧道锚杆台车工作臂轨迹规划及优化研究 [D]. 石家庄铁道大学, 2023.
- [7] 王平. 英格索尔兰德研制的锚杆台车 [J]. 有色金属（矿山部分）, 1986, (02): 60+54.
- [8] 卢二伟, 蒋先尧, 李鑫, 等. 智能锚杆支护台车在谦比希铜矿的应用 [J]. 中国有色金属, 2023, (S1): 288-290.
- [9] 韩冰, 文皓亮, 汪小平, 等. 锚杆台车在复杂破碎矿岩体支护中的应用技术研究 [J]. 世界有色金属, 2023, (04): 44-46.
- [10] 姚晓坡, 付大裕, 杜孟超. 基于高原锚杆台车的动力匹配分析计算 [J]. 建筑机械, 2022, (01): 97-101.

# 皮带机物料水分率在线检测方法与研究

李晨曦

中冶长天（长沙）智能科技有限公司，湖南 长沙 414000

DOI: 10.61369/ME.2024090002

**摘要：** 针对现有皮带机物料水分率检测技术存在的检测深度不足、环境干扰敏感及标定复杂等问题，本研究提出一种基于称重与非接触式图像检测的物料水分率在线检测方法。通过构建物料体积与重量的实时检测模型，结合图像处理算法实现料面形态的精确解析，开发了集成称重单元与激光视觉检测的新型装置。实验结果表明，该方法可准确获取全料层水分率，抗干扰能力提升 30%，标定效率提高 80%，为工业生产过程中的水分实时监控提供了高效解决方案。

**关键词：** 皮带机；水分率；在线检测；图像处理；非接触测量

## Study on the Method and Device for Online Detection of Moisture Content of Belt Conveyor Material

Li Chenxi

Zhongye Changtian (Changsha) Intelligent Technology Co., LTD., Changsha, Hunan 414000

**Abstract：** To address challenges in existing belt conveyor moisture detection technologies—including insufficient depth of detection, sensitivity to environmental interference, and complex calibration requirements—this study proposes an online moisture detection method integrating weighing and non-contact image analysis. By establishing a real-time model linking material volume with weight data and employing advanced image processing algorithms for precise surface morphology analysis, we developed a novel integrated system combining a weighing unit with laser vision inspection. Experimental results demonstrate that this approach achieves accurate measurement of total material layer moisture content, demonstrates 30% enhanced anti-interference capability, and shows 80% improved calibration efficiency, providing an efficient solution for real-time moisture monitoring in industrial production processes.

**Keywords：** belt conveyor; moisture content; online detection; image processing; non-contact measurement

## 引言

在冶金、煤炭、化工等流程工业中，皮带机所运物料的水分率对生产工艺稳定性与产品质量影响重大，如烧结生产中，其与透气性、制粒效果相关，精确检测很关键。现有红外、微波等主流检测技术虽快，但存在检测深度不足、环境适应性差、标定繁琐等问题，难以满足全料层水分实时精准检测需求。

本研究提出融合称重计量与非接触式视觉检测的在线方法，构建“体积 - 重量 - 水分”关联模型，结合图像处理算法抑制干扰，以解决现有技术局限，提供高精度、高稳定性方案。

## 一、现有技术分析

### （一）传统检测方法原理

#### 1. 红外水分仪检测法

基于水分子对近红外光的选择性吸收特性，通过测量物料表面反射光能量计算水分含量。该方法检测速度快，但受物料表面状态（如颗粒度、颜色）影响显著，且光穿透深度有限（通常 <

10mm），无法反映深层水分。

#### 2. 微波水分仪检测法

利用微波信号与水分子的相互作用，通过检测微波能量衰减或相位变化计算水分率。该方法对物料内部水分敏感，但易受环境电磁场、物料密度波动等干扰，且设备成本较高<sup>[1]</sup>。

### （二）现有技术缺陷

现有检测方法存在三方面局限：一是检测深度不足，仅能

作者简介：李晨曦（1985-），男，汉族，湖南涟源人，学历：硕士研究生，目前职称：高级工程师，研究方向：工业控制及智能制造领域的产品全周期研发。



表面或近表面检测，无法覆盖50–200mm全料层，结果偏差达15%–20%；二是环境适应性差，红外法受光和蒸汽影响，微波法易受金属电磁干扰，高温高湿粉尘环境下稳定性下降；三是标定复杂，每种物料需10次以上烘干实验，难适应多品种快速切换。

## 二、本研究技术方案

### （一）检测原理与方法流程

本研究提出的皮带机物料水分率在线检测方法，通过实时检测物料的体积与重量，结合干基密度标定数据，构建“体积–重量–水分”关联模型，实现对物料全料层水分率的精确检测。该方法的核心流程主要包括干基密度标定、称量段物料重量检测、料面高度与宽度检测、体积计算、水分重量计算及水分率计算等步骤<sup>[2]</sup>。

#### 1. 干基密度标定（离线步骤）

取代表性物料样本，经烘干至恒重后，通过电子秤称量干重  $M_{cal}$ ，用量杯测量体积  $V_{cal}$ ，计算干基密度： $\rho_{dry} = \frac{M_{cal}}{V_{cal}}$ 。该参数为物料固有属性，仅需标定一次。

#### 2. 称量段物料重量检测（实时步骤）

通过称重托辊与压力传感器组成的称重单元，实时测量皮带机称量段（长度  $L$ ）内物料重量  $M_{wet}$ <sup>[3]</sup>。

#### 3. 料面高度与宽度检测（非接触式视觉测量）

利用非接触式检测单元检测计算得到物料横截面其中一点的料面高度。如图1所示，首先进行料面高度标定，将用于标定的刻度尺竖直立于激光光源正下方、皮带机表面，并将工业摄像机采集到的此时的图像作为标定素材。图像中刻度尺上刻度和图像中代表此刻度的像素点坐标一一对应，从而建立起料面高度和像素点的对应关系。在实际测量中，根据激光线在料面上形成的投射点在图像中像素点的坐标位置，可以相应得到料面的高度。例如图2中  $n$  点和  $m$  点可以根据对应关系分别得到其位置点  $h(n)$ 、 $h(m)$ <sup>[4]</sup>。

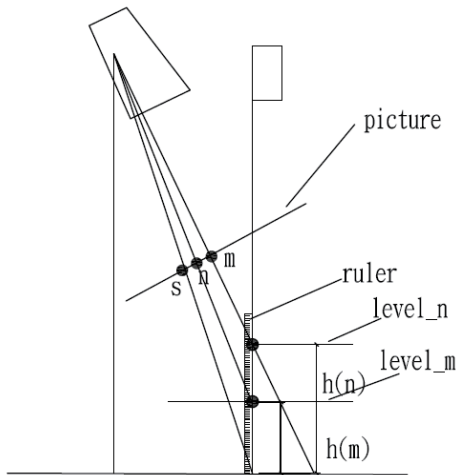


图1 物料高度标定与检测

检测计算得到料面宽度  $D$ 。在图3中  $N$  为图像中料面宽度所对应的像素点个数； $P$  为皮带机宽度对应的像素点个数； $W$  为实际

皮带机的宽度，此参数可直接测量得到。利用比例公式  $\frac{N}{P} = \frac{D}{W}$  可得料面宽度  $D = \frac{N}{P} * W$ 。测量计算出横截面积  $S = \sum_{n=1}^N h(n)$ ，其中  $N = [\frac{D}{\Delta d}]$ ，单位宽度  $\Delta d$  为图像上每一个可分辨像素点所对应的实际宽度，如图2所示。

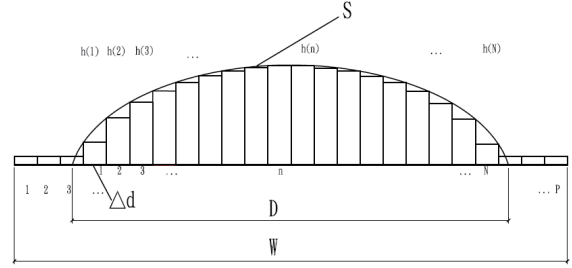


图2 物料宽度及横截面积检测

#### 4. 体积与水分率计算

物料体积的计算是基于料面横截面积和皮带机的运行速度实现的。由于皮带机是连续运行的，物料的体积可以看作是在一定时间内通过称量段的物料体积的累积。

检测计算得到的物料体积为  $V = \sum_{m=0}^M l(m) * s(m) + s(M+1) * l(M+1)$ ，其中  $\sum_{m=0}^M l(m) \leq L \leq \sum_{m=0}^{M+1} l(m)$ ，累加步长为  $l(m) = vel(m) * \Delta t$ ，其中  $\Delta t$  为单位时间也是图像采集卡对于每帧图像的采集时间； $l(m)$  为累加步长，即  $l(m) = vel(m) * \Delta t$ 。 $vel(m)$  为采集每帧图像时皮带机的瞬时速度； $s(m)$  为采集每帧图像时皮带机对应的截面积，如图3所示<sup>[5]</sup>。

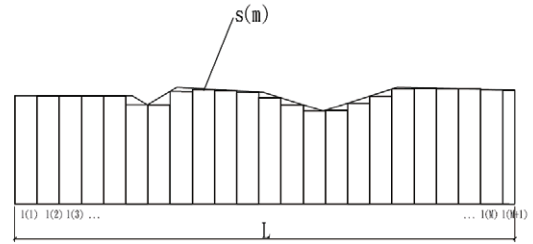


图3 物料体积检测

计算出物料中水分的重量， $M_{water} = M_{wet} - M_{dry}$ ，其中  $M_{dry} = V * \rho_{dry}$ ， $M_{wet} = V * \rho_{wet}$ 。物料中水分率计算公式为：

$$Moi_{water\%} = \frac{M_{wet} - M_{dry}}{M_{wet}} * 100\%$$

$$Moi_{water\%} = (1 - \frac{[\sum_{m=0}^M l(m) * s(m) + s(M+1) * l(M+1)] * \rho_{dry}}{M_{wet}}) * 100\%$$

其中  $\rho_{dry}$  为物料干基密度， $M_{wet}$  为称量段物料实际重量， $l(m)$  为累加步长； $s(m)$  为料面单位长度的横截面积。

### （二）检测装置设计

#### 1. 称重单元

称重单元由称重托辊、称重传感器组成。称量段平台将物料重力传递至托辊，传感器采用电阻应变式原理，输出信号经放大滤波后由微处理器实时解算重量数据。

## 2. 非接触式视觉检测单元

视觉单元包括工业摄像机、激光线光源、图像采集卡和中央处理器。激光线垂直投射到料面形成特征光条，摄像机以 25fps 帧率采集图像，通过边缘检测算法提取光条像素坐标，结合标定模型计算料面高度<sup>[6]</sup>。

为了减少料面不平整对检测精度的影响，在视觉检测单元中增设了整形罩。整形罩安装在皮带机的上方，位于激光线光源和工业摄像机的前方，用于对物料进行预平整。整形罩的底部与皮带表面保持一定的距离，当物料通过整形罩时，会被整形罩刮平，使料面更加平整，减少料面高度的波动，从而提高料面高度和宽度检测的精度。

## 3. 系统集成

称重单元与视觉单元通过工业总线与中央处理器通信，实时数据经融合计算后输出水分率结果。系统支持 RS485、Ethernet 等多种通信协议，可无缝接入工厂 DCS 控制系统。

# 三、关键技术创新

## （一）全料层检测方法

传统方法仅检测表面 5-10mm 物料，本研究通过视觉检测获取全料层高度分布，结合体积积分计算，实现 0-200mm 厚度物料的全层水分率检测，检测深度提升 10-20 倍<sup>[7]</sup>。

## （二）抗干扰图像处理算法

采用自适应阈值分割与中值滤波算法，有效抑制环境光、粉尘等干扰。实验表明，在光照强度波动  $\pm 2000\text{lux}$ 、粉尘浓度  $< 50\text{mg/m}^3$  条件下，料面高度检测误差  $< 1.5\%$ 。

## （三）简化标定流程

仅需一次烘干实验获取干基密度，其余参数通过图像像素比例与称重传感器标定完成，标定效率较传统方法提升 80%，显著降低人工成本。

# 四、实验验证与结果分析

## （一）实验条件

在某钢铁厂烧结配料皮带机进行现场测试，物料为铁精矿

粉，皮带速度 1.2m/s，料层厚度 80-120mm，环境温度 25-40℃，湿度 40%-70% RH。对比方法为红外水分仪，同步采集表层水分数据<sup>[8]</sup>。

## （二）精度验证

选取 10 组样本，分别采用本方法与烘干法（国标 GB/T 212-2008）测量水分率，结果如表 1 所示：

样本编号	本方法（%）	烘干法（%）	绝对误差（%）
1	8.21	8.35	-0.14
2	7.98	8.12	-0.14
3	9.05	9.21	-0.16
4	8.56	8.73	-0.17
5	7.62	7.75	-0.13
平均值	-	-	-0.15

结果表明，本方法检测误差控制在  $\pm 0.2\%$  以内，精度显著优于红外法（误差  $\pm 1.2\%$ ）。

## （三）稳定性测试

在连续 8 小时运行中，监测环境光强度从 500lux 波动至 2500lux，本方法水分率检测值波动范围  $< 0.3\%$ ，而红外法波动达 1.8%，显示出更强的环境适应性<sup>[9]</sup>。

## （四）标定效率对比

传统方法完成单物料标定需 4 小时（含 10 次烘干实验），本方法仅需 0.5 小时（1 次烘干 + 图像 / 称重标定），效率提升 8 倍，尤其适合多品种物料切换场景。

# 五、结束语

本研究提出的皮带机物料水分率在线检测方法与装置，通过称重与视觉检测融合，突破了传统技术的检测深度限制，结合抗干扰算法与简化标定流程，实现了高精度、高稳定性的全料层水分检测。现场实验表明，该技术检测误差  $< 0.2\%$ ，抗干扰能力提升 30%，标定效率提高 80%，为工业生产过程控制提供了可靠的技术支撑。未来可进一步集成 AI 算法，实现物料特性自适应学习，提升复杂工况下的检测鲁棒性。

## 参考文献

- [1] 王小明, 李华. 微波技术在煤水分测量中的应用研究 [J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(5): 180-185.
- [2] 张红, 刘阳等. 基于图像识别的皮带机物料水分率在线检测方法 [J]. 自动化仪表, 2020, 41(3): 80-84.
- [3] 刘嫣红, 毛志怀等. 电容式谷物水分传感器在线测试研究 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 345-352.
- [4] 赵强, 孙宇等. 无线低功耗燃烧混合料水分仪的设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器, 2019(8): 30-34.
- [5] 李想, 陈辉等. 基于微波法的矿井输送机煤含水率检测与控制系统研究 [J]. 煤炭工程, 2023, 55(6): 110-115.
- [6] 陈阳, 刘畅等. 基于近红外光谱技术的皮带机物料水分实时监测系统 [J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1110-1115.
- [7] 李飞, 王强等. 基于电容层析成像的皮带机物料水分分布检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 143-149.
- [8] 张悦, 赵刚等. 基于超声波衰减的皮带机物料水分率检测技术研究 [J]. 传感技术学报, 2024, 37(5): 660-666.
- [9] 刘梅, 孙超等. 基于深度学习的皮带机物料图像水分分析模型 [J]. 计算机应用研究, 2023, 40(8): 2550-2554.

# 聚丙烯生产工艺危险性分析及安全措施

刘勇

陕西延长中煤榆林能源化工股份有限公司, 陕西 榆林 718500

DOI: 10.61369/ME.2024090005

**摘要：**聚丙烯作为五大通用塑料之一，其生产工艺存在诸多潜在危险性。鉴于近年来聚丙烯装置频发的安全事故，本文以聚丙烯生产过程的危险性分析作为切入点，从物料、反应过程、静电与粉尘、设备与管道等四个维度系统梳理了工艺各环节的主要风险。在此基础上，从工艺参数控制、防爆防静电、安全设计、自动化控制、人员管理、承包商与环保设施管控等方面提出针对性的安全措施，这些措施具有较强的实操性和可行性，可为企业聚丙烯装置的本质安全提供有益借鉴和参考。

**关键词：**聚丙烯；生产工艺；危险性分析；安全措施

## Risk Analysis and Safety Measures of Polypropylene Production Process

Liu Yong

Shaanxi Yulin Energy and Chemical Co., LTD., Yulin, Shaanxi 718500

**Abstract：**As one of the five major general-purpose plastics, polypropylene production processes carry significant inherent risks. In light of frequent safety incidents in recent years within polypropylene facilities, this study initiates with a risk analysis of polypropylene manufacturing processes. It systematically identifies primary risks across four dimensions: raw materials, reaction processes, electrostatic and dust hazards, and equipment/piping systems. Based on this analysis, targeted safety measures are proposed covering process parameter control, explosion-proofing and anti-static solutions, safety design, automated control systems, personnel management, contractor oversight, and environmental facility regulation. These practical and feasible measures provide actionable references for achieving intrinsic safety in polypropylene plant operations.

**Keywords：**polypropylene; production processes; risk analysis; safety measures

## 引言

随着石化工业的不断发展，聚丙烯作为重要的化工原料，其产量和消费量持续攀升。但与此同时，聚丙烯生产过程涉及诸多危险化学用品，且工艺条件苛刻，极易引发重大安全事故。我国聚丙烯装置近年来多次发生爆炸、火灾等安全事故，造成重大人员伤亡和财产损失，引起行业和社会的广泛关注。因此，开展聚丙烯生产工艺危险性分析，识别潜在风险，制定有效的预防和控制措施，对于确保装置安全平稳运行，具有十分重要的现实意义。

## 一、聚丙烯生产工艺流程

聚丙烯生产流程主要包括原料准备与精制、催化剂配置与投料、聚合反应以及后处理等环节。首先，将液化石油气经脱硫、脱水后，通过裂解制得高纯度丙烯单体，再经缓蚀、干燥得到聚合级原料。与此同时，将催化剂组分按比例混合并投入聚合釜。在特定温度、压力条件下，单体与催化剂充分接触发生聚合反应。聚合工艺有气相法、本体法等多种路线，生产装置构型也各不相同。反应产物经闪蒸、切粒、干燥、筛分，最终得到成品聚丙烯粒子。

在复杂的生产流程中，温度、压力、配料比等工艺参数的

精确控制至关重要。聚合温度一般控制在80℃，压力保持在2.0MPa。催化剂用量较少，其组成与活性直接影响产品质量。各工艺单元衔接紧密，参数波动会引起连锁反应。因此，装置设计时须重点考虑温度、压力、液位等参数的实时监控和自动调节，确保生产平稳运行。

聚丙烯生产装置涉及诸多大型设备，如聚合釜、压缩机、换热器等。其安全可靠运行是保证产品产量和质量的关键。聚合反应釜是最核心的设备，通常采用不锈钢材质，设置夹套冷却系统，配备搅拌装置和安全阀等。聚合釜须耐高温高压，并能有效去除反应热，避免发生“熔融”和“爆聚”等异常工况。此外，为输送大量易燃易爆介质，生产装置管道错综复杂。设计中须统

筹考虑管道的合理布局、伸缩补偿以及防腐蚀等因素，降低泄漏风险。

## 二、聚丙烯生产工艺危险性分析

### （一）物料危险性

在原料准备阶段，丙烯作为主要原料，其爆炸极限范围广，下限仅为1%，上限可达15%。一旦发生泄漏，丙烯易在低洼处聚集，形成爆炸性混合物。遇明火、高热或静电火花极易引发爆炸，后果不堪设想。此外，聚合反应过程中需持续通入氢气以调节产物分子量。氢气的爆炸极限更宽，下限4%，上限高达75%。氢气泄漏与空气混合，遇点火源可发生剧烈爆炸。齐格勒-纳塔催化剂中常用三乙基铝等有机金属化合物作为助催化剂，这类物质遇空气能自燃，遇水猛烈反应放出易燃气体。催化剂配制和使用过程中，若操作不当或设备密封失效，极易引发火灾爆炸事故。因此必须对上述危险物料的储存、输送、投料等环节实施严格管控，配备可靠的安全设施。

### （二）反应过程危险性

聚合反应放热量大，反应热可达1700~2100kJ/kg。若冷却系统故障或失效，反应热不能及时有效移除，聚合速率加快，极易引发失控反应，导致聚合釜“爆聚”事故。一旦反应失控，聚合物大量析出，黏度骤增，搅拌功率急剧上升。若不及时采取紧急措施，反应物温度和压力会在短时间内突破设计值，最终导致反应釜破裂泄漏，释放大量的可燃性气体，后果不堪设想。

反应体系的压力也是重点监控对象。当系统压力超过设计值（如2.0MPa）时，易导致设备连接部位泄漏。泄漏的丙烯迅速气化吸热，使管道和阀门温度骤降，发生“冻裂”现象，加剧介质外泄。因此必须对反应釜温度和压力实施联锁控制，设置独立的紧急冷却系统和泄压阀，确保反应过程始终在安全范围内进行。

### （三）静电与粉尘危险性

静电是聚丙烯生产中的普遍危险源。聚丙烯树脂属电绝缘体，极易因摩擦起电而积聚静电荷。尤其在气力输送、气流干燥等环节，高速运动的聚丙烯粉料与设备管壁剧烈摩擦，如果静电接地措施不到位，就会在设备表面积聚大量静电荷，一旦放电就可能引燃周围的可燃物料或粉尘。而聚丙烯粉料的爆炸浓度下限低至0.1%，只需一点粉尘悬浮在空气中，遇点火源就会发生爆炸，其威力绝不容小觑。因此，必须从设计上全面考虑防静电接地，将所有设备、管道、料仓等通过可靠导体接地，并定期检测接地电阻，确保其小于10Ω。此外，在粉尘易积聚的部位，还须设置吸尘装置，避免形成爆炸性悬浮粉尘云。输送粉料最好采用氮气密闭循环方式，在源头上控制粉尘外逸<sup>[1]</sup>。日常还要加强对防静电装置的检查维护，发现问题及时修复，坚决杜绝因防静电失效酿成的火灾爆炸事故。在粉尘清理作业时，更要使用防爆工具，避免产生撞击火花。

### （四）设备与管道危险性

设备管道腐蚀是长周期运行的聚丙烯装置常面临的危险因素。原料丙烯中往往含有微量硫化物杂质，在高温条件下会加速

设备的硫化腐蚀。腐蚀会导致设备壁厚减薄，一旦减薄到设计极限，设备的机械强度和抗压能力就会大打折扣，最终导致破损泄漏事故。因此，在开车初期就应对原料进行硫含量检测，超标时应先进行脱硫处理。对腐蚀敏感部位还可涂覆耐硫涂层，定期开展超声测厚以掌握壁厚变化趋势。当减薄量达到设计壁厚的80%时就应及时更换，避免设备带病运转。

管道和设备的堵塞问题也值得警惕，生产实践中经常发现，聚丙烯熔体或粉料会逐渐在管道内壁上粘附积聚，导致过流面积减小，物料输送阻力增大。轻则影响生产效率，重则会诱发局部过热、管道振动等问题，严重时还可能导致管道变形或设备损坏。对此，必须加强工艺排查和清管措施。合理控制聚合温度，避免过高温导致树脂分解结焦。在换热器等容易积垢的设备中投加阻垢剂。定期使用高压水或机械清管工具疏通受堵管线。

## 三、聚丙烯生产工艺安全措施

### （一）工艺参数控制

工艺参数是影响聚丙烯生产安全的关键因素，必须实现精准控制。对于聚合反应温度，关键是要避免失控引发“爆聚”。为此，可在聚合釜内设置多对备用的温度传感器，实时采集温度数据。当主温度计失灵或显示超过警戒值如85℃时，自动切换至备用点，同时启动紧急冷却系统，将反应物料快速冷却，必要时甚至要紧急排空反应釜。对于压力控制，可设置独立的安全仪表系统SIS，当反应压力超过3.5MPa时，SIS直接触发紧急泄压阀，将釜内物料泄放至安全区域。SIS系统与基础自控系统DCS分离设置，可最大限度避免因主系统故障而无法实施紧急停车的风险。

在线气相色谱仪是控制氢气等有毒有害介质浓度的利器。要确保氢气浓度低于爆炸下限如2%，须从釜顶尾气中实时取样分析。一旦发现超标，立即切断氢气进料阀，同时提高搅拌转速，加快氢气的脱除速度<sup>[2]</sup>。对取样管线定期吹扫，避免聚合物沉积堵塞影响分析结果。

### （二）防爆与防静电措施

丙烯、氢气等易燃易爆物料广泛存在于聚丙烯生产过程中，极易形成爆炸性环境。必须采取全面的防爆防静电措施，将爆炸风险降至最低。在催化剂配制、粉料输送等关键岗位，应采用氮气置换，将设备及管道内的氧含量控制在0.5%以下，消除燃烧和爆炸条件。对于无法实施氮封的场所，必须保证通风换气，防止可燃气体聚集。所有设备、管线、阀门等均应采用金属导电材质，并与工艺装置可靠连接，确保等电位联结。粉料输送应在密闭系统中进行，采用氮气闭路循环，避免粉尘与空气直接接触。人体也是重要的静电聚集体，操作人员进入静电敏感区域，必须穿着防静电工作服，佩戴静电手环，并定期进行静电释放和跨接测试。

### （三）设备与管道安全设计

反应设备和管道的材质选型是确保工艺安全的首要因素。聚丙烯装置的核心设备，如聚合反应釜、旋风分离器等，其内壁应



采用316L等优质不锈钢材质，并在表面涂覆聚四氟乙烯等惰性防腐层，提高设备耐腐蚀性能和使用寿命。输送管道应选用耐硫化物应力腐蚀开裂的合金材料，并控制硫含量。对于停工检修前的设备和管线，必须进行彻底的吹扫置换，排除残留的可燃性气体，防止检修过程中发生火花引燃事故<sup>[3]</sup>。长输管道应设计合理数量的膨胀节，减少热胀冷缩引起的应力集中，降低管道泄漏风险。对于存在泄漏可能的设备，如泵、压缩机等，其机械密封应采用双端面结构，配置泄漏收集装置，将泄漏的介质导入封闭容器或火炬系统，防止危险气体扩散。

#### （四）自动化安全控制系统

完善的自动化安全控制系统是保障聚丙烯装置安全运行的重要手段。其核心是紧急停车系统 ESD。当装置发生严重工况偏差，危及人员设备安全时，ESD 系统能在最短时间内将装置导入安全状态。其采用两套独立的逻辑控制单元，对关键参数进行双重监测。例如，当反应器冷却水流量低于 30m<sup>3</sup>/h，搅拌电流高于 120A 时，系统判定为反应失控，立即切断进料阀门，同时打开急冷水阀，必要时还注入反应终止剂苯醌。

报警管理也是安全自动化的重要内容，DCS 应能根据工艺参数偏差幅度和速率等特征，自动对报警进行分级管控。紧急报警如反应器超温、循环氢压缩机超速等，必须在 10 秒内响应处理。重要报警如原料丙烯压力高限、催化剂流量低限等，应在 1 分钟内处理。而一般报警则相对宽松一些。还应对现场操作员进行分级，不同级别人员只能调整相应级别的参数。如中控主操可操作全部参数，巡检工只能操作部分现场阀门。

#### （五）人员操作与应急管理

再完善的硬件设施也离不开人的正确操作和管理，这对聚丙烯这类高风险化工装置尤为重要。生产运行应树立“以人为本”的管理理念。操作人员上岗前必须进行严格的安全教育和技能培训，经考核合格后方能持证上岗。中控室应实行“双人监盘”制度，一人负责盯控工艺参数，另一人负责核对报警信息并适时复述，以防遗漏关键信息。对于关键工序的现场操作，如催化剂配制、设备置换、取样分析等，应编制详细的操作规程，并采用交接班双签名等制度严格执行。

应急管理方面，必须根据风险评估结果制定科学的应急预案，并通过反复演练强化员工的应变能力。如每月轮流组织丙烯

泄漏、粉尘爆炸、反应器失控等典型场景的桌面推演和实战演习，确保应急响应时间控制在 3 分钟内。还应储备足够的应急物资，如空气呼吸器、防化服、堵漏工具等，确保万一旦发生险情能第一时间投入应急抢险。日常还应强化应急值守，发现异常苗头应立即响应。

#### （六）承包商与环保设施安全管控

化工装置的检维修施工以及环保治理，通常会引入外部承包商参与，这对安全管理提出了更高要求。在施工承包商选择上，除了考察其专业技术能力外，安全资质也是必查的硬指标。施工前必须对承包商及其作业人员的相关资质进行严格审核，操作工必须持有焊工、电工、特种设备作业等资格证书，并在施工前接受必要的安全教育。在施工过程中，企业安全管理人员还应加强动态监管，及时消除各类违章行为和不安全因素<sup>[4]</sup>。环保设施的安全运行直接关系到企业的社会责任。对废气焚烧装置，应确保燃烧室温度始终高于 750℃，停留时间不低于 1 秒，以保证 VOCs 等污染物充分氧化分解。对酸碱废液处理系统，必须实施分类收集，杜绝不同性质废液混排，并根据其特性选择合适的材质，防止因腐蚀穿孔导致废液外泄污染环境。对固废焚烧炉，应在进口烟气中设置快速切断阀，并与 CO 浓度检测仪联锁。当 CO 浓度超标时，应立即切断废气，同时停止固废进料，避免燃烧不充分导致二噁英等有毒物质超标排放。

### 四、结束语

综上所述，聚丙烯生产是一个高风险、高技术、高投入的过程。其涉及的易燃易爆原料、高温高压工艺、粉尘静电危害以及腐蚀泄漏风险等，对安全管理提出了极高要求。企业必须以本质安全为导向，从工艺、设备、电气、仪表、管理等各专业角度，系统设计并落实安全措施。既要发挥好自动化技术的硬件保障功能，又要强化人的管理和操作，并树立全员安全意识。在生产运行中，还应通过加强动态监控和风险分级管控，及时发现和消除各类隐患。一旦发生紧急情况，还要按照应急预案及时处置，控制事态扩大。只有立足预防为主，以风险管控为核心，构建全过程、全方位、多层次的安全防线，才能从根本上确保聚丙烯生产装置的本质安全，实现长周期安全平稳运行。

### 参考文献

- [1] 刘贵春. Unipol 气相法工艺聚丙烯装置安全风险管控 [J]. 云南化工, 2023, 50(S01): 54-56.
- [2] 张强. 聚丙烯生产危险因素分析及安全防范措施 [J]. 化工设计通讯, 2021, 47(1): 2.
- [3] 张强. 聚丙烯生产危险因素分析及安全防范措施 [J]. 化工设计通讯, 2021, 47(01): 149-150.
- [4] 赵玉鑫. 聚丙烯装置中三乙基铝的化学危险性分析 [J]. 化工设计通讯, 2018, 44(08): 125-126.

# 基于齿轮箱轴承失效影响因素相关探究

栾博翰

南京高速齿轮制造有限公司, 江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090006

**摘 要：** 本文旨在深入探讨齿轮箱轴承失效的影响因素，通过对轴承失效的基本原理进行详细分析，包括失效模式的分类、磨损、疲劳与断裂的机理，以及载荷、应力与寿命之间的关系，为后续的失效原因探究奠定理论基础。进一步地，文章系统性地分析了导致齿轮箱轴承失效的多种影响因素，涵盖设计因素中的轴承选择与配置、结构设计与载荷分布，材料与制造质量中的材料性能及制造缺陷，以及工作条件中的载荷变化、温度、润滑与腐蚀环境等。在此基础上，文章提出了针对性的预防策略与维护实践，涉及设计优化、材料与工艺改进、润滑与冷却系统优化以及预测性维护与状态监测等方面。

**关 键 词：** 齿轮箱轴承；失效分析；影响因素；预防策略；维护实践

## Research on the Influencing Factors of Gearbox Bearing Failure

Luan Bohan

Nanjing High-Speed Gear Manufacturing Co., LTD., Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract：** This paper aims to deeply explore the influencing factors of gearbox bearing failure. Through a detailed analysis of the basic principles of bearing failure, including the classification of failure modes, the mechanisms of wear, fatigue and fracture, as well as the relationship between load, stress and life, it lays a theoretical foundation for the subsequent exploration of failure causes. Furthermore, the article systematically analyzes various influencing factors that lead to the failure of gearbox bearings, covering aspects such as bearing selection and configuration in design factors, structural design and load distribution, material properties and manufacturing defects in materials and manufacturing quality, as well as load variations, temperature, lubrication and corrosive environments in working conditions. Based on this, the article proposes targeted prevention strategies and maintenance practices, covering aspects such as design optimization, material and process improvement, lubrication and cooling system optimization, as well as predictive maintenance and condition monitoring.

**Keywords：** gearbox bearing; failure analysis; influencing factors; preventive strategy; maintenance practice

## 一、轴承失效的基本原理

### （一）轴承失效模式分类

轴承失效模式分类是理解轴承失效问题的关键。常见的失效模式包括疲劳剥落、磨损、变形、热损伤和润滑失效等。疲劳剥落通常发生在经过数以亿计的循环载荷后，轴承表面形成微小裂纹并最终导致金属疲劳脱落。磨损则是由于颗粒污染、腐蚀或长期摩擦导致材料逐渐损失。变形可能源于重载、安装不当或轴承座刚度不足，导致轴承内外圈或滚动体发生形状改变。热损伤多发生在轴承工作温度过高时，可能导致材料退火、硬度降低甚至烧伤。润滑失效则可能是由于润滑剂选用不当、污染或供应不足，导致轴承部件间直接接触，加速磨损和失效。每种失效模式都有其特定的原因和预防措施，深入了解这些模式对于提高齿轮箱轴承的可靠性和延长使用寿命至关重要<sup>[1]</sup>。

### （二）磨损、疲劳与断裂的机理

轴承失效往往由多种因素引起，其中磨损、疲劳与断裂是三

个关键的机理。在实际应用中，磨损通常源于轴承内部的相对运动，导致表面材料的持续损失。例如，在重载工况下，轴承的滚动接触可能会导致微小金属碎片的剥落，长期积累会降低轴承的精度和效率，严重时甚至引发润滑失效和进一步的摩擦损伤。疲劳失效则是一个渐进的过程，它涉及材料在重复应力或应变作用下的逐渐弱化。这种弱化最终导致微裂纹的形成和扩展，直至轴承部件完全断裂。断裂失效通常具有突发性，可能导致设备的意外停机，对生产安全和效率构成严重威胁。因此，深入理解磨损、疲劳与断裂的机理，对于制定有效的预防策略和维护计划至关重要，有助于减少轴承失效的发生，提高设备的可靠性和运行效率<sup>[2]</sup>。

### （三）载荷、应力与寿命的关系

载荷、应力与轴承的寿命之间存在着密切的联系。载荷是轴承所承受的外力，它直接影响轴承内部的应力分布。在较高的载荷作用下，轴承各部件所受的应力会相应增大，从而加速了磨损、疲劳和断裂等失效机理的进程。应力的集中和分布不均会进



一步缩短轴承的寿命。因此，合理控制载荷，优化轴承的设计以分散应力，是提高轴承寿命的关键。同时，轴承的寿命也反映了其承受载荷和应力的能力，是评估轴承性能的重要指标之一。通过深入研究载荷、应力与寿命的关系，可以为轴承的设计、制造和维护提供科学依据，确保轴承在复杂多变的工作条件下仍能保持良好的性能和可靠性<sup>[3]</sup>。

## 二、影响因素分析

### （一）设计因素

#### 1. 轴承选择与配置

轴承选择与配置是影响齿轮箱轴承失效的关键因素之一。在实际应用中，轴承类型必须根据齿轮箱的运行条件和载荷特性来确定。例如，高转速和轻载荷的场合可能适合选用滚珠轴承，而重载荷和冲击载荷下，滚柱轴承可能更为合适。此外，轴承的尺寸和额定载荷能力必须与齿轮箱的输出扭矩和轴向力相匹配，以确保在预期寿命内稳定运行。

正确的轴承配置同样至关重要。轴承的排列方式、预紧力以及游隙的调整都会显著影响轴承的性能和寿命。例如，适当的预紧力可以减少轴承内部的间隙，提高旋转精度和刚度，但过大的预紧力则可能导致过度磨损和早期失效。因此，在进行轴承配置时，必须综合考虑齿轮箱的整体结构、运行条件以及预期寿命，以确保轴承的选择与配置能够最大限度地发挥其性能，延长齿轮箱的使用寿命<sup>[4]</sup>。

#### 2. 结构与载荷分布

结构设计在齿轮箱轴承失效中起着至关重要的作用。不合理的载荷分布可能导致轴承过早磨损或疲劳失效。例如，当轴承承受过大的局部应力时，这可能是由于设计时未充分考虑载荷的均匀分布，使得轴承在工作过程中承受了不适当的集中载荷。为了避免这种情况，设计师需要在齿轮箱的结构设计阶段就充分考虑载荷的分布。通过精确的力学分析和模拟，可以预测轴承在工作过程中可能承受的载荷，并据此优化结构设计，确保载荷能够均匀分布到各个轴承上。此外，结构设计还应考虑到齿轮箱的整体刚度和强度，以确保在承受各种载荷时，齿轮箱的整体结构不会发生过度变形或损坏，从而进一步保护轴承免受不必要的应力和磨损。

### （二）材料与制造质量

#### 1. 材料性能对失效的影响

材料性能在轴承失效中起着至关重要的作用。轴承通常由内圈、外圈、滚动体和保持架等部分组成，这些组件的材料质量直接影响轴承的耐磨性、抗疲劳强度和耐腐蚀性。例如，高碳铬轴承钢因其高硬度和良好的淬透性，被广泛用于制造滚动体，以抵抗在高接触应力下的滚动疲劳。然而，如果材料的纯净度不足，含有过多的杂质或内部缺陷，可能会成为应力集中点，加速疲劳裂纹的形成<sup>[5]</sup>。

此外，轴承材料的热处理工艺也极为关键。合适的热处理能够提升材料的硬度和韧性，从而增强轴承的整体性能。例如，淬火和回火处理可以显著提高轴承钢的硬度和耐磨性，而表面渗碳

或渗氮处理则可以增加轴承表面的硬度和耐腐蚀性，进一步提高轴承的使用寿命。

另一方面，保持架的材料选择同样重要。它不仅需要具有足够的强度和刚度以支撑滚动体，还需要具备良好的耐磨性和耐腐蚀性，以确保轴承在恶劣工作条件下的稳定运行。如果保持架材料性能不佳，可能会导致其过早变形或损坏，进而影响轴承的整体性能和寿命。

#### 2. 制造过程中的缺陷

在制造过程中，轴承的缺陷往往是导致其失效的重要原因之一。这些缺陷可能源于加工误差、表面处理不当或者装配过程中的问题。例如，微小的加工痕迹可能导致润滑剂的不均匀分布，进而加速磨损。此外，如果热处理工艺控制不精确，轴承内部的应力分布可能不均，降低其抵抗疲劳载荷的能力。同时，装配过程中的偏差，如轴承座与轴的配合间隙过大或过小，都可能导致轴承在运转中产生异常摩擦和振动，从而影响其使用寿命。因此，制造商需要严格控制每个生产环节，采用高精度的加工设备和先进的检测技术，以确保轴承的制造质量。只有这样，才能最大限度地减少制造缺陷，提高轴承的可靠性和耐久性<sup>[6]</sup>。

### （三）工作条件

#### 1. 载荷变化与冲击

载荷变化与冲击是导致齿轮箱轴承失效的重要因素之一。在实际运行中，齿轮箱可能承受非恒定的载荷，例如在重载启动、负载突变或机械冲击时，轴承需要承受瞬时增加的应力。这种非恒定的载荷条件对轴承的材料和结构设计提出了严峻的挑战。重载启动可能导致轴承在短时间内承受远超其设计极限的载荷，从而加速磨损和疲劳。负载突变则可能引发轴承内部的应力重新分布，造成局部应力集中，增加失效的风险。机械冲击，如设备运行中突然遇到的障碍物或意外碰撞，会产生瞬间的巨大冲击力，这种冲击力可能导致轴承的瞬时过载，甚至直接造成损坏。因此，在设计和制造齿轮箱时，必须充分考虑载荷变化与冲击的影响，采用适当的材料和结构设计，以提高轴承的耐冲击能力和适应非恒定载荷的能力<sup>[7]</sup>。

#### 2. 温度、润滑与腐蚀环境

在齿轮箱轴承的工作过程中，温度、润滑与腐蚀环境是三个关键的外部因素，它们对轴承的性能和寿命有着显著影响。温度的升高可能导致润滑剂失效或轴承材料性能退化，从而影响轴承的正常运转和承载能力。过高的温度还可能加速轴承内部的化学反应，导致润滑脂老化、氧化，进而增加轴承的摩擦和磨损。润滑状况的好坏直接关系到轴承的运转效率和寿命。缺乏适当的润滑或润滑剂选用不当，都会增加轴承的摩擦系数，导致热量积聚和温度升高，从而加速轴承的磨损和失效。此外，腐蚀环境也是影响轴承性能的重要因素。在潮湿、酸性或碱性环境中，轴承材料容易发生化学反应，导致表面腐蚀和性能下降。这种腐蚀不仅会降低轴承的精度和运转平稳性，还可能引发应力集中和裂纹扩展，最终导致轴承失效。因此，在齿轮箱轴承的设计和运行过程中，必须充分考虑温度、润滑与腐蚀环境的影响，采取相应的措施来保障轴承的正常运转和延长使用寿命。

### 三、预防策略与维护实践

#### （一）设计优化与标准更新

在设计齿轮箱轴承时，应充分考虑轴承的工作环境和使用需求，采用先进的设计理念和技术手段，对轴承的结构、材料和润滑方式进行优化。通过设计优化，可以减少轴承的应力集中，提高轴承的承载能力和运转平稳性。同时，随着科技的进步和行业的发展，轴承的设计标准也在不断更新和完善。因此，在设计和制造过程中，应及时了解和掌握最新的设计标准和技术规范，确保轴承的质量和性能符合行业要求<sup>[8]</sup>。

#### （二）材料与工艺改进

在齿轮箱轴承的失效预防中，材料与工艺改进是至关重要的环节。轴承通常由内圈、外圈、滚动体和保持架等部分组成，这些组件的材料性能直接影响到轴承的耐磨损性和疲劳寿命。例如，采用高碳铬轴承钢可以显著提高滚动接触的耐疲劳性能，但需确保其硬度、韧性与淬透性的平衡。此外，表面处理技术如渗碳淬火、渗氮和表面涂层等，也能有效提升轴承的耐磨性和耐腐蚀性。这些技术通过改变轴承材料表面的化学组成和微观结构，增强了材料的硬度、润滑性和抗腐蚀能力。同时，在工艺方面，采用精密锻造、精密加工和热处理等先进技术，可以进一步减少轴承的制造误差和内部缺陷，从而提高轴承的精度和可靠性。通过材料与工艺的双重改进，我们可以更有效地预防齿轮箱轴承的失效。

除了上述提到的材料和工艺改进措施，还应关注新材料的应用研究。近年来，随着材料科学的不断发展，一些新型高性能材料，如陶瓷、复合材料以及特种合金等，正在逐渐应用于轴承制造中。这些新材料往往具有更优异的机械性能、热稳定性和耐腐蚀性，能够在极端工况下保持轴承的稳定运行，进一步延长其使用寿命<sup>[9]</sup>。

此外，工艺创新也是不可忽视的一环。例如，采用先进的数控加工技术和自动化生产线，可以实现对轴承制造过程的精准控制，减少人为因素导致的误差。同时，引入智能化检测技术，如超声波检测、磁粉检测等，可以在生产过程中及时发现并排除潜在缺陷，确保每一批次轴承的质量稳定可靠。

#### （三）润滑与冷却系统的优化

润滑与冷却系统的优化在预防齿轮箱轴承失效中起着至关重

要的作用。润滑质量直接影响轴承的摩擦系数和温升，而冷却效率则决定了轴承工作温度的控制。良好的润滑系统能够减少轴承部件之间的摩擦和磨损，延长轴承的使用寿命。合适的润滑剂不仅可以降低摩擦系数，减少能量损失，还能在轴承表面形成一层保护膜，防止金属间的直接接触和腐蚀。同时，润滑剂还能带走轴承在工作中产生的热量，起到冷却作用，防止轴承过热导致的性能下降和失效。冷却系统的优化则着重于提高热交换效率，确保轴承工作温度保持在适宜的范围内，避免因高温引起的材料退化和润滑失效。因此，通过润滑与冷却系统的综合优化，我们可以显著提升齿轮箱轴承的运行效率和可靠性，进一步预防其失效。

#### （四）预测性维护与状态监测

预测性维护与状态监测是预防齿轮箱轴承失效的关键手段。通过实时监测轴承的运行状态，可以提前发现潜在的故障，从而减少非计划停机，提高设备的可靠性和生产效率。预测性维护依赖于先进的传感器技术和数据分析算法，能够实时监测轴承的振动、温度、声音等关键参数。当这些参数出现异常变化时，系统能够及时发出预警，提示维护人员进行检查和维修。这种方法不仅提高了维护的精准性，还大大减少了因过度维护或维护不足导致的资源浪费。状态监测则通过定期或不定期的数据采集和分析，评估轴承的健康状态和使用寿命。结合历史数据和趋势分析，可以预测轴承未来的性能变化，为制定合理的维护计划提供科学依据。预测性维护与状态监测的实施，不仅提升了齿轮箱轴承的运行效率，还为企业的生产安全和成本控制带来了显著效益<sup>[10]</sup>。

### 四、结束语

随着工业技术的不断进步，齿轮箱轴承的性能和可靠性日益成为影响设备运行效率和生产成本的关键因素。通过对轴承失效影响因素的深入探究，我们不仅能够更好地理解失效的机理和过程，还能够采取针对性的预防策略和维护措施，延长轴承的使用寿命，提高设备的整体性能。本文详细分析了齿轮箱轴承失效的基本原理、影响因素以及预防策略与维护实践，特别是强调了预测性维护与状态监测在提升轴承运行效率中的重要性。未来，随着智能化和数字化技术的不断发展，我们有理由相信，齿轮箱轴承的失效问题将得到更为有效的解决。

### 参考文献

- [1] 董洋. 基于DCNN的齿轮箱轴承故障诊断与健康识别研究[D]. 沈阳工程学院, 2023.
- [2] 雍跃, 陈慧, 赖晓丽. 基于有限元的轮边齿轮箱破裂分析及改进[J]. 机械研究与应用, 2021(05).
- [3] 陈加国, 翁秀奇. 减速器齿轮箱拓扑优化及轴承有限元分析[J]. 化工时刊, 2022, 36(12): 5-9.
- [4] 孙鑫威, 纪爱敏, 杜占涛, 等. 动车组齿轮箱滚动轴承变转速故障诊断方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(01): 106-115.
- [5] 陈辉, 黄伟, 尚艳涛, 等. 大功率风电齿轮箱轴承试验和检测技术[J]. 轴承, 2023, (06): 121-126.
- [6] 郭晏麟. 基于同齿轮箱高度集成一体化理念开发的发电机轴承单元结构[J]. 机械管理开发, 2022, 37(11): 24-25+29.
- [7] 赖舒平, 李振华, 张义孔. 主动齿轮双支撑式电机齿轮箱输入轴轴承载荷分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(05): 36-41.
- [8] 孙海波, 沈峰. 风电齿轮箱轴承内部疲劳裂纹萌生与扩展方向研究[J]. 机械传动, 2022, 46(08): 33-38.
- [9] 张钟文. 齿轮箱滑动轴承损坏原因及解决措施[J]. 机电工程技术, 2021, 50(08): 284-285.
- [10] 杨林杰, 李俞峰, 李娜娜, 等. 高速齿轮箱可倾瓦轴承性能研究[J]. 河南科技, 2021, 40(21): 34-36.

# 机电安装项目精细化管理方法与实践应用

孙健<sup>1</sup>, 丁国祥<sup>2</sup>, 马强<sup>2</sup>

1. 青岛宇通消防科技有限公司, 山东 青岛 266000

2. 青岛宝利建设集团有限公司, 山东 青岛 266000

DOI: 10.61369/ME.2024090007

**摘要：** 随着我国工业化和城市化进程的加速，机电安装项目在各类工程建设中的重要性日益凸显。本文聚焦于机电安装项目的精细化管理方法与实践应用展开深入研究。首先阐述了精细化管理在机电安装项目中的重要意义，它有助于提高项目质量、降低成本、缩短工期并增强企业竞争力。接着详细分析了精细化管理的具体方法，涵盖了前期规划、施工组织、质量控制、安全管理以及成本核算等多个关键环节。结合实际案例探讨了这些方法在电气机械相关机电安装项目中的具体实践应用，总结了实践过程中的经验与教训。通过研究发现，有效的精细化管理能够显著提升机电安装项目的整体效益和管理水平，为企业创造更大的价值，也为行业的可持续发展提供有力支撑。

**关键词：** 机电安装项目；精细化管理；电气机械；实践应用；管理效益

## Refined Management Methods and Practical Applications for Mechanical and Electrical Installation Projects

Sun Jian<sup>1</sup>, Ding Guoxiang<sup>2</sup>, Ma Qiang<sup>2</sup>

1. Qingdao Yutong Fire Protection Technology Co., LTD, Qingdao, Shandong 266000

2. Qingdao Baoli Construction Group Co., LTD, Qingdao, Shandong 266000

**Abstract：** With the acceleration of industrialization and urbanization in China, the importance of mechanical and electrical installation projects in various types of engineering construction has become increasingly prominent. This article focuses on conducting in-depth research on the refined management methods and practical applications of mechanical and electrical installation projects. Firstly, it expounds the significant importance of refined management in mechanical and electrical installation projects. It helps to improve project quality, reduce costs, shorten the construction period and enhance the competitiveness of enterprises. Then, a detailed analysis was conducted on the specific methods of refined management, covering multiple key links such as pre-planning, construction organization, quality control, safety management, and cost accounting. Based on actual cases, the specific practical application of these methods in the mechanical and electrical installation projects related to electrical machinery was discussed, and the experiences and lessons learned in the practical process were summarized. Through research, it has been found that effective refined management can significantly enhance the overall benefits and management level of mechanical and electrical installation projects, create greater value for enterprises, and also provide strong support for the sustainable development of the industry.

**Keywords：** mechanical and electrical installation project; refined management; electrical machinery; practical application; management efficiency

在现代工程建设中，机电安装项目技术复杂、系统繁多，其质量与效率直接影响工程整体功能。传统管理模式已难以应对当前挑战，暴露出管理粗放、效率低等问题，导致成本增加、工期延误和质量隐患。精细化管理强调精准细致的管控，以最小投入获取最大效益。将其应用于机电安装项目，可实现全生命周期的有效管理，涵盖设计规划、施工质量控制到调试运行各环节，提升项目质量与安全性，降低成本，增强企业竞争力。因此，研究精细化管理的方法与实践具有重要意义。

## 一、机电安装项目精细化管理概述

### （一）精细化管理的概念与内涵

精细化管理是一种以最大限度地减少管理所占用的资源和降

低管理成本为主要目标的管理方式。它强调将管理工作做精做细，通过对管理流程的优化和对管理环节的精确控制，实现管理的高效性和精准性。在机电安装项目中，精细化管理要求对项目的各个方面进行深入分析和研究，制定详细的管理标准和操作规



范，确保每一个施工环节都能得到有效的管理和控制。

精细化管理的内涵包括精确的计划、精准的执行、精细的核算和严格的考核。精确的计划是指在项目开始前，对项目的目标、任务、进度、资源等进行详细的规划和安排；精准的执行是指在施工过程中，严格按照计划和规范进行操作，确保各项任务的顺利完成；精细的核算则是对项目的成本、质量、进度等进行实时的监控和分析，及时发现问题并采取措施加以解决；严格的考核是指建立科学合理的考核机制，对项目团队成员的工作绩效进行评估和奖惩，激励员工积极工作。

## （二）机电安装项目实施精细化管理的必要性

随着电气机械技术的不断发展和更新，机电安装项目的规模和复杂度越来越高，对项目管理的要求也越来越严格。传统的管理模式已经难以满足现代机电安装项目的需求，实施精细化管理势在必行<sup>[1]</sup>。

## （三）精细化管理在电气机械安装中的优势

在电气机械安装中，精细化管理具有独特的优势。电气机械安装涉及到大量的电气设备和线路，其安装质量直接影响到设备的运行性能和安全性。精细化管理可以对电气设备的选型、采购、安装、调试等环节进行严格的把控，确保设备的质量和性能符合要求。

# 二、机电安装项目前期精细化管理方法

## （一）项目规划与设计阶段的精细化管理

在项目规划与设计阶段，精细化管理的重点是确保设计方案的科学性和合理性。要进行充分的项目调研和分析，了解项目的需求和使用要求，结合电气机械的特点和性能，制定出符合实际情况的设计方案。在设计过程中，要采用先进的设计理念和方法，运用计算机辅助设计软件进行模拟和优化，确保设计方案的可行性和可靠性<sup>[2]</sup>。

要加强与设计单位的沟通和协调，及时反馈项目的需求和意见，确保设计方案能够满足项目的要求。要对设计文件进行严格的审核和把关，检查设计文件是否完整、准确，是否符合相关的规范和标准。对于设计中存在的问题，要及时与设计单位沟通解决，避免在施工过程中出现设计变更，影响项目的进度和成本。

## （二）招投标与合同管理的精细化操作

招投标与合同管理是机电安装项目前期管理的重要环节。在招投标过程中，要严格按照相关的法律法规和程序进行操作，确保招投标的公平、公正、公开。要对投标单位的资质、信誉、业绩等进行严格的审查，选择具有丰富经验和良好信誉的施工单位。

在合同管理方面，要制定详细、明确的合同条款，明确双方的权利和义务。合同中要对工程范围、工程质量、工程进度、工程价款、支付方式、违约责任等重要事项进行明确的约定，避免在合同履行过程中出现纠纷。要加强对合同执行情况的跟踪和监督，及时发现和解决合同履行过程中出现的问题，确保合同的顺利履行<sup>[3]</sup>。

## （三）施工组织设计的精细化编制

施工组织设计是指导机电安装项目施工的重要文件，其编制的质量直接影响到项目的施工质量和进度。在编制施工组织设计时，要进行精细化的考虑和安排。要根据项目的特点和要求，制定合理的施工方案和施工工艺。施工方案要具有科学性、合理性和可行性，能够确保施工过程的安全、高效。

要合理安排施工进度计划，明确各施工阶段的开始时间和结束时间，确保项目能够按时完成。在施工进度计划中，要充分考虑到各种可能影响施工进度的因素。要对施工资源进行合理的配置，包括人力资源、物资资源、机械设备等，确保施工过程中资源的充足供应<sup>[4]</sup>。

# 三、机电安装项目施工过程精细化管理措施

## （一）施工进度精细化管理

施工进度精细化管理的关键在于制定科学合理的进度计划，并对进度计划进行实时的监控和调整。在制定进度计划时，要根据项目的总工期和各分项工程的施工顺序，合理安排各施工阶段的时间节点。要采用先进的进度管理工具，如甘特图、网络计划图等，对进度计划进行可视化管理，以便及时发现进度偏差。

在施工过程中，要建立进度监控机制，定期对施工进度进行检查和分析。通过对比实际进度与计划进度，及时发现进度偏差，并分析偏差产生的原因。对于进度偏差较大的情况，要及时采取有效的措施进行调整，确保项目能够按照计划顺利进行<sup>[5]</sup>。

## （二）施工质量精细化控制

施工质量精细化控制是机电安装项目施工过程管理的核心。要建立严格的质量管理制度，明确质量目标和质量责任。在施工过程中，要严格按照施工图纸和相关的规范标准进行施工，加强对施工质量的检验和验收。

要对原材料和构配件进行严格的质量检验，确保其质量符合要求。对于关键的施工工序和隐蔽工程，要进行旁站监督，确保施工质量。要加强对施工人员的质量培训和教育，提高施工人员的质量意识和操作技能。建立质量问题追溯机制，对出现的质量问题要及时进行分析和处理，追究相关人员的责任，避免类似问题的再次发生。

## （三）施工安全精细化管理

施工安全是机电安装项目施工过程中不容忽视的重要问题。要建立健全的安全生产管理制度，加强对施工人员的安全教育和培训，提高施工人员的安全意识和自我保护能力。在施工现场要设置明显的安全警示标志，配备必要的安全防护设施和消防器材，确保施工人员的生命安全和身体健康<sup>[6]</sup>。

要对施工现场的安全风险进行全面的识别和评估，制定相应的安全风险防范措施。对于高风险的施工工序，要制定专项的安全施工方案，并严格按照方案进行施工。要加强对施工现场的安全检查和监督，及时发现和消除安全隐患，确保施工现场的安全稳定。

## 四、电气机械安装现场精细化管理实践

### （一）设备安装与调试的精细化操作

设备安装与调试是电气机械安装的关键环节。在设备安装过程中，要严格按照设备的安装说明书和施工图纸进行操作，确保设备的安装位置准确、牢固。要对设备的基础进行严格的检查和验收，确保基础的强度和水平度符合要求。在设备安装完成后，要进行全面的检查和调试，检查设备的运行状况是否正常，各项参数是否符合要求。

在设备调试过程中，要制定详细的调试方案，按照调试方案进行操作。要对设备的性能进行测试和评估，及时发现和解决设备调试过程中出现的问题<sup>[7]</sup>。要做好设备调试的记录和总结，为设备的正式运行提供依据。

### （二）现场材料与物资的精细化管理

现场材料与物资的管理直接影响到施工的进度和质量。要建立完善的材料与物资管理制度，对材料和物资的采购、运输、存储、发放等环节进行严格的管理。在材料采购过程中，要选择质量可靠、价格合理的供应商，确保材料的质量和供应的及时性。

在材料和物资的存储过程中，要按照不同的种类和规格进行分类存放，做好防潮、防火、防盗等措施。要建立材料和物资的台账，对材料和物资的收发情况进行详细的记录，定期进行盘点和清查，确保材料和物资的数量和质量准确无误。在材料和物资的发放过程中，要严格按照施工进度和需求进行发放，避免材料的浪费和积压<sup>[8]</sup>。

### （三）施工团队与人员的精细化管理

施工团队与人员的管理是现场精细化管理的重要方面。要建立科学合理的人员组织结构，明确各岗位的职责和权限。要加强对施工人员的培训和教育，提高施工人员的专业技能和综合素质。在施工过程中，要建立激励机制，对表现优秀的施工人员进行奖励，对违反规定的施工人员进行处罚，激发施工人员的工作积极性和主动性。

## 五、机电安装项目后期精细化管理与评估

### （一）项目验收与交付的精细化流程

项目验收与交付是机电安装项目的最后一个环节。在项目验收过程中，要严格按照相关的规范和标准进行操作，确保项目的质量符合要求。要对项目的各项资料进行整理和归档，包括施工

图纸、施工记录、检验报告等，确保资料的完整性和准确性。

在项目交付过程中，要向业主提供详细的使用说明书和维护手册，对业主进行培训和指导，确保业主能够正确使用和维护机电设备。要建立项目回访制度，定期对项目进行回访，了解项目的使用情况和业主的意见和建议，及时解决项目运行过程中出现的问题<sup>[9]</sup>。

### （二）项目成本核算与效益评估的精细化分析

项目成本核算与效益评估是机电安装项目后期管理的重要内容。要对项目的成本进行详细的核算和分析，包括直接成本和间接成本。通过成本核算，了解项目的成本构成和成本控制情况，找出成本控制中存在的问题和不足之处，采取相应的措施进行改进。

要对项目的效益进行评估，包括经济效益和社会效益。通过效益评估，了解项目的盈利能力和社会贡献，为企业的决策提供依据。要总结项目管理过程中的经验和教训，不断完善企业的管理体系和方法，提高企业的管理水平和市场竞争力<sup>[10]</sup>。

### （三）经验总结与持续改进的精细化措施

经验总结与持续改进是机电安装项目精细化管理的重要环节。要对项目管理过程中的经验和教训进行全面的总结和分析，找出项目管理中存在的问题和不足之处，制定相应的改进措施。要建立持续改进的机制，将改进措施纳入企业的管理体系中，不断完善企业的管理流程和方法。

要加强对新技术、新工艺、新材料的学习和应用，不断提高企业的技术水平和创新能力。通过持续改进，不断提高机电安装项目的管理水平和质量，为企业的可持续发展奠定坚实的基础。

## 六、结束语

机电安装项目精细化管理是提高项目质量、降低成本、缩短工期、增强企业竞争力的有效手段。通过对机电安装项目全生命周期的精细化管理，尤其是在电气机械安装方面的精细化实践应用，能够实现对项目各个环节的精准控制和高效管理。然而，机电安装项目精细化管理是一个不断发展和完善的过程。在实际应用中，还需要不断地探索和创新，结合项目的实际情况和企业的发展需求，进一步优化管理方法和措施。要加强对精细化管理理念的宣传和培训，提高全体员工的精细化管理意识和能力，形成全员参与、全过程管理的良好氛围。只有这样，才能不断提高机电安装项目精细化管理的水平，为企业创造更大的经济效益和社会效益，推动机电安装行业的持续健康发展。

## 参考文献

- [1] 张明岗. 机械系统与电气控制融合：机电一体化系统设计方法研究 [J]. 工程技术与管理（香港），2024，(06)：67-69.
- [2] 黄健. BIM 技术在医药项目机电安装精细化管理中的应用 [J]. 建筑与装饰，2022，(07)：144-146.
- [3] 张觉荣. 项目管理方法在机电安装中的应用 [J]. 视周刊，2023，(17)：190-192.
- [4] 王春晓，何有泉. BIM 技术在复杂建筑机电安装项目管理中的应用与实践 [J]. 旅游世界（下半月），2023，(1)：22-24.
- [5] 杨建文. 水电站机电安装工程中生产管理与成本管控 [J]. 水电站机电技术，2024，47(09)：165-168.
- [6] 温雅峰. 精细化管理在建筑机电安装项目中的实践研究 [J/OL]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术，2024(9)[2024-09-01].
- [7] 郭书鹏. 浅析机电安装工程电气施工关键工序控制与管理措施 [C]// 江西省工程师联合会. 2023 智能工程与经济建设学术交流会，2022.
- [8] 程霖. 机电安装工程电气施工工艺与控制管理分析 [J/OL]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术，2022(9)[2022-09-01].
- [9] 曹立宝. 全面预算管理在机电安装工程项目的的应用 [J]. 财富生活，2024，(26)：95-97.
- [10] 高成荣. 大型公建项目机电安装工程应用实践 [J]. 科学技术创新，2024，(03)：183-186.

# 齿轮箱关键加工设备（如滚齿机、磨齿机） 预防性维护体系构建

朱孟壮

南京高精齿轮集团有限公司，江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090009

**摘要：** 随着现代工业技术的快速发展，齿轮箱作为机械设备中的核心传动部件，其加工精度与运行稳定性直接关系到整个生产线的效率与质量。滚齿机和磨齿机作为齿轮箱关键加工设备，其预防性维护体系的构建显得尤为重要。本文旨在探讨齿轮箱关键加工设备的预防性维护策略，通过分析滚齿机与磨齿机的工作原理、特点以及常见故障模式，提出一套科学、系统的预防性维护体系构建方案。该方案涵盖了设备维护标准的制定、维护团队的培训与能力提升、维护资源的配置与优化等多个方面，旨在提高设备的可靠性和使用寿命，降低故障率和维修成本。

**关键词：** 齿轮箱；关键加工设备；预防性维护；滚齿机；磨齿机

## Construction of a Preventive Maintenance System for Key Processing Equipment of Gearboxes (Such as Gear Hobbing Machines and Gear Grinding Machines)

Zhu Mengzhuang

Nanjing High Precision Gear Group Co., LTD., Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract：** With the rapid development of modern industrial technology, gearboxes, as core transmission components in mechanical equipment, their processing accuracy and operational stability directly affect the efficiency and quality of the entire production line. As key processing equipment for gearboxes, the construction of a preventive maintenance system for gear hobbing machines and gear grinding machines is particularly important. This article aims to explore the preventive maintenance strategies for key processing equipment of gearboxes. By analyzing the working principles, characteristics, and common failure modes of gear hobbing machines and gear grinding machines, a scientific and systematic construction plan for the preventive maintenance system is proposed. This plan covers multiple aspects such as the formulation of equipment maintenance standards, the training and capacity enhancement of maintenance teams, and the allocation and optimization of maintenance resources, aiming to improve the reliability and service life of equipment, reduce failure rates and maintenance costs.

**Keywords：** gearbox; key processing equipment; preventive maintenance; gear hobbing machine; gear grinding machine

### 一、关键加工设备分析

#### （一）滚齿机的工作原理与特点

滚齿机是齿轮箱关键加工设备之一，其工作原理基于切削工艺，通过旋转的刀具与工件间的相对运动来切除材料，形成齿轮的齿形。滚齿机的特点包括高精度、高效率和对复杂齿轮形状的适应性。此外，滚齿机还具备以下显著特点：

一是操作灵活性高。滚齿机可通过调整刀具和工件的相对位置及运动参数，轻松加工出不同模数、压力和螺旋角的齿轮，满足多样化的生产需求。

二是结构稳定可靠。滚齿机采用坚固的床身和精密的传动系统，确保在长时间、高强度的工作中仍能保持优异的加工精度和稳定性。

三是自动化程度高。现代滚齿机通常配备先进的数控系统，可实现自动对刀、自动换刀等功能，大大提高了加工效率和生产自动化水平。

#### （二）磨齿机的工艺流程与精度要求

磨齿机在齿轮箱关键加工设备中扮演着至关重要的角色。其工艺流程通常包括粗磨、半精磨和精磨三个阶段，以确保齿轮的尺寸、形状和位置精度。在粗磨阶段，磨削量较大，主要去除大部分加工余量；半精磨时，会进一步减小误差，为精磨做准备；精磨阶段则是至关重要的最后一步，它决定了齿轮的最终精度。在这一阶段，磨削量极小，主要目的是消除微小的形状和位置误差，以达到设计要求的高精度。磨齿机不仅要求高精度，还需保证齿轮的表面质量，如表面粗糙度和波纹度等，这些都直接影响到齿轮的传动效率和噪音水平。因此，在磨齿过程中，严格控制



各项工艺参数，如磨削速度、进给量、冷却液的使用等，是至关重要的。此外，磨齿机还具备高度的刚性和稳定性，以确保在长时间、高精度的加工过程中，能够保持稳定的加工性能，满足齿轮箱对关键零部件的高标准要求<sup>[1]</sup>。

### （三）设备常见故障模式与影响分析

磨齿机作为齿轮箱关键加工设备，其故障模式多种多样，每一种故障都可能对生产效率和产品质量产生重大影响。常见的故障模式包括但不限于磨削不良、振动过大、噪音异常、温度过高等。磨削不良可能导致齿轮表面粗糙度不达标，影响传动效率和噪音水平；振动过大则可能引发机床结构松动，甚至损坏刀具和工件；噪音异常往往是设备内部故障的前兆，需及时排查；温度过高则可能加速机床磨损，缩短使用寿命。

这些故障模式不仅影响设备的正常运行，还可能对生产安全构成威胁。因此，深入分析磨齿机的故障模式及其影响，是构建预防性维护体系的重要基础。通过故障模式与影响分析（FMEA），可以识别出关键故障点，为后续的维护策略制定提供科学依据<sup>[2]</sup>。

## 二、预防性维护策略

### （一）定期检查与维护计划

定期检查与维护计划是预防性维护策略的核心组成部分，旨在确保齿轮箱关键加工设备的稳定运行和延长设备寿命。这一计划应详细列出每项设备的检查频率、检查内容以及预期的维护行动。例如，滚齿机可能需要每月进行一次全面的润滑系统检查，以防止因润滑不足导致的异常磨损；而磨齿机的电气系统可能需要每季度进行一次绝缘性能测试，以避免潜在的电气故障。

此外，定期检查与维护计划还应包括关键部件的磨损情况评估。对于磨齿机而言，砂轮的磨损情况应作为重点检查项目，一旦磨损超过规定限度，应立即更换，以确保加工精度和表面质量。同时，对于传动系统、冷却系统等关键组件，也应制定相应的检查与维护标准，确保其在最佳状态下运行。通过实施定期检查与维护计划，可以有效预防设备故障，减少非计划停机时间，提高生产效率和产品质量<sup>[3]</sup>。

### （二）设备状态监测与早期预警系统

设备状态监测与早期预警系统是预防性维护策略中的核心组成部分，旨在通过实时监控设备运行状态，提前发现潜在的故障隐患。例如，可以利用先进的传感器技术，对滚齿机和磨齿机的关键参数如振动、温度、噪音和润滑状态进行持续监测。当这些参数超出预设的正常范围时，系统将自动触发预警，通知维护人员进行干预。

此外，系统还可以结合历史数据和机器学习算法，对设备运行状态进行趋势分析，预测潜在故障的发生概率和时间窗口。这种预测性维护能够进一步提升维护效率，减少突发故障带来的损失。为了确保设备状态监测与早期预警系统的有效运行，需要定期校准传感器，验证预警机制的准确性，并根据设备运行数据的反馈，不断优化预警模型和参数设置。通过这一系统的实施，企业能够实现对齿轮箱关键加工设备的精细化管理，确保生产线的稳定运行和高效产出<sup>[4]</sup>。

### （三）维修记录与故障数据分析

在预防性维护策略中，维修记录与故障数据分析是不可或缺的环节。通过对历史维修记录的深入挖掘，可以识别设备故障的模式和规律。例如，某些部件可能频繁出现磨损或损坏，通过分析这些记录，可以确定故障的高发部位和原因。进一步地，结合故障发生时的工作条件和操作参数，可以构建故障树或故障模式与影响分析（FMEA），从而更深入地理解故障发生的机理。此外，利用统计分析方法，如可靠性分析、寿命分布拟合等，可以对设备的可靠性和寿命进行评估，为备件管理和维护计划的优化提供依据。通过这些分析，企业能够针对性地采取措施，如改进设计、优化操作工艺或更换更可靠的部件，以减少故障的发生，提高设备的可靠性和使用效率<sup>[5]</sup>。

## 三、维护体系构建步骤

### （一）设备维护标准的制定

在预防性维护体系构建中，设备维护标准的制定是核心环节。这一阶段需要详细定义每台关键加工设备的正常运行参数、性能指标和维护周期。这些标准应涵盖设备的日常检查、定期保养、故障处理流程以及维修后的验收标准。通过明确这些标准，可以确保维护工作的规范性和一致性，减少因人为因素导致的维护差异。同时，设备维护标准的制定还需考虑设备的使用环境、工作强度以及制造商的推荐维护指南，以确保标准的科学性和实用性。在标准制定过程中，应充分征求一线操作和维护人员的意见，确保标准的可操作性和可接受性。此外，随着设备技术的不断更新和工艺的改进，设备维护标准也应适时进行修订和完善，以适应新的维护需求和技术要求。

制定过程中，还需注意以下几点：首先，要确保标准的详细性和全面性，避免遗漏任何可能影响设备性能和稳定性的关键因素。其次，标准的表述应清晰明确，避免产生歧义，便于操作和维护人员理解和执行。再者，标准的制定应与企业的整体维护策略和目标相一致，确保维护工作的有效性和高效性。最后，设备维护标准的制定还需考虑法律法规和行业规范的要求，确保企业的维护工作符合相关标准和规定，避免因违规操作而带来的法律风险。通过综合考虑以上因素，可以制定出既科学又实用的设备维护标准<sup>[6]</sup>。

### （二）维护团队的培训与能力提升

在构建预防性维护体系的过程中，维护团队的培训与能力提升是不可或缺的一环。团队成员不仅需要理解齿轮箱关键加工设备的工作原理和常见故障模式，还应具备预防性维护的先进理念和专业技能。为了实现这一目标，企业应定期组织内部培训课程，邀请设备制造商的技术专家或具有丰富经验的维护工程师进行授课。课程内容应涵盖设备的基础知识、故障诊断技巧、预防性维护策略以及最新的维护技术和工具。此外，通过模拟故障排查和维修操作，增强团队成员的实战能力，提升他们在面对实际问题时的应对能力<sup>[7]</sup>。

除了内部培训，企业还应鼓励团队成员参加外部的专业培训和认证课程，如设备制造商提供的培训课程或行业协会组织的维护技术研讨会。这些外部培训可以帮助团队成员拓宽视野，了解

行业的最新动态和技术趋势，进一步提升他们的专业素养。

同时，建立团队内部的分享机制也是提升维护能力的重要途径。定期举行技术交流会，让团队成员分享各自在维护工作中遇到的难题和解决方案，可以促进知识的共享和创新思维的激发。通过相互学习和借鉴，团队成员可以不断提升自己的维护技能和工作效率。

### （三）维护资源的配置与优化

在构建预防性维护体系的过程中，维护资源的配置与优化是确保设备高效运行的关键环节。资源优化涉及人员、备件、工具、时间和成本等多个维度的综合考虑。例如，根据历史数据，可以分析出滚齿机和磨齿机的平均故障间隔时间，以此为依据制定合理的备件库存策略，避免过度储备导致的资金占用，同时确保在设备需要维修时能快速响应。此外，可以引入预测性维护技术，如使用传感器监测设备运行状态，通过数据分析模型预测可能的故障，提前安排维修工作，减少非计划停机时间。

在人员配置方面，企业应根据设备数量、维护复杂度和团队成员的技能水平，合理规划维护团队的人员结构。一方面，要确保有足够的维护人员应对日常的维护需求，另一方面，也要避免人员冗余，造成资源浪费。对于关键岗位，如高级维修技师，可以通过内部培养和外部引进相结合的方式，确保团队的技术实力。同时，建立合理的激励机制，激发团队成员的工作积极性和创新精神，进一步提升维护效率和质量。

此外，工具和设备的配置也是资源优化的重要方面。企业应根据维护工作的实际需求，选择适合的工具和设备，确保维修工作的顺利进行。同时，定期对工具和设备进行维护和保养，延长其使用寿命，降低维护成本<sup>[9]</sup>。

## 四、维护体系的实施与优化

### （一）初始维护计划的执行

在预防性维护体系构建中，初始维护计划的执行是确保齿轮箱关键加工设备高效、安全运行的关键步骤。这一阶段需要结合设备的工作特性和历史维修数据，制定出详实的维护时间表和执行业务流程。维护计划应涵盖定期检查、传感器监测、预防性维修等多个方面，确保设备的各个部件都能得到及时且有效的维护。同时，要明确各项维护任务的责任人，确保维护工作的有效执行。在执行过程中，还需注重与设备操作人员的沟通，收集他们的反

馈意见，以便对维护计划进行适时的调整和优化<sup>[9]</sup>。

### （二）维护效果的评估与反馈

在预防性维护体系构建中，维护效果的评估与反馈是至关重要的环节。通过定期对维护活动进行效果评估，可以确保设备的稳定运行，减少非计划停机时间，从而提高生产效率。

评估的内容应涵盖维护计划的执行情况、设备故障率的降低程度、维修成本的节约情况以及设备整体性能的提升等方面。通过数据分析和对比，可以直观地了解维护活动的效果，为后续的优化提供有力支持。同时，建立有效的反馈机制，鼓励设备操作人员和维护人员积极提出意见和建议，有助于及时发现并解决维护过程中存在的问题，进一步提升维护体系的效能。

### （三）持续改进机制的建立

在预防性维护体系构建中，持续改进机制的建立至关重要。这涉及到对现有维护策略的定期评估、故障数据的深入分析以及团队技能的持续提升。为了建立一个有效的持续改进机制，首先需要设定明确的评估标准和周期，定期对维护策略进行全面审查。这包括对维护计划的执行效率、成本效益以及故障预防效果等方面进行综合考量。同时，借助先进的数据分析工具，对故障数据进行深度挖掘，以识别潜在的设备故障模式和趋势，为预防性维护提供更为精准的决策依据。

此外，重视团队技能的持续提升也是持续改进机制不可或缺的一环。通过定期举办培训课程、技术交流活动以及引入新的维护技术和理念，不断提升维护团队的专业素养和创新能力。同时，建立激励机制，鼓励团队成员积极学习新知识、掌握新技能，为预防性维护体系的持续优化注入源源不断的动力<sup>[10]</sup>。

## 五、结束语

综上所述，齿轮箱关键加工设备如滚齿机和磨齿机的预防性维护体系构建是一个系统工程，需要从设备分析、预防性维护策略制定、维护体系构建步骤以及实施与优化等多个方面综合考虑。通过科学的设备维护标准、专业的维护团队以及合理的资源配置，可以有效提升设备的可靠性和稳定性，降低故障率，从而保障生产效率和产品质量。未来，随着智能制造技术的不断发展，预防性维护体系也将向着更加智能化、自动化的方向发展。因此，企业应持续关注预防性维护领域的新技术和新理念，不断优化和完善维护体系，以适应不断变化的市场需求和设备运行环境。

## 参考文献

- [1] 郑威德. 齿轮箱加工设备预防性维护技术研究 [J]. 机械制造, 2022, 50(3).
- [2] 蔡钧. 基于状态监测的滚齿机预防性维护策略 [J]. 设备管理与维修, 2021, (12).
- [3] 黄诗昀. 磨齿机精度保持性及维护技术研究进展 [J]. 工具技术, 2023, 47(2).
- [4] 王笑笑. 基于小波分析的风电机组齿轮箱振动信号识别方法 [J]. 电工技术, 2023, (14): 46-48+148.
- [5] 魏峰, 张新明, 安文臣. 行星齿轮箱降噪能力 A-CNN 模型及其智能诊断 [J]. 机械设计与制造, 2024, (11): 237-240.
- [6] 刘舒宇. 齿轮减速器虚拟仿真样机试验技术应用研究 [D]. 大连海事大学, 2024.
- [7] 李亚男. 基于声信号的风机齿轮箱故障识别研究 [D]. 内蒙古农业大学, 2024.
- [8] 阮文浩, 康少博, 陆军, 等. PE 装置挤出机齿轮箱失效分析 [J]. 内燃机与配件, 2023, (24): 71-74.
- [9] 伍源, 朱才朝, 谭建军, 等. 环境参数对风电齿轮箱传动系统疲劳损伤的影响 [J]. 重庆大学学报, 2024, 47(03): 132-144.
- [10] 傅利强. 某船舶主推进齿轮箱故障判断与分析 [J]. 中国水运, 2019, (07): 64-65.

# 齿轮箱维修中的常见失效模式与修复工艺

王睿鸿

南京高速齿轮制造有限公司, 江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090011

**摘 要 :** 齿轮箱作为机械设备中的关键传动部件, 其运行状态直接影响到整个设备的性能和寿命。本文旨在探讨齿轮箱维修中的常见失效模式与修复工艺。通过对磨损与疲劳失效、润滑失效以及材质与热处理失效等典型失效模式的分析, 揭示了失效模式的内在机制和外在表现。进一步地, 文章详细阐述了影响这些失效模式的多种因素, 包括载荷与应力分布、安装与对中误差以及环境因素等。在修复工艺方面, 本文介绍了机械修复、表面处理修复以及内部结构修复等多种方法, 并针对不同失效模式提出了相应的修复建议。

**关 键 词 :** 齿轮箱; 失效模式; 维修; 修复工艺

## Common Failure Modes and Repair Processes in Gearbox Maintenance

Wang Ruihong

Nanjing High-Speed Gear Manufacturing Co., LTD., Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract :** As a key transmission component in mechanical equipment, the operating condition of the gearbox directly affects the performance and service life of the entire equipment. This article aims to explore the common failure modes and repair processes in gearbox maintenance. Through the analysis of typical failure modes such as wear and fatigue failure, lubrication failure, and material and heat treatment failure, the internal mechanisms and external manifestations of the failure modes are revealed. Furthermore, the article elaborates in detail on various factors influencing these failure modes, including load and stress distribution, installation and alignment errors, as well as environmental factors, etc. In terms of repair processes, this paper introduces various methods such as mechanical repair, surface treatment repair, and internal structure repair, and puts forward corresponding repair suggestions for different failure modes.

**Keywords :** gearbox; failure mode; maintenance; restoration process

### 一、齿轮箱失效模式识别

#### (一) 磨损与疲劳失效

磨损与疲劳失效是齿轮箱常见的失效模式, 严重影响设备的正常运行和使用寿命。齿轮在长期高负荷运转中, 由于齿面间的相对滑动和滚动, 会导致表面材料的损失, 形成磨损。随着磨损的加剧, 齿面的形状和精度会逐渐降低, 进而影响齿轮的啮合效果和传动效率。此外, 磨损还会增加齿面的粗糙度, 导致摩擦系数增大, 进一步加速磨损过程。而疲劳失效则通常是由于齿轮在交变载荷作用下, 齿根部位产生过大的应力集中, 导致裂纹的形成和扩展, 最终引发齿轮断裂。这种失效模式往往具有突发性, 对设备的安全运行构成严重威胁<sup>[1]</sup>。

#### (二) 润滑失效

润滑失效是齿轮箱运行中常见的问题, 可能导致齿轮磨损加剧、噪音增大甚至设备故障。润滑系统的有效性直接影响到齿轮的接触条件和寿命。例如, 润滑油的粘度过低可能导致润滑不足, 造成金属间的直接接触, 从而加速齿面的磨损。另一方面, 润滑油粘度过高会增加摩擦阻力, 导致油温上升, 降低润滑效果。此外, 润滑油的污染, 如混入金属碎屑、水分或其他杂质,

也会严重影响润滑性能, 导致齿轮表面腐蚀或磨损加剧。因此, 定期检查和更换润滑油, 以及保持润滑系统的清洁, 对于预防润滑失效至关重要<sup>[2]</sup>。

#### (三) 材质与热处理失效

齿轮箱的失效模式多种多样, 其中材质与热处理失效是导致设备性能下降和故障频发的重要因素之一。材质问题可能源于原始材料的缺陷, 如杂质含量过高, 或者在制造过程中因加工硬化、微观裂纹等导致的强度和韧性下降。例如, 齿轮在承受高载荷时, 如果材料的屈服强度不足, 可能会发生塑性变形或断裂。此外, 热处理工艺的失误, 如淬火不均、回火不足, 也可能造成硬度分布不均, 影响齿轮的耐磨性和疲劳寿命<sup>[3]</sup>。

另一方面, 不同材质之间的热膨胀系数差异, 若未经妥善处理, 也可能在齿轮配合部位产生应力集中, 导致早期失效。因此, 在齿轮箱的设计和制造过程中, 严格选材和控制热处理工艺至关重要。这包括对原材料进行严格的质量检测, 确保杂质含量在允许范围内, 以及优化热处理参数, 以获得理想的硬度和韧性组合。同时, 对于已服役的齿轮箱, 定期进行材质检测和热处理状态评估, 及时发现并修复潜在问题, 也是预防材质与热处理失效的有效手段<sup>[4]</sup>。



## 二、失效模式影响因素分析

### （一）载荷与应力分布

载荷与应力分布是影响齿轮箱失效的关键因素之一。齿轮在运转过程中，承受的载荷复杂多变，包括径向载荷、切向载荷以及轴向载荷等。这些载荷通过轴承传递到箱体，形成复杂的应力场。若齿轮箱的载荷分布不均，某些部位可能承受过大的应力，导致局部磨损加剧，甚至产生裂纹。

此外，齿轮的啮合过程中，由于制造误差、安装误差或热变形等因素，可能会导致啮合不完全，进而产生边缘应力集中。长期作用下，这种应力集中会加速齿面的疲劳磨损，缩短齿轮的使用寿命。因此，在齿轮箱的设计和制造过程中，应充分考虑载荷与应力分布的影响，通过优化齿轮参数、提高制造精度、改善安装工艺等手段，来降低应力集中，提高齿轮箱的承载能力和使用寿命<sup>[5]</sup>。

### （二）安装与对中误差

在齿轮箱的运行中，安装质量和对中精度是影响其长期稳定性和效率的关键因素。安装与对中误差可能导致额外的机械应力，加速磨损，甚至引起齿轮箱的早期失效。这种误差可能源于安装过程中的不规范操作，如轴承座的不精确安装、轴线的偏差等。此外，齿轮箱在长时间运行后，由于地基沉降、温度变化等因素，也可能导致对中精度的下降。这些因素共同作用，使得齿轮箱内部的齿轮、轴承等部件在运转过程中产生不必要的摩擦和碰撞，从而加剧了磨损和疲劳。因此，在安装齿轮箱时，应严格按照操作规程进行，确保每个部件都正确安装，并使用专业的对中工具来校准轴线的位置，以减少安装与对中误差对齿轮箱性能的影响。同时，定期对齿轮箱进行检查和维护，及时发现并纠正对中偏差，也是保障齿轮箱长期稳定运行的重要措施<sup>[6]</sup>。

### （三）环境因素

环境因素在齿轮箱的失效模式中起着不容忽视的作用。例如，极端温度条件可能导致润滑性能下降，过高或过低的温度都可能加速润滑油的氧化，从而引发齿轮的磨损与疲劳失效。在潮湿环境中，金属部件可能遭受腐蚀，影响材质与热处理稳定性，降低齿轮箱的使用寿命。此外，尘土和颗粒物的侵入会加剧齿轮的表面磨损，而持续的振动和冲击负荷可能导致结构的疲劳裂纹。因此，分析环境因素并采取相应的防护措施是预防齿轮箱失效的关键，如选用耐高温或低温的特殊润滑剂，以及设计适应恶劣环境的密封结构。

## 三、齿轮箱修复工艺

### （一）机械修复

#### 1. 齿面磨削与修复

在齿轮箱的维修过程中，齿面磨削与修复是至关重要的步骤，尤其当齿轮因长期运转导致磨损或疲劳失效时。齿面磨削工艺通过精确控制磨削深度和表面粗糙度，可以有效地恢复齿轮的几何形状和尺寸精度。这一步骤不仅能够消除齿面的微小缺陷，

还能提高齿轮表面的光洁度，从而减少齿轮运转时的摩擦和噪音。在进行齿面磨削时，选择合适的磨削工具和磨削参数至关重要，以确保磨削效果达到最佳。同时，磨削后的齿轮还需要进行严格的检测，以确保其几何形状、尺寸精度以及表面粗糙度均符合设计要求。在齿面磨削与修复完成后，齿轮箱的运转效率和稳定性将得到显著提升，从而延长其使用寿命<sup>[7]</sup>。

#### 2. 齿轮整形

齿轮整形是齿轮箱修复工艺中的一个重要环节，尤其在处理由于不正确啮合、过大的工作载荷或长期磨损导致的齿轮几何形状失准问题时。齿轮的精确几何形状对其传递动力和保持系统效率至关重要。例如，当齿轮的齿廓出现变形，可能导致啮合间隙增大，从而影响传动精度，增加运行噪音，并可能导致过早的疲劳断裂。

齿轮整形工艺通过一系列精密的机械加工方法，如滚压、珩磨或热压整形等，来恢复齿轮的原始几何形状。这些方法不仅能够精确地调整齿轮的齿廓和齿距，还能改善齿轮的表面质量，减少应力集中，从而提高齿轮的承载能力和使用寿命。整形过程中，关键是对整形量和整形精度的严格控制，以确保整形后的齿轮能够满足设计要求，并与配对齿轮形成良好的啮合。整形完成后，齿轮箱的整体性能将得到显著提升，传动效率更加稳定，噪音和振动也会大幅降低。因此，齿轮整形在齿轮箱修复工艺中扮演着至关重要的角色<sup>[8]</sup>。

### （三）表面处理修复

#### 1. 电镀与喷涂

在齿轮箱的修复工艺中，表面处理修复是一种重要的技术手段，尤其在处理磨损或腐蚀表面时，电镀与喷涂技术能显著改善齿轮箱的性能和寿命。电镀是一种通过电解在齿轮表面形成均匀、致密的金属或合金涂层的过程，如铬镀层可以提高耐磨性，而镍镀层则能提供良好的防腐保护。另一方面，喷涂技术如热喷涂或等离子喷涂，允许在齿轮表面形成复合材料层，以适应特定的工作环境。比如，使用陶瓷涂层可以抵抗高温环境下的磨损，而金属合金涂层则能提供优异的抗冲击性能。

这些涂层不仅能增强齿轮的机械性能，还能修复因磨损或腐蚀造成的表面缺陷，恢复齿轮的原始尺寸和形状。电镀与喷涂技术还具有灵活性，可以根据齿轮的工作条件和失效模式选择最合适的涂层材料和工艺参数。例如，在重载和高速运行的齿轮箱中，选择具有高硬度和低摩擦系数的涂层可以显著减少磨损，提高传动效率。此外，这些涂层还能有效隔绝环境中的腐蚀介质，防止齿轮进一步腐蚀，从而延长齿轮箱的整体使用寿命。在实施电镀与喷涂工艺时，关键在于确保涂层与基体之间的良好结合，以及涂层本身的均匀性和致密性，以保证修复后的齿轮具有可靠的性能<sup>[9]</sup>。

#### 2. 热处理修复

热处理修复是齿轮箱修复工艺中的一项关键技术，尤其对于因材质与热处理失效导致的性能下降，如硬度不足、内部应力不均等。热处理修复主要包括表面硬化、应力消除和成分调整等步骤，旨在恢复或提升齿轮的承载能力和耐磨损性能。表面硬化通

常通过渗碳、渗氮或碳氮共渗等工艺实现，这些工艺可以增加齿轮表面的硬度，同时保持心部的韧性，从而提高齿轮的耐磨损和抗疲劳性能。应力消除则是通过退火或回火处理，减少或消除齿轮在制造或使用过程中产生的残余应力，避免应力集中导致的裂纹萌生和扩展。成分调整则是针对特定齿轮材质的需求，通过合金化处理或表面改性技术，调整齿轮的化学成分，以获得更优异的机械性能。这些热处理修复技术不仅能够修复受损的齿轮，还能在一定程度上提升其性能。

### （三）内部结构修复

#### 1. 零件更换

在齿轮箱的修复工艺中，零件更换是解决严重损伤或无法修复的部件问题的关键步骤。当齿轮或其他组件因磨损、疲劳裂纹或材质失效达到一定程度，无法通过常规修复方法恢复其功能时，就需要考虑更换零件。例如，如果齿轮的磨损导致实际齿隙超过制造商规定的最大允许值，那么为了保证传动精度和效率，应更换新的齿轮。同时，更换零件时需确保新零件与原始设计的材料、硬度和热处理状态相匹配，以恢复或提高齿轮箱的性能。

在实际操作中，可能需要更换的零件还包括轴承、密封件和轴。轴承的失效可能导致轴的异常振动和过大的运行阻力，当轴承的径向间隙超过推荐的极限值，必须更换新的轴承以恢复轴承支撑的精度。同样，密封件的失效可能导致润滑剂泄漏，增加污染风险，因此在检测到密封失效后，应及时更换以保持齿轮箱内部的清洁环境。

在零件更换过程中，应遵循严格的拆装顺序和程序，避免因操作不当引起新的损伤。此外，更换的零件通常需要经过专业的质量检查，可能包括尺寸测量、无损检测等，以确保新零件符合质量标准。在某些情况下，可能还需要对更换的零件进行定制，以适应修复后箱体的特定要求，如非标准的安装孔位或加强的结构设计。

在分析零件更换的成本效益时，维修团队需要考虑更换成本、停机时间成本以及潜在的性能提升收益。例如，虽然更换整个齿轮箱可能比更换单个组件更昂贵，但考虑到长期的运行效率和减少的故障率，整体更换可能在长期来看更为经济。因此，决策应基于全面的维修策略分析，结合设备的使用历史、预期寿命和预期的未来运行条件<sup>[10]</sup>。

#### 2. 箱体修复与强化

在齿轮箱的修复工艺中，箱体修复与强化是至关重要的环节，因为箱体是支撑内部齿轮和其他组件的基础结构。箱体可能由于长期的机械应力、热应力或化学腐蚀而出现裂纹、变形或磨损，这些损伤会直接影响齿轮箱的精度和效率。

在箱体修复过程中，可能需要采用焊接技术来修复大的裂纹或局部损伤。这要求严格控制焊接的工艺参数，以防止焊接应力导致新的结构变形。此外，箱体的几何精度恢复也是关键，可能需要通过精密磨削或铣削来恢复其原始的尺寸和形状。

箱体强化通常包括硬化表面处理和结构强化两方面。硬化表面处理，如渗氮或高能离子注入，可以显著提高箱体接触面的耐磨性和抗疲劳性能。而结构强化，例如通过增加箱体内部的支撑筋或优化设计增加壁厚，可以提高箱体抵抗动态载荷和冲击的能力。

在箱体强化过程中，还需特别注意材料的选择和匹配。对于某些关键部位，可能需要采用高性能合金材料替代原有材料，以提高整体强度和耐腐蚀性。此外，对于焊接修复的部位，应选用与箱体材料相容的焊条或焊丝，以确保焊接接头的力学性能和化学稳定性。

在完成修复与强化处理后，对箱体进行全面的质量检验是必不可少的。这包括无损检测，如超声波检测或磁粉检测，以检查焊接接头是否存在缺陷。同时，还需进行几何精度测量和功能测试，确保修复后的箱体满足设计要求，能够可靠地支撑和驱动内部齿轮组件。

## 四、结束语

齿轮箱作为机械设备中的关键组件，其性能的稳定性和可靠性对于设备的整体运行至关重要。通过深入分析齿轮箱的失效模式及其影响因素，并采取科学合理的修复工艺，不仅可以有效延长齿轮箱的使用寿命，还能显著提高设备的运行效率。在齿轮箱维修过程中，对于不同失效模式的识别、分析以及针对性的修复措施是关键步骤。未来，随着材料科学和制造技术的不断进步，齿轮箱的失效分析和修复工艺也将得到进一步的优化和创新。

## 参考文献

- [1] 蔡琨. 齿轮箱失效分析与修复技术研究进展 [J]. 机械制造, 2020, 58.
- [2] 丁晓靖. 金属材料疲劳失效分析及应用 [J]. 无损检测, 2021, 43(3).
- [3] 洪启明. 表面工程技术在齿轮箱修复中的应用 [J]. 表面技术, 2021, 48(12).
- [4] 陈云. 高速列车齿轮箱的动态特性及可靠性研究 [D]. 吉林省: 吉林大学, 2023.
- [5] 宋志方. 基于可靠性的生产系统维修策略研究 [D]. 江苏省: 江苏大学, 2022.
- [6] 张占昌. 铝合金搅拌摩擦裂纹修复工艺与机理研究 [D]. 辽宁省: 沈阳航空航天大学, 2016.
- [7] 郑思来. 基于振动信号的齿轮传动监测系统 [D]. 江西省: 南昌航空大学, 2015.
- [8] 刘欢. 重型车用发动机空压机再制造关键工艺开发与应用 [D]. 江苏省: 江苏大学, 2017.
- [9] 郭广玉. 广州拜耳聚碳酸酯工厂设备维修可靠性分析 [D]. 广东省: 华南理工大学, 2010.
- [10] 曹珂璐. 基于深度残差收缩网络的风力发电机齿轮箱故障诊断方法研究 [D]. 陕西科技大学, 2023.

# 齿轮箱常见失效模式分析与预防措施研究

颜宇飞

南京高速齿轮制造有限公司, 江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090012

**摘要：** 齿轮箱作为机械设备中的关键传动部件，其稳定运行对于设备的整体性能至关重要。本文旨在全面分析齿轮箱常见的失效模式，并探讨相应的预防措施。通过对齿面磨损、点蚀、齿轮断裂、变形、轴承失效、轴损坏以及密封失效等关键问题的深入研究，揭示了这些失效模式的成因及其对齿轮箱性能的影响。进一步地，文章探讨了多种检测与诊断技术，包括声发射检测、振动分析、温度监测、红外热成像、油液分析以及微粒监测等。在预防措施方面，本文提出了设计优化、加工与装配质量控制、润滑系统升级与维护以及工作条件调整与控制等多方面的策略，以期提高齿轮箱的可靠性和使用寿命。

**关键词：** 齿轮箱；失效模式；预防措施；振动分析；润滑系统维护

## Analysis of Common Failure Modes of Gearboxes and Research on Preventive Measures

Yan Yufei

Nanjing High-Speed Gear Manufacturing Co., LTD., Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract：** As a key transmission component in mechanical equipment, the stable operation of gearboxes is crucial to the overall performance of the equipment. This article aims to comprehensively analyze the common failure modes of gearboxes and explore the corresponding preventive measures. Through in-depth research on key issues such as tooth surface wear, pitting, gear fracture, deformation, bearing failure, shaft damage and seal failure, the causes of these failure modes and their impact on the performance of gearboxes have been revealed. Furthermore, the article explores a variety of detection and diagnostic techniques, including acoustic emission detection, vibration analysis, temperature monitoring, infrared thermal imaging, oil analysis, and particle monitoring, etc. In terms of preventive measures, this paper proposes strategies in multiple aspects such as design optimization, quality control of processing and assembly, upgrading and maintenance of lubrication systems, as well as adjustment and control of working conditions, with the aim of enhancing the reliability and service life of gearboxes.

**Keywords：** gearbox; failure mode; preventive measures; vibration analysis; maintenance of lubrication system

### 一、齿轮箱失效模式详细分析

#### （一）齿面磨损与点蚀

齿面磨损通常是由于齿轮在运行过程中，由于摩擦、载荷以及润滑不良等因素导致齿面材料逐渐损失。这种磨损会降低齿轮的精度，增加啮合间隙，进而引发噪声和振动。而点蚀则是齿面在交变接触应力的作用下，表面出现微小的疲劳裂纹，这些裂纹逐渐扩展并最终导致齿面材料的剥落，形成点蚀坑。点蚀会严重影响齿轮的承载能力和使用寿命。

齿面磨损与点蚀是齿轮箱失效中较为常见的两种模式。齿面磨损的程度通常与齿轮的材料、润滑条件以及工作环境密切相关。在恶劣的工作条件下，如高温、重载或润滑不足，齿面磨损会更为严重。此外，齿轮的制造精度和安装质量也会影响磨损的进程。若齿轮制造精度不高或安装不当，会导致齿轮啮合不良，

从而加速齿面磨损<sup>[1]</sup>。

点蚀的发生则更多地与齿轮的材质和应力状态有关。齿轮材料的选择对于抵抗点蚀至关重要。优质的材料能够提供更好的抗疲劳性能，减少点蚀的发生。同时，齿轮的应力状态也是影响点蚀的重要因素。过高的接触应力或应力集中都会导致点蚀的加速发展。因此，在齿轮设计和制造过程中，应充分考虑材料的抗疲劳性能和齿轮的应力状态，以预防点蚀的发生。

#### （二）齿轮断裂与变形

齿轮断裂与变形是齿轮箱失效模式中极为严重的问题，可能导致整个传动系统的瘫痪。齿轮的断裂通常源于过载、疲劳或材料缺陷，而变形则可能源于热变形、塑性变形或不均匀应力分布。例如，在重载工况下，齿轮承受的扭矩超过其设计极限，可能会导致突发性断裂。此外，不精确的加工和装配误差也可能使齿轮产生永久性变形，影响啮合精度，从而降低传动效率<sup>[2]</sup>。



为了预防齿轮断裂与变形，工程人员可以采用多种分析模型，如有限元分析（FEA）来预测齿轮在工作条件下的应力分布，以优化设计。例如，通过 FEA，可以发现潜在的应力集中区域，从而在设计阶段就进行改进，提高齿轮的疲劳寿命。同时，采用先进的材料科学，选择高强度、高韧性的合金钢，可以显著提高齿轮抵抗断裂的能力。

在制造过程中，严格的质量控制也至关重要。例如，采用精密的磨齿工艺和热处理技术，可以确保齿轮表面硬度均匀，减少变形风险。此外，装配时应用精确的测量工具和调整方法，确保齿轮与轴、轴承的对中性，防止因装配不当导致的额外应力和变形<sup>[3]</sup>。

在维护层面，定期的应力监测和变形检测是必要的预防措施。可以结合振动分析和非破坏性检测技术，如超声波检测，及时发现齿轮的微小裂纹或变形，以便在问题恶化前进行修复或更换，确保设备的稳定运行。

### （三）轴承失效与轴的损坏

轴承失效与轴的损坏是齿轮箱运行中常见的问题，严重影响设备的可靠性和使用寿命。轴承失效可能导致轴承内部滚动体和滚道的异常磨损，甚至发生轴承抱死，造成轴的异常振动和过大的径向或轴向位移。轴的损坏则可能是由于过载、疲劳、腐蚀或材料缺陷等多种因素引起，表现为轴的弯曲、断裂或表面损伤。这些失效模式不仅会导致齿轮箱运行不稳定，噪音增大，还可能引发连锁反应，加速其他部件的损坏，最终导致整个齿轮箱系统的失效。因此，深入分析轴承失效与轴的损坏的原因，并采取有效的预防措施，对于提高齿轮箱的可靠性和延长使用寿命具有重要意义<sup>[4]</sup>。

### （四）密封失效导致的润滑油污染

密封失效是齿轮箱运行中另一个不容忽视的问题，它直接导致了润滑油的污染。齿轮箱内部需要保持清洁的润滑油以确保各部件的正常运转和润滑。然而，当密封件老化、磨损或安装不当，外部杂质如灰尘、水分等可能侵入齿轮箱内部，与润滑油混合，导致油质恶化。这种污染不仅会降低润滑效果，增加部件间的摩擦和磨损，还可能引发油液泄漏，进一步影响齿轮箱的性能和可靠性。因此，定期检查和更换密封件，确保密封系统的完好性，是预防润滑油污染的关键措施之一<sup>[5]</sup>。

## 二、失效模式的检测与诊断技术

### （一）声发射检测与振动分析

声发射检测与振动分析是诊断齿轮箱失效模式的重要技术手段。在实际应用中，通过安装高灵敏度的传感器，可以实时监测齿轮箱在运行过程中的微小变化。例如，当齿轮出现早期点蚀或磨损时，会产生特定频率的振动信号，通过分析这些信号的频谱特征，可以定位问题的源头和故障的严重程度。此外，声发射检测技术还能捕捉到因轴承失效或轴损坏而引发的异常声音信号。这些信号往往预示着潜在的机械故障，如轴承滚珠或滚道的剥落、轴的弯曲或断裂等。结合振动分析，可以更加准确地判断故障类型和位置，为后续的维修和更换提供有力的数据支持。因

此，声发射检测与振动分析在提高齿轮箱故障诊断的准确性和效率方面发挥着至关重要的作用<sup>[6]</sup>。

### （二）温度监测与红外热成像

温度监测与红外热成像在齿轮箱故障诊断中扮演着至关重要的角色。通过实时监测齿轮箱内部组件的温度变化，可以有效地发现潜在的过热问题，如异常摩擦、局部热应力集中或润滑失效等。这些过热现象往往是齿轮箱内部组件磨损、断裂或失效的前兆。红外热成像技术则能够直观地显示齿轮箱表面的温度分布情况，通过图像分析，可以快速识别出温度异常的区域，从而进一步定位故障点。此外，红外热成像还可以用于监测齿轮箱在运行过程中的热变形情况，为评估齿轮箱的热稳定性和寿命提供重要依据。因此，温度监测与红外热成像技术相结合，不仅提高了齿轮箱故障诊断的准确率，还为预防故障的发生提供了有效的手段。

### （三）油液分析与微粒监测

油液分析是预防齿轮箱失效的重要手段，尤其在监测微粒污染方面，能够提供宝贵的早期预警信息。通过对润滑油中的金属微粒、磨损颗粒数量和尺寸的分析，可以揭示齿轮和轴承的异常磨损状态。例如，当监测到的金属微粒浓度显著增加时，可能表明齿轮表面正在经历异常加速磨损。此外，颗粒形状的分析也能提供额外线索，如圆形颗粒可能来源于轴承内圈或外圈的疲劳剥落<sup>[7]</sup>。

进一步地，不同材质的微粒往往指示着不同类型的故障。例如，铁质微粒可能表示齿轮或轴承的钢制部件磨损，而铜质或铝质微粒则可能源于其他非钢制组件。此外，微粒的尺寸分布也是关键指标之一。大尺寸的颗粒可能意味着发生了严重的磨损或断裂事件，而小尺寸的微粒则可能代表持续但相对温和的磨损过程。通过定期的油液分析，可以建立微粒污染的历史记录，从而帮助识别磨损趋势，预测潜在故障，并及时采取维护措施。因此，油液分析与微粒监测在齿轮箱健康管理方面发挥着不可或缺的作用。

### （四）预测性维护与故障早期识别

预测性维护与故障早期识别是现代工业设备管理的关键，尤其对于齿轮箱这样的关键组件至关重要。通过利用先进的传感器技术，可以实时监测齿轮箱的运行状态，包括振动、温度、噪声等关键参数。一旦这些参数超出预设的安全范围，系统便会自动触发报警，提示维护人员进行检查。此外，结合大数据分析与人人工智能算法，可以进一步解析这些监测数据，识别出潜在的故障模式，甚至在故障发生前预测其发展趋势。这种方法不仅大大提高了设备维护的效率，还显著降低了意外停机的风险，确保了生产线的稳定运行<sup>[8]</sup>。

## 三、预防措施与优化策略

### （一）设计优化：材料选择与结构改进

在齿轮箱的设计优化中，材料选择与结构改进是预防失效模式的关键环节。例如，通过选用高强度、高耐磨性的合金钢或钛

合金,可以显著提高齿轮的抗疲劳和抗磨损性能。此外,对于齿轮箱的关键部位,如齿轮接触面、轴承座等,采用表面强化处理技术,如渗碳淬火、氮化处理或喷丸强化,能进一步增强材料的硬度和耐磨性,延长使用寿命。在结构改进方面,优化齿轮的模数和齿宽,以及合理设计轴承支撑结构,可以有效分散载荷,减少应力集中,从而降低齿轮断裂和轴承失效的风险。同时,改进密封设计,防止外部杂质进入齿轮箱内部,也是保障齿轮箱长期稳定运行的重要措施<sup>[9]</sup>。

## （二）加工与装配质量控制

在齿轮箱的失效模式中,加工与装配质量控制是预防失效的关键环节。齿轮的精度直接影响到其与轴、轴承的配合,以及运行过程中的载荷分布。因此,在齿轮的加工过程中,必须严格控制加工精度,确保齿轮的齿距、齿高、齿形等参数符合设计要求。同时,对于轴承、轴等关键零部件的加工,同样需要高精度的加工工艺来保证配合精度和表面质量。在装配环节,采用先进的装配工艺和严格的装配流程至关重要。通过精确的装配,可以确保齿轮、轴承、轴等零部件之间的正确配合,避免装配误差导致的应力集中和载荷不均。此外,装配过程中还应注重清洁度控制,防止杂质和污染物进入齿轮箱内部,影响齿轮和轴承的正常运行。通过严格的加工与装配质量控制,可以显著提高齿轮箱的整体性能和使用寿命,预防失效模式的发生。

为了确保加工与装配质量,企业应采用先进的加工设备和精密的检测仪器。加工设备应具备良好的刚性和精度保持性,以确保在长时间加工过程中齿轮参数的稳定性。检测仪器则应具有高灵敏度和高分辨率,能够准确测量齿轮的各项参数,及时发现并纠正加工误差。此外,定期对加工设备进行维护和校准也是必不可少的,以确保设备的加工精度始终保持在最佳状态。在装配过程中,采用自动化装配线和智能化装配系统可以进一步提高装配效率和装配精度。这些系统能够精确控制装配过程中的各项参数,减少人为误差,确保齿轮箱的整体性能达到设计要求<sup>[10]</sup>。

## （三）润滑系统升级与维护

润滑系统在齿轮箱的正常运行中起着至关重要的作用,它能够减少部件间的摩擦,降低磨损,延长设备寿命。润滑系统升级与维护是预防齿轮箱失效的关键措施之一。通过对润滑油的选择优化,比如采用具有更优抗磨性能和抗氧化性的合成润滑油,可

以显著提高齿轮和轴承的抗疲劳能力。此外,定期更换润滑油和清洁润滑系统也是必不可少的维护步骤。润滑油在使用过程中会逐渐变质,含有杂质和磨损颗粒,这不仅会降低润滑效果,还可能加速齿轮和轴承的磨损。因此,根据齿轮箱的工作条件和运行时间,制定合理的润滑油更换周期至关重要。同时,润滑系统的清洁工作也不容忽视,定期清洗润滑油箱、滤油器和管道,确保润滑油的纯净度,可以有效避免杂质对齿轮和轴承的损害。为了进一步提升润滑系统的性能,还可以考虑引入智能润滑管理系统,通过实时监测润滑油的状态和消耗量,自动调整润滑油的供给,确保齿轮箱始终处于最佳的润滑状态。

## （四）工作条件的调整与控制

工作条件的调整与控制在预防齿轮箱失效中起着至关重要的作用。例如,适当的载荷分配可以显著减少齿轮的疲劳断裂风险。此外,控制齿轮箱的工作温度也是至关重要的。过高的温度会导致润滑油性能下降,加速齿轮和轴承的磨损。因此,应确保齿轮箱的冷却系统正常运行,及时排除散热不良的问题。同时,对于工作在极端环境下的齿轮箱,如高温或低温环境,还需采取特殊的冷却或加热措施,以保持齿轮箱在适宜的工作温度范围内。另外,工作过程中的振动和冲击也是影响齿轮箱寿命的重要因素。通过优化设备安装和调整工艺参数,减少振动和冲击,可以进一步延长齿轮箱的使用寿命。综上所述,工作条件的调整与控制是预防齿轮箱失效的关键环节,需引起足够的重视。

# 四、结束语

通过对齿轮箱失效模式的深入分析和研究,我们了解了齿面磨损、齿轮断裂、轴承失效以及密封问题等主要的失效形式。同时,借助先进的检测与诊断技术,如声发射检测、振动分析、温度监测以及油液分析等,我们能够及时准确地识别齿轮箱的潜在故障,为采取预防措施提供有力支持。在设计优化、加工装配质量控制、润滑系统升级以及工作条件调整与控制等方面,我们也提出了一系列切实可行的优化策略,旨在全面提升齿轮箱的可靠性和使用寿命。未来,随着科技的不断进步和创新,齿轮箱的失效预防与维护技术也将持续升级和完善。

## 参考文献

- [1] 王凯,任沛昊,魏晓帅.变速箱齿轮油孔失效分析与影响因素研究[J].机械工程师,2023(03).
- [2] 高东海.某变速箱齿轮断齿失效分析[J].机械传动,2020(05).
- [3] 朱孝录.硬齿面齿轮随机断裂的多种失效模式、原因和预防[J].机械传动,2022(06).
- [4] 徐佳宁.轨道交通车辆齿轮箱常见失效模式分析及对策[J].轨道交通装备与技术,2019,(02): 34-36.
- [5] 风机齿轮箱轴承常见失效模式及解决方案[J].内燃机与配件,2012,(12): 28-29.
- [6] 刘溯.风电机组齿轮箱轴承常见失效模式及解决方案[C]//中国农业机械工业协会风能设备分会2011年度论文集(上).铁姆肯公司,2011: 2-4.
- [7] 翟晶,王曰辉,柴希.风电齿轮箱轴承检修中的判定综述[J].机械研究与应用,2017,30(05): 133-134+137.
- [8] 吴四二.地铁车辆转向架齿轮箱失效型式分析[J].现代城市轨道交通,2021,(01): 29-34.
- [9] 魏明辉.基于同步挤压变换的齿轮箱故障诊断[D].北京建筑大学,2023.
- [10] 赵旋.基于齿轮箱试验平台的轮齿故障识别研究[D].武汉理工大学,2016.

# 混凝土3D打印连续螺旋线路径规划算法研究

刘嘉正

江苏省交通工程建设局，江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090003

**摘 要：** 3D 打印技术作为一种数字建造的新兴技术，将计算机技术、数控技术、材料成型技术结合在一起，以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体。由于混凝土物料特性、硬件平台功能与树脂打印工艺并不匹配，导致打印构件会出现填充不实、欠过填充现象，本文针对打印材料特点，研究适用于混凝土3D打印的路径规划算法。

**关 键 词：** 3D 打印技术；欠过填充；路径规划算法

## Research on Continuous Spiral Path Planning Algorithm for Concrete 3D Printing

Liu Jiazheng

Jiangsu Provincial Transportation Engineering Bureau, Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract：** 3D printing technology, as an emerging digital construction technology, combines computer technology, numerical control technology and material forming technology. Based on digital model files, it uses powdery metals or plastics and other bondable materials to construct objects layer by layer through printing. Due to the mismatch between the characteristics of concrete materials, the functions of the hardware platform and the resin printing process, the printed components may have problems such as incomplete filling and underfilling. This paper studies the path planning algorithm suitable for 3D printing of concrete in light of the characteristics of the printing materials.

**Keywords：** 3D printing technology; underfilling; path planning algorithm

### 引言

3D 打印技术是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体的技术<sup>[1]</sup>。3D 打印过程包括三维设计、切片处理、完成打印等方面，是一种智能生产技术，能够实现个性化、快速化定制。目前3D打印通常是采用数字技术材料打印机来实现的。常在模具制造、工业设计等领域被用于制造模型，在土木工程、工业设计、航空航天、地理信息系统等领域都有所应用<sup>[2]</sup>。利用固废制备满足性能要求的高固废掺量3D打印材料，不仅可以实现固废的资源化处理，而且可以获得可观的经济效益，同时3D打印生产技术作为一种智能、绿色、高效的建造方式，发展前景巨大，作为一种智能化加工建造方式，为所在公路工程建设提供了富有前景的发展方向<sup>[3]</sup>。

现阶段混凝土打印路径规划算法主要沿用传统树脂打印的方法，但是由于混凝土物料特性、硬件平台功能与树脂打印工艺并不匹配，导致打印构件会出现填充不实、欠过填充现象<sup>[4]</sup>，因此需要针对本项目采用的打印设备，以及打印材料特点，研究适用于混凝土3D打印的路径规划算法。

### 一、连续螺旋线路径规划算法研究

#### （一）算法概述

在混凝土3D打印工艺中，传统路径规划算法因存在频繁的跨孔运动或非连续跳转点，导致打印喷头被迫中断挤出过程。这一现象对树脂类材料的打印质量影响较小，但在混凝土打印中却会引发显著问题。原因在于混凝土泵送系统受机械响应滞后的影

响，启停动作存在固有延迟，难以实现瞬时精确控制。这种延迟会导致材料在启停位置过度堆积或中断，造成层间结合弱化、表面平整度下降及结构均匀性受损，最终严重影响构件的成形质量和力学性能。因此，优化填充路径的连续性设计可显著降低非连续跳转频次，从而提升打印构件的成形质量与工艺效率。

为解决上述问题，本项目采用运动轨迹具有匀速性的连续螺旋线路径规划算法，灵感来源于阿基米德螺旋线。应用于混凝土



3D 打印中,能够减少打印过程中的跳转点,没有相交重叠路径,前一路径打印完成后,选择距离其终点最近的路径起点,从而减少喷头位移时间,泵机持续工作相比传统路径规划算法可获得更连续平滑的打印效果,具有打印路径匀速、曲率变化很小、路径覆盖比高、连续无中断等优点。

在混凝土3D 打印过程中,先行打印的外围路径混凝土因水化反应加速而快速硬化,形成刚性边界框架;该框架通过空间约束效应限制内部新挤出的混凝土流变变形,显著抑制层间错位与表面起伏,最终提升构件几何精度及表层平整度。打印过程示意图,见图1。

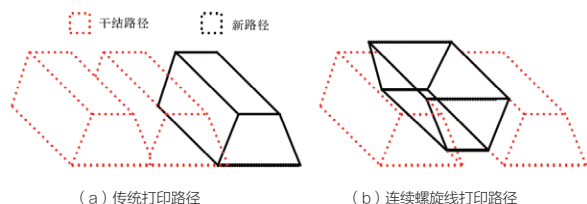


图1 连续螺旋线算法对于传统路径的改进示意图

连续螺旋线路径规划算法采用分层拓扑重构策略:首先通过凹多边形凸分解将复杂轮廓转化为简单的凸单元集;随后每个凸单元构造连续无中断的打印路径;最终通过全局连接优化实现子路径间的无缝衔接,形成高覆盖率的完整加工轨迹。

## (二) 凹多边形凸分解

1. 判断该轮廓是否为凹多边形,如果轮廓是凹多边形则需要对凹多边形的凸分解,如果轮廓是凸多边形则无需经过此步骤处理。本项目基于可视点进行判断,考虑到打印路径方向,以逆时针方向遍历目标多边形轮廓顶点集内各顶点,判断各顶点凹凸性。

2. 消去多边形轮廓的凹点,将其分解为多个便于处理的凸多边形。由于常见凸分解思路(局部剖分算法、全局剖分算法)中,全局剖分算法同步分析所有可能的连接关系,使它能做出全局更优的分割决策,最终获得更好的分解效果。本项目选用全局剖分算法。

## (三) 凸多边形轮廓偏置

多边形轮廓偏置的过程可归纳为:确定所有点偏移后的位置、直接按偏移点构建新线段、将这些新点有序连接成完整的新轮廓、检查偏移是否已达极限。对于带内孔的凸多边形,内孔偏移方向与外轮廓刚好相反,但偏移量计算和轮廓构建的方法是通用的。

### 1. 偏置点求解计算

等距缩放的目标是让图形轮廓线整体向外推出或向内缩进一个设定的距离。实际操作时不管是外推还是内收,关键步骤都是算出每个角点移动后的新位置。需要让图形的每一个角点,分别顺着原有两边垂直的方向移动规定的长度,然后找到这两条移动路径的交点,即新轮廓线需要的角点。

### 2. 偏置点线段的自交优化处理

在轮廓偏置过程中,由于顶点沿法向收缩位移,原本不相邻的轮廓线段可能发生交叉重叠,形成自相交区域。本项目在检测线段相交问题时,融合了快速筛选与精确判断的双重策略。首先

利用快速排斥原理对所有非相邻线段进行初步筛查:通过比较线段端点坐标范围快速排除明显不相交的情况。若某组线段在初步筛查中存在重叠可能,则进一步执行跨立验证,通过分析线段端点的位置分布关系确认是否实际相交。最终仅对通过双重验证的线段组计算精确的交点坐标。

### 3. 偏置层轮廓筛选

在确定偏移轮廓的关键点和交点位置后,依据这些交点将偏移后的轮廓划分为若干区域,进而通过计算分析方法检验各区域轮廓是否符合几何规则要求,若区域轮廓对应向量为逆时针方向则为有效区域,反之则为错误区域,应删除。

以图2为例,线段AB、DE对应的偏置线A'B'、C'E'相交于F'且跨立, $\overrightarrow{F'B'} \times \overrightarrow{B'C'} > 0$ 说明点集{F',B',C',D'}的区域有效, $\overrightarrow{F'E'} \times \overrightarrow{E'A'} < 0$ 说明点集{A',F',E'}的区域有效,予以删除。

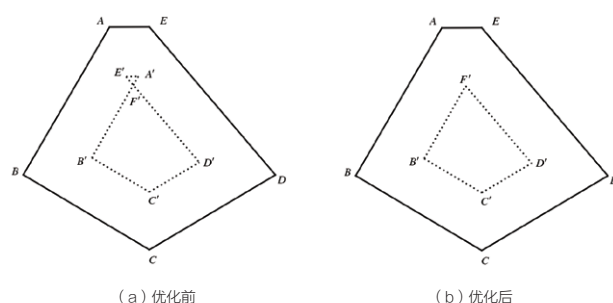


图2 偏置层线段的自交优化处理示意图

### 4. 偏置轮廓极限判断

本项目为避免偏移轮廓在生成过程中出现形状失真,通过计算几何中心到边界的最短距离设定临界值,将其作为轮廓有效性的校准标准。该算法首先定位轮廓的几何中心点坐标,并计算该中心点到轮廓边界的最小间距值。将此最小间距设定为关键判定基准,通过与混凝土打印喷头尺寸进行对比:当该间距值大于或等于喷头直径时,允许继续执行轮廓偏移操作;若小于喷头直径,则终止后续偏移计算流程以防止轮廓形态异常。

以图3为例,对于三角形,其中线的交点就是质心;对于多边形,可划分为n-2个三角形分别计算其质心,进而求出多边形质心。

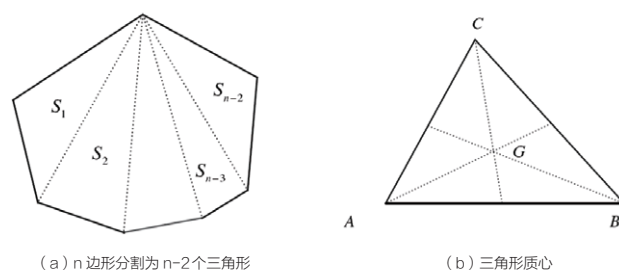


图3 图形质心计算示意图

## (四) 螺旋化处理

该路径规划方法通过螺旋化改造技术处理偏移轮廓,具体包含两个阶段的单螺旋路径生成和一次连续螺旋整合。算法充分考量了混凝土材料随时间硬化的特性,遵循"先打印先固化"的成形原则。优先完成的外轮廓快速形成刚性支撑框架,后续内部填充

时已硬化部分可有效抑制结构变形与表面破损。在连续螺旋填充过程中，当第一个螺旋路径完成扫描后，其硬化形成的类夹壁结构可为相邻螺旋提供侧向支撑，同步提升填充区域的整体结构强度和几何精度。

### 1. 单螺旋化

螺旋化重构的关键在于重新组织相邻轮廓的衔接逻辑：首先获取偏置生成的轮廓点集，从中选定一个起始点；延伸该点所在的轮廓线段，直至与上层轮廓线相交形成连接点，此交点同时成为上层轮廓的结束位置和当前层轮廓的起始位置。同理，向下延伸当前层轮廓线即可确定与下层的衔接端点，从而实现多层轮廓线的首尾贯通，最终构建出连续无间断的螺旋路径。

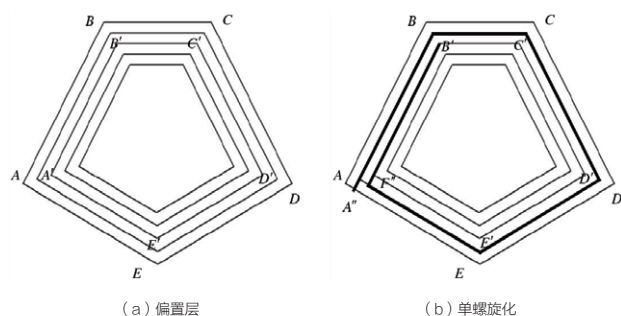


图4 单螺旋化处理示意图

### 2. 连续螺旋线化处理

连续螺旋路径的构建是在基础轮廓调整和单螺旋路径生成之后进行的处理阶段，其核心思路是根据实际打印需求，将完整的螺旋轨迹拆分成两个互补部分：向内收缩的填充路径和向外扩展的填充路径。

对于目标多边形轮廓（图5a），以两倍打印直径（2D）为间距生成由外至内的连续螺旋轨迹，形成向内收缩的填充路径（图5b）；随后将初始轮廓整体向内平移一个打印直径（D）的距离作为新边界，同样采用2D间距生成由内至外的扩展螺旋轨迹（图5c红色部分）；最终将两套互补的螺旋路径无缝整合，构成覆盖整个截面的连续打印方案（图5d）。

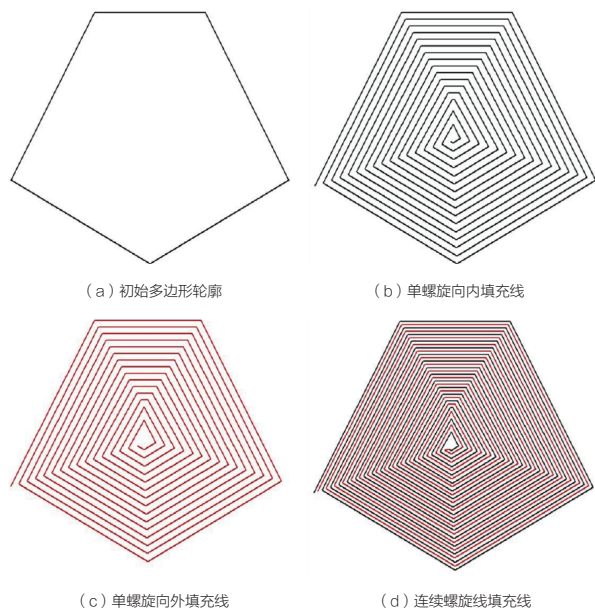


图5 连续螺旋线化处理示意图

### （五）内轮廓螺旋线优化

在处理带孔洞的凸多边形轮廓偏移时，其操作过程可归纳为两个对称步骤：内部空洞边界向外扩张，同时外部主体边界向内收缩。由上文偏置轮廓极限判断可知，内外轮廓的螺旋线组数之和只与图形几何尺寸有关，为了保证内轮廓的几何尺寸和形状，本项目将内部螺旋路径的数量固定为两组。完成内外轮廓螺旋路径生成后，可能出现第二层内部螺旋线与邻近的外部螺旋线之间存在较大空白区域的情况。这种路径间隙可能导致局部填充不足，影响打印结构的连续性，见图6（a），如此打印会对构件成形质量造成影响，对其进行内切圆处理，见图6（b）。

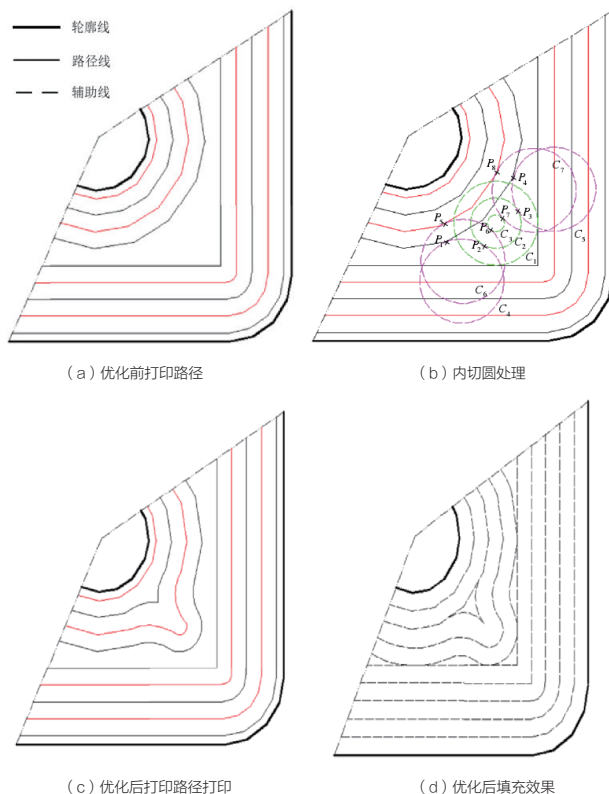


图6 内轮廓螺旋化处理示意图

## 二、结束语

本文提出了连续螺旋线路径规划算法，明确了该算法流程，从凹多边形凸分解、凸多边形轮廓偏置、轮廓螺旋曲线化三部分阐述实现方法。连续螺旋线路径规划算法相比传统算法，可获得更连续平滑的打印效果，打印质量和效率明显提高。

## 参考文献

- [1] 陈勃生. 增材制造（3D 打印）应用领域发展现状及趋势 [J]. 建设机械技术与管理, 2015, 28（12）：38-41.
- [2] 朱艳青, 史继富, 王雷雷, 等. 3D 打印技术发展现状 [J]. 制造技术与机床, 2015（12）：50-57.
- [3] 王延庆, 沈竞兴, 吴海全. 3D 打印材料应用和研究现状 [J]. 航空材料学报, 2016, 36（4）：89-98.
- [4] Daniel G, Bastian H, Franz G, et al. Continuous 3D printing for additive manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20（4）：320-327.

# 基于智能技术的电力调度自动化系统设计与实现

赵方园

江苏电力信息技术有限公司, 江苏 南京 210098

DOI: 10.61369/ME.2024090004

**摘 要 :** 本文围绕基于智能技术的电力调度自动化系统展开相关探讨, 着重剖析其核心价值、设计关键所在及实现的路径, 系统采用集成大数据分析、人工智能算法与实时监控技术的方式, 形成了包含数据收集、负荷预测、优化调度以及人机交互四大功能模块的完整架构, 设计突出对安全保障的强化和故障概率的降低, 采用智能预测和动态优化切实提升电网运行的稳定性、经济性与响应效率, 为现代电力系统实现智能化升级给予技术支持。

**关 键 词 :** 智能技术; 电力调度; 自动化系统; 设计与实现

## Design and Implementation of Power Dispatching Automation System Based on Intelligent Technology

Zhao Fangyuan

Jiangsu Power Information Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210098

**Abstract :** This article explores the power dispatching automation system based on intelligent technology, focusing on analyzing its core value, key design elements, and implementation pathways. The system integrates big data analysis, artificial intelligence algorithms, and real-time monitoring technology to form a complete architecture consisting of four functional modules: data collection, load forecasting, optimized dispatching, and human-computer interaction. The design emphasizes the enhancement of safety security and the reduction of failure probability. By adopting intelligent forecasting and dynamic optimization, it effectively improves the stability, economy, and response efficiency of grid operation, providing technical support for the intelligent upgrade of modern power systems.

**Keywords :** intelligent technology; power dispatching; automation system; design and implementation

### 前言

电力系统规模不断扩充与可再生能源渗透率加大, 对调度运行的及时程度、准确程度和安全性提出更高的标准, 传统调度模式难以契合复杂多变的电网环境, 迫切需要引入智能技术达成自动化的决策支持, 本文打算设计并实现一套结合前沿智能算法的电力调度自动化系统, 采用模块化构建方式优化调度全流程, 提高电网的韧性及运行效率, 下文会探讨系统核心价值、设计注意事项, 并完整说明智能技术模式下电力调度功能实现路线。

### 一、基于智能技术的电力调度自动化系统设计的价值

#### (一) 强化安全保障

采用人工智能技术优化电力调度系统, 效果十分明显, 利用智能算法可高效提升电网自动安防体系, 提高系统可靠性, 尽可能降低外界干扰造成的线路故障, 采用智能化视觉识别手段, 实现对调度作业人员违规操作的智能判别, 当监测到违规动作时, 系统会采集违规图像并传至操作界面发出警报, 利用云端分析配合边缘节点实时感知等办法实现协同治理, 在电力调度施工的各环节触发动态提醒, 通过人脸识别等技术改良电力调度自动化系

统, 可对上岗人员身份进行准确查证, 实现操作人员的规范管控, 保障人员按时到岗工作<sup>[1]</sup>。

#### (二) 降低故障概率

随着电力产业的快速发展进程, 电力行业对调度自动化系统的开发应用探索不断深入, 领悟到人工智能技术在电力调度自动化中的应用价值, AI 技术以神经网络为计算根基, 对各种数据进行加工分析, 作为自动化控制手段, 核心是模仿人脑决策方式, 匹配应用场景实现智能操控<sup>[2]</sup>。在电力调度自动化的工作中, 采用智能算法能够有效解决系统故障状况, 提升自动化系统的整体运作效率, 显著降低系统故障的概率, 实现系统的可靠保护; 采用



人工智能技术能够开展电力调度的自动检测，发现异常后即刻上报，可在电网失效前排除故障，达成电力调度的无缝衔接<sup>[3]</sup>。

（三）优化能源资源配置效率

基于智能技术开展的电力调度自动化系统设计，极大优化了能源资源配置效率，该系统靠强大的智能算法内核支撑，做到了对庞大电网复杂运行情形与多维动态需求的精准察觉和实时剖析，借助实施对海量发电侧出力数据、用电侧负荷曲线和电网运行参数的毫秒级融合分析，智能算法可构建出最优潮流分布模型，动态调整负荷跟电源之间的匹配度<sup>[4]</sup>。此机制有效降低了传统调度里因信息反馈滞后或预判出现偏差导致的能源输送损耗与机组非经济运行时长，大幅减少了系统整体的网损率数值，尤其降低了轻载或空载线路的无效电能输送，该系统经深度挖掘新能源发电特性跟预测信息，能够更迅速地消纳间歇性可再生能源，将这种波动性与不确定性纳入优化调度构架，极大提升可再生能源的利用效率，减少风力、太阳能发电弃用的现象，做到全网能源流向的科学规划与整体利用效率的切实提高<sup>[5]</sup>。

（四）提升跨区域协同调度能力

智能电力调度自动化系统的核心价值体现为显著提升了大规模跨区域电网的协同调度实力，该系统借助搭建贯穿各层级、各区域的广域信息交互平台，实现了对在地理上分散分布的能源中心、负荷集群以及不同运营主体的电力单元的集中监控与一体化优化调度<sup>[6]</sup>。智能算法冲破了传统调度管理方面地域与行政界限的约束，以全网统一的优化目标函数为准则，如实现总发电成本极小化、断面潮流安全裕度极大化，协同统筹区域内和区域间的有功/无功支撑及备用容量共享，这不仅推动了大范围电力资源的互补互济，利用时间差或者资源禀赋差异开展区域间的电力互济，更主要的是增强了系统处理像机组故障、局部负荷大幅攀升等局部突发事件的全局响应韧性与协同支援本领，系统达成了跨区跨省电力资源在更大空间范畴的优化调配与高效流动，为构建国家级能源互联网筑牢了稳固的技术后盾<sup>[7]</sup>。

二、基于智能技术的电力调度自动化系统设计注意事项

需从多个维度考量采用人工智能的电力调度系统设计，这样才可适应电网现代化管理的技术条件。

（1）系统核心应具备可靠的数据采集与处理能力，实时收集电网运行状态量、负荷变化趋势及气象条件等复杂异构数据，随后开展数据存储、归集及清洗工作，为分析决策环节提供稳定的数据支持<sup>[8]</sup>。

（2）可运用新一代智能计算手段，借助机器学习、深度学习以及强化学习等途径，承担负荷预测、故障诊断以及优化调度等工作，达成更高效的智能响应与参数自主调整；还需系统设计人机交互界面，打造低学习门槛的图形化工具，让调度员能快速把握电网实时状况，依需求调整调度策略<sup>[9]</sup>。

（3）系统要实现灵活扩充和可靠抗干扰之间的平衡，可稳定应对接线方式的改变和不确定环境的考验，维持全工况运行的稳

定性，与系统的可靠性<sup>[10]</sup>。

三、基于智能技术的电力调度自动化系统设计与实现

系统设计采用模块化结构，架构中的调度策略、人机交互、数据采集和用电量预测模块组成核心功能体系，见图1。

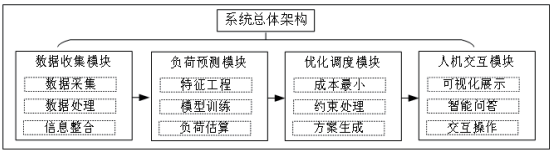


图1 模块化架构设计

（一）数据收集模块

该数据采集单元是电力调度 AI 自动化系统的底层核心组件，模块核心任务是实现电网数据的高效实时采集与批量处理，结合物联网智能采集终端与大数据系统的联合处理方案，借助变电站到终端用户全段布设的物联感知终端，以高频（100 次 / 秒）采样持续获取电压、电流等关键电力参数，利用 5G 等高速传输技术实现数据在云端的实时同步<sup>[11]</sup>。该环节基于集中式数据仓库，使用 Spark 和 Hadoop 分布式架构，对原始数据进行清理、标准化和异构数据整合处理，去除无关和冗余成分，达成跨源异构数据向标准模型的归集，模块采用高效的数据压缩与优化举措，把高效压缩手段（例如 Delta 编码）和列存储模式结合在一起，有效减少数据存储和传输的资源耗费，借助数据汇聚模块的加工，将电网中分散且格式多样的大规模数据统一处理成结构清晰、便于挖掘的数据集合，为负荷预测、故障诊断及调度优化等后续环节提供更可靠的数据支撑，优化了系统感知精度及数据驱动决策效果。

（二）负荷预测模块

就电力自动化调度而言，负荷预测模块采用 AI 技术作为核心驱动，基于高质量采集数据，采用特征工程手段处理历史负荷数据，抓取时间序列、天气特征、假日标签等负荷关键项，采用最大最小值归一化等方法对特征数据进行标准化处理，然后通过自适应学习机制，精确预测未来某时间的电力需求。此模块借助长短期记忆神经网络（LSTM）打造出负荷预测模型，这一被称为 LSTM 的循环神经网络变体，和门控模块联合起来运作，善于应对负荷数据里的长程时间依赖问题，可精准建模负荷数据的周期性及趋势性变化规律，针对模型参数的优化阶段，采用 Teacher Forcing 策略改进模块，采用负荷历史数据作为输入基准，用后续负荷观测数据作为指导标签，辅助模型精准拟合负荷变化过程，该模块与 Early Stopping 机制相结合，实时采集验证集的模型评估参数，检测到性能峰值时触发训练终止机制，消除过拟合的萌芽状态，随即进入预测实施阶段，采用时间滑窗处理机制，采用 24 小时负荷历史数据作为输入变量，获取后续时段的负荷估算值，采用滑动时间窗口方式，做到负荷预测结果的实时推送<sup>[12]</sup>。

（三）优化调度模块

作为电力调度的 AI 核心模块，实现电力系统的自动化运行，采用负荷预测模块的运算结果，采用 AI 增强的优化模型，实时生成最佳电力调度方案，该模块运用优化后的粒子群算法（IPSO）

建模，将发电成本与环保成本的双重最低作为优化目标，综合考虑系统功率平衡、机组出力边界及爬坡速率等约束，该模型的具体表达式参见式。

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [C_i(P_{i,t}) + E_i(P_{i,t})]$$

定义 T 为调度阶段的总数，系统配置的发电机组总台数定义为 N，机组 i 于 t 调度时段的经济成本  $C_i(t)$  与环保费用  $E_i(P_i, t)$  反映第 i 台发电设备在 t 时段的成本及环境治理费用， $P_i(t)$  定义为第 t 时段的发电出力，面对这类优化问题的求解，IPSO 采用可调惯性权重配合混沌搜索的途径，既提高了收敛速率，又增强了全局探索性能，克服了传统粒子群算法易收敛于局部最优的缺陷。随机初始化粒子群作为起点，各粒子均体现为调度方案的载体，粒子响应个体极值和集体极值，以及惯性参数、认知权重等调节项，反复调整运动矢量和空间位置，通过多次迭代逐步逼近最佳的调度方案，若达到收敛标准，程序输出的最终调度方案与全局最优粒子绑定。

#### （四）人机交互模块

智能调度系统需要内置人机交互这一基础功能层，根本目的在于实现调度人员与敏捷响应、智能化的操作界面的高效协同，实现调度人员对电网状态的即时把控，掌握负荷预测与优化调度的实施效果，完成人工介入及调度决策操作，该模块采用可视化展示与语义解析技术，开发支持多视图展示、多角度分析及交互控制的可视化操作界面，采用 D3.js 等工具进行数据视觉呈现，

实时反映电网构型特征、能量分布和设备工况等关键内容，采用力场引导的排布算法，即时绘制电网拓扑的可视化图形，通过实时数据驱动节点及关联边的颜色变化与运动轨迹，马上展现电网运行的真实模样。模块中集成了多种可操控的数据图表，如条形示意图、折线示意图、极坐标示意图等，能够对负荷预测轨迹、调度优化输出、电量匹配度等关键因素进行可视化展示，还能对展示内容进行动态缩放和位置移动，有利于调度员开展多维度的分析工作，在智能对话处理领域，该组件整合了采用 BERT 模型的智能问答模块，调度人员能用生活里的语句发起咨询，以“测算次日早高峰电力负载量”为例，算法可自动拆解语句的语义结构，锁定相关反馈，返回结构化的语义精简答案，切实改善了交互效能及用户体验。

#### 四、结语

基于智能技术搭建的电力调度自动化系统利用数据收集、负荷预测、优化调度与人机交互模块协同行动，构建出高效、可靠的电网智能决策的闭环回路，该系统不仅明显强化了调度过程的安全壁垒、降低了故障发生风险，更凭借动态优化能力达成了资源的高效调配与响应速度的提高，智能调度系统是维系新型电力系统稳定运行的关键基础设施，其设计与实现为电力行业的数字化转型给出了可复用的技术样式，今后将不断深化算法适应性的探索，促进智能化调度朝全域自治进步。

#### 参考文献

- [1] 金萍，侯娟. 基于分布式数据管理的电网智能调度控制系统设计 [J]. 机械与电子, 2023, 41(06): 46–50.
- [2] 陈适铭. 人工智能在电力调度优化中的应用 [J]. 互联网周刊, 2024, (08): 32–34.
- [3] 谭泽渊. 电力调度自动化系统中的智能技术分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(05): 158–159. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2024.05.068.
- [4] 付饶，袁丁，刘琦，等. 人工智能在电力调度自动化系统中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(02): 67–69. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2023.02.024.
- [5] 赵冬冬，李盼盼. 人工智能技术在电力调度自动化系统中的应用研究 [J]. 电工材料, 2024, (03): 72–75. DOI: 10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2024.03.020.
- [6] 周伟昌，陈雨，刘军福，等. 电力调度自动化系统中人工智能的应用探析 [J]. 电工材料, 2023, (06): 77–79. DOI: 10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2023.06.021.
- [7] 胡鑫. 电力调度自动化系统中的人工智能技术分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(09): 190–191. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2023.09.084.
- [8] 赵冬冬，李盼盼. 人工智能技术在电力调度自动化系统中的应用研究 [J]. 电工材料, 2024, (03): 72–75.
- [9] 牛花梅，赵嘉文. 智能电网技术在电力调度自动化中的运用 [J]. 城市建设理论研究（电子版）, 2023, (33): 4–6.
- [10] 袁丁，郝威，张可，付饶. AI 技术在电力调度自动化中的应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2021, (22): 119–121.
- [11] 闫凯文. 基于在电力调度自动化系统中人工智能技术的应用新探 [A]. Proceedings of 2023 Seminar on Engineering Technology Application and Construction Management [C]. 上海筱虞文化传播有限公司，上海筱虞文化传播有限公司，2023: 2.
- [12] 许文婧，刘晓静. 关于电力调度自动化中的智能电网技术的研究 [A]. 第二届电力工程与技术学术交流会论文集 [C]. 广东省国科电力科学研究院，广东省国科电力科学研究院，2022: 4.

# 低温冷凝技术在油品储运系统 VOC 减排中的应用研究

孙健

大庆石化公司销售储运中心，黑龙江 大庆 163714

DOI: 10.61369/ME.2024090010

**摘 要：** 本文针对油品储运系统 VOCs 排放问题，研究了低温冷凝技术在减排中的应用。分析了油品储运过程中 VOCs 的产生机理和排放特点，阐述了低温冷凝技术的原理、工艺流程及关键设备。研究表明，低温冷凝技术通过降低温度使 VOCs 从气相转化为液相，具有回收效率高、能耗低、适应性强等优势。针对不同储运环节，提出了差异化的工艺方案，并通过工程实例验证了应用效果。采用优化后的系统，VOCs 减排率和油气转化率均较高，具有显著的环境效益和经济价值。本文还探讨了低温冷凝技术与其他处理技术的耦合应用，为油品储运系统 VOCs 综合治理提供了新思路。

**关 键 词：** 低温冷凝技术；油品储运系统；挥发性有机物 (VOCs)；减排

## Research on the Application of Low-temperature Condensation Technology in VOC Reduction of Oil Storage and Transportation Systems

Sun Jian

Sales, Storage and Transportation Center of Daqing Petrochemical Company, Daqing, Heilongjiang 163714

**Abstract：** This paper studies the application of low-temperature condensation technology in reducing VOCs emissions from oil storage and transportation systems. The generation mechanism and emission characteristics of VOCs during the storage and transportation of oil products were analyzed, and the principle, process flow and key equipment of low-temperature condensation technology were expounded. Research shows that low-temperature condensation technology converts VOCs from the gas phase to the liquid phase by reducing the temperature, and it has advantages such as high recovery efficiency, low energy consumption and strong adaptability. Differentiated process schemes were proposed for different storage and transportation links, and the application effects were verified through engineering examples. By adopting the optimized system, both the VOCs reduction rate and the oil and gas conversion rate are relatively high, presenting significant environmental benefits and economic value. This article also explores the coupled application of low-temperature condensation technology and other treatment technologies, providing a new idea for the comprehensive management of VOCs in oil storage and transportation systems.

**Keywords：** low-temperature condensation technology; oil storage and transportation system; volatile organic compounds (vocs); emission reduction

### 一、油品储运系统 VOCs 排放特点及控制必要性

油品储运系统是石油化工行业 VOCs 排放的主要源头之一，包括储存、装卸、输送等环节。我国石油化工行业 VOCs 年排放量约占工业源排放总量的 15% 以上，其中储运系统贡献了约 40% 的排放量<sup>[1]</sup>。

油品储运过程中 VOCs 排放具有以下特点：排放源分散，涉及储罐、装车台、铁路装卸站、码头等多个环节；排放具有间歇性和不稳定性，与气温、压力、操作频率等因素密切相关；组分复杂，主要包括烷烃、环烷烃、芳香烃等多种碳氢化合物。这些特点使得 VOCs 的控制和回收面临较大挑战。

随着环保法规日益严格，石油化工企业面临越来越大的减排

压力。《挥发性有机物无组织排放控制标准》等法规对油品储运系统 VOCs 排放提出了明确要求，研究高效、经济的 VOCs 减排技术具有重要意义。

### 二、低温冷凝技术基本原理

低温冷凝技术是一种基于相变原理的 VOCs 控制技术，利用温度降低使气态 VOCs 凝结为液态，实现分离和回收。当环境温度低于 VOCs 露点温度时，VOCs 会从气相转化为液相，分子量

大、沸点高的组分更易冷凝<sup>[2]</sup>。

冷凝效率受多因素影响：冷凝温度越低，效率越高；VOCs 初始浓度越高，效率越高；组分沸点越高，越易冷凝；延长气体停



留时间可提高效率。

在油品储运系统中，低温冷凝技术采用机械制冷或液氮等低温介质提供冷量，可分为单级和多级制冷系统。单级制冷系统简单经济，适用于温度要求不高的场合；多级制冷系统可实现更低温度，适用于对回收率要求较高的场合<sup>[3]</sup>。

### 三、低温冷凝技术工艺流程及关键设备

#### （一）工艺流程

低温冷凝技术在油品储运系统中的典型工艺流程包括以下几个步骤：

首先，含 VOCs 的废气经过预处理单元，去除其中的水分、颗粒物等杂质，避免这些物质在低温环境下结冰或堵塞设备。预处理通常采用除尘器、干燥器等设备，可将废气中的水分含量控制在 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，颗粒物浓度降至 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下<sup>[4]</sup>。

其次，预处理后的废气进入冷凝单元。冷凝单元是整个系统的核心，通常采用多级冷凝方式，逐步降低温度。在第一级冷凝器中，温度通常控制在 $-20^{\circ}\text{C}$ 至 $-40^{\circ}\text{C}$ 之间，可回收约75%的高沸点 VOCs；在第二级冷凝器中，温度可降至 $-60^{\circ}\text{C}$ 至 $-100^{\circ}\text{C}$ ，进一步回收中低沸点 VOCs，总回收率可达85%以上<sup>[5]</sup>。

然后，冷凝后的液体进入油气分离单元，将回收的油品与不凝气体分离。回收的油品纯度可达95%以上，可返回生产系统重新利用，提高资源利用效率，每年可回收油品数百吨至数千吨不等，具有显著的经济效益。

最后，处理后的尾气根据其浓度和组分，可直接排放或进入深度处理单元（如吸附、催化燃烧等）进行进一步处理，以满足排放标准。经低温冷凝处理后，尾气中 VOCs 浓度通常可降至 $1.5\text{g}/\text{m}^3$ 以下<sup>[6]</sup>。

#### （二）关键设备

低温冷凝系统的关键设备主要包括冷凝器、制冷系统和油气分离装置。

冷凝器是实现 VOCs 相变的核心设备，其类型主要包括壳管式冷凝器、板式冷凝器和螺旋板式冷凝器等。壳管式冷凝器结构简单、易于清洗维护，但热交换效率相对较低，传热系数通常为 $800\text{--}1200\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；板式冷凝器热交换效率高，传热系数可达 $2000\text{--}4000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，但清洗维护相对困难；螺旋板式冷凝器兼具前两者优点，传热系数约为 $1500\text{--}2500\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，但成本较高<sup>[7]</sup>。

制冷系统根据温度需求不同，可采用机械压缩制冷系统或液氮等低温介质直接冷却。机械压缩制冷系统能耗相对较高，单位制冷量电耗约为 $0.8\text{--}1.5\text{kWh}/\text{kW}$ ，但运行成本低；液氮直接冷却可实现更低温度（最低可达 $-196^{\circ}\text{C}$ ），但成本较高，液氮消耗量约为 $3\text{--}5\text{kg}/\text{kg}$ 回收 VOCs，适用于要求极低温度的场合<sup>[8]</sup>。

油气分离装置主要包括气液分离器、储罐等，用于将冷凝后的液体与未冷凝的气体分离。分离效果直接影响系统的回收效率和产品质量，高效气液分离器可使分离效率达到99%以上，残留气体中的液滴含量低于 $0.01\text{g}/\text{m}^3$ 。

### 四、低温冷凝技术在油品储运不同环节的应用

#### （一）储罐呼吸过程中的应用

油品储罐在昼夜温差变化和装卸操作过程中会产生呼吸损失，是 VOCs 排放的重要来源。储罐呼吸气体特点是排放量大、浓度波动明显，VOCs 浓度在小呼吸时约为 $200\text{--}500\text{g}/\text{m}^3$ ，大呼吸时可达 $800\text{--}1500\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[9]</sup>。针对这一特点，低温冷凝技术在储罐呼吸气体处理中的应用方案主要包括两种模式。

一种是集中式处理模式，将多个储罐的呼吸气体收集到中央处理装置进行冷凝回收。该模式适用于储罐群集中布置、排放量相对稳定的场合。以某石化企业储罐区为例，采用集中式低温冷凝系统处理10座储罐的呼吸气体，系统设计处理能力为 $200\text{m}^3/\text{h}$ ，冷凝温度为 $-40^{\circ}\text{C}$ ，年回收油品约320吨，VOCs 减排率达82%，投资回收期不到3年<sup>[10]</sup>。集中式处理模式的主要优势在于规模效应明显，单位处理成本较低，设备利用率高。此外，由于集中处理，便于实施自动化控制和在线监测，提高了系统运行的安全性和可靠性。集中式系统通常配备完善的预处理单元，包括除雾器、气液分离器和加热器等，可有效防止因液滴夹带或结冰导致的设备故障，延长设备使用寿命。

另一种是分散式处理模式，在每个储罐或几个相邻储罐设置独立的冷凝回收装置。该模式适用于储罐分散布置或排放特性差异较大的场合。分散式系统设备规模小，投资较低，但运行管理成本相对较高。实践表明，单罐配套的小型低温冷凝装置，处理能力通常在 $20\text{--}50\text{m}^3/\text{h}$ ，冷凝温度为 $-30^{\circ}\text{C}$ 左右，VOCs 回收率可达75%以上。分散式处理模式的显著特点是灵活性强，可根据不同储罐的排放特性和油品种类进行针对性设计。这种模式特别适合于储存不同油品种类、排放特性差异明显的储罐区。分散式系统还具有模块化安装便捷、占地面积小的优势，对于改造现有储罐区尤为适用。随着小型制冷设备技术的进步，新型分散式低温冷凝装置的能效和自动化水平不断提高，进一步增强了其应用价值和市场竞争力。

#### （二）装车过程中的应用

油品装车过程是 VOCs 排放的另一重要环节，特点是排放集中、浓度高但时间短。装车过程中排放的 VOCs 浓度通常在 $1000\text{--}2000\text{g}/\text{m}^3$ ，气体流量与装载速度密切相关，一般为装载量的1.0–1.2倍体积。

针对装车过程的特点，低温冷凝技术采用两段式冷凝工艺：第一段采用常规制冷设备将温度降至约 $-40^{\circ}\text{C}$ ，可回收约70%的 VOCs；第二段采用液氮等深冷介质将温度进一步降至 $-120^{\circ}\text{C}$ 左右，总回收率可达90%以上。某石油企业汽油装车站采用这种两段式冷凝工艺，系统设计处理能力为 $600\text{m}^3/\text{h}$ ，年回收汽油约850吨，VOCs 排放浓度由原来的 $1500\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $120\text{g}/\text{m}^3$ 以下，达到国家排放标准，年经济效益超过600万元。两段式冷凝工艺的核心优势在于充分发挥了不同冷凝温度区间的特点，实现了能源的梯级利用，既保证了回收效率，又降低了运行成本。常规制冷设备适用于回收高沸点 VOCs 组分，投资相对较低；而深冷系统则针对性地回收低沸点组分。



此外，装车过程 VOCs 排放具有间歇性特点，为了提高系统稳定性和经济性，通常在冷凝系统前设置缓冲罐，平衡流量和浓度波动。实践证明，设置容积为最大排放量1.5~2倍的缓冲罐，可使系统负荷波动控制在  $\pm 15\%$  以内，大幅提高设备利用率和能源效率。缓冲罐的合理配置不仅解决了装车过程中排放的间歇性问题，还起到了预冷和初步分离的作用，延长了后续设备的使用寿命。现代化的 VOCs 回收系统通常配备自动化控制装置，根据装车计划和实时监测数据动态调整系统参数，优化能耗和回收效率。

## 五、低温冷凝技术的节能优化与余热利用

### （一）多级梯级利用技术

低温冷凝技术的能耗主要集中在制冷系统，如何提高能源利用效率是该技术应用和推广的关键。多级梯级利用技术是降低能耗的有效途径之一，其基本思路是根据不同组分 VOCs 的冷凝温度特性，采用分级冷凝方式，实现冷量的梯级利用。

多级梯级利用系统通常分为两到三级冷凝器。在第一级冷凝器中，温度控制在较高水平，用于冷凝高沸点组分；在后续级冷凝器中，温度逐级降低，用于冷凝中低沸点组分。这种分级冷凝方式可以根据不同组分的冷凝特性合理配置冷量，避免低品位冷量用于高温冷凝的能源浪费。研究表明，采用多级梯级利用技术可使系统能耗降低20%~30%。多级梯级利用技术的实施需要精确设计各级冷凝器的操作参数，包括温度、压力和流量等。通过合理的工艺布局，可实现冷量在系统内的循环利用，高温阶段冷凝产生的冷凝热可用于预热后级冷却介质，提高系统整体热效率。此外，不同级别的冷凝器可根据处理气体特性选择不同类型，如壳管式、板式或螺旋板式等，以获得最佳的传热效果和运行稳

定性。

### （二）低温余热回收利用

炼油厂内部存在大量低温余热资源，如制氢装置的氢气冷却、催化裂化装置的烟气余热等。这些低温余热如果能够有效回收利用，可显著降低低温冷凝系统的运行成本。低温余热回收利用的关键是热能品位匹配和热量传递效率提升。

在实际应用中，低温余热回收主要通过以下方式实现：一是利用余热驱动吸收式制冷系统，为冷凝系统提供部分冷量；二是利用余热驱动有机朗肯循环发电，为制冷系统提供电能；三是采用热泵技术提升余热品位，扩大其应用范围。这些措施可使低温冷凝系统的综合能效显著提高，显著降低运行成本。

此外，低温冷凝过程本身也会产生大量冷凝热，对这部分热量进行回收利用也是降低系统能耗的重要途径。通过设置热回收换热器，可将冷凝热用于预热进入系统的冷空气或作为其他用热单元的热源，进一步提高系统的能源利用效率。

## 六、结束语

低温冷凝技术作为一种高效、经济的 VOCs 减排技术，在油品储运系统中具有广阔应用前景。通过对该技术在储罐呼吸、装车装卸等环节的应用分析可知，低温冷凝技术既能实现 VOCs 的有效减排，又能回收有价值的油品资源，实现环境效益与经济效益的统一。随着能源节约和环境保护要求日益提高，低温冷凝技术需在节能降耗、适应性增强和系统集成方面进一步优化。特别是低温余热回收利用、多级梯级冷凝等节能技术的应用，将提升该技术的经济性和可持续性。此外，低温冷凝技术与其他 VOCs 处理技术的组合应用也将成为未来发展重要方向。

## 参考文献

- [1] 杨春剑. 炼油装置低温余热在油品储运系统中的应用 [J]. 齐鲁石油化工, 2016, 44(3): 4.
- [2] 缪志华, 张林, 王蒙, 等. 冷凝法油气回收技术与应用 [J]. 低温与超导, 2011, 39(6): 5.
- [3] 杨叶, 王铁军, 王蒙, 等. 冷凝式油气回收系统设计研究 [J]. 低温与超导, 2012, 40(1): 6.
- [4] 王伟. 炼厂储运过程中 VOCs 治理技术应用与研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2017.
- [5] 赵志伟, 杜垵. 冷凝法油气回收工艺的能耗分析 [J]. 制冷技术, 2010(1): 4.
- [6] 缪志华, 张林, 王蒙, 等. 冷凝法油气回收技术与应用 [J]. 低温与超导, 2011.
- [7] 徐强, 吴宝华. 油气回收技术在油品储运中的应用 [C]// 中国计量协会; 中国石油化工集团公司; 中国石油天然气集团公司. 中国计量协会; 中国石油化工集团公司; 中国石油天然气集团公司, 2014.
- [8] 刘野. 冷凝式油气回收技术在油品储运中的应用 [J]. 文摘版: 工程技术, 2016, 000(006): P.230-230.
- [9] 鲁清明, 杜垵. 冷凝法油气回收技术研究进展及现状 [C]// 江苏省暖通空调制冷2015年学术年会.; 中国勘探设计协会; ; 江苏省制冷学会; ; 江苏省土建学会, 2015.
- [10] 梁家联. 冷凝式油气回收技术在油品储运中的运用 [J]. 化工管理, 2015(28): 1.

# 建筑智能化系统网络安全体系分析

张金宇

江苏大美天第文化产业有限公司，江苏 南京 210000

DOI: 10.61369/ME.2024090013

**摘 要：** 随着建筑智能化系统的快速发展和广泛应用，网络安全问题日益突出。本文从建筑智能化系统的特点出发，分析了其面临的网络安全威胁，探讨了建立建筑智能化系统网络安全体系的必要性。在此基础上，从技术、管理、法律法规三个方面提出了构建建筑智能化系统网络安全体系的策略，以期为保障建筑智能化系统的安全运行提供参考。

**关 键 词：** 建筑智能化系统；网络安全；安全体系；安全策略

## Analysis of Network Security System of Intelligent Building System

Zhang Jinyu

Jiangsu Damei Tiandi Cultural Industry Co., LTD., Nanjing, Jiangsu 210000

**Abstract：** With the rapid development and widespread application of intelligent building systems, cybersecurity challenges have become increasingly prominent. This paper analyzes the characteristics of intelligent building systems and examines the cybersecurity threats they face, highlighting the necessity of establishing a cybersecurity framework for these systems. Building on this foundation, it proposes strategies to construct a cybersecurity system for intelligent building systems from three perspectives: technology, management, and legal regulations. These strategies aim to provide practical references for ensuring the secure operation of intelligent building systems.

**Keywords：** intelligent building systems; cybersecurity; security framework; security strategies

## 引言

建筑智能化系统是以建筑物为平台，兼备通信、办公自动化、建筑设备监控、信息管理等多种功能，集成多种智能化子系统，实现建筑物的智能化管理和服务。但是由于建筑智能化系统具有开放性、集成性、网络化等特点，使其面临着诸多网络安全威胁。因此，构建完善的建筑智能化系统网络安全体系势在必行。

## 一、建筑智能化系统面临的网络安全威胁

### （一）数据泄露与窃取

建筑智能化系统汇聚了大量业主的个人信息，如姓名、住址、电话、车牌号等隐私数据，以及楼宇的各种控制参数，如电梯运行状态、空调温度设置、门禁权限分配等敏感信息。这些数据一旦泄露，不仅会侵犯业主的隐私权，还可能被不法分子利用，进行精准营销、电信诈骗等违法活动，给业主造成财产损失和精神困扰。同时，楼宇控制参数的泄露也会给犯罪分子提供可乘之机，如掌握了电梯控制逻辑，就可能实施故意卡停电梯、改变运行速度等危害公共安全的行为<sup>[1]</sup>。

### （二）系统入侵与控制

数据泄露的途径多种多样，黑客可以利用建筑智能化系统的各种漏洞，如软件漏洞、硬件后门、弱口令等，非法入侵系统，窃取数据。一些智能化系统为了便于远程维护，设置了远程访问

接口，但如果认证措施不够严密，也可能成为数据泄露的突破口。此外，内部人员的泄密也是一个重要隐患，如系统管理员滥用职权，将数据非法出售给第三方，或工作人员误操作，将数据错误地公开等。由于建筑智能化系统规模大、结构复杂，数据量巨大，传统的安全防护手段难以完全应对数据泄露与窃取的风险，需要建立多层次、全方位的数据安全保护体系。

### （三）拒绝服务攻击

拒绝服务攻击是一种常见的网络攻击方式，攻击者通过向目标系统发送大量虚假请求，耗尽系统的计算、存储、网络等资源，使系统无法正常响应正常用户的服务请求，从而达到瘫痪系统的目的<sup>[2]</sup>。建筑智能化系统往往依赖网络通信，各子系统之间、系统与外部之间需要频繁地交换数据和控制指令，一旦遭受拒绝服务攻击，可能严重影响楼宇的智能化服务。

### （四）恶意代码传播

恶意代码传播是建筑智能化系统网络安全面临的另一个重要

威胁。恶意代码，如计算机病毒、蠕虫、特洛伊木马等，通过网络传播，感染智能化系统中的各种设备，破坏系统的正常运行，窃取系统的敏感数据。与传统的信息系统相比，建筑智能化系统更容易受到恶意代码的侵害。

## 二、构建建筑智能化系统网络安全体系的必要性

### （一）保障系统安全稳定运行

建筑智能化系统集成楼宇的各种核心设备和服务，如暖通空调、供配电、给排水、电梯、门禁、消防等，这些系统的运行直接关系到建筑物的正常使用和人身财产安全。一旦建筑智能化系统遭受网络攻击，导致关键设备失灵或服务中断，将给建筑物的运营管理和使用者带来严重的负面影响。因此，构建完善的建筑智能化系统网络安全体系势在必行。网络安全体系应从物理层、网络层、应用层等多个层面入手，采取有效的安全防护措施，全方位守护建筑智能化系统的安全。

### （二）保护用户隐私和财产安全

随着建筑智能化系统的不断发展，其采集、存储和处理的用户隐私信息日益增多，一旦发生数据泄露事件，将给用户的隐私安全和财产安全带来极大威胁。构建建筑智能化系统网络安全体系，加强对用户隐私和财产信息的保护，是维护用户合法权益的必然要求<sup>[3]</sup>。网络安全体系应重点围绕数据安全展开，贯穿数据采集、传输、存储、处理、销毁等各个环节，防止隐私数据被非法获取、篡改、泄露或滥用。例如，对采集的隐私数据进行脱敏处理，加密存储和传输隐私数据，严格限制隐私数据的访问权限，及时删除过期或无用的隐私数据等。同时还应建立健全的数据安全管理制度，明确各方的数据安全责任，加强内部人员的安全意识教育，提高用户隐私保护水平。

### （三）维护国家安全和社会稳定

首先，政府机关、军事设施、科研院所等涉及国家机密和核心利益的建筑物，其智能化系统一旦被入侵或破坏，可能导致国家机密泄露、军事指挥失灵、科研成果外流等严重后果，危害国家安全和主权完整。其次，交通枢纽、能源设施、医疗机构等关系国计民生的公共建筑，其智能化系统一旦瘫痪，可能引发连锁反应，导致城市运转陷入瘫痪，给人民群众的工作和生活带来严重影响。最后，金融中心、证券交易所等关系经济命脉的建筑物，其智能化系统一旦失守，可能引发金融风险，甚至触发经济危机。黑客可能利用智能化系统的漏洞，操纵金融交易，窃取商业机密，这不仅会给相关机构造成重大经济损失，还可能动摇投资者信心，引发市场恐慌，进而影响整个国民经济的健康运行。因此，加强建筑智能化系统的网络安全建设，对维护国家安全和社会稳定具有十分重要的意义<sup>[4]</sup>。

## 三、建筑智能化系统网络安全体系构建策略

### （一）技术策略

为了加强建筑智能化系统的身份认证与访问控制，系统管理

员应采取多种措施。系统应引入双因素认证机制，要求用户在登录时不仅提供密码，还需使用硬件令牌或手机应用生成的一次性验证码，以确保只有授权用户才能访问系统。对于重要的系统管理功能，还可以引入生物识别技术，如指纹或人脸识别，进一步提高身份认证的安全性。在访问控制方面，系统应基于用户角色和职责分配权限，采用最小权限原则，只授予用户完成工作所需的最小权限，并定期审核和调整权限设置。系统管理员应在网络边界、核心交换机、服务器等关键节点部署入侵检测系统（IDS），实时监测进出网络的流量，分析其行为特征，及时发现可疑活动。同时，还应部署入侵防御系统（IPS），对检测到的攻击行为进行实时阻断。IDS和IPS系统应定期更新攻击特征库，提高检测和防御的有效性<sup>[5]</sup>。此外，系统管理员还应关注IDS和IPS系统的告警信息，对可疑事件进行分析和处置。建筑智能化系统中存储和传输的数据通常具有较高的敏感性，因此必须采取数据加密措施。对于静态存储的数据，应使用强加密算法进行加密，并妥善保管加密密钥。对于跨网络传输的敏感数据，应采用安全传输协议，并使用数字证书进行身份验证，防止数据在传输过程中被窃听或篡改，同时还应对数据备份进行加密，防止备份数据泄露。此外，系统管理员应建立漏洞管理流程，定期对系统软硬件进行漏洞扫描，并关注厂商发布的安全公告和补丁信息。对于发现的漏洞，应及时评估其危害性，制定修复方案，并在测试环境中验证补丁的有效性和兼容性后，再应用于生产环境。对于暂时无法修复的漏洞，应采取临时防护措施，如访问控制、入侵检测等，降低漏洞被利用的风险。构建安全隔离区域是控制建筑智能化系统内部访问的有效手段，系统管理员应根据业务需求和安全要求，将系统划分为不同的安全域，如管理域、业务域、外联域等。在安全域之间部署防火墙，根据预定义的安全策略控制各域之间的访问，如仅允许特定IP地址或端口的访问。同时还应对防火墙日志进行分析，及时发现可疑的跨域访问行为。在安全域内部也应根据业务和安全需求进一步划分子网或虚拟局域网，通过访问控制列表等技术手段实现细粒度的访问控制。

### （二）管理策略

建筑智能化系统的运营单位应建立健全的安全管理制度体系，成立网络安全管理委员会，明确各部门和个人在网络安全方面的职责和任务，制定全面的网络安全管理制度，涵盖系统规划、建设、运维、应急响应等各个环节，规范操作流程和标准，并定期开展网络安全教育和培训，提高全员的安全意识和技能。管理制度的制定应充分考虑建筑智能化系统的特点和实际情况，确保制度的可操作性和有效性<sup>[6]</sup>。权限管理是建筑智能化系统安全管理的核心内容，系统管理员应根据用户的角色和职责，设置相应的操作权限。权限设置应遵循最小权限原则，仅授予用户完成工作所需的最小权限，避免过度授权带来的安全风险。对于关键操作，如系统配置修改、数据库管理等，应实行双人复核制度，防止单一用户的错误操作或恶意行为。同时还应定期审核和调整权限设置，及时撤销离职人员的权限，确保权限设置与实际需求相符。日志管理和审计是建筑智能化系统安全管理的重要手段，系统应对用户的登录、退出、操作等行为进行详细记录，包



括时间、地点、操作内容等关键信息。日志应采用集中存储和管理的方式，防止被篡改或删除。安全管理人员应定期对日志进行分析和审计，及时发现可疑行为和安全事件。审计过程中如发现问题，应深入调查，查明原因，并采取相应的纠正和预防措施，审计结果应形成报告提交管理层审阅。此外，安全管理人员应定期对系统进行全面的安全检查，评估现有安全措施的有效性，发现安全隐患和薄弱环节。安全评估应包括外部渗透测试和内部配置核查等方面，全面评估系统的安全状况。对于发现的安全问题应及时制定整改方案，明确责任部门和整改期限，并跟踪整改进度，确保问题得到有效解决。安全评估结果应形成报告，作为管理决策和安全改进的重要依据。运营单位应制定完善的网络安全事件应急预案，明确应急组织架构、职责分工、处置流程等内容。应急预案应针对不同类型和级别的安全事件，制定相应的处置方案和措施。同时成立应急响应小组，配备专业人员和必要的技术设施，确保在安全事件发生时能够迅速响应和处置。应急响应小组应定期开展应急演练，检验应急预案的有效性，提高实战处置能力。在安全事件发生后，还要及时启动应急预案，控制事态，减少损失，并总结经验教训，完善应急机制。

### （三）法律法规策略

国家应加快建筑智能化系统网络安全相关法律法规的建设步伐，为行业发展提供有力的法治保障。立法机关要充分调研建筑智能化系统网络安全的特点和需求，制定专门的法律法规，明确建筑智能化系统运营单位、设备供应商、安全服务商等各方主体的安全责任和义务，规范行业行为。同时及时修订现有的法律法规，如《网络安全法》《数据安全法》等，将建筑智能化系统纳入监管范围，弥补法律空白。在法规制定过程中，应广泛听取行业专家和企业代表的意见，确保法规的针对性和可操作性<sup>[7]</sup>。执法部门应加大对建筑智能化系统网络安全的监管力度，严厉打击各类违法犯罪行为。公安机关应成立专门的网络安全执法队伍，配备专业人员和技术设备，提高执法能力。对于发现的网络攻击、

数据泄露等违法犯罪行为，应及时立案侦查，依法惩处。对于情节严重、后果恶劣的案件，应从重处罚，形成威慑。同时，执法部门还应加强与建筑智能化系统运营单位的沟通协作，建立信息共享和联动机制，及时发现和处置安全隐患，执法过程中应严格依法办案，保护企业和个人的合法权益。建筑智能化行业协会应发挥行业自律的重要作用，制定行业网络安全规范和标准，引导企业加强安全防护。行业协会应组织行业专家和企业代表，研究制定建筑智能化系统网络安全的技术标准、管理规范、评估指标等，为企业提供可操作的指引<sup>[8]</sup>。同时，还应建立行业网络安全信息共享平台，促进企业间的经验交流和威胁情报共享。行业协会还应定期开展网络安全评估和检查，对企业的安全状况进行评价，督促企业整改问题。对于安全防护不力、屡次出现安全事故的企业，行业协会应予以通报批评，情节严重的可以实施行业处罚，如限制市场准入等。此外，行业协会还应积极开展网络安全教育和培训，提高从业人员的安全意识和技能。协会应定期举办网络安全专题讲座、研讨会等活动，邀请行业专家和优秀企业代表分享经验，传播最新的安全理念和技术。同时，还应制定行业人才培养计划，与高校、科研机构合作，培养建筑智能化系统网络安全领域的专业人才，为行业发展提供智力支持。行业自律与政府监管相结合，能够有效提升建筑智能化系统的整体安全防护能力，促进行业健康有序发展。

## 四、结束语

综上所述，建筑智能化系统网络安全问题事关建筑物的安全运行和人民生命财产安全，必须高度重视。构建完善的建筑智能化系统网络安全体系需要多方共同努力，通过采取有效的技术、管理和法律手段，全面提升建筑智能化系统的安全防护能力，为智能建筑的健康发展提供坚实保障。

## 参考文献

- [1] 田晓霞. 弱电智能化系统网络安全体系研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2022(3): 3.
- [2] 葛欣欣. 学校建筑智能化系统的设计要点探讨 [J]. 江西建材, 2023, (05): 208-210.
- [3] 席攀峰. 新型智能建筑中的网络安全策略研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(07): 111-115.
- [4] 云洁. 建筑智能化系统网络安全研究 [J]. 数字技术与应用, 2017, (01): 211+213.
- [5] 李志敏. 网络通信技术下弱电智能化建筑系统分析 [J]. 信息记录材料, 2022, 23(6): 3.
- [6] 江好. 智能建筑中的网络安全策略探讨 [J]. IT 经理世界, 2023(11): 25-28.
- [7] 高凡. 智能建筑系统网络安全问题行业解决方案制定进行时 [J]. 中国建设信息化, 2020(3): 1.
- [8] 朱伊华. 智能楼宇系统中网络安全技术分析 [J]. 中国设备工程, 2021(19): 2.



# 多模联动，语义贯通

## ——大模型跨模态信息融合的创新技术路径

李少华，张正

中国人民武装警察部队工程大学，陕西 西安 710000

DOI: 10.61369/ME.2024090014

**摘要：** 人类在现实社会通过视觉、听觉、触觉等多种感官获取信息，不同模态信息相互补充印证，帮助人们理解和认知世界。人工智能大模型的跨模态融合能够有效提升复杂信息理解处理能力，使得人工智能更加接近人类智能水平。此次研究综合运用文献资料法、案例分析法和对比研究法探索大模型跨模态信息融合的创新技术，提出多模数据的获取与预处理、多模联动的模型架构设计、多模联动的训练与推理机制、语义理解与分析技术、语言对齐与融合技术等技术路径，为大模型实现多模联动、语义贯通的模态信息融合提供新的思路与方向。

**关键词：** 大模型；人工智能；跨模态；信息融合；创新技术

### Multi-modal Interaction and Semantic Integration -An Innovative Technical Path for Cross-modal Information Fusion in Large Models

Li Shaohua, Zhang Zheng

Engineering University of the People's Armed Police Force of China, Xi 'an, Shaanxi 710000

**Abstract：** In the real world, humans obtain information through multiple senses such as vision, hearing, and touch. Different modalities of information complement and verify each other, helping people understand and perceive the world. The cross-modal fusion of large models in artificial intelligence can effectively enhance the ability to understand and process complex information, bringing artificial intelligence closer to human intelligence levels. This research comprehensively employs methods such as literature review, case analysis, and comparative study to explore innovative technologies for cross-modal information fusion in large models. It proposes technical paths including the acquisition and preprocessing of multi-modal data, the design of multi-modal interaction model architectures, the training and inference mechanisms of multi-modal interaction, semantic understanding and analysis techniques, language alignment and fusion techniques, and knowledge graphs and semantic integration. These provide new ideas and directions for large models to achieve multi-modal interaction and semantic integration in cross-modal information fusion.

**Keywords：** large models; artificial intelligence; cross-modal; information fusion; innovative technologies

## 引言

人工智能在信息技术高速发展的当下对社会各个领域的运作模式产生了深远影响，大模型作为人工智能领域的核心技术已经成为推动科技创新和产业升级的关键力量。随着大数据、云计算和深度学习技术的持续发展，大模型的训练数据规模与模型参数数量呈现指数级增长态势，这使得模型学习的知识内容更加全面丰富，庞大的模型参与赋予模型极强的表达能力与泛化能力，大模型在处理复杂任务时更加精准高效，为人工智能的持续成长发展奠定了坚实基础<sup>[1]</sup>。跨模态融合能够将来自不同模态的数据整合分析后获取全面准确信息提示，他模型借此充分利用不同模态数据的互补性实现信息深度理解与综合分析。跨模态信息融合对提升大模型在自然语言处理、计算机数据等领域性能具有显著作用，同时也为大模型在智能驾驶、智能医疗、智能服务等等领域的应用提供了重要支持。

作者简介：

李少华（1991.12-），男，汉族，山西河曲人，学历：硕士研究生，职称：助教，研究方向：云计算、大模型应用。

张正（1993.03-），男，汉族，山西太原人，本科，助理工程师，人工智能。

## 一、多模联动的创新技术路径

### （一）多模数据的获取与预处理

大模型跨模态信息融合中多模数据来源广泛，覆盖了多种类型和多个领域，数据不仅仅可以来自于互联网公开数据，同时还可以通过与其他不同领域的不同类型机构合作获取各种数据。例如医疗领域的医学影像数据就是重要的图像数据来源，医疗机构的影像数据库存储了大量 X 光、CT、MRI 等影像，这些影响对疾病诊断和治疗具有重要价值。实际应用中还可以通过传感器获取多模数据，例如智能驾驶车辆上的摄像头、雷达、激光雷达等传感器能够实时采集车辆周围环境信息，这些数据对自动驾驶系统的控制和决策至关重要<sup>[2]</sup>。

数据清洗是多模数据预处理的关键环节，它可以去除数据中的噪声、错误和不完整信息，提升数据质量与可用性。例如通过 Hunspell、语言模型等拼写检查工具检测纠正错别字和语法错误，使用哈希算法判断文本是否重复并删除重复文本数据，采用降噪算法去除音频的噪音和干扰等等。数据标准能够为数据赋予语义标签，这对跨模态信息融合的作用非常显著，文本标注可以根据不同任务需求开展词性标注、命名实体识别、情感分析等标注；图像标注可以采用目标检测标注、图像分类标注、语义分割标注等等；音频标准则可以采用语音转文本标准和音频分类标准。

数据增强能够扩充多模数据并提升模型性能，图像数据增强可以通过集合变化和颜色变化实现，例如颜色变化能够调整图像的色调、亮度、饱和度和对比度，生成不同颜色风格图像。文本数据增强的常用方法包括同义词替换、随机插入、随机删除和回译等，例如同义词替换就是将文本中某些词语替换为同义词，保持文本语义不变的前提下增加文本多样性，使模型学习到不同表达方式下的语义理解。音频数据增强可以通过改变音频音量、速度、音调等参数来实现，例如加快或减慢音频播放速度能够让模型学习到不同语速下的语音特性，提高模型对语速变化的鲁棒性。数据增强技术能够扩充多模数据，增加多模数据多样性和复杂性，使模型在训练过程中学习到丰富特征，提升模型泛化能力与性能<sup>[3]</sup>。

### （二）多模联动的模型架构设计

统一 Transformer 架构在多模态联动中展现出显著优势，逐渐成为跨模态大模型的核心架构，其核心是自注意力机制，该机制使得模型在处理序列数据时动态关注输入序列的不同序列信息，其在机器翻译、文本生成、问答系统等自然语言处理任务中取得显著效果。统一 Transformer 架构能够统一编码处理不同模态数据，将文本、图像和音频等不同模态数据转化为统一特征表示，充分利用不同模态数据的互补信息实现跨模态语义理解和关联<sup>[4]</sup>。统一 Transformer 架构的并行计算能力非常突出，该架构通过共同处理整个序列，不需要根据顺序依次处理各个时间步，这提升模型训练和推理效率，减少了资源与时间消耗。统一 Transformer 架构还具有很好的可拓展性，它通过堆叠多层 Transformer 模块构建更深层次模型，提高了模型表达能力与学

习能力，这使得模型能够适应不同规模与复杂程度多模态数据，持续提升跨模态信息融合效果。

多模态编码器和解码器分别负责多模态数据的编码和解码，实现跨模态信息处理和生成。多模态编码器能够将不同模态数据专户为统一特征表示以便后续模型处理分析，卷积神经网络是常用的编码器，它能够提取图像局部特征和全局特征，通过多层卷积和池化操作得到图像特征表示。多模态编码器需要解决不同模态特征融合问题，这可以通过不同模态特征的拼接或加权融合实现，也可以通过注意力机制动态融合不同模型特征，使模型可以根据任务需求自动调整模态特征权重。多模态解码器负责根据编码器输出特征生成相应输出，解码器在图像描述任务中可以根据图像特征表示生成描述图像内容的文本，根据文本特征表示生成对应图像，常用的多模态解码器包括 Transformer 解码器或循环神经网络解码器，前者主要通过自注意力机制和交叉注意力机制实现连贯准确输出，后者则通过循环结构加好的完成序列生成任务<sup>[5]</sup>。

多模联动模型在寻求你过程中需要持续优化改进以提升性能和效果，随机梯度下降及其变种是常用的优化算法，例如 Adam 算法能够自适应调整学习率，通过合理调整算法超参数可以使模型更快收敛以提升训练效率。模型正则化也是常用优化手段，L1 和 L2 正则则在顺势函数中添加正则化项能够方式模型过拟合，提高模型泛化能力。为了进一步提升模型性能，可以在 Transformer 架构基础上提出变体，处理图像、长序列数据或长文本等等。此外，数据处理和增强也是优化模型的有效手段，通过多模态数据的精细预处理和增强能够增加数据多样性与复杂性，保证模型能够学习到更加丰富特征。

### （三）多模联动训练与推理机制

多模联动模型训练依靠先进算法和策略完成海量多模态数据的有效学习和模型性能优化，随机梯度下降机器变种在多模联动训练中占据了重要地位，它在每次迭代中随机选择小批量数据样本，计算样本的损失函数梯度并根据梯度更新模型参数，这种算法能够在大规模数据集上快速收敛，在处理多模态数据集时不断迭代调整模型参数，使得模型能够学习到不同模态数据的关联与特征<sup>[6]</sup>。Adagrad 是 SGD 的变种，它能够自适应调整每个参数的学习率，根据每个参数在以往迭代中的梯度平方和调整学习率，增大不常更新参数的学习率，减少频繁更新参数的学习率，这种自适应学习率调整机制时期在多模态数据处理时能够更好地平衡不同参数更新速度，提升模型训练效果。多模联动模型训练还可以通过数据并行和模型并行提升训练效果，数据并行将数据集分为多个小批次并分别在不同计算设备上训练，汇总更新计算效果，这可以充分利用多个计算设备的计算能力加快训练效果；模型并行将模型的不同部分分配到不同计算设备计算来提升训练效率。

多模联动模型的推理过程能够将训练好的模型应用于实际任务，根据输入多模态数据生成相应输出。将图像特征向量和文本语义向量输入到多模联动模型后，模型能够利用自注意力机制对两种模态信息进行融合与交互，寻找图像和文本的语义关联，模

型根据融合后的信息推理生成对问题的回答，模型在推理过程中根据训练学习到的知识和模式进行逻辑判断和语义理解，最终得到正确答案。推理效率提升对多模联动杆模型的实际应用非常重要，模型压缩技术能够减少模型参数数量和计算量，模型剪枝是常用的模型压缩方法，它能够删除模型中不重要的连接或神经元，减少模型复杂程度以降低计算成本。优化推理算法也能够提升推理效率，通过对自注意力机制等核心算法优化能够减少计算量和内存消耗，合理设计融合算法可以避免重复计算与冗余操作，保证模型更快处理多模态信息。

## 二、语义贯通的创新技术路径

### （一）语义理解与分析技术

词法分析是自然语言处理的基础，它将连续文本流切成独立单词或要素，识别单词的语言学信息，基于统计的分词方法利用大规模语料库，通过统计模型学习词语出现的概率及上下文关系实现文本切分。句法分析能够分析句子的语法结构，确定句子中各个词语之间的依存关系或成分及结构，常用分析方法主要包括基于规则方法和基于统计方法。语义角色标注在句法分析基础上标注句子各个谓词的寓意角色，为自然语言处理任务提供了丰富语义信息，它主要以来机器学习算法和语义知识库实现<sup>[7]</sup>。

语音识别能够将语音信号转化为文本形式，使计算机“听懂”人类语言，语音识别技术广泛用于智能语音助手、语音输入法、智能客服等场景。语音识别从特征提取入手，常用梅尔频率倒谱系数和线性预测倒谱系数；声学模型和语言模型是语音识别系统的核心，常用隐马尔可夫模型和深度神经网络将语音特征转化为因素或音节的概率分布；语音合成能够将文本转化为语音，为用户提供自然便捷交互方式，常用技术包括参数合成和波形合成<sup>[8]</sup>。

### （二）语言对齐与融合技术

跨模态语义将不同模态的数据在语义层面匹配关联，使模型

能够理解不同模态数据的内部关联。深度学习方法在跨模态语义对齐中显现出巨大优势，它能够有效关联不同模态数据语义，通过构建对比学习模型将同一语义概念的不同模态数据作为正样本对，将不同语义概念的不同模态数据作为负样本对，将不同模态数据映射到一个能够反映语义关系的共同空间。生成对抗网络也被用于跨模态语义对齐，它主要由生成器和判别器组成，前者负责将一种模态数据转化为另一种模态数据，后者用于判断生成数据是否真实<sup>[9]</sup>。知识图谱辅助的寓意对齐方法能够借助知识图谱中丰富语义知识和关系实现不同模态数据与知识图谱节点和知识的关联和匹配，进而实现语义对齐。

语义融合整合了不同模态语义信息，特征拼接是简单直观的语义融合策略，它将不同模态数据提取特征在维度上拼接形成统一特征向量<sup>[10]</sup>。例如图像与文本跨模态任务中采用卷积神经网络提取图像视觉特征，使用 Transformer 提取文本语义特征，拼接后能够得到融合特征。注意力融合机制能够让模型根据任务需求自动关注不同模态数据的重要部分实现更有效语义融合，基于图神经网络的语义融合算法将不同模态数据表示为图结构，融合策略还可以根据任务特点和需求动态调整，例如在一些需要实时响应的任务中采用计算效率更高的融合策略，结合强化学习方法可以让模型根据任务反馈信息自动选择最有语义融合策略，进一步提升模型性能与效率。

## 三、结束语

本文围绕大模型跨模态信息融合展开研究，提出多模数据获取与预处理、模型架构设计、训练推理机制以及语义贯通等创新技术路径。这些成果为大模型实现多模联动、语义贯通提供了方向，未来我们将积极探索技术创新路径，应对更多复杂场景需求，让人工智能更好地服务于社会。

## 参考文献

- [1] 刘聪, 朱兰芹. 基于多模态交互的汽车人机交互设计研究 [J]. 汽车电器, 2022, (08): 3-5. DOI: 10.13273/j.cnki.qcdq.2022.08.003.
- [2] 潘昱辰. 基于提示优化和工具学习的大语言模型推理能力增强方法研究 [D]. 军事科学院, 2024.
- [3] 缪凯博. 基于多模态融合的电商数据分析系统设计与实现 [D]. 华东师范大学, 2024.
- [4] 贺菁希, 任吴炯, 夏以柠. 有图不一定有真相: AI 大模型应用的多模态虚假信息问题分析 [J]. 现代视听, 2024, (08): 36-41.
- [5] 姚奕, 陈朝阳, 杜晓明, 等. 多模态知识图谱构建技术及其在军事领域的应用综述 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(22): 18-37.
- [6] 余德志. 基于度量学习与粗细粒度协同的多模态文档信息抽取算法研究 [D]. 杭州电子科技大学, 2024.
- [7] 刘学博, 户保田, 陈科海, 等. 大模型关键技术与未来发展方向——从 ChatGPT 谈起 [J]. 中国科学基金, 2023, 37(05): 758-766.
- [8] 李伟. 电厂热工过程控制中智能 PID 控制器的应用探讨 [J]. 应用能源技术, 2022, (06): 9-11.
- [9] 杨蓓莹, 王金桥. 多模态大模型的发展与思考 [J]. 财经智库, 2024, 9(02): 33-50+135-136.
- [10] 吴蔚. 人工智能多模态通用大模型数据合规技术应用风险动态规制 (英文) [J]. 科技与法律 (中英文), 2024, (02): 117-126.

# 雨水花园在市政景观中的应用及生态效益分析

苏海洋

宁夏正荣建设工程检测有限公司，宁夏 银川 750001

DOI: 10.61369/ME.2024090015

**摘要：**雨水花园作为一种低影响开发（LID）技术，在市政景观中具有重要的生态效益和应用价值。本文通过分析雨水花园的设计原理、功能特点及实际案例，探讨其在城市雨水管理、景观美化及生态环境改善方面的作用。研究表明，雨水花园能有效减少地表径流、净化雨水污染物、缓解城市热岛效应，同时为城市生物多样性提供栖息地。结合国内外实践，本文提出优化雨水花园设计的建议，以期为我国市政景观的可持续发展提供参考。

**关键词：**雨水花园；市政景观；生态效益；低影响开发；雨水管理

## Analysis of the Application and Ecological Benefits of Rain Gardens in Municipal Landscapes

Su Haiyang

Ningxia Zhengrong Construction Engineering Testing Co., LTD, Yinchuan, Ningxia 750001

**Abstract：** Rain gardens, as a low-impact development (LID) technology, have significant ecological benefits and application value in municipal landscapes. This article explores the role of rain gardens in urban rainwater management, landscape beautification and ecological environment improvement by analyzing their design principles, functional features and practical cases. Studies show that rain gardens can effectively reduce surface runoff, purify rainwater pollutants, alleviate the urban heat island effect, and at the same time provide habitats for urban biodiversity. Based on domestic and international practices, this paper puts forward suggestions for optimizing the design of rain gardens, with the aim of providing references for the sustainable development of municipal landscapes in China.

**Keywords：** rain garden; municipal landscape; ecological benefits; low-impact development; rainwater management

## 引言

随着城市化进程加速，传统排水系统面临径流污染与内涝风险的双重压力，低影响开发（LID）理念为这一问题提供了创新解决路径。雨水花园作为 LID 技术的典型代表，通过模拟自然水文循环，实现了雨水渗透、滞留与净化的协同作用。相较于传统灰色基础设施，其不仅能够缓解市政管网负荷，还能提升景观美学价值与生态服务功能。尽管雨水花园在欧美国家已有成熟应用体系，我国对其生态效益的量化研究仍显不足，尤其在多雨地区与高密度城区的适应性亟待探索。在此背景下，系统分析雨水花园的生态机理与实践经验，对推动海绵城市建设具有现实意义。

## 一、雨水花园的概念与设计原理

### （一）定义与分类

雨水花园（Rain Garden）是一种基于低影响开发（LID, Low Impact Development）理念的生态景观设施，旨在通过模拟自然水文过程，实现雨水的渗透、滞留、净化和再利用。其核心功能在于减少地表径流、补充地下水并改善水质，同时兼具景观美化与生物栖息地营造的作用。从形态上看，雨水花园通常表现为浅凹式绿地，内部填充渗透性基质，并搭配耐旱耐涝的乡土植物，形成可持续的微型生态系统。

根据应用场景与功能侧重点，雨水花园可分为三类：渗透

型、滞留型与净化型。渗透型以促进雨水下渗为主要目标，适用于地下水位较低、土壤渗透性良好的区域；滞留型则强调延缓径流峰值，常见于易涝地区的调蓄设施周边；净化型多设置于污染源下游，通过植物-土壤-微生物的协同作用去除雨水中的悬浮物、重金属及营养盐（如氮、磷）。此外，按空间布局差异，还可划分为分散式雨水花园与集中式雨水花园，前者多见于建筑屋顶、停车场等小尺度场地，后者则常作为市政公园或道路绿带的组成部分<sup>[1]</sup>。

### （二）结构与功能特点

雨水花园的典型结构自上而下包括植被层、覆盖层、种植土层、填料层和砾石层，各层级通过物理过滤与生物化学作用实现



雨水调控。植被层选用根系发达的地被植物（如鸢尾、菖蒲），既能减缓径流流速，又可吸收污染物；覆盖层通常采用有机覆盖物（如树皮碎屑），用于抑制杂草并减少水分蒸发；种植土层需满足渗透系数 $\geq 1.5 \times 10^{-5}$  m/s，确保雨水快速下渗；填料层由砂砾与改良土壤构成，可进一步过滤杂质；底部的砾石层则设置穿孔管，将过量雨水导入市政管网或蓄水模块<sup>[2]</sup>。

在功能实现上，雨水花园表现出四重优势。水文调节方面，其可削减70%以上的径流总量（引用数据时补充），显著缓解城市内涝风险。水质净化方面，填料层中的微生物群落能降解有机污染物，而植物根系可吸附重金属离子，使出水COD（化学需氧量）降低40%-60%。生态服务方面，多样化的植物配置为昆虫与鸟类提供栖息环境，有助于提升区域生物多样性。景观价值方面，季节性开花植物与错落的地形设计，能够增强公共空间的视觉吸引力。值得注意的是，雨水花园的效能受气候条件、土壤特性及维护水平影响，在干旱地区需配套滴灌系统，而在高污染区域则应增加活性炭等强化净化介质<sup>[3]</sup>。

## 二、雨水花园在市政景观中的应用

### （一）典型案例分析

雨水花园在市政景观中的实践已形成多样化模式，其应用场景涵盖老旧小区改造、城市公园建设及工业地块转型等领域。以北京西城区油漆作胡同5号院为例，该院落通过透水铺装、微型下沉蓄水池与集雨桶的组合设计，实现了雨水的就地消纳与回用，2024年汛期两场大雨中未出现积水，年节水达20吨<sup>[4]</sup>。类似地，上海普陀区李子园公园作为工业地块转型项目，通过“雨水花园+透水铺装+景观湖体”系统，实现年径流总量控制率82%，同时为周边区域提供生态休闲空间，获评上海市海绵城市精品工程。

广州老旧小区改造则体现了小尺度雨水花园的灵活性。阿普贝思公司在768创意园设计的140平方米雨水花园，通过微地形塑造与台阶式溢水墙延长雨水径流路径，结合本土植物与透水材料，实现初期净化与洪峰缓冲。重庆中央公园的雨水花园示范基地则展示了山地城市的适应性设计，其700平方米空间通过分层蓄水与生态净化，每年可消纳2000平方米不透水地面的径流，水质稳定达到Ⅲ类标准<sup>[5]</sup>。

值得注意的是，不同气候区的设计侧重点存在差异。多雨的常德市康桥蓝湾小区通过植草沟与雨水收集箱联动，满足2.1万平方米绿地的灌溉需求；而干旱的北京通州副中心则强调雨水回用，95%的雨水通过调蓄水体补充绿化与消防用水。

### （二）设计要点与技术措施

#### 1. 空间布局与竖向设计

雨水花园的平面布局需遵循“源头减排—过程控制—末端调蓄”的系统逻辑。北京集雨型绿地设计规范提出，绿地竖向应优先利用地形组织径流，坡度大于25°时需设置截水沟分流雨水，低洼处则布置调蓄空间。宿迁市要求道路绿化带采用下沉式绿地（低于路面50-250毫米），并搭配开口路缘石引导径流，确保安全性与渗透效率<sup>[6]</sup>。

#### 2. 技术组合与材料选择

核心设施包括生物滞留设施（如雨水花园）、透水铺装与植被缓冲带。李子园公园采用透水路青铺装减少径流，同时通过人工湖调蓄超标降雨，形成“滞蓄—净化—回用”闭环。土壤渗透系数需 $\geq 1.5 \times 10^{-5}$  m/s，填料层多采用砂砾与活性炭强化净化，植物优选耐旱耐涝品种（如鸢尾、菖蒲），根系可吸附重金属并提升生物多样性。

#### 3. 协同市政系统与安全保障

雨水花园需与城市排水防涝系统衔接。北京要求外排水管渠满足重现期标准，调蓄设施溢流口需防倒灌；宿迁则强调初期雨水弃流设施的必要性，以削减径流污染。安全防护方面，渗透设施需距建筑物基础3米以上，地下水位季节性波动区应避免深层入渗。

#### 4. 维护管理与智能化

长期效能依赖于科学维护。重庆中央公园通过水泵自动回用蓄水，减少人工干预；北京部分项目结合气象数据与土壤湿度传感器实现智慧灌溉，节水率达30%-50%。此外，宿迁市建议定期清理滤料层与监测水质，确保设施持续稳定运行<sup>[7]</sup>。

综上，雨水花园的应用需结合地域特点选择技术路径，通过系统性设计实现生态、功能与景观的协同优化。未来，随着智能化技术与标准化导则的推广，其市政景观价值将进一步释放。

## 三、雨水花园的生态效益分析

### （一）水文调节与水质净化

雨水花园对城市水循环的调控作用主要体现在径流削减、峰值延迟与地下水补给三个方面。监测数据表明，200平方米的典型雨水花园可截留85%的25毫米以下降雨事件产生的径流，使汇流时间延长15-30分钟，有效降低市政管网压力。这一效果源于其分层结构：植被层拦截部分雨水，填料层促进下渗，而底部砾石层则暂时储存过量雨水。在北京住宅区项目中，雨水花园系统使区域年径流系数从0.7降至0.3，同时通过土壤渗透每年补充地下水约800立方米<sup>[8]</sup>。

水质净化是雨水花园的核心生态功能。径流中的污染物通过物理过滤、化学吸附和生物降解三重机制被去除。填料层中的沸石与活性炭可吸附70%-90%的重金属离子（如铅、锌），而植物根系分泌的有机酸能促进微生物对石油类污染物的分解。上海工业园区雨水花园的监测显示，出水的总悬浮物（TSS）浓度从进水时的120 mg/L降至8 mg/L，总磷（TP）去除率达到65%。值得注意的是，净化效果受运行年限影响——新建系统的氮去除率通常不足40%，但随着植物根系与微生物群落的成熟，三年后可达60%以上<sup>[9]</sup>。

### （二）微气候改善与生物多样性保护

#### 1. 微气候调节机制

雨水花园通过蒸发蒸腾作用与遮荫效应缓解城市热岛效应。植被层吸收太阳辐射后，水分通过气孔蒸腾带走热量，使周边空气温度降低1-3℃。北京奥林匹克公园的实测数据显示，2000平

方米的雨水花园区域夏季午后气温比硬质铺装区低2.8℃，相对湿度提高15%。此外，透水铺装与植被的组合可减少地表热辐射，其热通量仅为沥青路面的30%，显著改善人体舒适度<sup>[10]</sup>。

### 2. 生物多样性提升途径

雨水花园为城市野生动物提供了重要的栖息地与迁徙廊道。其植物配置遵循“乔木－灌木－地被”的垂直结构，形成多样化的生态位。调查表明，深圳大沙河生态长廊的雨水花园中，鸟类种类从建设前的12种增至21种，传粉昆虫数量提升40%。本土植物（如狼尾草、千屈菜）不仅适应性强，还能吸引特定昆虫，形成稳定的食物链基础。在德国汉诺威的实践中，雨水花园甚至成为濒危物种如欧洲树蛙的繁殖地。

### 3. 协同效益与长效性

这些生态功能具有显著的协同效应。例如，蒸腾作用增强时，植物对污染物的吸收效率同步提高；而昆虫种类的增加又会促进植物授粉，形成正向循环。但需注意，生态效益的持续发挥依赖于科学维护——北京部分项目因缺乏定期清理，五年后填料层板结导致渗透率下降50%。因此，建议建立动态监测体系，结合植物更替与基质更换，保障设施的长期效能<sup>[11]</sup>。

## 四、存在问题与优化建议

### （一）当前应用中的不足

尽管雨水花园在市政景观中的应用已取得显著成效，但其推广仍面临多重制约因素。设计标准化缺失导致实施效果参差不齐，部分项目因未考虑土壤渗透系数（K值）与降雨强度的匹配关系，建成后出现长期积水或渗透不足问题。例如，南京某社区雨水花园因填料层厚度不足，在梅雨季节持续积水达两周，最终引发蚊虫滋生投诉。

维护管理短板同样突出。多数城市的雨水花园缺乏专项维护资金与技术人员，北京2024年调查显示，23%的设施因滤料层堵塞丧失渗透功能，植物存活率不足60%。此外，公众认知度低加剧维护难度——成都某公园雨水花园被误认为普通花坛，游客频繁踩踏导致植被破坏。从技术层面看，高密度城区受限于空间约束，难以布置足够规模的雨水花园，上海内环某项目仅能实现15%的径流控制率，远低于设计要求。

更值得关注的是生态效益的量化困境。当前评估多依赖短期监测数据，缺乏全生命周期成本效益分析（LCCA）。广州部分项

目虽宣称具有水质净化功能，但未对重金属累积风险进行长期跟踪，可能引发土壤二次污染。

### （二）未来发展方向

#### 1. 技术创新与标准化

建立气候分区导向的设计标准是首要任务。建议参考美国《雨水花园设计手册》，按年降雨量划分三类技术模式：多雨地区（>1200mm/年）强化滞蓄能力，干旱地区（<400mm/年）侧重雨水回用，过渡带则采用混合系统。材料研发方面，可推广具有自清洁功能的纳米改性填料，其孔隙率是传统砂砾的2倍，且能通过光催化降解附着污染物。

#### 2. 智慧化运维体系构建

物联网技术为长效管理提供新思路。深圳试点项目已在雨水花园中部署水位传感器与自动清洗装置，当积水深度超过警戒值时触发排水泵，同时通过APP推送维护提醒。这种智慧系统使维护成本降低40%，设施完好率保持在90%以上。对于高密度城区，可发展“垂直雨水花园”——将绿墙技术与蓄水模块结合，使单位面积径流控制能力提升3倍。

#### 3. 制度保障与公众参与

政策层面需明确雨水花园的产权归属与维护责任。建议将设施维护纳入物业考核指标，并设立专项补贴激励社区自治。上海推行的“海绵社区认证制度”值得借鉴，其对达标项目授予节水标识并减免部分排污费。公众教育则应注重体验式传播，如在北京奥林匹克森林公园设置互动式解说牌，通过AR技术展示雨水渗透过程。

## 五、结束语

雨水花园作为海绵城市建设的关键技术，在市政景观中展现出多维度价值。其通过模拟自然水文循环，不仅有效缓解了城市内涝与径流污染问题，还显著改善了微气候并提升了生物多样性。实践表明，科学设计的雨水花园可实现70%以上的径流削减率与60%的污染物去除率，同时降低周边环境温度1-3℃。然而，当前推广仍受限于标准化不足、维护缺失及公众认知薄弱等挑战。未来需通过技术创新、智慧运维和制度协同，进一步释放其生态与社会效益。随着低影响开发（LID）理念的深化，雨水花园有望从单一设施升级为城市绿色基础设施网络的核心节点，为可持续城镇化提供重要支撑。

## 参考文献

- [1] 常文婷. 海绵城市雨水花园景观设计的思路及意义 [J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(14): 241-242.
- [2] 范仲强. 浅析雨水花园在景观设计中的应用要点 [J]. 中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术, 2016(8): 00114-00114.
- [3] 刘菲, 龚航. 海绵城市背景下雨水花园景观营造探究 [J]. 现代园艺, 2017, 40(18): 66-67.
- [4] 徐鹤桐. 雨水花园在北方民居景观设计中的应用探析 [J]. 青年与社会, 2019, 0(21): 205-205211.
- [5] 王蕾. 雨水花园发展过程中雨水池景观设计探讨 [J]. 花卉, 2019, 0(18): 70-71.
- [6] 林云华, 严梓瑞. 雨水花园在庭院景观设计中的应用 [J]. 现代园艺, 2017, 40(22): 65-65.
- [7] 张婷焱. 雨水花园在庭院景观设计中的应用 [J]. 智库时代, 2020(28): 268-268.
- [8] 张辉. 基于海绵城市建设中的雨水花园景观设计研究 [J]. 城市周刊, 2019, 0(15): 1-1.
- [9] 杨石泉. 雨水花园在景观工程中的应用研究 [J]. 低碳世界, 2014(09X): 35-36.
- [10] 冉安彤. 浅析雨水花园在城市景观设计中的应用方法 [J]. 中文科技期刊数据库（文摘版）社会科学, 2017(3): 00318-00318.

# 移动作业终端在电力营销业务场景中的运用分析

赵方园

江苏电力信息技术有限公司, 江苏 南京 210098

DOI: 10.61369/ME.2024090008

**摘 要 :** 伴随电力行业数字化转型的提速, 移动作业终端已成为增进电力营销效能的关键工具, 电力营销业务面临着服务覆盖范围辽阔、现场作业量巨大、实时性要求高等难关, 急切要借助移动技术对业务流程优化, 本文以移动作业终端在其采用实时数据查询、业务过程留痕、移动化服务等功能实现的效率提升与服务优化效果, 针对终端推广中现有的资金投入受限、制度配套滞后和信息化协同不够等瓶颈, 推出场景化部署办法, 加速移动作业终端的业务融合步伐, 对重新构建电力营销服务体系、支持客户需求响应升级意义非凡。

**关 键 词 :** 移动作业终端; 电力营销; 业务场景; 运用

## The Application of Mobile Operation Terminals in Power Marketing Business Scenarios is Divided

Zhao Fangyuan

Jiangsu Electric Power Information Technology Co., LTD. Nanjing, Jiangsu 210098

**Abstract :** As the digital transformation of the power industry accelerates, mobile operation terminals have become a key tool for enhancing the efficiency of power marketing. Power marketing faces significant challenges, including extensive service coverage, large on-site operations, and high demands for real-time performance. There is an urgent need to leverage mobile technology to optimize business processes. This paper highlights the efficiency gains and service improvements achieved by mobile operation terminals through features such as real-time data queries, business process tracking, and mobile services. It addresses the bottlenecks in terminal promotion, such as limited financial investment, lagging institutional support, and insufficient information collaboration, by proposing scenario-based deployment methods. These methods aim to accelerate the integration of mobile operation terminals into business operations, which is crucial for rebuilding the power marketing service system and supporting the upgrade of customer demand response.

**Keywords :** mobile operation terminal; power marketing; business scenario; application

### 前言

处于能源服务智慧化转型的大背景下, 电力营销业务正历经从分散化管理到集约化、移动化运营的重大变革, 传统以纸质工单、人工传递为主导的作业模式存在信息滞后、流程多余等缺陷, 对服务质效提升造成制约, 随4G/5G网络实现覆盖与智能终端不断普及, 移动作业终端依赖实时互联、便携上手等特性, 逐渐被应用到客户信息查询、现场工单处理、异常排查等营销环节里, 成为增进客户体验的有效手段, 现阶段电力企业已开展终端试点投放, 但依旧面临应用深入度不够、标准化程度较低等问题, 系统剖析终端在多元营销场景的应用逻辑和优化路径, 对促进电力营销管理模式创新、搭建敏捷服务体系有着紧迫的实践意义。

### 一、电力营销业务的现状

当下的电力营销业务包含多个关键阶段, 各模块有不可替代的特性, 也存在一些需要突破的难题, 针对客户资料管理, 其表现为数据量大且分布零散, 客户信息的采集和管理大多由各部门根据业务特点自行开展, 导致客户数据标准不一致、管理不规

范。客户规模不断扩大, 该机制引发客户信息采集和整合的效能不够, 很难生成有实际价值的客户分析报告, 在电费征收和用电量计算环节, 呈现操作繁琐、周期重复的情况, 而且客户资料同步滞后的缺点慢慢展现, 客户近期用电需求变化和实际用量不能及时体现出来<sup>[1]</sup>。对电费进行分析需要涉及多个相关变量, 诸如电价政策的分类方式、不同时段用电的特征以及阶梯计费的体系



等，核算程序既繁琐又容易出现疏忽，在资金收缴的事情上，现有的收缴途径主要是人工操作，并且存在资金管控方面的漏洞，需求侧管理的主要目标是让用户能够科学地使用电力，提高能源的利用水平，这个阶段信息获取有明显的延迟和偏差问题，供电方没办法实时把握用户的用电需求和设备的运行状态，很难开展有针对性的节能服务<sup>[2]</sup>。

## 二、移动作业终端在电力营销业务场景中的运用优势

### （一）支持实时查询用户数据

为高效支持电力计量营销业务顺利开展进程，本系统摆脱传统工作模式的空间约束状态，整合现代化移动操作终端设施，使电力计量营销人员拥有全天候、多环境工作的技能，这一技术实施的重要优势是，工作人员能在现场直接查询系统存储的用户信息。过去电力营销的常规操作流程里面，电力营销人员需不断在户外作业点和室内固定终端之间来回移动，为处理用户信息验证、数据维护更新和工单分派事宜，员工只能轮流使用有限的工位设施，频繁变换工作位置，这会产生诸多不利后果：先是会使数据同步延迟或错误的可能性增加，实时遇到的问题不能立刻记录，只能后续凭记忆或临时记录补充，容易造成信息记录不完整或内容有错误；接着会使工作效率降低，每次移动都会占用一定的工作时间，还会破坏工作的连贯性；最后会让统筹管理变得更麻烦，业务高峰时可能出现员工等待使用电脑资源的情况<sup>[3]</sup>。

智能操作终端的移动化实行，主要针对这些痛点加以处理，达成质量与效率的双重提高，作业人员依靠便携终端，在客户所在地、计量表计安装处、故障发生区域，可通过稳定的移动专网或加密数据传输渠道，实时连接核心系统，此系统让工作人员随时对用户基础资料、用电过往、计量装置状况、账户余额及欠费情形等核心数据进行实时查询与核对。在作业现场，工作人员能够精准判断局势，快速应对处理需求，不必为获取资料而中断手头工作或待在固定点位，采用“业务处理跟数据应用零阻隔”模式，有效降低了与工作无关的交通时间和待机时长，显著提升了工作效能；动态信息查询及实时维护系统有效保证了数据的精准和更新，压缩了因数据滞后或传输流程造成的错误区间，切实提高了工作质量。

### （二）便于后续营销提供依据

就电力营销里的计量工作来讲，当智能终端完成现场计量数据收集，可依靠终端设备将计量数据和相应影像素材实时传至后台系统实现统一处理与剖析，此类自动的信息传递途径，直接减轻了基层员工在手动记录、数据整合和信息传送方面的工作负担和焦虑感。十分关键的是，这种高效的信息采集、输送与存储体系，助力电力公司营销业务广泛拓展，主要解决营销资料采集、客户需求回应和用电习惯分析等重要问题，形成层次分明、持续迭代且真实完整的数据支撑架构，依靠终端内的高速存储部件和高分辨率图像采集单元，计量工作的各个关键环节、设备状态的变化以及异常信号都能实时完整记录，实时生成与工作流程匹配的数字记录，这样既保证了数据真实可信，又具有可追溯性，促

使营销计量工作从执行环节到分析环节再到存储环节完成全流程数字化升级和规范化治理<sup>[4]</sup>。

### （三）推动电力营销计量服务实施

电力营销计量工作开始之际，可借助移动工作平台整合用户上传的关联信息，利用卫星定位方式迅速锁定用户当前位置，从而有效减少服务周期，同时配置打印输出模块让服务数据及时输出，以保障电力营销计量服务有效实施<sup>[5]</sup>。

## 三、移动作业终端在电力营销业务场景中的问题

### （一）资金投入不足

开展电力营销信息化布局之际，增加软硬件方面投入可促进信息化建设与管理水平提高，然而现实存在明显问题，多数供电企业对信息化建设投入的主动性不足，建设实施时资金资源投入不够，使得管理方式跟不上电力营销建设的节奏，不利于营销工作正常推进<sup>[6]</sup>。

### （二）管理制度缺失

部分电力供应方在实施管控时，跟不上时代发展，也没结合企业发展阶段对管理制度做调整升级，难以达成预期管理成效，一旦出现这种状况，供电企业社会评价会受负面影响，终端用户电力服务满意度显著降低，由于供电企业未及时约束用户用电，会有用户非法用电的问题，进而影响供电企业经济效益增长<sup>[7]</sup>。

### （三）信息化建设有待提升

相较于过去的电力营销模式，电力营销信息化突出的是信息处理的标准化和统一性特点，电力企业在推进信息化建设的前期，常常存在结构不健全、与需求契合度不高的问题，这不利于营销管理体制的改革推进，和信息化建设标准不相符，使得电力营销信息化实施效果不理想，随着信息技术的快速更新，既定业务流程日益繁杂，业务信息处理时间长，数据互通存在时间差，这些问题影响了企业的决策效能<sup>[8]</sup>。

## 四、移动作业终端在电力营销业务场景中的运用策略

### （一）在用电检查中的运用

在电力营销的范畴内，用电检查作为基础业务，支撑着电力营销体系，它着重开展定期检查管理、专项检查管理以及用电违约处理等工作，用电检查业务依靠移动作业终端开展，电力人员做检查作业时，要按要求认真填好用电检查工作单，作业人员在实施多样用电客户分类操作时，要按照现场实际需求开展，填好工作表格。实地巡检作业，依据用户类型划分依据自主调派工单，完整收集用户档案关键数据和其他辅助资料，工作人员根据实际状况在手持终端准确填写相关内容，开展现场用电标准化查验，结合检查业务现实所需，该工具能够自动确定检测项目、操作规范和人员资质标准，自动编写相关现场作业手册，为现场作业人员提供必要工作引导，做好首手证据留存<sup>[9]</sup>。电力系统员工开展营销业务时，若发现用户用电异常，要借助移动作业终端，针对异常情况快速进行拍照、录像等证据采集，把核查收集的证据



依托移动终端及时回传营销系统，按时完成电费回收，若用电客户存在违约举动，检查人员实地核查时，需依据实际状况，采用电费差额追补或电量补记等方式，估算电费追补额度，制作对应的用电检查证明，工作人员正处于工作人员可利用移动终端设备进行现场信息采集和管理，电力营销专员现场巡检时需携带打印工具，当对用户用电装置等要素检查出违规情况，就用移动作业终端生成电检单据并现场打印用电检查通知单<sup>[10]</sup>。

### （二）在电力营销计量中的运用

电力营销人员开展装表接电工作，可依靠终端设备定位导航功能精确找到用户装表位置，与管理系统实时互动，查阅用户信息并填报数据，为后续服务维护提供支撑，电表安装完毕，用移动设备扫描条形码汇总新装电表资产数量，再对系统表计参数进行二次比对。通过移动作业终端，工作人员扫描起止码来自动采集信息，统计箱内用电量，作业班组利用终端影像采集功能与工具，准确识别计量设备条形码安装地点，完整采集新旧表计的起止数据和拆装情况，便于后续资料的归档操作，该终端配备无线传输模块，能极大提高计量人员的工作水平，它和营销系统完成数据对接，在开展现场计量装置安装、配表等业务时，能让工作效率和操作精准度双双提升，测量人员还能重新录入数据，防止编码出错，为数据高效运用提供有力保障<sup>[11]</sup>。

### （三）在营销稽查业务中的运用

在电力营销稽查工作实施进程中，能够充分运用移动作业设备，让工作现场达成营销系统的安全登录，开展营销稽查业务前，业务人员凭借营销系统制定具体的稽查计划，及时录入系统后台，不必进行纸质打印，到了现场操作阶段，现场作业人员借助移动终端开展表单填写、资料调阅和扫描采集等工作。采取这

种方式能够有效促进作业流程持续运作，缓解员工在文档归档环节的工作压力，实施稽查工作的一线人员，经常会遇到信息缺失的情形，诸如用户信息不完备、作业要求不清晰等，基于纸质记录的稽查模式存在天然的局限，工作人员开展稽查时受工作边界的约束，导致监管范围比较狭窄、应变能力较弱。依靠便携作业终端，工作人员能高效地处理问题，现场人员依据现场动态信息和标准作业指引，可快速做出专业的判断，现场稽查发现的问题，整改各阶段的情况会被工作人员如实记载，实现超期整改的实时控制，最终实现整改事项的闭环管理，以这种形式为依托，实地作业人员能逐步扩大稽查实施范围，对于岗位操作期间潜在的难题，工作人员可采取相应的解决办法，提高工作的机动性，这么做会直接提高电力营销人员的稽查业务能力，让电力营销工作的效率和质量都有所提高<sup>[12]</sup>。

## 五、结束语

移动作业终端通过打破时空限制、贯通数据链条，显著提升了电力营销业务的响应速度与执行精度。其在用电检查中实现隐患即查即处，在计量服务中保障数据实时同步，在营销稽查中强化过程闭环管控，有效解决了传统人工模式下的效率瓶颈。然而，终端全面推广仍受限于资金投入不足、管理机制缺位及系统兼容性等现实约束。未来电力企业需以业务场景为核心，深化终端功能与营销流程的适配性开发，同步完善终端运维保障制度与数据安全标准，推动移动应用从工具替代向业务赋能转变。只有实现技术应用与管理创新的协同并进，方能释放移动作业终端在构建智能化电力营销生态中的核心价值。

## 参考文献

[1] 王登峰, 陈银江, 张军喜, 李夫海, 李学斌, 侯永宁. 电力移动作业终端逻辑信息自适应跟踪系统设计 [J]. 电子设计工程, 2023, 31(24): 109-112+117.

[2] 邓建峰, 肖焯, 黄宝鑫, 张丽娟, 胡厚鹏. 面向智能电网移动终端的轻量级认证方案 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2023, 35(06): 1087-1097.

[3] 任建峰, 郝婉茹, 刘庆. 电力物资合同云结算平台的构建技术研究 [J]. 中国物流与采购, 2023, (23): 45-46.

[4] 常苏芬. 继电保护移动运维平台的设计与应用 [J]. 今日制造与升级, 2023, (11): 179-181.

[5] 翟梅宏. 基于数据融合的电力营销决策方案研究 [J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 251-253+264.

[6] 赵金. 基于云计算的电力调度控制系统关键技术浅析 [J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 206-208.

[7] 花雷. 移动终端技术在电力营销计量中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(11): 370-371.

[8] 沈哲, 王祎萌. 基于移动终端的电力安全监控系统设计 [J]. 网络安全和信息化, 2023, (11): 44-47.

[9] 陈璐, 张涛, 黄桂容, 陈洋荣, 李俊娥. 电力移动终端安全状态评估指标体系及方法 [J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(09): 1-7.

[10] 任建峰, 郝婉茹, 刘庆. 基于智能移动终端的电力物资合同结算平台 [J]. 数字技术与应用, 2023, 41(09): 162-164.

[11] 潘国超. 移动终端技术在电力营销计量中的应用 [J]. 电气技术与经济, 2023, (07): 202-205.

[12] 雷雨, 刘喆, 周宇晴, 欧林, 张明媚, 欧睿. 面向智能电网的移动终端可信网络通信方案 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2023, 69(05): 636-644.

