

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6期 2024年8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。



材料工程 | MATERIALS ENGINEERING

- 001 钴磷双掺杂硫化镍纳米片高效析氢催化 刘晨阳, 毕宇聪
High-efficiency Electrocatalysis for Hydrogen Evolution Using Cobalt-
Phosphorus Double-Doped Nickel Sulfide Nanosheets Liu Chenyang, Bi Yucong
- 004 煤气化渣基吸附材料研究进展 邓琦
Research Progress on Coal Gasification Slag Based Adsorbent Materials Deng Qi
- 007 钛合金钻杆: 从组织性能到加工工艺的综合研究 杨柳, 李成
Titanium Alloy Drill Pipes: A Comprehensive Study From Microstructure
and Properties To Processing Technology Yang Liu, Li Cheng

建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- 010 市政道路工程水泥稳定碎石基层施工技术实践研究 戴萍
Research on Construction Technology Practice of Cement Stabilized
Crushed Stone Base in Municipal Road Engineering Dai Ping
- 013 半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰沥青混凝土相结合的应用
祖源博, 江其昕, 范耘赫, 代明鑫, 于淼
Application of Semi-Flexible Large Pore Anti-Rutting Asphalt Concrete
Combined with Anti-Freezing Asphalt Concrete
Zu Yuanbo, Jiang Qixin, Fan Yunhe, Dai Mingxin, Yu Miao
- 017 国土工程方向在生态修复工程的困境与优化路径探究 贾立东
The Dilemma and Optimization Path of Ecological Restoration Project in the
Direction of Land Engineering Jia Lidong
- 020 高速公路改扩建工程交通安全管理策略研究 李珠君
Research on Traffic Safety Management Strategy of Expressway
Reconstruction and Expansion Project Li Zhujun
- 023 市政桥梁预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术 肖才华
Construction Technology of Suspended Basket for Pre stressed Cast
in place Box Beam of Municipal Bridges Xiao Caihua
- 026 智慧工地系统在建设项目中的应用 杨索
Application of Smart Site System in Construction Projects Yang Suo
- 030 工程造价审计在建设项目中的关键作用与实施策略 张获
The Key Role and Implementation Strategy of Engineering Cost Audit
in Construction Projects Zhang Huo
- 033 新型装配式施工围挡在江苏公路工程建设中的应用 张杰
The Application of New Prefabricated Construction Site Enclosures
in Jiangsu Highway Engineering Construction Zhang Jie
- 037 建筑工程施工中的防水防渗施工技术现状分析 丁永超
Analysis of Waterproofing and Impermeability Construction Technology
in Construction of Building Engineering Ding Yongchao
- 041 建筑工程施工中混凝土裂缝及防治措施 吴项
Concrete Cracks and Prevention Measures in Construction Engineering Wu Xiang

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

046	花瓶型斜拉桥塔梁固结主塔 π 型下横梁施工支撑体系研究与应用 Research and Application of Construction Support System for Tower Beam Consolidation of Main Tower π -type lower Beam of Vase Cable-Stayed Bridge	曹景伟, 李浩铭, 黄星亚 Cao Jingwei, Li Haoming, Huang Xingya
050	大型模块化项目吊装一体化实施因素分析 Analysis of Implementation Factors for Integrated Hoisting in Large-scale Modular Projects	何斌斌, 焦艳莹, 郭少林 He Binbin, Jiao Yanying, Guo Shaolin
053	汽爆饲草料加工生产中的工艺参数优化与质量控制 Process Parameter Optimization and Quality Control in the Processing and Production of Explosive Feed	贾涛 Jia Tao
056	船舶结构设计中提高疲劳寿命的维护策略 Maintenance Strategies for Improving Fatigue Life in Ship Structure Design	李露露, 庞卫芳 Li Lulu, Pang Weifang

电气工程 | ELECTRICAL ENGINEERING

059	PLC 技术在电气工程及其自动化控制中的应用探讨 Application of PLC Technology in Electrical Engineering and Its Automatic Control	唐永泉 Tang Yongquan
062	智能变电站二次系统集成技术与可靠性分析 Integration Technology and Reliability Analysis of Secondary System in Intelligent Substation	陈东 Chen Dong
065	基于可靠性的电气设备全生命周期维护策略在电力工程中的应用 Application of Whole-life Cycle Maintenance Strategy of Electrical Equipment in Power Engineering	陈向东 Chen Xiangdong
068	基于复合改性提升介电弹性体驱动性能的研究进展 Research Progress on Improving the Driving Performance of Dielectric Elastomers Based on Composite Modification	丁国通, 吕祥鸿 Ding Guotong, Lv Xianghong
071	电气火灾预防措施与消防技术改进策略分析 Analysis of Preventive Measures of Electrical Fire and Improvement Strategies of Fire Fighting Technology	吕东旭 Lv Dongxu
074	电气工程及其自动化无功补偿技术的应用研究 Application Research of Electrical Engineering and Its Automatic Reactive Power Compensation Technology	唐永泉 Tang Yongquan
077	浅谈质子医院机电施工 BIM 解决方案及技术措施 A Brief Discussion on BIM Solutions and Technical Measures for Mechanical and Electrical Construction in Proton Therapy Hospitals	张曾水, 陈豪, 卢亮, 张昌波, 邹发涛 Zhang Zengshui, Chen Hao, Lu Liang, Zhang Changbo, Zou Fatao

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

080	物联网技术在仓储物流中的运用研究 Research on the application of Internet of Things Technology in Warehousing and logistics	安慧燕 An Huiyan
083	地质测绘新技术在矿产资源勘查中的应用 The Application of New Geological Surveying and Mapping Technologies in Mineral Resources Exploration	范攀, 董焰锋, 李旭 Fan Pan, Dong Yanfeng, Li Xu
086	犀牛软件在水尺及船名标记放样中的应用技巧 Rhinoceros Software in the Water Gauge and Ship Name Mark Lofting Application Skills	刘剑 Liu Jian
090	森林火灾无人机协同监测与精准扑救技术研发 Research and development of collaborative monitoring and precision fire fighting technology for forest fires by UAVs	秦艳 Qin Yan
093	海洋工程装备项目建造阶段数字化管理实践 Digital Management Practices in the Construction Phase of Marine Engineering Equipment Projects	于琦, 吴涛, 宋亚楠, 姜晗, 申勃, 张瑞 Yu Qi, Wu Tao, Song Yanan, Jiang Han, Shen Qing, Zhang Rui
096	用于飞行品质分析的操纵差错分析技术及应用 Analysis Technique and Application of Maneuvering Errors for Flight Quality Evaluation	张雨乐, 庄夏, 王泽潭, 孙晓雨 Zhang Yule, Zhuang Xia, Wang Zetan, Sun Xiaoyu

钴磷双掺杂硫化镍纳米片高效析氢电催化

刘晨阳, 毕宇聪 *

西安石油大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065

摘要 : 氢能作为一种清洁能源, 具有巨大的发展潜力。目前较为成熟的化石燃料制氢由于其成本太高, 且有碳杂质排放, 被认为不是理想的制氢方式。碱性电解水制氢是目前具有发展前景的绿色制氢方式之一, 但是碱性电解水制氢的成本较高。由此亟待设计开发高效且低成本的碱性电解水制氢电极催化材料。本文通过一步水热法以及高温磷化, 对过渡金属硫化物电催化析氢材料进行性能的优化。通过物理表征、电化学测试以及理论模拟计算对 P-Co-Ni₃S₂/NF 进行碱性电解水析氢性能的研究, 并通过改变材料制备时水热反应物质量来分析碱性电解水析氢材料最佳的反应条件。研究发现, 钴和磷双掺杂的 P-Co-Ni₃S₂/NF 具有与 Ni₃S₂/NF 相似的蜘蛛网状纳米片结构, 为电解水析氢提供大量的离子传输通道以及反应活性位点。采用标准的三电极体系, 对所制备的电催化材料进行电化学性能发现, P-Co-Ni₃S₂/NF 拥有比 Ni₃S₂/NF 以及单金属掺杂的电催化材料更优异的电化学性能, 通过理论模拟计算与电化学实验的结合共同探究了非金属与过渡金属共掺的 P-Co-Ni₃S₂/NF 电解水析氢的路径与机理, 为碱性电解水析氢材料以及电解槽的发展提供一定的理论及实验支持。

关键词 : 电解水析氢; 泡沫镍; 密度泛函理论; 掺杂策略; 过渡金属硫化物

High-efficiency Electrocatalysis for Hydrogen Evolution Using Cobalt-Phosphorus Double-Doped Nickel Sulfide Nanosheets

Liu Chenyang, Bi Yucong *

School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract: Hydrogen energy, as a clean energy source, has huge development potential. At present, the relatively mature hydrogen production from fossil fuels is not considered an ideal method due to its high cost and the emission of carbon impurities. Alkaline electrolysis of water for hydrogen production is one of the promising green hydrogen production methods at present, but the cost of alkaline electrolysis of water for hydrogen production is relatively high. Therefore, it is urgent to design and develop efficient and low-cost catalytic materials for alkaline electrolytic water hydrogen production electrodes. In this paper, the performance of transition metal sulfide electrocatalytic hydrogen evolution materials is optimized through one-step hydrothermal method and high-temperature phosphating. The hydrogen evolution performance of P-Co-Ni₃S₂/NF in alkaline electrolytic water was studied through physical characterization, electrochemical tests and theoretical simulation calculations. The optimal reaction conditions of the alkaline electrolytic water hydrogen evolution material were analyzed by changing the mass of hydrothermal reactants during material preparation. The research found that the cobalt and phosphorus dual-doped P-Co-Ni₃S₂/NF has a spider-web-like nanosheet structure similar to Ni₃S₂/NF, providing a large number of ion transport channels and reactive sites for hydrogen evolution in electrolyzed water. The electrochemical performance of the prepared electrocatalytic materials was investigated using the standard three-electrode system. It was found that P-Co-Ni₃S₂/NF has more excellent electrochemical performance than Ni₃S₂/NF and single-metal-doped electrocatalytic materials. Through the combination of theoretical simulation calculations and electrochemical experiments, the path and mechanism of hydrogen evolution in water electrolysis using P-Co-Ni₃S₂/NF co-doped with non-metals and transition metals were jointly explored, providing certain theoretical and experimental support for the development of hydrogen evolution materials and electrolytic cells in alkaline water electrolysis.

Keywords: hydrogen evolution from electrolytic water; nickel foam; density functional theory; doping strategy; transition metal sulfide

作者简介: 刘晨阳 (1998.08-), 男, 汉族, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事碱性电解水析氢电极催化材料的制备及析氢性能的研究;

通讯作者: 毕宇聪 (1999.10-), 男, 汉族, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事油田管道腐蚀与防护方面的研究, 邮箱: 1633776825@qq.com

引言

氢能作为清洁能源,其燃烧热值可以达到与汽油、煤炭等化石燃料相当的值,甚至比传统化石燃料的热值还要高数倍,氢气之所以被称之为清洁能源最重要的就是其燃烧产物仅仅只有水,是一种亲和环境的气体^[1]。过渡金属磷化物作为电解水析氢的催化材料,表面通常具有丰富活性位点,能够为析氢反应提供更多的反应活性位点。过渡金属磷化物的加工性较强,能够通过高温磷化法、溶液法等多种合成方法制备成不同形态^[2-3]。本研究选择过渡金属钴和非金属磷作为掺杂元素,对 $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{NF}$ 材料进行改性,通过一步水热法合成了钴掺杂的 $\text{Co-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 材料,然后对样品进行了磷化处理,以获得最终的电极催化材料。该过程中,钴作为过渡金属的掺入能够增强材料的导电性,调节催化活性位点。

一、实验部分

对泡沫镍进行预处理。将处理好的泡沫镍置于 70 mg 硫酸钴与 30 mL 的去离子水中,并添加 80 mg 的硫酸镍以及 20 mg 硫代乙酰胺,将混合溶液转移至高压反应釜中,160 °C 下高温加热 4 h。将过渡金属钴掺杂后的泡沫镍置于 30 mg 次亚磷酸钠与 30 mL 的去离子水中 1 h,随后将其置于方舟上放入马弗炉中进行高温热处理,以 2 °C/min 的速率升温至 320 °C,保温 2 h。将制备的样品记为 $\text{P}_3\text{-Co}_7\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$,保持硫酸镍及硫代乙酰胺的质量不变,改变硫酸钴及次亚磷酸钠的质量,制备出 $\text{P}_5\text{-Co}_5\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 、 $\text{P}_8\text{-Co}_2\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 、 $\text{P}_2\text{-Co}_8\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 以及 $\text{P}_7\text{-Co}_3\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 等。

二、结果与讨论

根据图 1 可知,在 44.9 °、53.1 ° 以及 76.8 ° 处出现了三个 Ni 的强衍射峰,与立方晶体 Ni (JCPDS No.01-1258) 标准衍射峰很好匹配^[4-5]。 $\text{P-Co-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 在 22.8 °、31.1 ° 以及 48.3 ° 处的衍射峰分别对应 Ni_3S_2 (JCPDS No.44-1418) 的标准衍射峰 (101), (110) 以及 (113)^[6]。

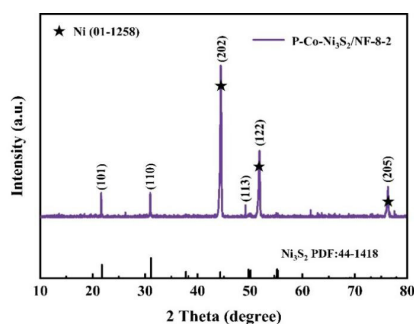


图 1 $\text{P-Co-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 的 XRD 图谱

如图 2(a) 所示, S 2p 可被分峰为 160.98 eV 和 164.22 eV 处的两个自旋轨道峰 (S 2p_{1/2} 和 S 2p_{3/2})。图 2(b) 所示, 在 873.15 eV 及 854.89 eV 处显示了两个自旋轨道峰 (Ni 2p_{1/2} 和 Ni 2p_{3/2}) , 均为 Ni_3S_2 中镍的衍射峰。此外, 在 878.21 eV 和 860.74 eV 处显示的是 $\text{P}_3\text{-Co}_7\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 两个自旋轨道对应的卫星峰^[7]。如图 2(c) 所示, $\text{P}_3\text{-Co}_7\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 中 Co 2p 被分峰为 795.97 eV 和 778.25 eV 处的两个自旋轨道峰 (Co 2p_{1/2} 和 Co 2p_{3/2})。如图 2(d) 所示, P 2p 的峰位于 129.34 eV 和 131.01

eV, 对应于 P 2p_{3/2} 和 P 2p_{1/2} 两个自旋轨道峰, 其中 133.64 eV 出的峰归因于 P 表面的氧化物^[8]。

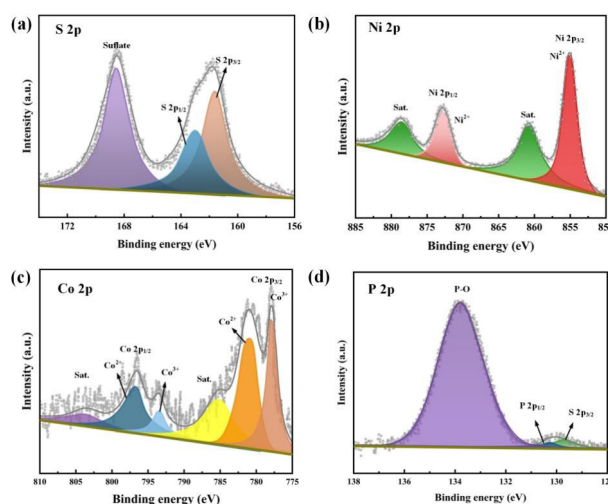


图 2 $\text{P-Co-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF}$ 的 (a) S 2p, (b) Ni 2p, (c) Co 2p 及 (d) P 2p 精细谱

如图 3(a)~(d) SEM 图像所示, $\text{P-Co-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 在 100 μm 、5 μm 以及 500 nm 的下可观察出其呈现出相互连接的蜘蛛网状纳米片结构。如图 3(e) 所示, 间距为 0.163 nm 和 0.281 nm 的晶格条纹与 Ni_3S_2 标准的 (104) 和 (110) 晶面所对应的晶格间距匹配良好^[9]。如图 3(f), 通过 Ni_3S_2 的选取电子衍射 (SAED) 可以得出, 衍射环对应于 Ni_3S_2 (110), (003), (113) 及 (223) 晶面的晶格间距^[10]。通过图 3(g) 以及 XRD 证明在泡沫镍表面上合成了 Ni_3S_2 。

图 4(a) 为 $\text{P}_3\text{-Co}_7\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 、 $\text{P}_2\text{-Co}_8\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 、 $\text{P}_4\text{-Co}_6\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 以及 $\text{P}_5\text{-Co}_5\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 的 LSV 曲线, 由 10 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以及 100 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 电流密度时的过电位可知, $\text{P}_3\text{-Co}_7\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 在所有过渡金属钴以及非金属 P 掺杂的 $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 样品中有最好的电化学性能。图 4(b) 四个样品 Tafel 斜率分别为 104 $\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$ 、118 $\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$ 、122 $\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$ 以及 129 $\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$, $\text{P}_3\text{-Co}_7\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 是析氢动力学最快的。如图 4(c) 所示, 四个样品的阻抗为 1.85 Ω 、2.14 Ω 、2.22 Ω 以及 2.63 Ω 。证明 $\text{P}_3\text{-Co}_7\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 拥有样品中最强的导电性。通过对图 4(d) 的分析可以得知, 四个样品的双层电容值分别为 16.01 $\text{mF} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、15.22 $\text{mF} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、14.58 $\text{mF} \cdot \text{cm}^{-2}$ 及 12.81 $\text{mF} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。证明 $\text{P}_3\text{-Co}_7\text{-Ni}_3\text{S}_2/\text{NF-8-2}$ 有最大的活性面积。

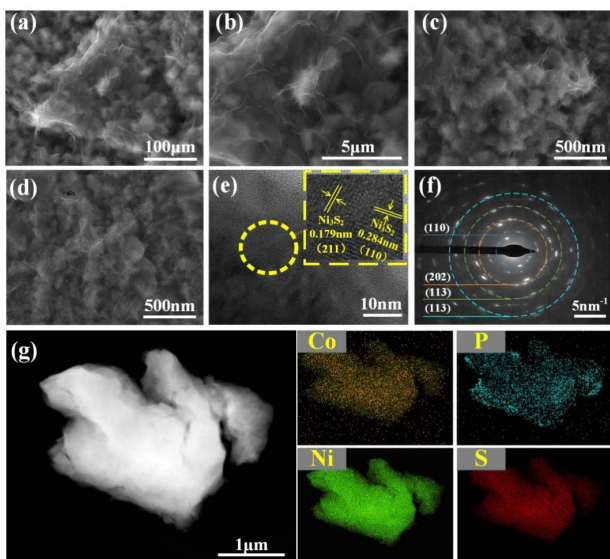


图3 P-Co-Ni₃S₂/NF(a-d) SEM图, (e-f) HRTEM图, (g) EDS扫描图及元素映射图

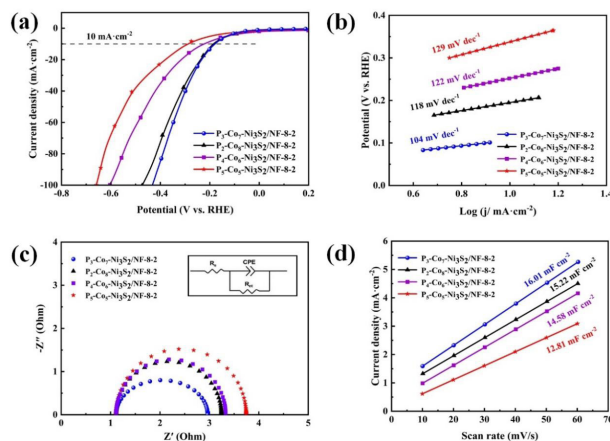


图4 不同反应物质量制备的P-Co-Ni₃S₂/NF (a) 在5 mV/s 扫描速率下的极化曲线, (b) 塔菲尔斜率, (c) 交流阻抗及 (d) 双层电容值, 均在1.0 M KOH 水溶液中

将P₃-Co₇-Ni₃S₂/NF-8-2在三电极体系中进行长达100 h的稳定性测试, 并测量材料在100 h前后的LSV曲线。从图5可观察到, P₃-Co₇-Ni₃S₂/NF-8-2具有非常好的稳定性, 反应前后的LSV曲线重合度较高, 并且在100 h内的电流没有明显波动。

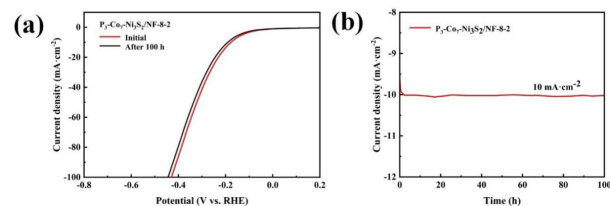


图5 P₃-Co₇-Ni₃S₂/NF-8-2 (a) 100h 测试前后的LSV曲线, (b) i-t曲线

如图6 得出了P-Co-Ni₃S₂的态密度图以及吸附氢离子前后的P-Co-Ni₃S₂的总能量, 通过公式计算得出P-Co-Ni₃S₂的 ΔG_{H^*} 值为-0.31 eV。两个材料中P₃-Co₇-Ni₃S₂/NF-8-2的HER过程最稳定。通过态密度图可以观察到, 在费米能级附近呈现出一定的金属性, 使得P₃-Co₇-Ni₃S₂/NF-8-2的导电性优于Ni₃S₂/NF-8-2。

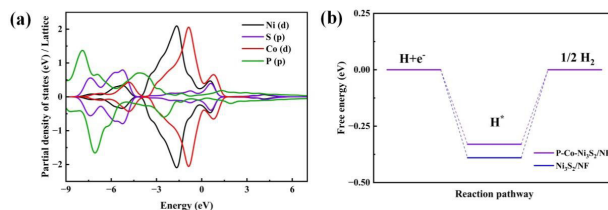


图6 (a) P-Co-Ni₃S₂的态密度图, (b) P-Co-Ni₃S₂和Ni₃S₂在HER的吉布斯自由能图

三、结论

通过水热法及磷化热处理所制备出的P₃-Co₇-Ni₃S₂/NF-8-2具有与Ni₃S₂/NF-8-2相似的蜘蛛网状纳米片结构, 并且制备的材料均匀地生长在NF的表面。通过物理表征信息可以证明在NF表面成功制备出具有Co和P共掺的Ni₃S₂纳米片, P₃-Co₇-Ni₃S₂/NF-8-2电极催化材料表现出了最优异的电化学性能。在1 M KOH中需要182 mV和440 mV的低电位就可达到10 mA·cm⁻²和100 mA·cm⁻²的电流密度, 并且有着104 mV·dec⁻¹的低Tafel斜率。该电极催化材料在析氢反应过程中有最低的1.85 Ω的阻抗值, 是所有材料当中电子传输速率最快的。采用DFT计算出了P₃-Co₇-Ni₃S₂/NF-8-2的态密度图以及氢吸附自由能, 在负方向上P₃-Co₇-Ni₃S₂/NF-8-2更接近于零, 证明P和Co掺杂后的材料在HER过程中能够拥有更好的稳定性。

参考文献

- [1]Wu Y, Jiao C, Wang F, et al. High electrocatalytic oxygen evolution reaction and hydrogen evolution reaction of N-doped Co@CN materials derived from two cobalt-based metal-organic frameworks (MOFs)[J]. Journal of Molecular Structure, 2024, 1316(15): 138945.
- [2]潘致宇. 过渡金属基催化析氢材料的研究进展[J]. 当代化工研究, 2019(2): 143-144.
- [3]Ganesan P, Sivanantham A, Shanmugam S. Inexpensive electrochemical synthesis of nickel iron sulphides on nickel foam: super active and ultra-durable electrocatalysts for alkaline electrolyte membrane water electrolysis[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(42): 16394-16402.
- [4]周宏春. 氢在碳中和背景下燃料构成中将占多大比例[J]. 中国商界, 2021, (7): 36-37.
- [5]Li S, Li E, An X, et al. Transition metal-based catalysts for electrochemical water splitting at high current density: Current status and perspectives[J]. Nanoscale, 2021, 13(30): 12788-12817.
- [6]冀国超, 赵笑飞. 过渡金属磷化物在电解水制氢方向的研究进展[J]. 化工管理, 2018, (33): 69-71.
- [7]Zhu X, Yao X, Lang X, et al. Charge self-regulation of metallic heterostructure Ni₂P@Co₉S₈ for alkaline water electrolysis with ultralow overpotential at large current density[J]. Advanced Science, 2023, 10(33): 2303682.
- [8]Zhao L, Guo Z, Liu Z. Facile synthesis and efficient electrochemical water splitting of bifunctional nanostructured Ni-based layered double hydroxide/sulfide composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 910(25): 164880.
- [9]Hu M, Qian Y, Yu S, et al. Amorphous MoS₂ decorated Ni₃S₂ with a core-shell structure of urchin-like on nickel-foam efficient hydrogen evolution in acidic and alkaline media[J]. Small, 2023, 20(5): 2305948.
- [10]Bao Y, Wu Z, Liu B, et al. Fe-doped Ni₃S₂ nanosheets on Ni foam for alkaline seawater oxidation[J]. ACS Applied Nano Materials, 2023, 6(6): 4360-4369.

煤气化渣基吸附材料研究进展

邓琦

西安工程大学城市规划与市政工程学院, 陕西 西安 710048

摘要： 煤气化渣 (CGS) 是煤气化过程产生的固体废弃物，年排放量超6000万吨，根据灰渣排放方式和粒度，煤气化渣可分为细渣和粗渣。其堆存易引发大气污染，威胁土壤及水体生态风险，亟需资源化利用。CGS 主要成分为硅铝酸盐，具有丰富的孔隙结构和表面活性位点，是一种潜在的吸附材料。本文系统综述煤气化渣的理化特性及其在吸附领域的研究进展，并探讨未来发展方向。

关键词： 煤气化渣；吸附材料；资源化利用

Research Progress on Coal Gasification Slag Based Adsorbent Materials

Deng Qi

School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048

Abstract: Coal gasification slag (CGS) is a solid waste generated during the coal gasification process, with an annual emission of over 60 million tons. According to the ash discharge method and particle size, CGS can be divided into fine slag and coarse slag. Its storage can easily cause air pollution, threaten soil and water ecological risks, and urgently require resource utilization. The main component of CGS is aluminosilicate, which has rich pore structure and surface active sites, making it a potential adsorbent material. This article provides a systematic review of the physicochemical properties of coal gasification slag and its research progress in the field of adsorption, and explores future development directions.

Keywords: coal gasification slag; adsorbent material; resource utilization

引言

煤炭气化工工艺作为实现煤炭资源清洁转化与高效利用的核心技术路径，已深度融入现代煤化工产业体系。气化过程中同时会产生大量的煤气化渣（CGS），其主要成分为非晶态铝硅酸盐，并夹杂着石英、方解石等晶相。根据统计数据，每年全国煤气化过程中产生的渣滓总量可达数8000万吨。这些废弃物的大规模堆积不仅占用大量土地资源，还可能对土壤、水体及大气环境构成潜在威胁。鉴于此，研究 CGS 的有效处理方法已成为当务之急。CGS 中含有多种有价值的元素和化合物，如金属、稀土元素、矿物质等。通过合理的处理和提取技术，可以将这些有价值的成分回收利用，实现 CGS 的资源化处理。基于煤气化渣的高比表面积特性与多级孔道结构优势，其在吸附领域展现出重要的固废资源化应用价值，特别是在实现双碳战略目标背景下具有显著的环境经济效益。

一、煤气化渣的基本性质

煤气化渣可分为粗渣和细渣两种。粗渣主要通过气化炉出口排放，占60%至80%。细渣主要来自合成气除尘设备，占总量的20–40%。其灰分主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Fe_2O_3 构成^[1]，通常 SiO_2 含量最高，其次是 Al_2O_3 。赵永彬等^[2]发现宁煤集团采用的三种不同煤气化技术生成的粗渣的主要化学成分包括 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 C 、 SiO_2 和 CaO 。宋瑞领等^[3]研究了陕西煤在多喷嘴对置式水煤浆气化炉中生成的粗渣和细渣，发现 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO 的总含量均超过85%。CGS 中多孔碳质颗粒多为不定型，无机颗粒多为球形或不规则形状，这些球形颗粒的主要矿物成分是硅和铝元素。

二、煤气化渣的应用

（一）建工建材方面的应用

煤气化渣主要用作建材原料，包括水泥掺料、混凝土辅料、砌块基材及路基填料等。谢海巍等^[4]研究了掺入不同比例粉煤灰和煤气化渣的水泥胶砂试件在各龄期的力学强度，发现粗渣可替代5%质量分数的水泥作为矿物掺合料，而细渣不适合直接用作矿物掺合料。吕生华等^[5]研究发现，含60%煤化工固废的混凝土28 d 抗压强度超过40 MPa，而含80%固废的混凝土28 d 抗压强度超过30 MPa，且两者均表现出优异的抗渗水性和抗干缩性能。武立波等人^[6]系统研究了煤气化粗渣作为改良材料对季节性冻土区黄土力学性能的影响；采用15%质量分数的粗渣掺量进行配比

试验,通过监测冻胀变形与融沉特性等关键指标发现:经过5次完整的冻融交替作用后,试样表现出0.38 %的平均冻胀变形率和0.17 %的特征融沉系数,有效调控土体在冻融作用初期的体积稳定性。

然而,煤气化渣的建筑应用仍主要限于实验室研究。未来需加强基础研究,优化处理工艺,建立技术标准,提升工程适用性。

（二）农业方面的应用

根据煤气化渣的特性,它对改善土壤的物理和化学性质以及保存有机肥料有重大影响。冷峥^[7]采用化学浸渍法对KOH活化处理的煤气化残渣进行改性,通过FeCl₃溶液负载铁元素制备Fe⁺CGFS复合材料,该材料可有效固定土壤中的镉、砷污染物,同时实现工业固体废弃物的资源化利用。煤气化渣作为土壤改良剂可显著提升作物产量,同时改善土壤理化性质并促进养分循环,实现农业增产与固废资源化的双重效益。研究表明,将煤气化渣与沙质土壤混合有利于沙三叶草的生长。

（三）吸附方面的应用

基于其独特的物理化学特性,如较高的比表面积、丰富的多孔结构及残留碳组分,气化渣在环境污染治理领域展现出显著的吸附性能,尤其适用于废气净化等应用场景。元宁等^[8]以煤气化细渣为碳源,通过最佳制备工艺获得活性炭,并将其应用于CO₂吸附,298 K下的CO₂吸附量为20.63 cm³/g,计算15/85的CO₂/N₂混合气体的吸附选择性为38.5。

煤气化渣经改性处理后形成的吸附材料对水体中的磷酸根离子及氨氮具有显著的去除效能。涂亚楠等^[9]采用碱融水热法制备的复合多孔材料是以P型沸石为主要晶相的沸石结构。实验结果表明,在初始NH₄⁺浓度为100 mg/L、吸附反应持续5 h的条件下,该材料对NH₄⁺的饱和吸附容量可达15.65 mg/g。

煤气化渣对废水中的重金属离子有良好的去除能力,Wagner等人^[10]发现,残碳具有较大的比表面积和微孔。经过进一步加工,生产出了活性炭/沸石复合材料,对水溶液中的亚甲基蓝和Cr³⁺重金属都有很好的吸附能力。

由煤气化渣制成的吸附材料也能有效去除废水中的染料污染物。于希豪等^[11]对煤气化渣进行酸、碱改性,考察了其对水中亚甲基蓝(MB)的吸附性能。结果表明,酸活化后增大了CGFS的孔尺寸,碱活化后使CGFS产生了更多微孔,对MB的吸附性能明显提高,最高可达159.92 mg/g。

三、煤气化渣基吸附材料

（一）介孔二氧化硅材料

煤气化固体残渣中富含多种金属元素,需经预处理方可获得高纯度二氧化硅。刘硕^[12]的研究表明,经脱碳及酸浸工艺处理后的气化灰可形成具有介孔特性的二氧化硅微球。实验数据显示,

当采用16%浓度的盐酸溶液时,所制备的介孔二氧化硅材料展现出优异的孔隙特性,其比表面积达到364m²/g,孔容为0.34cm³/g。何绪文等^[13]针对气化炉渣中重金属的提取,系统比较了硫酸硝酸盐法、水平振荡法及醋酸缓冲液法的处理效果。实验结果表明,在这三种溶解方法中,醋酸缓冲液法对重金属的去除效率最为显著,展现出最优的污染物脱除性能。

（二）高分子复合材料

张久朋等^[14]以煤气化渣为原料,成功合成了一种具有除臭功能的固体材料(CGFS-F)。该除臭剂能有效吸附聚丙烯(PP)树脂上的挥发性有机化合物(VOCs),并能使聚丙烯树脂上的VOCs挥发量减少67.6%。张今壹^[15]将煤气化细渣制成多孔微珠(ATCM),与Ag@CM、聚丙烯(PP)混合制得了性能优异的抗静电聚合物基复合材料。实验数据显示,当ATCM添加量为20%质量分数时,所得ATCM@PP复合体系呈现4.93×10⁹Ω·cm的体积电阻率,同时保持29.03MPa的拉伸强度,展现优异的抗静电性能、导热系数及机械强度。

（三）沸石、活性炭及其复合材料

煤气化细渣含碳量高,孔隙结构发达,可利用活化和酸碱转化等方法生产性能优异的吸附材料。马东坡^[16]以硅铝含量高的CGFS制备A型沸石,改性前后A型沸石五次再生循环后,对甲基蓝、结晶紫、臧红T等染料吸附能力约为初始吸附量的80%。Miao等人^[17]采用KOH活化法制备了煤气化渣基活性炭,其比表面积高达1.187 m²/g,孔隙率为0.89 cm³/g,CO₂吸附能力为4.01 mmol/g。Shu等^[18]以CGFS为前驱体,成功制备了炭-沸石复合吸附材料(CZ-1.0)。该材料对亚甲基蓝(MB)表现出显著的吸附性能,100 mg/L MB溶液的吸附容量达到137.5 mg/g,同时具备优异的循环再生特性。

四、现存问题

当前煤气化渣基吸附材料的应用面临三大问题:(1)吸附容量有限,即便采用酸浸、胺基功能化等改性手段,其最佳CO₂吸附量仍不及商业金属有机框架材料,这主要归因于孔隙结构单一和活性位点密度低;(2)循环稳定性不佳,在高温再生时,部分材料由于孔道坍塌或功能基团流失导致性能下降,特别是某些改性沸石及钙基材料在多次循环或高温下出现显著的性能衰减;(3)原料成分波动大,煤气化渣的硅铝比和残碳含量等受多种因素影响,造成吸附剂性能不稳定,限制了大规模生产的可靠性。

五、结论与展望

综上所述,近年来煤气化渣作为吸附材料的研究与应用取得了显著进展,展现了其在减少环境污染和资源回收方面的巨大潜力。然而,实际应用中仍面临诸多挑战,如吸附容量有限、循环

稳定性不足及原料成分波动较大等问题。为解决这些问题，研究应聚焦于设计多级孔结构以提升扩散性能和增加吸附位点密度，开发环保的改性工艺以降低环境影响，并通过构建煤气化渣成分数据库和制定标准化预处理流程来促进工业化集成。未来，随着

这些策略的不断优化和完善，煤气化渣基吸附材料有望成为高效、稳定且环保的吸附剂，广泛应用于污染控制领域，为应对全球变暖 and 环境污染问题做出重要贡献。

参考文献

[1] 曲江山, 张建波, 孙志刚, 等. 煤气化渣综合利用研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26: 184–93.

[2] 赵永彬, 吴辉, 蔡晓亮, 等. 煤气化残渣的基本特性研究 [J]. 洁净煤技术, 2015, 21: 110–3+74.

[3] 宋瑞领, 李静, 付亮亮, 等. 多喷嘴对置式水煤浆气化炉炉渣特性研究 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24: 43–9.

[4] 谢海巍, 潘福元, 刘尊青, 等. 煤气化渣与粉煤灰影响其水泥胶凝硬化产物的强度机理 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2023, 43: 26–34.

[5] 吕生华, 李泽雄, 吴磊, 等. 煤气化固废粗渣的表面处理及其混凝土的制备与应用性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49: 4–10.

[6] 武立波, 杨嘉伟, 刘惠阳, 等. 煤气化粗渣改良季节冻土区黄土填料的冻融特性及其微观机理研究 [J]. 冰川冻土, 2024, 46: 930–43.

[7] 冷峥. 铁负载煤气化渣对土壤中镉、砷的稳定化效果研究 [D]. 中国环境科学研究院, 2024.DOI:10.27510/d.cnki.gzhky.2024.000042.

[8] 元宁, 李嘉, 张晋玲, 等. 煤气化灰渣制备活性炭及其 CO₂ 吸附分离研究 [J]. 洁净煤技术: 1–10.[2024–08–07].

[9] 涂亚楠, 胡雨杉, 刘旺, 等. 煤气化细渣水热合成多孔材料及对氨氮的吸附性能研究 [J]. 煤炭工程, 2024, 56: 205–12.

[10]Wagner N J, Matjie R H, Slaghuis J H, et al. Characterization of unburned carbon present in coarse gasification ash [J]. Fuel, 2007, 87(6): 683–91.

[11] 于希豪, 刘祺, 张杰, 等. 煤气化细渣简单制备吸附剂用于亚甲基蓝吸附及其回收燃烧性研究 [J]. 工业水处理: 1–15.

[12] 刘硕. 煤气化细渣制备介孔材料及净水剂研究 [D]. 吉林大学, 2019.

[13] 何绪文, 崔伟, 王春荣, 等. 气化炉渣的重金属浸出特性及化学形态分析 [J]. 化工环保, 2014, 34: 499–502.

[14] 张久朋. 气化细渣制备介孔材料及在 CO₂ 捕集与树脂补强、除味中的应用 [D]. 吉林大学, 2022.DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2022.000552.

[15] 张今壹. 煤气化渣基复合导电填料的制备及其在抗静电高分子材料中的应用 [D]. 吉林大学, 2022.DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2022.007556.

[16] 马东坡. 煤基固废制备 A 型沸石及其吸附性能的研究 [D]. 安徽理工大学, 2024.DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2024.000999.

[17]Zekai M, Zhenkun G, Guofeng Q, et al. Synthesis of activated carbon from high-ash coal gasification fine slag and their application to CO₂ capture [J]. Journal of CO₂ Utilization, 2021, 50.

[18]Shu R, Qiao Q, Guo F, et al. Controlled design of Na–P1 zeolite/porous carbon composites from coal gasification fine slag for high-performance adsorbent [J]. Environmental Research, 2023, 217: 114912.

钛合金钻杆：从组织性能到加工工艺的综合研究

杨柳, 李成 *

西安石油大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065

摘要： 复杂恶劣的钻井环境对未来的钻井工具提出了更高的要求 and 标准。与其他钻杆相比，钛合金钻杆具有比强度高、密度低、耐腐蚀、抗疲劳、非磁性等一系列特点，已成为非常规深井、深海等恶劣环境下油气钻井的首选材料。本文综述了钛合金钻杆的发展现状、显微组织、力学性能、耐腐蚀性、耐磨性能、抗疲劳性能，并对其热处理方式及加工工艺进行了概述。结合钛合金钻杆的应用和发展，对钛合金钻杆在深井、超深井等非常规钻井作业中的发展和应用前景进行了展望，为促进钛合金钻头在油田的应用和发展提供支持。

关键词： 恶劣环境；钻井工具；钛合金钻杆；耐蚀抗疲劳；热处理

Titanium Alloy Drill Pipes: A Comprehensive Study From Microstructure and Properties To Processing Technology

Yang Liu, Li Cheng *

School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract: The complex and harsh drilling environment poses higher requirements and standards for future drilling tools. Compared with other drill pipes, titanium alloy drill pipes have a series of characteristics such as high specific strength, low density, corrosion resistance, fatigue resistance and non-magnetism, and have become the preferred material for oil and gas drilling in unconventional deep Wells, deep seas and other harsh environments. This paper reviews the development status, microstructure, mechanical properties, corrosion resistance, wear resistance and fatigue resistance of titanium alloy drill pipes, and provides an overview of their heat treatment methods and processing techniques. Combined with the application and development of titanium alloy drill pipes, the development and application prospects of titanium alloy drill pipes in unconventional drilling operations such as deep Wells and ultra-deep Wells are prospected, providing support for promoting the application and development of titanium alloy drill bits in oil fields.

Keywords: harsh environment; drilling tools; titanium alloy drill pipe; corrosion resistant and fatigue resistant; heat treatment

引言

全球油气勘探开发向非常规、深层超深层及海洋领域拓展，国内塔里木、四川等盆地存在大量深井、超深井等复杂工况井，非常规油田高温、高压、腐蚀等极端环境导致石油管材频繁失效^[1]。钛合金钻杆因低密度、高比强度、耐腐蚀等特性，成为深井、深海作业理想选择，在高温强酸环境中安全系数达传统铬钢/镍基管柱3.5倍，虽存在硬度低、耐磨性差、成本高问题，但短半径水平井作业寿命较传统钻杆提升约10倍^[2,3]。钢钻杆虽因价低、适应性强被广泛应用，却难以满足特殊工艺井高强度与韧性需求。美国 Grant Prideco 与 RTI 能源系统公司研发的钛合金钻杆融合钢铁与复合材料优势，为行业提供新方向。

一、钛合金钻杆特性

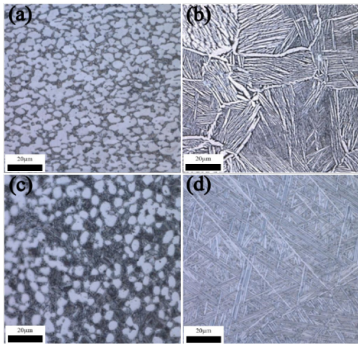
（一）钛合金的组织

钛合金通常包含 α 相和 β 相两种主要组织形式，其性能在很大程度上取决于这两种相的比例、形貌、分布特征以及尺寸大小^[4]。根据 α 相的含量和形态，等轴状、片层状、双态状与网篮状，这四种类型是 $\alpha + \beta$ 型双相钛合金的典型组织类型，如图1-1所示。组织与性能的一般关系如表1-1所示。

（二）密度与比强度

在20℃以下，钛合金钻杆的密度为4.506~4.516 g/cm³，较铝合金钻杆（2.70 g/cm³）更高，但低于铁、铜和镍合金管材。图1-2显示，钛合金在常温区间内具备最高的比强度。较高的比强度有助于石油钻采装备减重设计，并提升其运行安全性。表1-2列出了常用金属材料的性能对比数据。

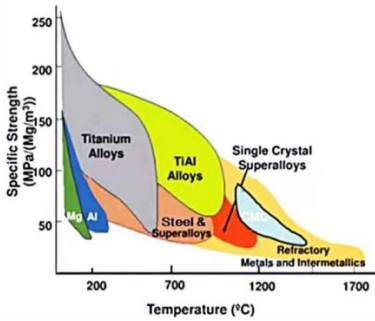
作者简介：杨柳（1999.04-），女，汉，籍贯：辽宁省沈阳市，学历：硕士研究生，研究方向：高强韧钻杆材料；
通讯作者：李成，男，汉，籍贯：陕西省商洛市，邮箱：licheng0224@qq.com



> 图 1-1 组织类型分类：（a）等轴状（b）片层状（c）双态状（d）网篮状

表 1-1 组织与性能的一般关系

性能	片层组织	网篮组织	双态组织	等轴组织
强度	高	较高	较高	稍低
塑性	低	良	好	优
冲击韧性	低	优	好	较好
断裂韧性	高	较好	较好	低
疲劳性能	低	较好	好	优
蠕变抗力	高	较好	较好	低



> 图 1-2 不同金属的温度 - 比强度关系

表 1-2 几种金属材料性能

材料类型	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /10 ⁴ MPa	密度/g·cm ⁻³	比强度/N·m ⁻¹ ·kg ⁻¹	比模量 /m
超硬铝合金	588	7.154	2.8	210	2.55
耐热铝合金	461	7.154	2.8	165	2.55
高强度镁合金	343	4.41	1.8	191	2.45
高强度钛合金	1646	11.76	4.5	366	2.61
高强度结构钢	1421	20.58	8.0	178	2.57

（三）耐腐蚀性能

钛在常温常压下展现出优异的耐腐蚀性能，其表面可迅速生成致密且稳定的 TiO₂ 氧化膜，具备良好的抗氧化性和自愈能力，能有效抑制氧在钛表面的扩散，防止进一步腐蚀^[5]。与镍基合金 028、825、728 相比，钛合金的耐蚀性更优，在 95% 屈服强度的载荷下不会发生应力腐蚀开裂。室温状态下，钛合金在 NaCl、H₂S 和 C₆H₅COOH 混合液中浸泡 90 小时未出现裂纹，说明对 HIC 会有较强的抗性。在 160 °C、总压为 30 MPa、H₂S 分压为 4 MPa、CO₂ 分压 4.5 MPa、Cl⁻ 的浓度为 1.2 × 10⁵ mg/L 的极端环境中，没有腐蚀发生，且盐雾腐蚀速率会有极大的降低。

（四）摩擦磨损性能

深井、超深井钻井中，钻杆面临复杂苛刻的摩擦磨损环境，极大考验钛合金钻杆耐磨性与使用寿命。Wu 等人^[6] 对比有耐磨带的钛合金钻杆和 S135 钢钻杆发现：两种材料硬度从耐磨带向内壁递减，S135 钻杆耐磨带平均显微硬度 610.75 HV、本体为 390.26 HV，而钛合金钻杆耐磨带平均显微硬度达 1271 HV，本体为 513 HV，S135 钻杆硬度约为钛合金钻杆一半；磨损试验数据显示，

S135 钻杆磨损量 0.167 g、磨损速率 0.042 g/h，钛合金钻杆磨损量 0.006 g、磨损率 0.006 g/h，相同条件下，S135 钢钻杆磨损率是钛合金钻杆的 6.7 倍。分析表明，钛合金耐磨带耐磨性优异，能有效保护基体，减少钻杆过度磨损。

（五）抗疲劳机理及性能

高频振动引发的高周疲劳失效是钛合金钻杆的失效模式之一，断口光滑平整，无明显塑性变形。疲劳裂纹发展分萌生与稳定扩展两阶段，其中萌生阶段占裂纹寿命大部分。钛合金中的等轴 α 相可有效抑制裂纹萌生，添加 Al 能改变临界剪切应力，促进 α 相滑移系统萌生，提升材料屈服强度与断裂韧性。层状次生 α 相在 β 相变结构中形成，当裂纹沿晶界 α 方向扩展时，层状结构使裂纹角度改变、数量增多、扩展路径扭曲，随着裂纹总长度和分叉增加，裂纹尖端应变场松弛，扩展速率降低。J.Smith^[7] 建模分析显示，循环应力在 30000~40000 psi 时，钛合金钻杆疲劳寿命达钢的 10 倍。

二、钛合金钻杆材料的热处理

热处理是改善钛合金组织与性能的重要方法，热处理改变金属组织与性能的核心是相变，加热及保温温度、加热及保温时间、冷却方式等都是影响相变的因素，目前钛合金最主要的热处理方式是退火、固溶和时效工艺^[8]。

（一）退火

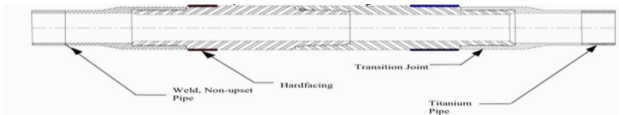
去应力退火、等温退火、完全退火、真空退火及双重退火是钛合金退火的主要方法。退火过程中，晶粒会发生回复与再结晶，显微组织的类型、比例和尺寸随之变化。冷变形加工引起晶格畸变并积累畸变能。在相变点以下进行热处理时，会形成点缺陷，通过位错移动释放畸变能量，从而缓解内应力。双重退火分两步进行：第一次加热温度高于再结晶结束温度，以促进充分再结晶，精确调控初生 α 相体积分数，避免晶粒异常长大；第二次加热温度低于再结晶温度，β 相会充分分解，组织更加平衡，表现出与时效强化相同的作用。

（二）固溶 + 时效处理

钛合金的固溶处理通过加热并保温后缓慢冷却，促使 β 相转变为 α 相，生成片状次生 α 相，且冷却速度较淬火慢，因此无马氏体组织。时效处理则在固溶冷却后的组织上进行低温保温，促使亚稳定相分解，增强合金强度。时效析出 α 相的形态和尺寸受温度影响，低温时效效果最佳。在固溶 + 时效热处理中，相变点以上得到片层组织，以下得到双态或等轴组织，时效处理则是合金强化的关键，残余亚温 β 相含量越高，强化效果越好。固溶时效强化热处理相比退火和高温 β 相区淬火，能显著提升钛合金钻杆的室温强度。

三、钛合金钻杆加工工艺

钛合金钻杆的结构主要包括管体和接头两部分，如图 3-1 所示。这两个部分主要通过摩擦焊接连接，以减少电偶腐蚀的概率。



> 图3-1 钛合金钻杆结构

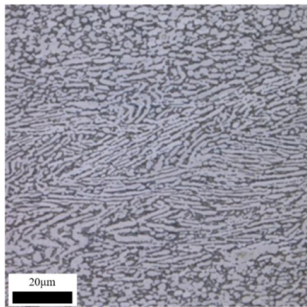
（一）钛合金钻杆管体

钛合金钻杆管体为无缝管，服役中承受拉压扭转及井壁摩擦，环境恶劣，对生产工艺要求比较高，包含五大类型的工艺：

（1）熔铸工艺：用真空自耗电弧炉进行二次熔炼，将3-1/2规格钻杆铸成长9~12 m、尺寸 $\phi 300 \times 800$ mm 的圆锭坯。（2）锻造：分三种方式。 $\alpha + \beta$ 两相区锻造可形成等轴组织，室温塑性与疲劳极限优，但冲击韧性差；近 β 锻造形成双态组织，塑性和疲劳强度高； β 锻造形成片层组织，在室温下，表现出优异的拉伸强度、断裂韧性和抗蠕变性能，具有较低的塑性和断面收缩率。（3）挤压：采用金属铜包覆热挤压，因高温易氧化，需大挤压比（10~30）、快挤压速度，挤压温度低于 β 相转变点 $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ ，可细化晶粒，使组织性能均匀。（4）轧制：温轧时管坯内用芯棒定径，涂刷石墨等润滑剂防内部缺陷。（5）热处理：包括退火、固溶+时效处理。

（二）钛合金钻杆接头

钛合金钻杆采用“钻杆+钢接头”和“钻杆+钛接头”两种连接结构，通过装配或摩擦焊接将接头与管体连接。接头制造过程包括墩粗锻造、钻孔和退火，退火温度较低。例如，首先，将TA15X 钛合金钻杆接头在 720°C 的温度下，保温90分钟并进行空冷，得到如图3-2所示的微观组织形貌。其次，在接头上取 $\phi 8$ mm 的拉伸试样，尺寸为 $7.5\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 的冲击试样，对其力学性能进行测试，结果见表3-1和表3-2。测试结果表明，抗拉强度均值为911 MPa，屈服强度均值为878 MPa，延伸率为19.3%。温度的升高，致使钛合金钻杆接头的冲击功也相应增加， 20°C 时的冲击功为59 J。因为等轴组织会具有比较高的强度，且片层组织抗冲击性能表现优异，所以，接头显现出优良的强韧匹配性。



> 图3-2 接头的微观组织形貌

表3-1 拉伸力学性能参数

接头	R_m/MPa	$R_{0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$
单值	906	877	20
	917	885	20
	911	872	18
平均值	911	878	19.3

表3-2 不同温度下钛合金钻杆接头的冲击功 /J

温度	-60°	-40°	-20°	0°	20°
纵向/单值	38	41	54	49	49
	35	36	42	43	62
	43	43	40	47	67
平均值	39	40	45	46	59

（三）钛合金钻杆焊缝

钛合金钻杆与管体之间是通过摩擦焊连接的，要保证焊缝处的质量性能要求，其中摩擦焊的转速以及压力参数比较关键，并且焊后要进行焊缝局部热处理^[9]。TA15X 钛合金钻杆焊缝用固溶+时效的方式进行热处理。焊缝处的抗拉强度均值为940 MPa，屈服强度均值为876 MPa，延伸率为15%，冲击功为31 J，如表3-3所示。

表3-3 焊缝力学性能

焊缝	R_m/MPa	$R_{0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	A_K/J
单值	940	878	16	26
	945	878	14	36
	935	872	15	31
平均值	940	876	15	31

四、结论

钛合金钻杆有低密度、高比强度、耐腐蚀和抗疲劳性能的特点，在深井、超深井等恶劣钻井环境中展现了显著优势。其优异的耐腐蚀性和耐磨性有效延长了钻井工具的使用寿命，尤其在高温和强酸环境下表现突出。通过固溶+时效处理，钛合金钻杆的强度和抗疲劳性能得到了显著提升。摩擦焊接技术为接头提供了可靠连接，退火与固溶时效等热处理工艺进一步优化了显微组织和力学性能。尽管钛合金钻杆在成本和耐磨性方面仍有提升空间，但其在特殊钻井作业中的表现明显优于传统钢制钻杆，具有广泛的应用前景。随着钛合金材料和加工技术的不断进步，未来将在石油钻井作业中发挥越来越重要的作用。

参考文献

[1] Mou Y, Lian Z, Li W, et al. The effect of friction welding on the mechanical properties and corrosion fatigue resistance of titanium alloy drill pipe [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2022, 45(2): 466-481.

[2] 鲜宁, 荣明, 李天雷, 等. 钛合金在高温高压酸性油气井的应用研究进展 [J]. 天然气与石油, 2020, 38(05): 101-107.

[3] 吕祥鸿, 舒谨, 赵国仙, 等. 钛合金石油管材的研究和应用进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(6): 1518-1524.

[4] Feng C, Li R, Liu Y, et al. Aging treatment effect on microstructure and mechanical properties of Ti-5Al-3V-1.5 Mo-2Zr titanium alloy drill pipe[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29: 7011-7025.

[5] P'erez-Mora R, Palin-Luc T, Bathias C, et al. Very high cycle fatigue of a high strength steel under sea water corrosion: a strong corrosion and mechanical damage coupling [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 74: 156-165.

[6] Wu J, Li Y, Liu H, et al. Comparative Analysis of Friction and Wear Properties of Titanium Alloy Drill Pipe and Steel Drill Pipe [C]. Journal of Physics: Conference Series. 2023, 2587(1): 012001.

[7] Smith J E, Chandler R B, Boster P L. Titanium drill pipe for ultra-deep and deep directional drilling [C]. Drilling Conference and Exhibition. SPE, 2001: SPE-67722-MS.

[8] Zhang W, Feng C, Zhang K, et al. Research Progress on High Temperature Resistance of Titanium Alloy Material for Oil Drill Pipe [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 2956(1): 012040.

[9] Zhang W, Huang Y, Wu J, et al. Performance Test of Weld Zone of Rotary Friction Welding of Titanium Alloy Drill Pipe [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2587(1): 012002.

市政道路工程水泥稳定碎石基层施工技术实践研究

戴萍

江西联能建设有限公司, 江西 上饶 334000

摘要：随着城市化进程加速，市政道路建设需求猛增。水泥稳定碎石基层因成本效益佳、力学性能优，成为市政道路基层构筑的常用选择。但其施工受环境、材料、工艺等因素制约，质量把控难度大，促使深入研究该施工技术以保道路工程品质。本研究聚焦于市政道路工程中水泥稳定碎石基层施工技术，为市政道路工程施工提供了全面的技术参考，有助于确保道路工程质量，提高市政道路的使用寿命与服务水平，推动城市基础设施建设的高效发展。

关键词：市政道路；水泥稳定碎石基层；施工技术；质量控制

Research on Construction Technology Practice of Cement Stabilized Crushed Stone Base in Municipal Road Engineering

Dai Ping

Jiangxi Lianneng Construction Co., Ltd. Shangrao, Jiangxi 334000

Abstract: With the acceleration of urbanization, the demand for municipal road construction has soared. Due to its cost-effectiveness and excellent mechanical properties, the cement-stabilized crushed stone base has become a common choice for the construction of municipal road bases. However, its construction is constrained by factors such as the environment, materials, and craftsmanship, making quality control difficult. This has prompted in-depth research on this construction technology to ensure the quality of road engineering. This study focuses on the construction technology of cement-stabilized crushed stone bases in municipal road engineering, providing a comprehensive technical reference for municipal road engineering construction. It helps to ensure the quality of road engineering, improve the service life and service level of municipal roads, and promote the efficient development of urban infrastructure construction.

Keywords: municipal roads; cement stabilized crushed stone base; construction technology; quality control

引言

水泥稳定碎石基层由于力学性能好，水稳性好，整体性强等优点被广泛运用于市政道路工程。但在施工中由于受材料选择、配合比设计和施工工艺等诸多因素影响，会产生压实度不够和裂缝等一系列质量问题。所以，对于市政道路工程中水泥稳定碎石基层施工技术展开深入的研究有着极其重要的实际意义，其目的就是为了给工程实际提供科学理论依据和有效技术指导，确保市政道路工程顺利施工和优质竣工。

一、市政道路工程水泥稳定碎石基层施工技术的特点

在市政道路工程当中，水泥稳定碎石基层的施工工艺有着显著特点。

一是它强度大、稳定性好。水泥作为一种胶凝材料与碎石共同作用形成牢固的骨架结构，承受汽车行驶所带来的多种载荷并有效地分散了压力，从而使得道路基层具有较好的承载能力并降低了路面变形、开裂的概率。以城市主干道为例，当大量重型车辆经常行驶时，水泥稳定碎石基层可以长时间处于稳定结构状态下，保证道路正常运行^[1]。

二是该项技术抗渗性好。水泥稳定碎石基层致密的结构可以有效地阻挡水的渗入，避免地下水或者雨水冲刷损坏道路基层。

这对市政道路来说尤其重要，由于道路周围经常有各类地下管线、排水设施等，水一旦渗透到基层而发生损坏，就有可能影响道路整体结构的稳定及相关设施的正常使用。

三是水泥稳定碎石基层取材广，造价比较低廉。碎石材料各地区比较普遍，水泥是建筑工程经常使用的一种材料，易得。这样就使这项技术应用于大范围市政道路建设有着经济上的优势，可以在确保工程质量的同时对建设成本进行合理的控制。

但是，水泥稳定碎石基层的施工工艺也具有一定的局限性。比如它的施工受到气候条件的影响比较大，雨天或者低温天气施工时，就有可能影响到混合料质量以及施工效果。并且，水泥稳定碎石基层收缩性比较大，若在施工时控制不到位，易出现裂缝，需采取相应防治措施。

二、市政道路工程水泥稳定碎石基层施工技术实践的标准

在市政道路工程中，水泥稳定碎石基层的建设一定要按照严格的规范进行。从材质上看，水泥要满足有关国家标准的要求，一般用普通硅酸盐水泥制成，强度等级要按工程设计要求而定。碎石粒径、级配及其他指标均应符合规定范围内，通常最大粒径不应大于某一值，不同粒径碎石按合理配比，才能确保混合料密实稳定。比如对基层厚度比较大的路面，碎石最大粒径的要求可以适当放宽，但是级配的连续性还是要得到保证^[2]。

混合料配合比设计中，应通过实验来确定水泥的最佳用量及含水量，过高的水泥剂量会使基层开裂的危险增大，过低又达不到强度的要求；含水量过高或过低，对混合料压实效果及强度形成均有影响。一般情况下，水泥稳定碎石基层中水泥剂量都会在某一区间内浮动，含水量也会随着施工环境及材料特性的变化而变化，以达到最佳压实效果。

施工期压实度就是其中一个重点准则，不同级别市政道路对于基层压实度的要求也不相同，通常主干道压实度的要求更高，要满足指定重型击实的更高比例。压实作业应当分层次实施，各层压实厚度和压实遍数均应当满足规范要求。如各层压实厚度通常不大于指定值，用适当压路机压平，先静压再振动压平，以保证基层按规定密实。平整度在市政道路水泥稳定碎石基层施工中同样是一项重要的施工标准。基层是否平整，直接关系到后续路面面层施工质量，关系着路面行车舒适度。在施工过程中，要用适当的测量仪器与方法来检测与控制，例如用水准仪、3米直尺以及其他工具来及时处理超过平整度许可偏差范围的地方，例如用平地机刮平操作。

三、市政道路工程水泥稳定碎石基层施工技术实践的方法

（一）准确地确定材料的比例

准确地确定材料配比，是市政道路水泥稳定碎石基层施工中的第一步。配比设计之前需细致地测试与分析原材料。对水泥而言，应确定水泥的强度等级、凝结时间和安定性，以保证水泥的质量满足要求。对于碎石，需要进行筛选实验，以确定其粒径的分布模式，从而更合理地组合不同粒径的碎石。如将多批碎石过筛后，画出粒径分布曲线并依据曲线来确定各种粒径碎石所占配比，使级配效果最佳。接着，结合道路工程设计要求及使用工况，对水泥稳定碎石混合料设计强度进行初步判断。通常市政主干道基层设计强度大于次干道及支路，在设计强度的基础上，采用室内试验测定了水泥剂量及含水量^[3]。通过对不同水泥剂量混合料的无侧限抗压强度试验，绘制了水泥剂量-强度关系曲线，并筛选出了符合设计强度和水泥剂量要求的合理混合料。同时在实验过程中对混合料和易性进行了观测，找出最佳含水量，使得混合料能在拌和、运输、摊铺及压实等环节都能保持较好的工作性能。

确定材料配比时还要考虑到施工环境因素，如高温干燥地区水分蒸发迅速，混合料水分需适当增加；但潮湿地区应控制含水量以防混合料过于潮湿。另外还应考虑到混合料延迟时间对于强度的影响。由于拌和至压实之间存在着一个时间区间，在此期间混合料强度将发生改变，所以应通过实验来确定最大容许延迟时间，并且对实际施工进行严格把控，保证延迟时间内要完成压实操作，从而确保基层强度稳定。

（二）标准的拌和作业

规范混合料拌和作业，对确保水泥稳定碎石基层质量具有重要意义。

一是拌和设备选型与调试至关重要。应选择性能优良、计量精确的拌和机进行拌和，拌和前应彻底检查调试设备，以保证设备能正常工作，各种原材料计量装置正确。如水泥螺旋输送器和水流量计的标定，从而可以准确地把原材料投放量控制到设计配比之内。

二是拌和时，应按既定的材料配比向拌和机内先后添加碎石、水泥及水。碎石先要进行一段时间的干拌，通常是数秒至十几秒钟，让碎石完全搅拌均匀后，才可以添加水泥进行持续的干拌，确保水泥均匀地分布于碎石的表面。此后，再加水湿拌和，湿拌和的时间要充分，以保持混合料颜色均匀，不产生离析。如湿拌时间一般不小于规定时长等，观察混合料状态判断是否满足拌和均匀。同时严格控制混合料含水量，因拌和、运输及摊铺等环节水分均存在不同程度蒸发损失，故拌和阶段含水量应比最佳含水量稍高。但是含水量不能太高，否则将使混合料产生“弹簧”现象，从而影响压实效果。施工期应根据天气情况、运输距离及摊铺速度及时调整拌和时水分，可以通过检测原材料水分，计算实际所需添加水量，以保证混合料含水量一直在适宜范围内。

三是拌和时还应加强质量检测。定期抽样检验拌和后混合料的水泥剂量、含水量及颗粒级配是否满足设计要求。若发现异常，要及时对拌和设备参数或者原材料投放量进行调整，以确保每批混合料质量稳定可靠，并为以后的运输、摊铺及压实作业打好基础。

（三）高效的混合料运输和管理

在市政道路水泥稳定碎石基层建设中，高效混合料运输管理具有重要意义，选择运输车辆时，要使用大型自卸汽车并保持车厢干净，且密封性好，以防混合料运输时漏出、离析。比如车厢底部可以铺一层塑料布或者帆布以减少混合料和车厢底部之间的粘度，而车厢侧板增加防护装置以避免颠簸时混合料外溢。

规划好运输路线也是至关重要，应选择道路条件较好、交通畅通的线路，最大限度地减少运输时间及颠簸。同时考虑城市交通复杂，交通高峰期应尽量避免通行，避免交通堵塞造成混合料在车内停留时间过长而影响混合料的品质。如协调各地交通管理部门，取得实时的交通信息和预先规划的运输路线等，以保证混合料能迅速而安全地到达施工现场。混合料装车时应注意装车高度的控制，以免因混合料输送过程中超高造成离析。

输送时还需监测混合料温度及含水量，尤其当高温或低温天

气时，气温变化对混合料品质有一定影响。比如，当气温较高时，应采用遮盖遮阳布的方法来避免混合料因气温过高而造成水分蒸发过快；在寒冷的气候条件下，需要实施各种保温手段，例如用棉被进行覆盖，以防止混合材料受到冻害。同时应根据运输时间、天气等因素适当调节混合料含水量，以保证到达施工现场的混合料能达到摊铺、压实要求。

（四）细部混合料摊铺技术

细部混合料摊铺工艺对确保市政道路水泥稳定碎石基层平整度、压实度至关重要，其中要进行下承层在摊铺前的检验与处理，下承层要平整牢固，并有指定的横坡度及压实度。若出现疏松、坑洼的缺陷要及时修补压实。如利用平地机平整下承层、压路机复压以保证下承层满足摊铺的需要。摊铺设备选型与调试也是至关重要的，通常使用摊铺机摊铺作业时，摊铺前应对摊铺机做全面的检查与调试工作，其中包括熨平板宽度、高度和平整度的调节，以便摊铺机能按设计要求完成作业。如根据路面宽、厚要求对熨平板宽、高进行调节，以保证摊铺混合料粗细均匀。

摊铺时摊铺机行驶速度应得到控制，过快的车速将造成摊铺厚度不均，混合料离析严重，过慢会影响施工效率并可能造成摊铺机摊铺之前混合料堆积。通常以混合料供应能力和压实设备工作效率来考虑摊铺机行车速度，如平时可以将摊铺机行车速度限制在某一范围。还要重视摊铺机振捣及熨平装置作业。振捣设备可以使混合物达到初步的密实度，而熨平设备则确保其表面平滑。应根据混合料性质及摊铺厚度适当调节振捣频率及熨平板振动频率及振幅。如对较厚混合料层可以适当增加振捣频率、熨平板振动强度等措施来确保混合料密实度、平整度。另外，摊铺时还应安排人员检查摊铺质量，对混合料内离析现象及时进行处理，例如用手撒细料来填充离析部位等，实时监控摊铺厚度及平整度，例如采用水准仪、全站仪及其他测量仪器进行检测，及时发现偏差并调整摊铺机参数，以保证摊铺后的水泥稳定碎石基层达到设计要求及质量标准。

（五）科学压实作业流程

科学的压实作业流程是保证市政道路用水泥稳定碎石基层的强度与稳定性的核心内容。在压实设备选型时，一般使用压路机操作，有静压压路机、振动压路机等。根据基层厚度及压实要求合理配装不同型号、吨位的压路机。比如对比较厚的基层，首先使用重型静压压路机初步稳压，后再使用振动压路机振动压实，最后再使用轻型压路机压平封面。压实作业时，要遵循先轻后重、再慢再快、再静压再振动的原则，启动压实阶段用较轻压路机静压，速度较缓慢，使得混合料处于初始稳定状态，以免由于突然的重压而造成混合料的推移。

振动压实时，振动的频率与振幅应得到合理的控制，振动频率及振幅应视混合料特性、厚度及压实要求而定。通常情况下，对较厚混合料层可以采取振幅大、振动频率小的方式；对于较为薄弱的层面，选择了较小的振动幅度和更高的振动频率。如通过对试验路段进行压实试验来确定振动频率与振幅的最优组合，从而使混合料能达到指定压实度。压实作业应当分层次实施，各层压实厚度应当满足规范要求，一般各层的压实厚度不得大于指定值，各层压实结束时，应进行压实度测试。检测方法可用灌砂法和核子密度仪法，若检测到压实度不够，则要及时补压至符合规定压实度。另外，压实时还应注意碾压顺序、重叠宽度等问题，压路机要从道路的边缘向中央进行碾压，并且相邻的碾压带要重合一定的宽度，通常是指定的值，这样才能确保整个基层被完全压实。

四、结束语

在市政道路工程中研究和应用水泥稳定碎石基层施工技术对保证道路工程质量起着至关重要的作用，可以保证其性能和质量较好，从而为市政道路长期平稳运营打下坚实的基础。在今后市政道路工程施工过程中，伴随着科学技术的进步和施工经验的累积，水泥稳定碎石基层施工技术也会得到不断的优化和革新，进一步提升市政道路工程施工水平和质量标准，从而为城市发展提供更高质量和更有效率的交通基础设施。

参考文献

- [1] 杨云. 市政道路工程中水泥稳定碎石基层施工技术的实践研究 [J]. Engineering Science Research & Application, 2023, 4(18).
- [2] 曹飞. 市政道路工程中水泥稳定碎石基层施工技术的实践研究 [J]. 运输经理世界, 2022(2):3.
- [3] 任伟韬. 水泥稳定碎石基层施工技术市政道路工程中的应用 [J]. 建筑·建材·装饰, 2020, 000(005):85,99.

半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰沥青混凝土相结合的应用

祖源博, 江其昕, 范耘赫, 代明鑫, 于淼*
沈阳工学院, 辽宁 沈阳 113122

摘要： 随着交通量的不断增加和车辆轴载的日益加重, 传统的沥青混凝土路面面临着严重的车辙和开裂问题。为了应对这些挑战, 半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土应运而生。本文将深入探讨半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰剂相结合的研究, 包括灌浆料的性质、试验数据、应用价值, 以及抗凝冰剂的数据及应用价值。通过理论分析、数值模拟和实地试验, 本文旨在为半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰剂的结合应用提供理论依据和技术支持。

关键词： 半柔性路面; 大孔隙; 抗车辙; 灌浆料; 抗凝冰剂

Application of Semi-Flexible Large Pore Anti-Rutting Asphalt Concrete Combined with Anti-Freezing Asphalt Concrete

Zu Yuanbo, Jiang Qixin, Fan Yunhe, Dai Mingxin, Yu Miao*
Shenyang Institute of Technology, Shenyang, Liaoning 113122

Abstract: With the increasing traffic volume and the increasing axle load of vehicles, the traditional asphalt concrete pavement is faced with serious problems of rutting and cracking. In order to cope with these challenges, semi-flexible asphalt concrete with large pore resistance to rutting came into being. This paper will deeply discuss the research on the combination of semi-flexible large pore anti-rutting asphalt concrete and anticoagulant, including the properties of grouting material, test data, application value, and data and application value of anticoagulant. Through theoretical analysis, numerical simulation and field test, this paper aims to provide theoretical basis and technical support for the combined application of semi-flexible large pore rut-resistant asphalt concrete and anticoagulant.

Keywords: semi-flexible pavement; large pores; rutting resistance; grout material; anticoagulant

引言

随着城市化进程的加速和交通量的不断增加, 对高性能路面的需求也越来越高。半柔性抗车辙沥青混凝土路面与融雪凝冰路面相结合项目能够满足市场对高性能、环保型路面的需求, 具有广阔的应用前景。路面材料的研发和应用是当前科技发展的趋势之一。半柔性抗车辙沥青混凝土路面与融雪凝冰路面相结合项目顺应了这一趋势, 将两种优秀的路面材料相结合, 提高了道路的性能和环保性能, 符合未来道路发展的趋势。政府对于环保、节能减排、科技创新等方面的政策支持也是该项目立项的重要依据。半柔性抗车辙沥青混凝土路面与融雪凝冰路面相结合项目符合政府的相关政策, 有望获得政策支持和资金扶持。该项目经过国内外相关领域专家的论证和推荐, 认为该项目在材料研发、施工工艺、环保性能等方面具有创新性和实用性, 具有良好的市场前景和应用价值。半柔性抗车辙沥青混凝土路面与融雪凝冰路面相结合项目的研发和应用需要具备相应的技术实力和条件。通过技术可行性的分析和验证, 证明了该项目在技术上的可行性和实施的可能性。在我国, 这种结合的应用还处于起步阶段。但是, 随着交通量的不断增加和冬季气候的日益严寒, 对于提高道路使用性能和安全性的需求也越来越迫切。因此, 这种结合的应用将成为未来道路建设的重要方向之一。

一、半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰沥青混凝土的工艺原理

(一) 半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土

半柔性路面是水泥砂浆填充在沥青混合料内部的孔隙中, 密实-骨架型结构, 刚柔相济的新型路面, 兼具有沥青路面抗裂

能力强、无接缝+水泥混凝土路面刚性大、承载能力强、抗车辙性能好的优点, 超强抗剪切性能, 抗车辙能力是普通沥青路面的5-10倍^[1]。

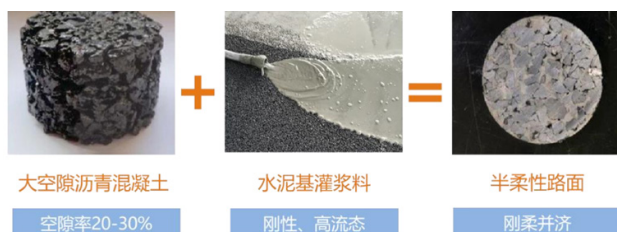
上世纪50年代在欧洲发明并应用, 后续日本、美国及我国也有, 通常用于机场、收费站、停车场、加油站、爬坡路段、交叉口、公交专用道, 抗车辙的处理效果明显。相较于普通路面增加

作者简介: 祖源博: (2004.09-), 男, 汉族, 沈阳工学院道路桥梁与渡河工程专业学生, 主要参与老师进行沥青混凝土以及外加剂的各种试验。

通讯作者: 于淼: (1987.12-), 女, 汉族, 吉林省松原人, 毕业于辽宁工程技术大学桥梁与隧道专业, 硕士研究生, 副教授, 沈阳工学院讲授《土木工程材料》等主干课程, 长期致力于建筑以及道桥新材料的研究。

100元/m²。

其作用机理如图1所示。



> 图1 半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土组成图

（二）抗凝冰沥青混凝土

抗凝冰剂在半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土中的应用方式主要有两种：一种是直接添加到沥青混合料中；另一种是在路面表面喷洒或涂刷。直接添加的方式可以使得抗凝冰剂与沥青混合料充分混合均匀，从而提高路面的整体抗凝冰性能。而喷洒或涂刷的方式则主要适用于已建成的路面改造和维修工程^[2]。

在实际应用中，抗凝冰剂的用量需要根据当地的气候条件、交通流量和路面类型等因素进行综合考虑。一般来说，在寒冷地区或冬季气温较低的地区，需要适当增加抗凝冰剂的用量以提高路面的抗凝冰性能。同时，还需要注意抗凝冰剂与沥青混合料之间的相容性和稳定性问题，以确保路面的整体性能和安全性。

（三）灌浆料的性质

灌浆料是半柔性路面的重要组成部分，其性能直接影响半柔性路面的整体性能。半柔性路面所用的灌浆料主要由水泥、聚合物改性剂和填料等组成，通过科学配比和现代化生产工艺制成。其中，水泥是灌浆料的主要成分，提供硬化后的强度；聚合物改性剂用于改善灌浆料的流动性和粘结性；填料则用于调节灌浆料的稠度和增加其强度。^[3] 这些成分通过科学配比和现代化生产工艺混合均匀，形成具有优异性能的灌浆料。灌浆料具有核-壳结构，将氯盐吸附于多孔材料中，并且表面采用聚合物进行裹覆。这种结构使得灌浆料具有一定的弹性，能够抵抗较大的变形，从而提高沥青胶浆的抗车辙变形能力。同时，盐化物材料呈弱碱性，在酸性石油沥青表面形成的吸附熔化膜，能够有效提升与沥青之间的交互作用，从而增加沥青混合料抗剪强度。

灌浆料的物理力学性能包括强度、流动性、凝结时间等。其中，强度是灌浆料最重要的性能指标之一，它决定了半柔性路面的承载能力和耐久性。流动性则影响灌浆料在沥青混合料中的渗透和填充效果。凝结时间则决定了灌浆料的硬化速度和施工效率。

通过试验测试，我们发现灌浆料具有较高的强度和优异的流动性。在标准条件下，灌浆料的抗压强度可达30MPa以上，抗折强度可达5MPa以上。同时，灌浆料的流动性良好，能够充分渗透到沥青混合料中的空隙中，形成密实的结构。此外，灌浆料的凝结时间适中，能够满足施工要求。

灌浆料的耐久性和稳定性对于半柔性路面的长期性能至关重要。耐久性包括抗疲劳性能、抗老化性能等，它决定了灌浆料在长期使用过程中的性能保持能力。稳定性则包括化学稳定性和热稳定性等，它决定了灌浆料在不同环境下的性能稳定性^[4]。

通过长期试验和观察，我们发现灌浆料具有优异的耐久性和稳定性。在模拟重载交通和恶劣气候条件的试验中，灌浆料表现出良好的抗疲劳性能和抗老化性能。同时，灌浆料在不同温度和湿度条件下均能保持稳定的性能，不会出现明显的性能下降或失效现象^[5]。

（四）试验过程

为了验证半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰剂相结合的性能，我们进行了多项试验。以下是对试验数据的详细分析。

1. 原材料性能测试

首先，我们对灌浆料和抗凝冰剂的原材料进行了性能测试。测试内容包括水泥的抗压强度、抗折强度、凝结时间等；聚合物改性剂的流动性、粘结性等；填料的粒度分布、含水量等；以及抗凝冰剂的冰点降低值、渗透性、附着性等。测试结果表明，所有原材料均符合相关标准和要求，可以用于制备半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土和抗凝冰剂^[6]。

2. 混合料配合比设计

接下来，我们进行了混合料配合比设计。通过调整灌浆料、沥青混合料和抗凝冰剂的用量比例，我们制备了不同配合比的半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土试件。同时，我们还设置了对照组试件，用于比较不同配合比下的性能差异。

3. 车辙试验

车辙试验是评估路面材料抗车辙性能的重要方法。我们采用轮碾成型机制备了车辙试验试件，并在模拟重载交通条件下进行了车辙试验。试验结果表明，半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土试件的车辙深度明显小于对照组试件，且随着灌浆料用量的增加，车辙深度进一步减小。这说明灌浆料对于提高沥青混凝土的抗车辙性能具有显著作用。

4. 低温弯曲试验

低温弯曲试验是评估路面材料低温抗裂性能的方法。我们采用低温弯曲试验机对试件进行了测试。试验结果表明，半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土试件的低温弯曲破坏应变明显大于对照组试件，且随着抗凝冰剂用量的增加，低温弯曲破坏应变进一步增大。这说明抗凝冰剂对于提高沥青混凝土的低温抗裂性能具有积极作用。

5. 抗凝冰性能试验

为了评估抗凝冰剂对于半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土的抗凝冰性能的影响，我们进行了抗凝冰性能试验。试验结果表明，在相同条件下，添加了抗凝冰剂的试件表面结冰速度明显慢于对照组试件，且冰层厚度也更薄。这说明抗凝冰剂能够显著降低路面的冰点温度，提高路面的抗凝冰性能。

二、半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰剂的应用价值

（一）提高路面抗车辙性能

半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土通过引入灌浆料和抗凝冰剂，显著提高了路面的抗车辙性能。在重载交通和恶劣气候条件

下，路面能够保持平整和稳定，减少了车辙的产生和扩展。这有助于提高路面的使用寿命和行车安全性。

（二）提高路面抗凝冰性能

抗凝冰剂的加入使得半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土具有优异的抗凝冰性能。在低温条件下，路面能够迅速融化冰雪，减少冰雪对路面的影响。这有助于提高路面的抗滑性能和行车安全性，特别是在冬季和雨雪天气条件下^[7]。

（三）延长路面使用寿命

半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰剂相结合的应用能够显著延长路面的使用寿命。通过提高路面的抗车辙性能和抗凝冰性能，减少了路面的维修频次和成本。同时，半柔性路面的耐久性和稳定性也较好，能够长期保持优良的性能。

（四）降低施工成本

半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰剂相结合的应用还能够降低施工成本。由于半柔性路面的施工效率较高，且不需要特殊的施工设备和工艺，因此可以节省施工时间和人力成本。同时，抗凝冰剂的加入也减少了融雪剂的使用量，进一步降低了施工成本。

三、半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰沥青混凝土的应用场景及施工技术

抗车辙沥青灌浆料广泛应用于高速公路、城市主干道等重载交通道路。在这些场景中，它能够快速修复车辙病害，恢复路面平整度，提高行车舒适度和安全性。此外，它还可以用于飞机跑道、停车场等需要承受重载和快速行车的场所。

抗车辙沥青灌浆料的施工技术主要包括以下几个步骤：

- 表面处理：清理原路面表面的杂物和污物，确保干净整洁。
- 灌浆材料制取：按照设计配比，将沥青、矿物材料和添加剂混合均匀，制备成灌浆材料。
- 注浆：将制备好的灌浆材料注入到车辙病害部位，确保填充密实。
- 压实：采用合适的压实设备，对注浆后的路面进行压实处理，确保灌浆材料与原路面紧密结合。

抗凝冰沥青混凝土路面广泛应用于冬季易结冰的路段，特别是靠湖临河、背阴路段、隧道进出口、桥梁涵洞以及长大纵坡等地。这些路段在冬季容易结冰，给行车带来极大的安全隐患。使用抗凝冰沥青混凝土路面可以有效减少路面结冰，提高道路的安全性和通行效率^[8]。

抗凝冰沥青混凝土路面的工作原理主要基于降低水的冰点。通过添加特殊的抗凝冰剂，如盐类或醇类物质，这些物质可以与水分子发生作用，从而降低水的冰点。在低温条件下，路面上的水分不易结冰，从而保持路面的通行能力^[9]。

施工技术方面，抗凝冰沥青混凝土路面的施工与普通沥青混凝土路面相似，但需要注意以下几点：

- 材料准备：确保抗凝冰改性剂的质量符合要求，并按照设

计配比与沥青混合料混合均匀。

- 温度控制：在施工过程中，要严格控制沥青混合料的拌合温度和摊铺温度，确保材料性能的稳定。

- 压实工艺：采用合适的压实设备和工艺，确保抗凝冰沥青混凝土路面与原路面紧密结合，达到良好的密实度和平整度。

四、半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土与抗凝冰沥青混凝土的应用优势及面临挑战

将抗车辙沥青混凝土路面灌浆料与抗凝冰沥青混凝土路面相结合使用，可以充分发挥两者的优势，提高路面的整体性能和使用寿命。具体优势包括：

- 提高路面抗车辙能力：抗车辙沥青灌浆料能够有效抵抗车轮荷载作用下的变形，延长路面的使用寿命。
- 防止路面结冰：抗凝冰沥青混凝土路面在低温环境下能够保持良好的通行条件，有效防止或减少路面结冰，提高道路的安全性和通行效率^[10]。
- 降低维护成本：结合使用这两种材料可以减少路面的病害发生频率，降低维护成本。
- 提高道路服务水平：良好的路面性能可以提高行车舒适度和安全性，提升道路的服务水平。

尽管结合使用抗车辙沥青混凝土路面灌浆料与抗凝冰沥青混凝土路面具有诸多优势，但在实际应用中 also 面临一些挑战。主要包括：

- 材料相容性问题：抗车辙沥青灌浆料和抗凝冰沥青混凝土路面可能因材料成分和改性剂的不同而存在相容性问题。为解决这一问题，需要在施工前进行充分的试验和验证，确保两种材料的相容性。
- 施工工艺复杂：结合使用这两种材料需要更加精细的施工工艺和控制措施。为确保施工质量，需要加强对施工人员的培训和管理，确保各项施工参数符合设计要求。
- 成本问题：虽然结合使用这两种材料可以提高路面的性能和使用寿命，但也会增加施工成本。为降低成本，可以优化材料配比和施工工艺，提高施工效率和质量。

五、结语

通过对半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土的研究与应用进行了深入探讨和分析。研究表明，半柔性大孔隙抗车辙沥青混凝土具有优异的抗车辙性能、高温稳定性和耐久性等特点，在重载交通、长大纵坡路段、城市道路交叉口等场所具有广泛的应用价值。同时，通过在半柔性路面中添加抗凝冰剂，能够进一步提高路面的抗冰雪性能和行车安全性。抗车辙沥青混凝土路面灌浆料与抗凝冰沥青混凝土路面的结合应用为解决道路车辙和冬季结冰问题提供了一种有效的解决方案。通过充分发挥两者的优势，可以提高路面的整体性能和使用寿命，降低维护成本，提高道路服务水平。然而，在实际应用中也需关注材料相容性、施工工艺

和成本等问题。未来，随着新材料和新技术的不断涌现，我们可以期待更加高效、环保、经济的解决方案的出现，为道路交通的可持续发展做出更大的贡献。

在未来的研究中，可以进一步探索抗车辙与抗凝冰材料的改性技术和施工工艺的优化方法，以提高材料的性能和施工效率。

同时，还可以加强对路面病害的监测和预警技术的研究，及时发现并处理路面病害，延长路面的使用寿命。此外，还可以考虑将智能感知和大数据技术应用于路面管理中，实现对路面性能的实时监测和智能预警，提高道路管理的科学性和精准性。

参考文献

- [1] 赵世豪，半柔性抗车辙路面施工技术研究 [J]. 交通世界 .2023 年 32 期 .
- [2] 周庆月，管鑫，上海奉贤典型半柔性路段路用性能研究 [J]. 上海公路 .2023 年 01 期 .
- [3] 孙宇，乔俊，罗望群，邓文杰，刘斌，孙大权，灌注式半柔性路面研究进展 (3)——铺装结构及施工技术 [J]. 石油沥青 .2023 年 01 期 .
- [4] 牟长江，程凯，刘瑞，贾恩达，孙浩；牛腾，卢晓磊，杜鹏，叶正茂，半柔性路面用水泥基灌浆材料的矿物掺合料协同优化研究 [J]. 硅酸盐通报 .2022 年 03 期 .
- [5] 谭建军，邓松，龚明辉，丁千宁，熊子佳，吴文超，半柔性路面在市政道路车辙处治工程中的应用研究 [J]. 中国市政工程 .2021 年 03 期 .
- [6] 李源渊，孙建勇，宋晓燕，不同类型沥青混凝土低温施工应用研究 [J]. 公路交通技术 .2020 年 01 期 .
- [7] 王斌，李自齐，融冰雪相变材料对沥青混合料性能的影响 [J]. 兰州工业学院学报 .2021 年 01 期 .
- [8] 孟勇军，零立山，赵启雄，卢祖标，覃鹏飞，抗凝冰微表处路用性能及抗凝冰效果试验分析 [J]. 科学技术与工程 .2021 年 07 期 .
- [9] 张争奇，强亚奎，张世豪，王东，赵富强，沥青路面超疏水抗凝冰涂层设计及性能 [J]. 材料导报 .2021 年 10 期 .
- [10] 高建清，融雪剂盐冻侵蚀作用对沥青混合料性能影响及劣化机理研究 [J]. 新型建筑材料 .2019 年 12 期 .

国土工程方向在生态修复工程的困境与优化路径探究

贾立东

峰峰矿区自然资源和规划局, 河北 邯郸 056200

摘要：生态修复工程是当前国土空间治理与可持续发展的重要环节，但国土工程在生态修复领域的实践仍面临诸多困境。本文通过分析国土工程在生态修复中的技术、资金、政策、公众参与等方面的现状，探讨其面临的主要问题，并提出优化路径，旨在为推动国土工程在生态修复领域的高质量发展提供理论支持和实践参考。

关键词：国土工程；生态修复；困境；优化路径

The Dilemma and Optimization Path of Ecological Restoration Project in the Direction of Land Engineering

Jia Lidong

Fengfeng Mining Area Bureau of Natural Resources and Planning, Handan, Hebei 056200

Abstract: Ecological restoration project is an important link in the current territorial space management and sustainable development, but the practice of land restoration project still faces many difficulties in the field of ecological restoration. By analyzing the current situation of land engineering in ecological restoration in terms of technology, funds, policies and public participation, this paper discusses the main problems it faces and puts forward optimization paths, aiming to provide theoretical support and practical reference for promoting the high-quality development of land engineering in the field of ecological restoration.

Keywords: land engineering; ecological restoration; dilemma; optimized path

引言

随着全球生态环境问题的日益严峻，生态修复工程逐渐成为各国关注的焦点。国土工程作为生态修复的重要组成部分，其目标是通过科学的规划与技术手段，恢复受损生态系统的结构与功能，提升生态系统的稳定性和服务价值。然而，在实际操作中，国土工程在生态修复领域面临着技术瓶颈、资金短缺、政策不完善、公众参与度低等多重困境。如何突破这些困境，优化国土工程的实施路径，成为当前亟待解决的问题。

因此，深入研究国土工程在生态修复中的现状，系统分析其所面临的困境，并探索有效的优化路径，对于推动国土工程在生态修复领域的高质量发展具有重要意义。本文将从技术、资金、政策和公众参与四个方面，详细剖析国土工程在生态修复中的困境，并提出针对性的优化策略，以期对相关领域的实践者和研究者提供参考和借鉴。

一、国土工程在生态修复中的现状与困境

（一）技术困境

1. 技术体系不完善

国土工程涉及的生态修复技术较为复杂，涵盖土壤修复、水体治理、植被恢复等多个领域。然而，目前的技术体系尚未完全成熟，许多技术仍处于试验阶段或小规模应用阶段，难以满足大规模生态修复的需求。例如，在矿山生态修复中，土壤重金属污染的修复技术仍面临效率低、成本高、二次污染等问题^[1]。

此外，针对不同地域、不同类型的生态系统，缺乏针对性的修复技术。由于生态系统的多样性和复杂性，一种技术往往难以适用于所有情况，导致在实际操作中需要频繁调整和优化，增加了修复的难度和成本。同时，技术之间的衔接和整合也存在不足，不同技术领域之间的壁垒限制了技术的综合应用效果，影响

了生态修复的整体成效。

2. 技术创新能力不足

国土工程领域的技术创新投入相对较少，科研力量分散，缺乏系统性的研究与开发。这导致在面对复杂的生态问题时，缺乏有效的技术解决方案。例如，在湿地生态修复中，如何平衡湿地的生态功能与人类活动的需求，仍是一个亟待解决的技术难题^[2]。

同时，技术创新过程中的产学研结合不够紧密，科研成果转化为实际应用的能力较弱。许多研究成果停留在实验室阶段，难以快速有效地应用到实际生态修复项目中，延误了生态治理的进程。同时，技术创新缺乏持续性和前瞻性，往往是在问题出现后才进行应急研发，缺乏对未来生态趋势的预判和准备，这使得国土工程在生态修复中时常处于被动地位。因此，加强技术创新能力的培养和提升，成为解决当前困境的关键所在。

（二）资金困境

1. 资金来源单一

国土工程的生态修复项目通常需要巨额资金支持，但目前资金来源主要依赖政府财政投入，社会资本参与度较低。这种单一的资金来源模式难以满足大规模生态修复的需求，导致许多项目因资金短缺而难以推进^[3]。

此外，政府财政投入往往存在周期性和不确定性，使得项目资金的稳定性和持续性难以保障。一旦政府财政出现紧张或政策调整，项目资金就可能面临被削减或中断的风险，进一步加剧了资金困境。因此，如何拓宽资金来源渠道，吸引更多的社会资本参与国土工程的生态修复项目，成为解决资金困境的重要途径。

2. 资金使用效率低下

在实际操作中，部分生态修复项目存在资金使用不合理、监管不力等问题，导致资金浪费现象较为严重。例如，一些项目在实施过程中缺乏科学规划，导致重复建设或资源浪费^[4]。

对于部分项目，在资金使用上缺乏透明度和公开性，使得资金的具体流向和使用情况难以追踪和监督。这不仅增加了资金被挪用或滥用的风险，也削弱了公众对项目的信任和支持。因此，如何提高资金使用效率，确保每一分钱都用在刀刃上，成为解决资金困境的另一大挑战。加强资金监管和评估机制，提升项目管理的科学性和透明度，对于优化资金使用、促进生态修复项目的顺利进行具有重要意义。

（三）政策困境

1. 政策法规不完善

当前，我国在国土工程生态修复方面的政策法规尚不完善，缺乏系统性和可操作性。例如，在生态修复项目的立项、审批、实施、验收等环节，缺乏明确的规范和标准，导致项目实施过程中存在诸多不确定性^[5]。

现有的政策法规对于生态修复项目的长期效益和可持续性考虑不足。许多项目在实施后，缺乏有效的后期管理和维护机制，导致修复效果难以持久。同时，政策法规对于生态修复项目的责任主体和权益保护也存在空白，使得项目在面临纠纷或问题时，难以找到明确的法律依据和解决途径。因此，完善政策法规体系，明确项目规范标准，加强项目后期管理和维护，以及明确责任主体和权益保护，是提升国土工程生态修复效果、保障项目顺利实施的关键所在。

2. 政策执行不到位

即使存在相关政策法规，但在实际执行过程中，由于监管力度不足、部门协调不畅等原因，政策执行效果往往不尽如人意。例如，在一些地区，生态修复项目因地方政府的短视行为而被搁置或延误^[6]。政策执行中存在信息不对称问题。信息传递不畅或解读不一致导致政策执行偏差，影响生态修复项目进度和质量，并加剧资源浪费和生态破坏。需加强监管力度、提升部门协调效率及信息透明度，确保政策有效实施。

（四）公众参与困境

1. 公众意识不足

部分公众对生态修复的重要性认识不足，缺乏参与意识和积

极性。这不仅影响了生态修复项目的实施效果，也增加了项目推进的难度^[7]。

公众缺乏环保意识，过于关注经济利益而忽视生态影响。提升公众环保意识和参与度对生态修复至关重要。相关部门需加强宣传，多渠道普及知识，提高公众意识和参与度。

2. 参与机制不完善

目前，公众参与生态修复的机制尚不完善，缺乏有效的沟通渠道和参与平台。这使得公众在生态修复过程中的作用难以充分发挥，难以形成全社会共同参与的良好局面^[8]。

公众虽有意参与生态修复，但常因缺乏明确流程与规范，导致效率低下甚至引发矛盾冲突。因此需完善参与机制，搭建多样化平台与渠道，制定明确流程与规范，以激发热情并提升效果。

二、国土工程在生态修复中的优化路径

（一）技术创新与整合

1. 加强技术研发与创新

加大对国土工程生态修复技术研发的投入，鼓励高校、科研机构与企业合作，开展产学研联合攻关。重点突破土壤修复、水体治理、植被恢复等关键技术，提高技术的适用性和可靠性^[9]。注重技术创新与实际应用结合，推动科技成果转化应用。通过技术创新解决现有技术难题并为未来生态修复提供先进技术手段。加强新技术、新工艺引进推广，提升国土工程生态修复技术水平。

2. 整合现有技术资源

对现有生态修复技术进行系统整合，形成技术集成平台，为不同类型、不同规模的生态修复项目提供一站式技术解决方案。例如，通过建立生态修复技术数据库，为项目实施提供技术参考和支持^[10]。

应加强技术交流合作，促进跨地区、跨部门的技术共享，避免重复研发。整合现有技术资源可提升生态修复效率和质量，促进行业技术进步与创新。同时需加强技术人员培训教育，提升其专业技能与综合素质，为生态修复提供更专业高效的技术支持。

（二）多元资金投入与管理

1. 拓宽资金来源渠道

鼓励社会资本参与国土工程生态修复项目，通过 PPP 模式、生态补偿机制等方式，吸引企业、社会组织和个人投资。例如，设立生态修复专项基金，为项目提供长期稳定的资金支持^[11]。

政府可通过税收优惠、财政补贴等措施激励社会资本参与生态修复。同时探索市场化运作机制，以项目收益权转让、碳排放权交易等方式为社会资本提供合理回报，从而拓宽资金来源，保障生态修复资金充足。

2. 加强资金监管与评估

建立健全资金监管机制，加强对生态修复项目资金使用的全过程监管，确保资金合理使用。同时，完善项目评估体系，对项目的生态效益、经济效益和社会效益进行科学评估，提高资金使用效率^[12]。

通过定期审计、信息公开提升资金使用透明度，防范挪用、

滥用。建立反馈机制，及时收集分析问题与挑战，为后续资金管理提供科学依据。对评估优秀项目给予表彰奖励，激励优质项目涌现，促进生态修复事业持续发展。

（三）政策完善与执行

1. 完善政策法规体系

加快制定和完善国土工程生态修复相关的政策法规，明确项目实施的各个环节的规范和标准，为生态修复项目提供法律保障。例如，制定生态修复项目的技术标准、验收标准等，确保项目实施的科学性和规范性^[13]。

政策法规应覆盖项目全生命周期，形成闭环管理，减少漏洞。法规需关注生态修复可持续性，鼓励环保材料和先进技术，减少二次破坏，确保长期效果。完善法规为生态修复项目提供法律支撑，推动实施，实现生态效益最大化。

2. 强化政策执行与监督

加强对政策执行情况的监督检查，建立健全责任追究机制，确保政策落地生根。同时，加强部门间的协调与合作，形成工作合力，共同推进生态修复项目的实施^[14]。

政策执行应公开透明并接受社会监督，建立信息公开制度定期发布进展成效，增强公众信任。加强执行人员培训教育，提升政策理解和执行能力，确保有效落实。通过强化执行监督，保障生态修复项目合规实施，实现生态效益最大化。

（四）公众参与与教育

1. 提高公众生态意识

加强生态修复的宣传教育，通过多种渠道普及生态知识，提

高公众对生态修复重要性的认识。例如，开展生态修复主题宣传活动，组织公众参观生态修复示范项目，增强公众的参与意识^[15]。

利用媒体平台发布生态修复信息和成功案例，扩大宣传覆盖面，引导公众树立正确生态观念。在学校、社区开展生态教育课程，从小培养环保意识，为生态环境持续改善奠定基础。这些举措能提升公众生态意识，为生态修复项目营造良好社会氛围。

2. 完善公众参与机制

建立健全公众参与机制，为公众参与生态修复提供便利条件。例如，搭建公众参与平台，鼓励公众通过志愿服务、捐赠等方式参与生态修复项目，形成全社会共同参与的良好氛围^[16]。

政府应建立反馈机制，及时回应公众关切，并设立公众监督小组，邀请代表参与项目监督评估，确保透明公正。这些措施既能提升公众参与度，又能推动生态修复项目顺利实施，实现生态与社会的双赢。

三、结论

国土工程在生态修复领域面临着技术、资金、政策、公众参与等多方面的困境，但通过技术创新与整合、多元资金投入与管理、政策完善与执行、公众参与与教育等优化路径，可以有效解决这些问题，推动国土工程在生态修复领域的高质量发展。未来，应进一步加强各方协同合作，不断完善生态修复体系，为实现国土空间的可持续发展提供有力保障。

参考文献

- [1] 焦思颖. 推进生态保护修复，服务生态文明建设——访自然资源部国土空间生态修复司司长周远波 [J]. 中国自然资源报, 2020-07-13.
- [2] 王志芳, 高世昌, 苗利梅, 等. 国土空间生态保护修复范式研究 [J]. 中国土地科学, 2020, 34(3): 1-8.
- [3] 彭建, 刘焱序, 董建权. “系统思维、整体视角、综合治理, 助力高质量发展”——“国土空间生态修复”专辑发刊词 [J]. 自然资源学报, 2020, (1): 1-2.
- [4] 沙金龙, 徐飞, 张文心. 构建我国废弃矿山生态修复公众参与机制研究 [J]. 中国矿业, 2022, 31(3): 49-53.
- [5] 卓文俊. 环境保护中的公众参与制度研究 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2017.
- [6] 杨振东, 王海青. 浅析环境保护公众参与制度 [J]. 山东环境, 2001(5): 15-16.
- [7] KRESKE D L. Environmental impact statements: a practical guide for agencies, citizens and consultants[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [8] 舒冰. 论我国环境保护中的公众参与制度 [J]. 内蒙古环境保护, 2004, 16(2): 6-9.
- [9] 何海珊, 赵宇豪, 吴健生. 低碳导向下土地覆被演变模拟——以深圳市为例 [J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8352-8363.
- [10] 黄小平, 张景平, 江志坚. 人类活动引起的营养物质输入对海湾生态环境的影响机理与调控原理 [J]. 地球科学进展, 2015, 30(9): 961-969.
- [11] 李淑娟, 郑鑫, 隋玉正. 国内外生态修复效果评价研究进展 [J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4240-4249.
- [12] 刘俊国, 安德鲁·克莱尔. 生态修复学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [13] 王聪, 伍星, 傅伯杰, 等. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向 [J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7333-7343.
- [14] 韩逸, 赵文武, 郑博福. 推进生态文明建设, 促进区域可持续发展——中国生态文明与可持续发展2020年学术论坛述评 [J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1259-1265.
- [15] 高吉喜, 张小华, 邹长新, 等. 筑牢生态屏障建设美丽中国 [J]. 环境保护, 2021, 49(6): 17-20.
- [16] 李百炼, 伍业钢. 谈“十四五”生态保护与绿色发展的生态关系 [J]. 科技导报, 2021, 39(3): 88-101.

高速公路改扩建工程交通安全管理策略研究

李珠君

云浮市广云高速公路有限公司改扩建管理处，广东 云浮 527300

摘要：高速公路改扩建工程是为了提升交通网络的通行能力和安全性，但在施工期间，交通安全问题尤为突出。施工区域与正常交通流的交织，交通标识不明确、交通流量不均衡、应急响应不及时等问题，都严重影响了施工期间的交通安全。因此，对高速公路改扩建工程中的交通安全管理进行研究具有重要的现实意义。本文通过分析当前高速公路改扩建过程中的交通安全管理现状，发现了主要问题，并提出了一系列策略，包括加强交通标识和标线的规范设置、优化交通流量管理、完善应急响应机制、加强公众安全教育等，以期能够减少施工期间的交通事故发生，保障过路车辆和施工人员的安全，提高施工效率。

关键词：高速公路；改扩建工程；交通安全；管理策略

Research on Traffic Safety Management Strategy of Expressway Reconstruction and Expansion Project

Li Zhujun

Yunfu Guangyun Expressway Co., Ltd. Renovation and Expansion Management Office, Yunfu, Guangdong 527300

Abstract: The purpose of highway reconstruction and expansion projects is to improve the traffic capacity and safety of the transportation network, but during the construction period, traffic safety issues are particularly prominent. The interweaving of construction areas and normal traffic flows, unclear traffic signs, unbalanced traffic flow, and untimely emergency response have all seriously affected traffic safety during the construction period. Therefore, it is of great practical significance to study traffic safety management in highway reconstruction and expansion projects. This paper analyzes the current status of traffic safety management in the process of highway reconstruction and expansion, finds the main problems, and proposes a series of strategies, including strengthening the standardized setting of traffic signs and markings, optimizing traffic flow management, improving emergency response mechanisms, and strengthening public safety education, in order to reduce the occurrence of traffic accidents during construction, ensure the safety of passing vehicles and construction personnel, and improve construction efficiency.

Keywords: expressway; reconstruction and expansion projects; traffic safety; management strategy

引言

随着我国交通基础设施的不断发展，高速公路的改扩建工程逐渐增多。这些工程在改善交通网络、提升通行能力的同时，也给交通安全管理带来了前所未有的挑战。高速公路改扩建工程期间，施工与交通流的交织使得施工区段成为高风险区域，交通事故的发生频率增加，给施工进度和通行安全带来严重影响。在这一背景下，如何有效进行交通安全管理成为亟待解决的问题。研究高速公路改扩建工程中的交通安全管理，不仅有助于提高施工期间的交通流畅性，还能减少因施工造成的安全隐患，保障过路驾驶员、施工人员以及行人的安全。

一、高速公路改扩建工程交通安全管理的必要性

（一）保障施工安全，减少事故发生

施工过程中，施工人员和施工机械与正常通行的交通车辆往往处于同一空间，这种复杂的交通环境增加了事故发生的可能性。施工区域的交通流动性较差，道路封闭、改道或施工设备的设置，都会对过往车辆产生干扰，造成司机的视线障碍或者反应

迟缓，进而引发交通事故。因此，交通安全管理在施工阶段显得尤为重要，它能够有效减少施工期间交通事故的发生，保护施工人员的生命安全，并保障过路车辆和司机的安全。通过合理的交通管制措施，标识的设置以及施工区域的安全防护，能够最大限度地减少事故的发生机率。比如：通过设立明显的交通标识和指示牌，提醒驾驶员注意前方的施工路段，提前减速，避免因为对施工区域的不熟悉或警示不足而发生碰撞。另一方面，交通安全

管理还包括对施工现场的严格监控,确保施工人员佩戴必要的安全防护装备,且所有施工机械的操作符合安全标准。可见施工现场的安全措施不仅仅是防范外部交通风险的需要,还涉及到施工过程中的操作安全^[1]。

（二）改善交通流畅性，减少拥堵

由于施工区域占用了部分车道或通行空间,原本顺畅的车流可能会受到阻碍,导致交通瓶颈的形成,进而产生长时间的交通拥堵现象。如果没有科学合理的交通安全管理措施,拥堵情况将会更加严重,造成更长时间的交通滞留,不仅影响司机的出行效率,还会增加能耗和排放,对环境产生不利影响。为了缓解这一问题,必须通过精确的交通组织方案和灵活的交通管制措施来减少拥堵,保证车辆能够在施工期间快速、安全地通过改扩建区域。这包括设置临时交通标志、优化交通信号灯的配时、加强交通疏导等手段,以便让车辆能够顺畅地流动,避免因交通管制不当而造成的交通堵塞。此外,合理的交通安全管理还需要对改道和施工区段的交通流量进行实时监控,及时调整交通管制策略,根据不同的交通流量状况进行适应性优化,以确保道路通行能力不被过度削弱,从而有效避免因交通流量不平衡而引发的严重拥堵^[2]。

（三）应对交通风险，预防安全隐患

高速公路改扩建工程涉及大量的施工操作和复杂的交通组织,施工过程中的安全隐患往往随时存在,特别是与交通流动相关的风险。这些风险不仅来自施工过程中的设备、材料和工人作业的安全问题,还包括了道路设施和交通组织安排不当所带来的潜在危害。在施工过程中,施工现场与正常交通流动的交集、施工车辆和设备的进出、临时交通标识的设置以及道路的封闭或改道等,都可能在没有妥善管理的情况下,成为交通事故的诱因。因此,为了应对这些交通风险,必须采取一系列有效的交通安全管理措施。通过加强现场的安全监控和风险评估,及时发现并排除施工区域内可能影响道路通行的隐患,能够最大程度地减少交通事故的发生^[3]。合理的交通安全管理措施还包括对潜在交通隐患的预警和处理,譬如在施工区域附近设置醒目的交通标志、减速标志和警告标识,提醒过路车辆和驾驶员提前减速、保持安全车距,避免因忽视交通管制而引发事故。

二、高速公路改扩建工程交通安全管理现状

（一）交通标识设置不明确

在高速公路改扩建工程中,交通标识设置不明确的问题较为突出,尤其是在施工区域与正常交通流交织的情况下。很多时候,临时设置的交通标志与标线没有达到应有的清晰度和规范性,导致驾驶员对道路状况的判断出现偏差。由于施工区域经常需要进行局部封闭或改道,而相关的交通标识往往设置不够及时或不够显眼,很多过路司机在经过这些区域时无法第一时间了解路况的变化,进而影响行驶安全^[4]。尤其是在夜间或能见度较低的情况下,一些交通标识的反光效果不足,无法在近距离内被驾驶员察觉,增加了行车风险。施工路段的标识和交通提示常常设置

不够合理,缺乏足够的引导作用。

（二）交通流量管理不合理

在高速公路改扩建过程中,交通流量管理的不合理经常成为导致安全隐患的重要因素。施工期间,道路常常需要封闭或改道,这对原有的交通流造成了显著的影响。然而,很多情况下,施工段的交通流量并未得到充分的预测与调控,导致车流集中在某些特定的路段。由于没有根据实时交通流量变化及时调整交通管制措施,部分路段可能出现车流量过大或过于密集的情况,这种交通不均衡往往加剧了拥堵,增加了发生交通事故的风险。特别是在改道和施工路段附近,由于未合理安排车道分配,导致驾驶员需要频繁变道,或者进入施工区时过于仓促,未能有效减速。这种情况使得原本顺畅的道路通行能力大幅下降,造成交通流动的堵塞,并影响了整个道路系统的运行效率。由于缺乏针对不同施工进度和车流量的灵活应对方案,交通流量管理在施工过程中显得尤为紧张和被动。尤其是在高峰时段,车流量的突然增加与施工区域的限制交织在一起,导致交通压力急剧上升,而在低峰时段,部分道路资源却未得到有效利用,进一步加剧了交通管理的不合理性^[5]。

（三）应急响应和事故处理机制不健全

在施工过程中,由于施工区域与正常交通流的交叉,交通事故的发生几率较高。然而,现有的应急响应机制往往未能及时有效地处理这些突发事件。事故发生后,由于缺乏完善的应急预案和快速响应程序,常常导致救援和事故处理的速度较慢,未能第一时间采取有效措施来疏导交通或清理事故现场,造成了长时间的交通停滞。很多施工区域缺少明确的事故处理流程,施工人员和管理部门在面对突发事件时常常无法迅速作出反应,导致事故现场无法得到及时有效的管理,甚至加剧了事故的影响。与此同时,施工期间的应急设备和救援力量配备不足,往往无法应对突发事件的实际需求,这也使得交通事故的后续处理更加复杂。在某些情况下,由于施工区域的特殊性,事故发生后的交通疏导工作也显得极为困难。对于事故发生后的救援和处理,相关人员的职责不明确,协作不畅,导致处理过程中的协调性和效率不足。

（四）公众安全教育和信息宣传不足

许多过路司机对于临时改道、施工区域的变化以及交通管制的具体措施了解不足,这使得他们在进入施工区域时容易忽视交通安全警示或反应迟缓。施工期间,很多施工单位并未在公众中进行有效的安全教育和信息宣传,导致许多司机未能提前了解施工路段的交通变化,甚至在通过施工区域时未能遵循合理的行驶规范。一些高速公路的施工区域缺少足够的警示性标识和信息板,而即使有相关标识,也常常由于不够显眼或内容不明确,难以引起司机的注意。更为严重的是,施工期间的交通安全信息并未有效通过各类渠道广泛传播,许多司机只有在临近施工区域时才发现路段的变化,无法提前做好应对准备。另一方面,行人在高速公路附近的通行安全意识普遍较低,特别是在施工区域的临时通道设置不完善时,容易发生不规范通行的情况,这为交通事故的发生埋下了隐患^[6]。

三、高速公路改扩建工程交通安全管理策略

（一）加强交通标识和标线的规范设置

在高速公路改扩建过程中，交通标识和标线的设置必须严格按照交通管理规范进行，以确保施工期间的道路使用安全。施工区域通常涉及道路封闭、改道或车道变化，这些变化会影响正常的交通流动，因此，临时标识和标线的清晰、准确和及时设置显得尤为重要。如果交通标识和标线不明确，驾驶员可能会误判路况，进而导致交通事故的发生。为此，施工单位必须根据工程进度和路况变化，定期检查并更新标识，确保施工期间的所有信息都能被过路司机及时、准确地接收到。特别是在施工区域的入口和出口处，需要设置明显的指示标志，引导司机提前减速并做好行车准备。而对于夜间或能见度较差的施工区域，应加强标识的反光性，确保司机在远距离就能清楚看到标识内容，减少突发情况带来的安全风险。

（二）优化交通流量管理与调控

施工期间，由于部分车道的封闭或改道，原本的交通流量可能被打乱，造成交通拥堵或不均衡的流动。为了有效避免这些问题，必须对交通流量进行科学的预测与合理的调控。交通流量监控系统应实时收集和分析车辆通行情况，根据实际车流量的变化，动态调整交通信号的配时与车道的分配，以确保交通流的畅通。尤其是在施工路段的入口和出口处，必须特别注意车流的引导，避免车辆集中过多导致的交通瓶颈。在高峰时段，交通流量可能会急剧增加，此时对车道数量的灵活调整和适时的交通管制显得尤为重要。同时，施工单位应与交通管理部门密切配合，制定出应对不同交通流量情况下的管理方案，确保每个环节都能及时响应突发情况，避免交通流动的长时间阻塞。对于低峰时段，交通管控应适度放松，避免资源浪费^[7]。

（三）完善应急响应和事故处理机制

在高速公路改扩建工程中，完善应急响应和事故处理机制至关重要，施工期间由于道路条件的变化以及施工区域与通行车辆的交汇，交通事故的发生概率较高。一旦发生事故，若应急响应机制不及时或不完善，将直接影响事故的处理效率和后续交通流的恢复。现有的一些应急预案往往未能覆盖施工现场的特殊需求，导致在事故发生后的第一时间内，事故现场的疏导和清理工作无法迅速展开。施工路段的交通管制、应急救援设备和人员调度等方面，往往存在不够迅速和协调的问题，导致交通事故的处理时间过长，进而造成更严重的交通堵塞。为了有效提高事故处理效率，应当建立起一套完善的应急响应体系，明确各方责任并加强协调机制^[8]。事故发生后，相关部门和人员应迅速到达现场，并按照预设的程序处理事故，以减少对通行车辆和施工进度影响。施工单位与交通管理部门需事先明确应急处理流程，确保在发生突发事件时能够快速调动资源，及时实施交通疏导，恢复交通秩序^[9]。

（四）加强公众安全教育与信息宣传

在高速公路改扩建工程中，公众安全教育和信息宣传的不足常常成为交通安全管理中的薄弱环节。很多司机在进入施工区域

时，由于没有事先获取充分的安全信息，往往忽视临时交通标志和警示，导致了交通事故的发生。在这种情况下，加强公众安全教育和信息宣传显得尤为重要。相关部门应通过多渠道传播施工期间的交通安全信息，包括施工路段的交通管制措施、改道信息和行驶要求等，确保过路司机和行人能够提前了解路况变化并做好相应准备。施工单位应在施工前和施工期间，利用交通广播、社交媒体、路面电子屏幕等平台及时发布信息，提醒公众注意安全，减少因信息不对称造成的交通安全隐患^[10]。同时，在施工区域附近设置明显的安全提示牌和宣传栏，向过路司机和行人清晰展示交通变化及相关安全注意事项。

四、总结

综上所述，高速公路改扩建工程中的交通安全管理是一项复杂的系统工程，涉及施工安全、交通流量管理、应急响应等多个方面。施工过程中，交通标识的规范设置、合理的交通流量调控以及完善的应急响应机制是减少交通事故、保障施工安全的重要措施。通过本研究提出的安全管理策略，可以有效解决改扩建期间面临的主要交通安全问题。实施这些策略，不仅能够提高施工期间的交通流畅性，还能减少交通事故的发生，提高施工效率和公众的安全感。

参考文献

- [1] 刘旭,王婷宇,贺陶安.高速公路改扩建旧路加铺方案探讨[J].湖南交通科技,2022,48(03):52-55+71.
- [2] 石文生,司锋超.高速公路改扩建工程项目施工安全管理分析[J].大众标准化,2023(15):97-99.
- [3] 李润山.高速公路改扩建工程道路交通安全管理策略[J].西部交通科技,2023(02):197-199.
- [4] 王彦锋.高速公路改扩建工程交通安全管理策略[J].四川建材,2021,47(01):213+215.
- [5] 孙宪魁.乌奎高速公路改扩建工程交通安全管理措施研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(04):331-333.
- [6] 付琰,王明法.公路改扩建工程中桥梁拓宽加固技术浅析[J].交通节能与环保,2023,19(S1):140-142.
- [7] 林高山.高速公路改扩建工程装配式挡墙成套技术研究[J].铁道建筑技术,2022,(09):203-206.
- [8] 刘志洁,朱益军,李金柱.公路改扩建工程中软土路基的沉降分析[J].山东交通科技,2023,(02):11-14.
- [9] 王德猛.高速公路改扩建工程路基路面拼接施工技术的研究[J].科学技术创新,2022,(15):98-101.
- [10] 王瑜.公路改扩建工程新旧路基衔接处施工质量控制研究[J].企业科技与发展,2022,(10):111-114.

市政桥梁预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术

肖才华

江西建工第四建筑有限责任公司, 江西 南昌 330000

摘要：市政桥梁是市政工程的重要构成，通过市政桥梁不仅可以实现城市不同区域的衔接，还可以有效缓解城市的交通压力，实现对城市纵向资源的合理利用，是推动城市经济发展的重要手段。预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术是市政桥梁施工中的一种新技术，该技术的应用不仅可以提高施工工程的质量，还可以提高施工的效率，是推动市政桥梁工程发展的重要手段。基于此，本文以市政桥梁为基础，对预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术的关键步骤进行分析，以期可以为相关人员提供理论参考。

关键词：市政桥梁；预应力；现浇箱梁；挂篮悬臂施工技术

Construction Technology of Suspended Basket for Pre stressed Cast in place Box Beam of Municipal Bridges

Xiao Caihua

Jiangxi Construction Fourth Construction Co., Ltd. Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract: Municipal bridges are an important component of municipal engineering. Through municipal bridges, not only can different areas of the city be connected, but also the traffic pressure of the city can be effectively alleviated, and the rational utilization of urban vertical resources can be achieved. It is an important means to promote urban economic development. The prestressed cast-in-place box girder hanging basket cantilever construction technology is a new technology in municipal bridge construction. The application of this technology can not only improve the quality of construction projects, but also enhance construction efficiency, and is an important means to promote the development of municipal bridge engineering. Based on this, this article analyzes the key steps of the cantilever construction technology of prestressed cast-in-place box girder hanging basket based on municipal bridges, in order to provide theoretical reference for relevant personnel.

Keywords: municipal bridges; prestress; cast in place box girder; hanging basket cantilever construction technology

引言

交通运输行业的繁荣、发展，有效推动了公路桥梁工程的发展。据交通运输部统计，截至2023年底，我国公路桥梁共107.93万座。这也间接地展示出国家对桥梁工程的重视程度。预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术顾名思义，是通过悬臂浇筑、预应力拉张等方式，实现超长度的桥梁工程施工。该技术的应用，降低施工难度的同时，也可以提高施工的质量，更重要的是，该施工技术的安全性更高，符合现代化市政桥梁施工的要求。所以在市政桥梁施工中，单位需要明确预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术的价值，从预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术的步骤入手，实现对各流程的精准控制，保障项目施工的质量，进而为推动市政桥梁工程的可持续发展助力。

一、预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术概述

预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术是结合箱梁的尺寸，确定支架与挂篮的位置，而后通过锚固系统、悬吊系统、行走系统等，将其设置成一个大型的“挂篮”，并在挂篮中通过浇筑混凝土等，完成后续桥梁的构建。在实际施工的过程中，挂篮是可以自由移动的，所以人们可以结合施工的要求，确定挂篮的位置。因此相较于其他施工技术来说，该技术施工效率高、稳定性强，可以有效提升桥梁的质量。与此同时，通过挂篮悬臂施工的方法，还可以有效避免传统市政桥梁施工中，重复施工的问题，其只需要对挂篮进行一次拆卸，是提高施工效率的重要手段。此外，该技术还具有较强的兼容性，可以与BIM等技术融合，实现施工流程优化的同时，也可以有效提高施工的精准性^[1]。

二、预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术的应用

（一）施工准备阶段

凡事预则立，不预则废。虽然从宏观的角度来看，预应力现

浇筑箱梁挂篮悬臂施工技术相对较为简单，但实际上，其施工工序也相对复杂，而且各个工序之间有着密切的关系，一旦某个环节出现问题，都会影响市政桥梁施工的最终质量。比如，预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术是采用统一的模块工程，一旦模块工程出现问题，会导致后续问题累积，给项目的质量留下安全隐患的同时，严重的甚至会导致整个施工偏离设计。所以在市政桥梁施工之前，施工单位需要做好施工前的准备工作，明确施工的要点与注意事项，从而降低施工问题发生的概率。比如，施工单位需要主动与设计单位沟通，利用 BIM 模型等，进行技术交底工作。通过该方式可以让施工单位快速了解施工要求，并明确施工的问题，是实现问题前置处理的重要手段。预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术对设备、材料的依赖程度相对较高，一旦设备、材料出现问题，不仅会影响施工的进度，严重的甚至会导致桥梁坍塌、凹陷等问题。所以在前期准备阶段，施工单位也要对设备进行详细的检查，若发现设备存在问题，需要第一时间上报，并由专业的维护人员来处理问题，保障后续施工工作的顺利进行。^[2]

由于环境等因素的影响，在项目建设期间，经常会出现实际施工进度落后于工程进度计划的情况。而在市政桥梁施工之前，施工单位与建设单位已经签署了相关合同，合同中对项目的交期进行了明确的规定，若施工进度无法满足设计的要求，会增加项目建设的成本。所以在施工之前，为了避免施工进度缓慢的问题，施工单位需要做好施工进度计划的审核工作，保障进度计划的合理性，从而确保项目可以在预定交期内完成^[3]。

（二）0# 块施工

0# 块施工虽然不属于预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术的构成，但其却是整个项目的起点，支撑着预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工的进程，是后续1#、2#、3# 块施工进行的基础，其质量也与市政桥梁施工的质量息息相关。在0# 块施工的过程中，为了提高其承载力，保障后续施工的稳定性的，需要在其墩身上埋设三角托架。0# 块的预应力体系包括纵向预应力体系、横向预应力体系、竖向预应力体系三种，在这三者的共同作用下，有效保障了0# 块的稳定性。通过对这三者的预应力体系分析可知，横向预应力体系与竖向预应力体系都在0# 块的表面，而竖向预应力体系则在0# 块的内部，是通过波纹管定位筋焊接的固定的钢筋骨架上，从而使整个预应力构成系统。而且在建设的过程中，为了防止钢束自重下落，需要在钢筋下安装螺旋筋、锚垫板等，实现对竖向预应力系统锚固端“托筋”的优化。0# 块主要采用的是预压材料，在预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工中，0# 块处于施工的中心位置，所以一旦0# 块出现问题，后续施工的质量也无法得到保障，所以在0# 块施工中，施工单位需要做好其预压处理工作，将其预压荷载控制为总荷载力的1.2倍，试验通过后，方可进行后续的操作。^[4-5]

（三）挂篮悬臂施工工艺流程

1. 选型

选型是挂篮悬臂施工技术的基础，不同的挂篮其施工流程也存在差异性，而且其作用也各有不同，所以在施工之前，施工单位需要结合市政桥梁项目的具体情况，选择合适的挂篮技术，从而实现在保障施工质量的基础上，尽可能地提升施工的效率^[6]。

当下常见的挂篮结构有桁架式挂篮、牵索式挂篮等，不同的挂篮方式还可以细分。比如桁架式挂篮可以细分为三角式挂篮、平行桁架式挂篮、菱形挂篮等。三角式挂篮与桁架式挂篮有着密切的关系，其是通过将受力主桁架改成三角形的组合，从而达到提高施工稳定性的目的。在三角式挂篮中该杆件是通过铰销的方式进行连接。由于三角形结构的稳定性，所以该挂篮方式的利用，不仅可以降低施工问题发生的概率，还可以提升施工的稳定性的，是当下常见的挂篮形式之一。但该结构也存在一定的问题，由于三角式挂篮的主桁架纵梁采用的是弯压构件，因此一旦纵梁过程，就会增加主桁架的压力，导致桁架出现弯曲、变形等问题，所以为了保障施工质量，其施工的节段程度不得超过4m，这在一定程度上也限制了三角式挂篮的使用范围。平行桁架式挂篮是由受力主桁架、悬吊、锚固系统等所构成的，是其在尾部设置一个平衡重量的土块，通过该方式，可以避免挂篮前倾问题，从而导致挂篮失稳等问题的发生。该技术的应用，具有施工简单的优势，而且其投入也相对较低，是降低施工成本、保障施工质量的重要手段。当然该施工技术也存在一定的问题，其挂篮的重量相对较高，导致其工作系数几乎保持在1.0以上，增加对材料质量依赖程度的同时，也影响了施工效率的提升。总之，不同的挂篮方式其优缺点各有不同，所以在施工中，施工单位需要做好挂篮的选型工作，强化挂篮与市政桥梁项目的契合度^[7]。

2. 制作与安装

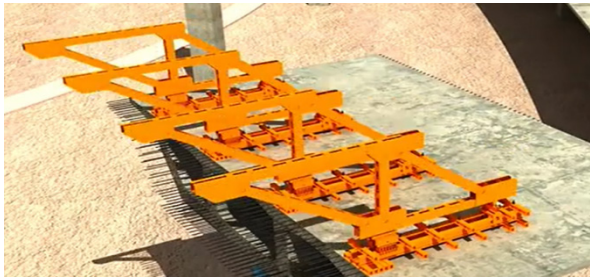
挂篮的制作是预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术的基础，是整个预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工的关键步骤，所以保障挂篮制作、安装的合理性，也是施工单位需要重点关注的内容。在进行挂篮制作之前，施工单位需要对设计图纸进行分析，明确挂篮的参数、尺寸、技术要求等，在确定完基础数据之后，方可进行材料的试拼操作。其具体参数如表1所示。

表1 挂篮技术参数

单个挂篮自重	挂篮的主桁最大挠度	挂篮底篮的最大挠度	工作纵向坡度
48t	<20mm	<26mm	± 3%

在确定完挂篮基础参数之后，就可以进行挂篮的制作与安装。施工单位需要在打扫干净的0# 块上进行测量放线，通过该方式，可以快速地确定滑道的位置，为后续施工的顺利进行助力。而后施工单位需要将滑块安装到既定位置上，并对其找平处理，避免滑块高度参差不齐，从而影响整个挂篮结构的稳定性。在安装中需要采用锚固技术等，安装滑道上压梁、前制座、反扣轮组等，使滑道可以与0# 块紧密衔接。滑道建设完成后，施工单位可以结合施工的要求，在指定位置上安装行走轮，通过行走轮确保后续预应力现浇箱梁挂篮设备可以移动，辅助工作人员完成2#、3# 块等的施工工作。行走轮安装完成后，需要将其穿入滑道后端，实现与主梁的有效连接。主桁架的安装可以采用装配式安装的方式，在其他地方将项目建设完成，而后将其吊装到滑道上。为了实现悬挂的效果，主桁架需要伸出箱梁端20cm。如图1所示。为了保障主桁架的稳定性，需要利用后锚压梁将主桁架压住，并安装后锚平连，用剪刀撑将主横整体连接。设置完成后，

工作人员需要对安装的效果进行检查,确保所有的材料安装都符合既定的要求,方可进行下部分的安装。下横梁的安装是通过吊杆连接的,吊杆前放横梁,并设置吊杆安装前下横梁,通过这两个横梁,可以设置出一两个支点,为底栏纵梁的安装提供保障。在安装完成后,施工单位就可以着手进行1#块外侧模板的安装。在施工中需要安装外滑梁和外导梁,并通过吊杆的方式与前横梁连接到一起,进行底膜安装浇筑,从而完成挂篮的拼装工作。由于后续浇筑施工重量相对较大,所以为了避免0#块失控,保障整个市政桥梁施工的稳定性的,施工单位需要在其对称的位置,设置相同的挂篮,同时施工^[8]。



> 图1 主桁架安装过程

3. 预压

挂篮在市政桥梁建设中,需要承受许多压力,而挂篮出现变形的,会影响市政桥梁施工的质量。所以在挂篮安装完成后,还需要对其进行预压处理。预压处理简单来说就是通过预应力钢筋、外加装置等,对挂篮结构进行施压处理,通过前置的预压处理,使挂篮结构可以前期适应后续施工的荷载,保障项目整个的稳定性与安全性。一般来说,为了保障施工的顺利进行,挂篮的承载力需要达到分段质量的1.5倍,所以在施工中,施工人员需要制定完善的处理方案,综合考量横梁等设备结构的情况,保障试验的合理性。在实际操作的过程中,工作人员可以采用5级加载的方式,并合理设置每级加载的重量,确保其可以满足混凝土浇筑施工的要求。在加载完成后,工作人员需要做好数据的记录工作,判断挂篮是否出现变形等问题,从而为后续施工提供必要的技术支持。在观测中,工作人员需要将重点放在焊缝等的

检测中,避免试验中焊缝出现裂缝等问题,助推后续挂篮施工的顺利进行。比如,在预压试验操作中,工作人员可以将压力分为0%、50%、70%、100%、120%五个阶段,每次试验的时间控制在1h,而当其压力加大120%后,需要静置24h,而后进行卸载处理。在测量完成后,工作人员需要对检测的数据进行分析,确保其在逐级加载中,观测数据的平均值之差不超过2mm。预压操作完成后,就可以进行浇筑处理。

4. 移动

浇筑完成且养护完成后,就可以进行挂篮的移动操作,完成下一块结构的施工。挂篮的前移,需要采用千斤顶、油泵等设备,而内模的前进,则是借助吊带和内滑梁的方式进行。在挂篮移动的过程中,工作人员需要控制好移动的速度与移动的偏差,避免偏差过大,从而影响项目施工的效果。在移动中,两套挂篮的移动距离需要保持一致,而且其移动的距离需要控制在40cm以内。在移动完成后,施工人员需要对挂篮的吊点、锚点等进行全面的分析与检查,确保其牢固且符合施工要求后,就可以进行操作。这就是一个完整的预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工过程。在施工的最后一个环节,会遇到合拢段施工,其施工是将挂篮移动到合拢段并进行锚固处理,安装纵向、横向预应力管,而后选择一天内温度最低的时间段完成肋性骨架的焊接工作。而后配置重水箱,在浇筑中一边拆除重水箱,而混凝土各项指标达到要求后,就可以进行拆除处理^[9]。

三、结语

综上所述,预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术在市政桥梁施工的应用,对于推动市政桥梁工程施工质量、施工效率的提升,都有着重要的作用,是推动桥梁工程行业发展的重要手段。所以相关单位也需要明确预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术的价值,以预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术为基础,做好施工步骤的分析工作,并做好施工工艺的优化与监督,提高市政桥梁施工的质量,进而为推动企业的可持续发展助力。

参考文献

[1] 吴洋. 公路桥梁预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术 [J]. 交通世界, 2024, (Z2): 212-214.
[2] 郝玉龙. 市政桥梁预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术的应用 [J]. 大众标准化, 2023, (06): 142-144.
[3] 黄龙江. 预应力现浇箱梁施工支架预压数据分析及应用 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5(14): 59-61.
[4] 杨富雄. 公路改建工程现浇箱梁支架搭设与预压重点技术探究 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5(14): 152-154+185.
[5] 徐宏敏. 桥梁工程中预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术解析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (09): 181-183.
[6] 郝玉龙. 市政桥梁预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术的应用 [J]. 大众标准化, 2023, (06): 142-144.
[7] 王鹏飞. 现浇箱梁挂篮悬臂技术在市政桥梁施工中的应用 [J]. 工程机械与维修, 2023, (03): 201-203.
[8] 贺军政. 市政桥梁预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术 [J]. 交通世界, 2022, (07): 20-21.
[9] 孟凡勇. 浅谈悬臂现浇箱梁挂篮施工工艺及质量控制 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2016, 12(11): 173-174.

智慧工地系统在建设项目中的应用

杨索

长阳城市建设投资控股集团有限公司, 湖北 宜昌 443500

摘 要：智慧工地系统在建筑工程领域的应用日益广泛，它通过物联网、大数据、云计算等现代技术手段，实现了对建筑工地的全方位数字化、信息化和智能化管理。该系统能够实时监控施工进度，实现施工质量的精准管理，同时对劳务人员实行实名制管理，确保施工人员安全培训的在线化与考核的有效性。此外，智慧工地系统还能远程监控和维护工地设备，实现物料使用的全程跟踪与管理。这些应用极大地提升了施工效率与质量，同时降低了安全风险和环境污染，提高了工地管理的科学性和精细化水平。

关 键 词：劳务实名制；视频监控；BIM 技术；扬尘治理；地面远程操控系统

Application of Smart Site System in Construction Projects

Yang Suo

Changyang Urban Construction Investment Holding Group Co., LTD. Yichang, Hubei 443500

Abstract: The smart site system is increasingly widely used in the field of construction engineering. It realizes the all-round digitization, information and intelligent management of construction sites through modern technical means such as the Internet of Things, big data and cloud computing. The system can monitor the construction progress in real time, achieve accurate management of construction quality, and implement real-name management for labor personnel to ensure the online safety training of construction personnel and the effectiveness of assessment. In addition, the smart site system can also remotely monitor and maintain site equipment to achieve the full track and management of material use. These applications have greatly improved the construction efficiency and quality, while reducing safety risks and environmental pollution, and improving the scientific and refined level of site management.

Keywords: labor real name system; video surveillance; BIM technology; dust control; ground remote control system

引言

“智慧工地”是指围绕人、机、料、法、环等关键要素，综合运用 BIM、物联网、人工智能、大数据、云计算、移动通信等数字技术和机器人等相关设备，通过数据采集、人机交互、感知、替代、决策、执行和反馈，形成有助于提高生产效率、管理水平和决策能力，有助于实现绿色化、工业化和智慧化的施工环境和条件。智慧工地顺应建筑行业发展趋势应运而生，它的意义不在于用一些新型的科技手段在项目现场简单的堆砌与罗列，而是实现对项目全过程、全要素、全方位监督和管理。

一、智慧工地系统的应用意义

建筑行业是我国国民经济的重要物质生产部门和支柱产业之一，同时，建筑业也是一个安全事故多发的高危行业。如何加强施工现场安全管理、降低事故发生频率、杜绝各种违规操作和文明施工、提高建筑工程质量，是一项重要研究课题。伴随着技术的不断发展，信息化手段、移动技术、智能穿戴及工具在工程施工阶段的应用不断提升，智慧工地建设应运而生。建设智慧工地在实现绿色建造、引领信息技术应用、提升社会综合竞争力等方面具有重要意义。

二、智慧工地系统应用的关键要素

（一）互联网 + 劳务管理

在当前的大环境下，人口红利正在逐渐减少。考勤，作为人力管理的基础，如果不清楚项目上有多少人员，工作就无法进行。此外，统计应用和分析也是个问题，而移动应用的出现完全可以解决每个工作面的工人数量问题。另一个关键点是现场的视频拍摄，这不是简单的工作日志能解决的，图像和影像可以更好地处理工人的工作情况。

（二）机械管理

特种作业人员管理有了机制保障，机械利用率提高70%以

作者简介：杨索（1989.10-），男，汉族，湖北宜昌人，本科学历，中级工程师，从事建筑工程管理工作。

上，智能加机械代替人工作业，施工效率成倍的提升。硬件普及率越高，人工需求量会越低。

（三）物料管理

对施工现场的物料进行数字化管理，实现物料的精准控制和优化配置。从物料的采购、进场、存储到使用，智慧工地系统都可以进行全程跟踪和监控，及时掌握物料的库存情况和使用进度，避免物料积压或缺货的情况发生，减少了因物料管理不善而导致的成本增加。

（四）方案与工法管理

在面对日益复杂的项目管理需求下，方案与工法的管理必须实现更高的可视化和响应速度。所有工艺工法的执行必须严格遵守既定流程，并且要将潜在风险的预判作为关键环节。通过智慧工地系统，我们可以有效地实现这一目标。该系统能够提供即时的现场信息获取，确保方案的实施过程中的每一步骤都能被清晰监控和高效管理。这样的管理方式不仅提高了施工效率，还能确保项目的安全和质量。

（五）生产与环境

项目的核心在于进度管理，计划的制定是项目成功的关键。这涉及到生产和组织的有效协调。初期，我们专注于主项目的推进，而往往忽视了辅助性计划的重要性。智慧工地系统的引入，可以帮助我们在项目启动之初就兼顾主线和辅助性计划，确保项目的全面性和协调性。通过这种方式，我们不仅能够保证主项目的进度，还能够有效地整合和执行辅助计划，从而提高整体项目管理的效率和质量。

三、智慧工地系统在建设项目中的实际应用

（一）项目概况

本项目位于宜昌市C县，北侧为主干道，南侧、东侧、西侧均为住宅区。项目总用地面积1634.72 m²，总建筑面积13187.10 m²，地下一层，地上19层，建筑高度69m，框架－剪力墙结构。建筑内容包括商业、办公、停车等。本工程地理位置特殊，红线范围内施工临时用地狭窄，施工管理难度较大。

（二）劳务实名制管理系统

劳务实名制管理系统是根据国家农民工实名制标准与要求而开发的一种信息化管理系统，它实现了对劳务市场的劳务人员进行全面、精细化的管理。该系统在建设项目中的应用主要体现在以下几个方面：

（三）人员管理

劳务实名制管理系统要求所有劳务人员进行实名制注册，包括提供身份证信息、联系方式、教育背景等，确保信息的真实性和完整性。通过人脸识别或身份证读取等技术手段进行身份验证，可以有效防止冒名顶替和非法人员进入工作现场，提高工作场所的安全性。

（四）考勤管理

系统能够实时记录劳务人员的上下班时间、加班情况、请假记录等考勤信息。支持人脸识别考勤方式，确保考勤数据的准确

性和及时性。这不仅避免了人工考勤的繁琐和错误，还为后续的薪酬计算提供了可靠依据。

（五）薪酬管理

根据考勤数据和工作表现评估结果，劳务实名制管理系统能够自动计算劳务人员的薪酬，并提供薪酬发放记录查询功能。这有助于劳务人员核对薪酬信息，确保他们的合法权益得到保障。同时，这也为劳务企业提供了便捷、准确的薪酬管理工具。

（六）班组管理与组织协调

劳务实名制管理系统支持班组管理功能，可以将工地人员按照班组进行分类和管理。这有助于施工组织和协调效率的提高，确保施工进度顺利进行。通过系统，工地管理方可以清晰地了解每个班组的人员构成、工作状态等信息，从而进行更加科学、合理的施工安排^[6]。

（七）培训与安全管理

系统还可以记录劳务人员的安全培训情况、事故记录等信息，加强安全管理。工地管理方可以通过系统进行培训计划的制定和管理，确保每位工人获得必要的安全教育和技能培训。这有助于提高工人的安全意识和操作技能，降低安全事故的发生概率。

四、数据分析与决策支持

劳务实名制管理系统能够对劳务用工数据进行深度分析，生成各种统计报表和图表，如出勤率统计、工作表现分析、薪酬分布等。这些报表有助于企业了解劳务用工的整体情况^[5]，为管理决策提供有力支持。通过数据分析，企业可以发现潜在的问题和改进点，从而制定更加科学、合理的劳务管理策略。

（一）解决农民工欠薪问题

劳务实名制管理系统通过工资审核和查询功能，有利于监督劳务企业的工资发放情况，从而解决农民工欠薪问题的发生。这有助于维护社会稳定，保障农民工的合法权益。

（二）应用实例与效果

在建筑施工项目中，劳务实名制管理系统被广泛应用于对工人身份、考勤、薪酬等方面的管理。例如，在本项目中，通过引入劳务实名制管理系统，实现了对数百名工人的全面管理。系统不仅提高了管理效率，还确保了工人的权益得到保障，同时提高了施工效率和质量。此外，该系统还为政府部门提供了劳务市场的动态数据支持，为制定相关政策提供了依据。

（三）视频监控系統

在现场项目工地的出入口、施工作业面以及塔吊等关键部位，我们定点布置了先进的网络高清摄像头，并运用了一套智能视频安全监控系统^[4]。这一系统能够实现对施工现场的异地监控与远程控制功能，极大地提升了施工管理的便捷性和效率。具体而言，通过该系统，管理人员可以随时随地查看工地的实时视频画面以及历史视频记录。

为了全面覆盖建筑工地的各个重要区域，我们在各出入口、塔吊操作区、通道、配电室以及围墙等部位均建设了高清视频监

控系统。这些高清摄像头能够直观地展示建筑工地现场各区域的详细状况，使管理人员能够清晰地看到施工现场的每一个角落^[1]。通过这样的监控方式，我们可以提前发现潜在的安全隐患，并立即采取措施进行处理，从而最大限度地确保工人的生命安全，有效避免生产安全事故的发生。

此外，该智能视频安全监控系统还具备强大的互联网视频直播能力。它能够将施工现场的视频信号实时转换为可通过互联网浏览器直接播放的视频数据。这一功能不仅方便了管理人员随时随地通过手机、电脑等设备查看施工现场情况，还为市级、区级远程视频监控子系统提供了安全、可靠的访问通道。通过这些措施，我们进一步提升了建筑工地的安全管理水平，为施工生产的顺利进行提供了有力保障。

（四）BIM 技术应用

本工程的 BIM（建筑信息模型）系统将全面而深入地涵盖建筑、结构、幕墙等多个专业领域，为此，我们特别设置了总承包 BIM 管理团队，旨在统筹协调土建、幕墙等专业分包的工作，确保各专业间的无缝衔接与高效合作。该团队将负责建立全专业的 BIM 信息模型，该模型将作为后续设计与施工的基础。

在本工程的施工过程中，我们将充分利用 BIM 模型的优势，开展全专业的综合深化设计。这包括但不限于对结构细节的优化、幕墙系统的完善等。同时，基于 BIM 模型，我们还将制定详细的施工方案，明确施工流程、工艺要求及质量控制标准。此外，BIM 模型还将被用于施工进度管理，通过模拟施工过程，预测潜在的延误风险，并采取相应的预防措施。

在工程造价方面，BIM 模型将提供精确的工程量计算，为预算编制提供有力支持。同时，通过 BIM 模型的可视化功能，我们将实现施工过程的可视化模拟^[2]，帮助施工人员更好地理解设计意图，提高施工效率。

值得一提的是，通过 BIM 专业建模，我们将对结构和幕墙的深化设计进行提前预演，对排版进行优化，从而确保设计的可行性和经济性。这一做法将问题前置于设计阶段，有效避免了施工过程中的变更和返工，进一步提高了现场施工工效^[10]。

（五）环境监测及扬尘治理系统

为确保施工现场的环境整洁与安全，我们采取了一系列有效措施对施工现场的出入口及场内道路进行了全面硬化处理，这不仅提升了道路的承载能力，还有效减少了扬尘污染。同时，整个施工现场被连续的绿植围档所封闭，围档的高度设定为 2 米，既起到了隔离作用，又美化了周边环境。

在施工现场的环形主干道外侧、外架以及塔吊等关键位置，我们安装了先进的自动喷淋系统。这一系统能够根据环境状况自动调节喷淋强度，从而实现了对施工现场的有效降尘。此外，我们还配备了环境监测仪，该仪器能够实时监测 PM2.5、PM10、风速、噪音、湿度以及温度等六项关键环境指标，并将监测数据实时接入到统一监控平台。当监测到 PM2.5 或 PM10 的污染指数超标时，自动喷淋系统会自动启动，及时喷洒水雾，有效改善工地扬尘污染状况^[3]。

对于自动喷淋系统未能完全覆盖的区域，我们采用了洒水车

进行喷洒降尘^[7]。洒水车每日在施工现场进行不少于 4 次的巡回喷洒，确保每个角落都能得到充分的湿润，从而减少扬尘的产生。同时，在车辆出入困难或洒水车难以到达的地方，我们安排了专人进行人工洒水清扫。这些工作人员每日同样进行不少于 4 次的人工洒水作业，确保施工现场的清洁与整洁。

（六）安全、质量管理信息系统

在现场安全与质量例行检查的过程中，现场管理人员能够充分利用现代科技手段来提升管理效率^[9]。具体而言，他们可以直接通过手机对发现的安全、质量问题进行拍照记录，并即时填写相关信息。这些信息包括但不限于问题的具体内容、发生的检查区域、相关的责任人、整改的期限以及可能涉及的罚款金额等。这一流程设计得既简便又高效，极大地减轻了管理人员的工作负担。

当管理人员完成信息的填写后，系统会自动将这些问题及整改要求推送给相关的整改责任人。这一步骤确保了信息的准确性和及时性，避免了传统方式中可能出现的信息传递延误或遗漏的问题。整改责任人在收到推送后，会立即了解到自己需要整改的内容和时间要求，从而迅速采取行动。

在督促整改的过程中，整改责任人可以通过手机 APP 实时反馈整改的进度和结果。这一功能使得监督责任人能够随时掌握整改的动态，确保整改工作按照既定的计划和时间表进行。一旦整改完成，整改责任人会将相关信息通过手机 APP 反馈给监督责任人，实现了安全隐患的闭环管理。

此外，通过手机 APP，相关人员还可以实时查看现场的视频监控。这一功能不仅提供了直观、真实的现场画面，还有助于管理人员更准确地了解现场的实际情况，从而更好地掌握整改进度，确保整改工作的质量和效果。

（七）塔吊地面远程操控系统

塔吊地面远程操控系统无疑是现代科技与建筑施工领域深度融合的产物，它巧妙地融合了物联网、5G 通信、大数据分析和人工智能等一系列前沿技术，展现了科技在推动行业变革中的巨大潜力。该系统通过安装在塔机上的高精度传感器与高清摄像头，能够实时、精准地采集塔机的各项运行数据以及周围环境信息^[8]。这些数据随后借助高速、低延迟的 5G 网络实现无缝传输，确保地面控制室能够实时掌握塔机的全面状态。

在地面控制室内，专业操作员通过配备的高精度控制终端和大尺寸高清显示屏，可以清晰地看到塔机的实时画面以及各项运行参数。这种身临其境的操控体验，使得操作员仿佛置身于塔机之上，能够准确、迅速地发出操作指令。指令通过 5G 网络迅速回传至塔机，实现远程精准操控，从而彻底颠覆了传统的高空作业模式，为建筑施工带来了前所未有的便利性和安全性。

在提升施工安全方面，塔吊地面远程操控系统的表现尤为卓越。它成功地将操作员从高空这一充满危险的环境中解脱出来，从根本上降低了作业过程中的风险系数。同时，该系统还内置了智能预警、紧急制动及故障自诊断等一系列高级功能。通过实时监测塔机的运行状态，系统能够及时发现并识别潜在的安全隐患。一旦发现问题，系统会立即发出警报，并通过紧急制动等措

施迅速响应，从而有效避免事故的发生。

这一系列的智能安全功能为施工人员的生命安全筑起了一道坚不可摧的防线。它们不仅提高了施工效率，更在保障人员安全方面发挥了至关重要的作用。可以预见，随着技术的不断进步和完善，塔吊地面远程操控系统将在建筑施工领域发挥越来越重要的作用，为行业的持续健康发展注入新的活力。

五、结语

智慧工地系统作为现代工程项目管理的重要组成部分，其通过引入先进的信息技术和管理理念，极大地提升了工程项目的精益化管理水平。这种管理模式的核心在于运用信息化手段，实现施工现场的质量、安全等各个层面的全面管理，从而确保施工过程的全流程、全方位、全要素的精准把控。随着技术的不断进步和应用的不断深入，未来的智慧工地将更加智能化、精细化，为实现高质量的工程项目管理提供更多可能。

参考文献

- [1] 厉明, 何子睿, 刘广东. 智慧工地安全及规范管理应用平台探讨 [J]. 科学与信息化, 2022, (16): 44-46.
- [2] 黄子俨. 基于 BIM 技术的智慧工地系统在项目建设管理中的应用 [J]. 企业科技与发展, 2022, (12): 85-87.
- [3] 刘璐. 智慧工地建设与建筑工程应用探讨 [J]. 陕西建筑, 2022, (07): 71-74.
- [4] 黄建明. 阿岗水库综合信息智能化管理系统关键技术研究 [J]. 水利信息化, 2018(06).
- [5] 张晓涵, 高居冠, 李明. 浅析智慧工地安全监督信息化管理的实施 [J]. 科学与信息化, 2022, (18): 190-192.
- [6] 刘刚. 智慧工地系统在场馆类建设项目安全管理中的应用分析 [J]. 居业, 2023(02).
- [7] 余瑞亮; 吕汉忠; 杜成华; 陈亚东; 尤旭升; 孟庆志. 5G 智慧工地管理系统在光源里棚户区改造项目中的应用 [J]. 建设科技, 2023(03).
- [8] 章文菁; 李楠. 智慧工地管理平台在城市大型综合体项目施工过程中的应用 [J]. 低碳世界, 2023(09).
- [9] 朱爽. 基于“互联网+智能化”的智慧工地管理系统研究 [J]. 大众标准化, 2023(18).
- [10] 王秀明. 浅析房屋建筑维修及质量监管 [J]. 全面腐蚀控制, 2020(10).

工程造价审计在建设项目中的关键作用与实施策略

张获

湖南涟钢福安建设有限公司, 湖南 娄底 417009

摘要：随着我国建筑行业规范化发展进程加速，工程造价审计作为项目的核心环节，在保障工程质量、提升投资效益方面发挥着不可替代的支撑作用。当前建设项目全生命周期中存在的造价动态性、风险隐蔽性及合同复杂性，亟需通过系统性审计手段实现精准管控。本文立足建设项目管理实践，深度剖析工程造价审计在成本动态监控、风险预警防控、合同合规审查三维度形成的闭环管理价值，创新性提出融合全过程审计体系、智能技术应用、协同治理机制及复合型人才培养的“四位一体”实施策略。通过某大型工业厂房建设项目案例的实证分析，验证了新型审计模式在平衡工程经济性与规范性方面的显著成效，为构建现代工程审计体系提供兼具理论深度与实践价值的解决方案。

关键词：工程造价审计；建设项目管理；成本动态控制；风险协同治理

The Key Role and Implementation Strategy of Engineering Cost Audit in Construction Projects

Zhang Huo

Hunan Lianyuan Steel Fuan Construction Co., LTD. Loudi, Hunan 417009

Abstract: Along with the acceleration of the standardization of construction industry, engineering cost audit, as the core link of project management, plays an irreplaceable support role in ensuring engineering quality and improving investment efficiency. At present, the dynamic cost, hidden risks and complexity of contracts in the whole life cycle of construction projects urgently need to achieve accurate control through systematic audit means. Based on construction project management practice, this paper deeply analyzes the closed-loop management value of project cost audit in three dimensions: cost dynamic monitoring, risk early warning prevention and control, and contract compliance review, and innovatively puts forward a "four-in-one" implementation strategy that integrates the whole process audit system, intelligent technology application, collaborative governance mechanism and compound talent training. Through the empirical analysis of a large industrial plant construction project, this paper validates the remarkable effect of the new audit mode in balancing engineering economy and standardization, and provides a solution with both theoretical depth and practical value for the construction of modern engineering audit system.

Keywords: project cost audit; construction project management; cost dynamic control; risk collaborative governance

引言

在建筑行业高质量发展的时代背景下，建设项目规模扩大与复杂性提升的双重挑战，工程资金流动管理是否合理合规已成为制约行业可持续发展的关键问题。面对隐蔽工程增量、材料价格波动、合同纠纷频发等现实痛点，传统碎片化的造价审计模式已难以适应全生命周期管理的精细化需求。工程造价审计作为贯穿项目决策、实施到运营的“经济体检”机制，既是防范资金流失的防火墙，更是激活投资效益的催化剂。本文立足建设工程管理转型升级的实践诉求，通过解构审计工作在成本、风险、合规维度的立体化价值，探索数智化转型与协同治理双重驱动下的创新实施路径，为破解“投资超概、结算超支”的行业顽疾提供系统性解决方案^[1]。

一、工程造价审计在建设项目中的关键作用

（一）成本控制与预算执行监督

在建设项目全生命周期中，工程造价审计宛如一道精密运转的“经济防线”，通过动态追踪资金流动轨迹，成为遏制成本失控的关键屏障。审计人员以施工图纸为蓝图，以合同条款为标

尺，通过现场踏勘与数据比对，不仅能够实时监测人工、材料、机械等核心成本的消耗轨迹，更能敏锐捕捉隐蔽工程变更、设计签证冗余等潜在超支风险点。在预算执行层面，审计工作突破了传统“事后核量”的局限，通过建立分阶段预算执行预警模型，将工程进度款支付、暂估价材料认质认价等环节纳入动态监管网络。这种贯穿始终的监督机制，既防止了施工单位虚报工程量、

高估冒算的灰色操作，又倒逼建设单位建立科学决策机制，使每一笔资金支出都能在阳光下流转。实践中，某项目在主体施工阶段通过审计发现混凝土浇筑量系统性偏差，经溯源发现系预算编制时未充分考虑异形结构节点施工损耗，审计组随即联动设计、施工方开展工艺优化，在保障工程质量前提下成功挽回隐性成本流失^[2]。

（二）工程风险识别与防控作用

工程造价审计在建设项目中如同一位敏锐的“风险解码者”，通过穿透式审查将潜伏于工程肌理中的风险因子逐一显影。在复杂施工场景下，合同条款的模糊地带、设计变更的蝴蝶效应、材料市场的价格震荡以及施工质量的隐蔽瑕疵，往往交织成难以察觉的风险网络。审计工作以全生命周期视角切入，借助工程量清单复核、进度款支付曲线分析、变更签证溯源性审查等手段，对工程实施中的风险敞口进行多维度扫描。例如，某市政项目审计中发现基坑支护方案与地质勘察数据存在逻辑断层，经三维建模模拟发现支护强度不足可能引发塌方风险，审计组及时叫停施工并推动设计优化，避免了可能的经济损失与安全事故。这种风险防控机制不仅体现在技术层面，更延伸至管理维度——通过梳理合同支付条款与履约保函的关联性，审计能预判承包方资金链断裂引发的连锁反应；通过监测主材价格波动曲线，可提前锁定暂估价材料调差争议的触发阈值。工程造价审计将“事后灭火”转化为“事前预警”，在风险尚未扩散时便构建起动态隔离屏障，使建设项目在风险可控的轨道上行稳致远^[3]。

（三）合同履约合规性审查功能

工程造价审计在合同履约维度上犹如架设在建设主体间的“法律准绳”，通过对契约文本与实践操作的交叉验证，确保各方权责在工程实施中精准落地。当施工蓝图转化为实体建筑时，隐蔽工程签证的随意性、进度款支付的时序偏差、索赔争议的边界模糊等问题，往往使合同条款沦为“纸上堡垒”。审计人员以契约精神为内核，深度解构合同价款调整机制、变更索赔触发条件、质量奖惩实施细则等条款，既核查施工方是否按图施工、依约报量，也审视建设单位是否存在过度让利、违规签证等失范行为。在某跨江桥梁项目中，审计组发现总包单位将钢结构专业分包给资质不符的企业，合同约定的技术标准与现场施工工艺存在明显断层，随即启动逆向溯源机制，不仅追溯出招投标环节的围标嫌疑，更推动建设方依据审计建议重新锁定分包准入红线。这种穿透式的合规审查，既能遏制承包方“低价中标、高价索赔”的博弈策略，又可矫正建设单位“以审代管”的懒政思维，使工程款支付、工期索赔、质量争议等高频纠纷在契约框架内找到平衡支点^[4]。

二、工程造价审计在建设项目建设中的实施策略

（一）实施全过程工程造价审计

全过程工程造价审计的核心在于打破传统事后审计的局限性，将审计触角延伸至项目决策、设计、招标、施工及结算等全周期环节，形成覆盖“事前预防、事中控制、事后评价”的动态监督体系。在项目前期决策阶段，审计人员需深度介入可行性研

究与投资估算审查，通过市场调研与方案比选，确保预算编制的科学性与经济性；设计阶段则聚焦图纸审核与工程量清单复核，识别设计冗余或技术漏洞，避免因方案缺陷导致的隐性成本攀升。进入施工阶段后，审计工作重点转向合同履行跟踪与进度款支付审核，结合现场踏勘与隐蔽工程记录，动态监控材料价格波动、工程变更签证的真实性与合理性，防止资源浪费与资金挪用。竣工结算阶段需以合同条款为依据，严格核查竣工资料完整性及结算工程量准确性，尤其对争议性索赔事项进行多维度复核，保障资金支付的合规性。通过全过程的闭环管理，审计不仅能够及时纠偏纠错，更能将风险防控关口前移，形成“发现问题—反馈整改—优化机制”的良性循环，最终实现工程造价在技术可行性与经济合理性之间的最优平衡^[5]。

（二）利用新技术提升审计能力

工程造价审计能力的现代化升级，离不开新技术的深度赋能。当前，建筑信息模型（BIM）技术可通过三维建模与数据集成，实现工程量自动提取、造价信息动态可视，使审计人员能够穿透图纸与报表的二维局限，精准识别设计变更对成本的影响轨迹。大数据分析技术的引入，则能对历史工程数据、市场价格波动、供应商信用记录等海量信息进行交叉比对与趋势预测，辅助审计人员快速定位异常成本项或潜在风险点，提升审计决策的客观性与前瞻性。同时，人工智能技术通过构建智能审核模型，可对工程变更签证、结算文件等文本资料进行语义分析与逻辑校验，自动识别合同条款冲突或工程量计算偏差，大幅减少人工复核的疏漏风险。此外，区块链技术为审计数据溯源提供了不可篡改的技术保障，通过将招投标文件、支付凭证等关键信息上链存证，确保审计证据链的完整性与可信度。新技术的融合应用，不仅重构了审计作业流程，更推动了审计模式从“事后纠偏”向“全程智控”的转型，为工程造价审计注入精准化、智能化的核心驱动力^[6]。

（三）多元主体协同的审计机制

工程造价审计效能的提升，需打破传统审计模式下各参与方“各自为政”的壁垒，构建建设单位、审计机构、监理单位、设计单位及施工单位协同联动的治理格局。通过建立跨主体的信息共享平台，实现工程量清单、合同变更、支付凭证等核心数据的实时互通，确保审计依据的全面性与时效性；定期组织多方参与的联席会议，围绕工程进度、成本偏差、风险预警等议题开展联合研判，将审计视角从单一财务核查拓展至技术、管理、法律等多维度的交叉验证。在协同机制运行中，需明确各方权责边界，例如由建设单位主导审计目标制定，监理单位提供现场监督数据，设计单位解释技术变更依据，施工单位配合资料真实性核验，形成“专业互补、相互制衡”的协作体系。同时，引入第三方咨询机构作为独立评估方，对争议性问题进行技术论证或造价复核，增强审计结论的公信力。通过构建“信息互通—问题共商—责任共担”的动态反馈机制，多元主体协同不仅能有效弥合专业认知差异，更能凝聚多方智慧，推动审计工作从被动纠错向主动优化的方向转型，最终实现工程建设全链条的透明化、规范化运作^[7]。

（四）培养专业的审计协作团队

工程造价审计效能的持续提升，核心在于构建一支兼具专业素养与协作能力的复合型审计队伍。在团队组建层面，需突破单一造价专业背景的限制，整合工程管理、法律、信息技术等多元学科人才，形成知识结构互补的协作单元。通过建立阶梯式培训体系，定期开展工程计价规范、合同风险识别、新技术工具应用等专项课程，强化团队成员对行业政策、技术标准及审计流程的深度理解。针对复杂项目的实战需求，可组织跨专业联合研讨与模拟审计演练，推动工程师、律师、数据分析师在案例分析中碰撞思维，锤炼团队从技术合规性、法律风险性、经济合理性多维度解构问题的综合能力。在协作机制上，需搭建内部知识共享平台，将审计经验、典型案例、行业动态等资源系统化沉淀，形成可迭代更新的“审计智慧库”，助力新成员快速融入团队作业节奏。同时，引入动态考核激励机制，将项目参与度、创新贡献度、协同效率等指标纳入绩效评估，激发团队成员主动拓展专业边界的积极性。值得注意的是，团队建设应注重与行业发展的同频共振，鼓励成员参与学术交流、标准编制等外部活动，既拓宽专业视野，又为团队注入前沿理念与实践经验。唯有通过系统性的人才培养与协作机制创新，方能锻造出既能精准把控审计要点、又能高效协同攻坚的“审计铁军”，为工程造价审计的高质量实施提供坚实保障^[8]。

三、某大型工业厂房建设项目工程造价审计案例分析

某大型工业厂房建设项目作为区域产业升级的重点工程，具有结构复杂、工艺设备集成度高、施工周期紧的特点，其工程造价审计实践为行业提供了多维度的经验参考。

项目初期，审计团队即介入前期决策阶段，针对设计方案的经济性开展比选分析，发现部分工艺布局存在冗余空间，通过优化设备管线走向及钢结构节点设计，有效避免了后期施工中的返工风险。进入施工阶段后，审计组依托全过程跟踪机制，发现土建工程中因地质条件变化导致的桩基调整方案未及时履行签证程序，且部分甲供材料采购价格偏离市场信息价，随即联合建设、

施工、监理三方召开专项协调会，明确变更责任归属并重新核定材料价差，避免了近千万元的成本争议。在机电安装专项审计中，审计人员利用 BIM 模型对管线综合排布进行碰撞检测，提前识别出通风管道与消防设施的空间冲突问题，协同设计单位调整深化图纸，既保障了施工进度，又规避了拆改损失。项目竣工结算期间，审计团队针对施工单位提交的工程量清单开展全面复核，发现钢结构防火涂料工程量因计量规则理解偏差存在重复申报。偏差原因在于：一方面，施工人员对计量规则的细节和内涵研究不够深入，未能充分把握其复杂性和准确性要求；另一方面，施工单位与设计、监理等各方沟通不充分，未明确统一的执行标准。此外，施工团队可能因经验不足或疏忽大意，在申报工程量时未严格按规则核算，甚至未及时跟进规则的更新，最终导致重复申报等问题的出现。通过调取施工日志、监理旁站记录及隐蔽工程影像资料进行交叉验证，最终核减虚报产值^[9]。

值得注意的是，该项目审计过程中凸显出工业厂房特有的审计难点：一是专业设备安装的技术标准与造价匹配度需精准把控，二是 EPC 总承包模式下设计、采购、施工的接口责任需清晰界定。为此，审计团队引入第三方技术顾问对特种设备的安装规范及计价依据进行专项论证，同时建立合同条款与履约行为的动态对照表，确保工程价款的支付始终与合同约定形成闭环。

该案例表明，工业厂房项目的造价审计需深度融合工程技术与经济分析，既要依托信息化手段实现数据穿透，又要通过多方协同机制化解专业壁垒，最终在保障工程质量的前提下实现投资效益最大化，为同类项目的审计实践提供了“技术 + 管理”双轮驱动的解决方案^[10]。

四、结束语

工程造价审计作为建设项目投资管控的核心手段，其价值贯穿于工程全生命周期管理。本文通过理论分析与案例实证，揭示了审计工作在成本约束、风险预警及合规监管中的不可替代性，尤其在当前建筑业转型升级背景下，全过程跟踪审计与数字化技术的深度融合，为破解传统审计滞后性问题提供了新路径。

参考文献

[1] 杨林涛. 工程造价的风险因素及各阶段工程造价审计要点梳理 [J]. 房地产世界, 2023, (22): 102-104.
[2] 胡文月, 刘长迎, 单文. 建筑工程造价审计中常见问题及解决办法 [J]. 房地产世界, 2023, (19): 97-99.
[3] 柴艳峰. 基于工程审计的造价全过程控制策略研究 [J]. 居舍, 2021, (25): 168-169.
[4] 王鹏羽. 工程造价控制中对工程审计的应用探讨 [J]. 中国科技投资, 2021, (10): 144-146.
[5] 周渊. 基于工程审计的造价全过程控制策略研究 [J]. 中国管理信息化, 2021, 24(02): 28-29.
[6] 王鸿雁. 工程造价控制中工程审计的应用 [J]. 住宅与房地产, 2020, (27): 28-35.
[7] 林振兴. 工程审计在工程造价控制中的应用分析 [J]. 江西建材, 2020, (07): 212-213.
[8] 兰犇惊. 浅谈建设项目跟踪审计中工程造价审计 [J]. 写真地理, 2020, 0(17): 0158-0158.
[9] 钱卓娜. 建设项目跟踪审计控制工程造价研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2020, (05).
[10] 马宇明. 建设项目工程造价跟踪审计与合同管理研究 [J]. 住宅与房地产, 2021, No.614(17).

新型装配式施工围挡在江苏公路工程建设中的应用

张杰

南京市公路事业发展中心，江苏 南京 210000

摘 要： 施工围挡是工地现场周围设置的一种安全防护设施，主要用于隔离工地与周围环境，保护工地内的人员和设备安全。随着公路工程项目规模的快速发展，特别是改扩建项目、穿越城镇项目数量的不断增加，对公路工程文明施工过程中围挡设置的功能性、美观性、可周转性要求也不断提高。传统的围挡材料及设置方式已不能完全满足公路工程建设高质量发展的要求。本文通过开展新型装配式在公路工程建设中的应用，对比分析了新型装配式围挡与传统围挡的性能差异，为工程建设行业的围挡标准化建设提供参考。

关 键 词： 公路工程；文明施工；施工围挡；新型装配式

The Application of New Prefabricated Construction Site Enclosures in Jiangsu Highway Engineering Construction

Zhang Jie

Nanjing Highway Development Center, Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract: Construction barriers are safety protection facilities set up around construction sites, primarily used to isolate the site from its surroundings and protect the safety of personnel and equipment within the site. With the rapid development of highway engineering projects, especially the increasing number of expansion and renovation projects and those crossing urban areas, the requirements for the functionality, aesthetics, and reusability of barriers in civilized construction processes have also increased. Traditional barrier materials and installation methods can no longer fully meet the demands of high-quality development in highway engineering. This paper explores the application of new prefabricated components in highway engineering, comparing and analyzing the performance differences between new prefabricated barriers and traditional ones, providing a reference for standardized barrier construction in the engineering industry.

Keywords: highway engineering; civilized construction; construction fence; new prefabricated assembly

前言

在公路工程项目建设中，安全文明施工管理对于项目的顺利开展有着至关重要的作用和意义。通过有效的安全文明施工管理，能够有效减少安全事故，避免对施工进度产生不利影响，同时减少项目周边居民的投诉，从而保证工程的顺利开展。^[1,2] 因此，加强公路工程安全文明施工管理，对于工程质量的保障，施工全过程的安全实施具有十分重要的意义。

近年来，在交通工程建设领域，已将文明施工纳入工程建设管理的一项重要工作。交通运输部2016年下发的《交通运输部关于公路水运品质工程的指导意见》（交安监发[2016]216号）、《公路水运品质工程评价标准（试行）》中对场站建设标准化、文明施工管理精细化等均提出了明确要求。江苏省交通建设管理局也下发了《公路工程现场安全管理标准化技术指南》对现场的安全文明管理提出了标准化建设要求。

文明施工管理的关键项目包括现场围挡、封闭管理、施工场地、材料管理、现场办公与住宿、现场防火。其中工程施工现场围挡是文明施工管理的重要组成部分。^[3] 围挡是工地周围设置的一种安全防护设施，主要用于隔离工地与周围环境，保护工地内的人员和设备安全，防止外界人员和车辆的非法进入，同时提醒过往行人和车辆注意工地施工，避免意外事故的发生。除此以外，施工围挡具有美化施工现场表里环境的作用。^[4] 围挡不仅代表建设单位、施工单位的形象，也代表地区建设工程行业的发展水平、城市的整体形象，直接影响居民的生活环境和城市景观。

针对当前施工现场文明施工管理中的不足，开展施工围挡提档升级，规范统一围挡设置，对保障施工安全管理，优化施工作业环境，降低周边环境影响具有重要意义。

一、施工围挡设置现状

通常根据施工所在区域的道路性质、周边环境、施工工法、施工阶段及占道时长等因素,施工围挡会进行分级、分类设计,并会根据不同阶段选择不同的施工围挡的标准和技术参数。^[5]

(一) 围挡结构形式分类研究

目前国内施工围挡主要的结构形式有传统的砌筑式围挡、装配式围挡、移动式围挡等。

1. 砌筑式围挡

砌筑式围挡通常采用空心砖、水泥砂浆等材料砌筑而成,由围墙、立柱、压顶组成。围墙采用砖砌,底色为白色,通常在底部设置高度为300mm的深色踢脚线,砖墙厚度不小于240mm,每间隔4米设置400mm×400mm立柱。为了美观效果,通常立柱采用表面做贴砖美化处理的砖柱,面层颜色同围墙踢脚线颜色;压顶采用砖砌体砌筑方式,颜色同围墙踢脚线颜色。砖砌式围挡在建筑施工领域应用较广泛,其外观稳重大气,使用寿命长。适用于工期在一年以上工程建设项目。

2. 装配式围挡

装配式围挡是一种由多个预制构件组成的围栏系统,通过简单的拼装和安装即可形成一个围合的空间。它具有可移动、可重复使用、安装快捷等特点。装配式围挡通常由预制钢筋混凝土基座、型钢立柱、压顶、地梁、面板、斜撑等拼装组成。其中,面板的材质主要有彩钢夹芯板、钢板、PVC板等。

近年来,在传统砖砌式围挡基础上,还演变出了砌体+可装配化板材结构型式的围挡结构。即以混凝土或砖砌体作为基础和立柱,以彩钢夹芯板、PVC板等可装配化板材为挡板。可装配化板材与基础、立柱采用螺栓等措施进行有效牢固连接。装配式围挡适用于工期在1个月以上的施工现场。

3. 移动式围挡

移动式围挡主要用于30天以下短期零散的临时施工。围挡使用注水式全塑围挡(需按规定注满水,防止倾倒),俗称水马。注水式全塑围挡采用高密度聚乙烯、抗UV剂、色料等材料制作而成。通常注水式全塑围挡可按照需求进行定制,耐候性能为-20℃~+60℃;连接方式为卡扣拼装连接;上部设警示器插孔。

注水式全塑围挡具有较好的抗缓冲弹性,能吸收强大的冲击力。搬运轻巧,机动性高,适合各种道路施工,无需路面施工即可安装。

(二) 不同材质围挡特点

1. 彩钢围挡

彩钢围挡的主要材质是彩钢板,多用于短期施工,或者需要经常性拆除挪用的施工现场,使用一年时间为佳。彩钢板围挡因为主要板面是彩钢板,所以韧性较差,经常性反复挪用拆装,易变形且不可恢复、美观度一般。彩钢板的厚度是主要影响其价格的因素。优点在于拆装便捷,价格便宜。

2. PVC围挡

PVC围挡板是以聚氯乙烯为原料,通过热压工艺加工而成

的板材。它具有轻质、高强度、防水、防潮等优点,而且颜色多样,适用于多种场合的装饰和防护。

PVC围挡无需焊接,加工速度快,交货期短;安装简便,安装费用低;拆卸与移动方便,便于特殊情况下的疏导;遭破坏后更换快捷,PVC围挡可满足一般工地工程的封闭防护需求,在城市中施工使用多彩的PVC围挡使工程形象提高。

3. 彩钢夹芯板围挡

彩钢夹芯板围挡是由两层彩涂钢板和中间填充聚氨酯或岩棉等材料制成的板材。这种围挡板具有保温、隔热、隔音等性能,适用于各类建筑的保温和防护。

彩钢夹芯板具有自重轻,施工速度快(无湿作业,不做二次装修,施工周期可缩短40%以上),色泽鲜艳(无需表面装饰,彩色镀锌钢板防腐层保持期长)的特点,是一种集承重、保温、防水、装修于一体的新型围护结构材料。

4. 绿植围挡

绿植围挡,是将铁皮围挡与绿植盆栽相结合的一种新型围挡。造价成本较高,相对仿真绿植围挡效果更好,造型更精美。该类围挡能够有效提升建筑工地面貌和城市形象,且实现了建设工程围挡设置管理标准化、景观化。对比传统的围挡上张贴宣传画,更加环保美观,施工结束之后,绿植围挡可拆除清洗再次利用,是十分环保的新型围挡。

5. 冲孔网围挡

冲孔围挡是一种以镀锌材料为主要材料的穿孔板。这种围挡既能起到安全隔离施工保护的作用,又能美化城市的环境,进一步促进了城市建设的标准化。可用于穿越城市地段的高速公路、铁路、地铁等交通市政设施中作为环保噪声治理屏障。冲孔板具有良好的透风性也可以用于沿海台风防护。

二、新型装配式围挡

随着对施工围挡安全、绿色、美观、高效、耐久等特性要求的不断提升,相关厂家也在对施工围挡不断的升级改造,涌现了新的围挡产品,在各方面性能上实现了有效提升。^[6]新型装配式围挡主要在以下几方面具有较好的性能优势。

(一) 安全性能提升方面

新型围挡的可装配面板采用镀锌烤漆板和镀锌烤漆方管立柱,镀锌层均通过加厚处理,可起到防锈并增加使用寿命的作用。连接处设计T型螺栓加连接槽,叉车口和立柱安装槽均为镀锌板包边,底座配备LED太阳能发光装置,起到亮化和主动警示的安全效果。新型装配式工艺较于普通围挡加厚加固,大幅度增强使用安全性能和防御台风的风载力。经过整体抗风性能测试验算,可满足9-10级风荷载,以确保安全无虞。

(二) 安装低成本节约方面

新型的装配式围挡实现采用标准化构件,具有制作安装工期短的特点,一体成型,整体强度较高。安装过程中无电焊作业,现场采用螺栓螺母连接,安装方便,确保安全。通常6个工人一天可施工300-400米。同时在使用过程中,任何构件出现损坏,也

方便拆装更换。

（三）绿色环保性能提升方面

通过对围挡的面板材料进行改良，选用0.5-1mm 毫米的钢板，使得面板的耐久性得到保障，拆卸方便快捷，可做到多次无损周转，有效降低了工程项目围挡的使用成本，也避免了传统围挡拆除后产生建筑垃圾问题。通过循环使用，降低环境污染，减少资源浪费。预制的混凝土底座配备了LED 太阳能发光装置，将可再生能源与围挡警示灯用电进行了完美结合。

三、新型围挡与传统围挡产品性能对比分析

通过对当前交通工程建设市场所采用的围挡材料及结构形

式，结合近年来江苏省各市公路工程施工现场围挡使用情况可以看出，公路工程施工围挡的设置重点的关注要素包括围挡的尺寸高度、围挡的材质、围挡的结构形式、围挡的安全稳定性（抗冲击性、防风性能）、耐久性（需要多次周转）、围挡的占地面积、围挡成本等。

目前公路工程建设市场上围挡材料应用较多的材料包括彩钢夹芯板围挡、PVC 围挡。在南京、苏州工业园区、昆山等地也开始尝试使用新型的彩钢镀锌板围挡等装配式围挡。^[7]在两区三厂建设的围挡还是以砌筑式围挡为主。

因此，本项目也对以下几类装配式围挡的性能及成本进行了对比分析，具体如下表1 所示。

综合以上分析可以看出，目前交通工程项目中已普遍应

表1 不同围挡性能分析表

性能指标		砖砌围挡	夹芯板围挡	PVC 板围挡	昆山围挡	新型镀锌烤漆板
底座基础	底座形式	砌筑底座	预制混凝土基础			
	底座尺寸（cm）	高：50-60厚：24	梯形，高：50-60 厚：50-60 长：100	梯形，高：50-60 厚：50-60 长：100	梯形，高：35 厚：50 长：200	梯形，高：60 厚：60 长：100
围挡板材		—	彩钢夹芯板	PVC	镀锌钢板	镀锌烤漆板
是否设置斜撑		否	是	否	否	否
是否设置横挡		否	是	是		否
压顶及立柱		否	是	是	是	否
占用空间大小		小	大	小	小	小
美观性		优	一般	一般	一般	优
可周转性		—	1-2次	1-2次	4-6次	6次以上
施工效率（6人工/天）		6米-10米	200米-250米	200米-250米	500米-600米	350米-400米
防风性能		10级	8级	8级	9级	9-10级
耐久性		5年以上	1-2年	1-2年	3年以上	3年以上
价格（元/延米）		1400	460-500	490-520	1300-1400	1200-1400 （可回收，约208-380元/延米）
综合性能评价		稳固，施工周期长，造价高，适用三厂围墙建设	施工方便快捷，耐久性和可周转性一般，价格中等	施工方便快捷，耐久性和可周转性一般，价格中等	施工方便快捷，耐久性和可周转性好，美观性一般，价格偏高。	施工方便快捷，耐久性和可周转性好，美观性佳，价格偏高。

用装配式围挡，主要的围挡面板式彩钢夹芯板和PVC 板。市场也出现了新型的镀锌烤漆板、镀锌钢板围挡。几类围挡的基础底座基本类似，搭建施工的方式也基本类似。

彩钢夹芯板围挡的质量差异主要体现在钢板的厚度上，因为主要板面是彩钢板所以没有什么韧性，经常性反复挪用拆装，易变现且不可恢复、美观度一般。优点在于拆装便捷，价格便宜。

PVC 围挡主要材料是聚乙烯和钙粉配比而成，影响PVC 围挡价格主要是PVC 板面的材质，聚乙烯和钙粉的配比的不同成型后的板面也不同，好的PVC 板面有很好的韧性，不易破损发脆、光洁度高、容易清洁、阻燃美观度高。[8,9]PVC 围挡缺点在于安装相对麻烦，拆除再挪用有损耗。使用1-2年后产品颜色变谈，版面有变花现象。此外，也有部分厂家使用是再生料生产的PVC 围挡，此类围挡使用年限远远不及标准配比的围挡。

从目前江苏地区公路工程建设市场的围挡搭建情况看，目前

施工单位常用的围挡类型仍然是彩钢夹芯板围挡为主。使用的彩钢夹芯板的板材差异主要在外包铁皮的厚度，从0.22-0.56mm 不等，彩钢夹芯板厚度在5cm 左右。价格上彩钢夹芯板较PVC 围挡尚有一定优势。

新型的镀锌彩钢板围挡在结构稳定性、耐久性、可周转性上都较以往围挡材料都有较大提升。虽然目前价格较高，可重复利用多次，周转折损率也较低，从长期应用看，综合成本也有一定的优势。^[10]有望在未来成为推广的主要方向。

四、结语

随着交通基础设施高质量发展要求的不断提升，施工围挡设置已成为有效提升交通工程建设文明施工水平的重要内容，选用安全耐久、优质美观、绿色环保的围挡材料及设置方式，是行业

建设者及广大人民的共同愿望。通过研究分析新型的装配式围挡与当前公路工程建设中不同规格的围挡型式，分析各种围挡的造价、性能、优缺点，可以看出新型的装配式围挡在耐久性、资源

集约节约方面具有较好的市场应用价值，并已在江苏省多个地区取得较好的应用效果，有望成为未来施工现场广泛应用的施工围挡型式。

参考文献

[1] 程珂. 城市施工围挡专项治理研究 [D]. 郑州大学, 2022.DOI: 10.27466/d.cnki.gzzdu.2022.003930.

[2] 陈业芬. 装配式垂直绿化围挡在市政工程中的应用——以白马河杨桥路桥梁改造工程为例 [J]. 福建建材, 2022, (10): 85-87.

[3] 王守华. 新型绿色施工围挡的研究与应用. 山东省, 新泰市市政工程处, 2017-12-30.

[4] 李俊雄, 孙广滨. 新型装配式围挡施工技术在市政工程项目中的应用研究 [J]. 中国市政工程, 2015, (03): 86-87+93+119.

[5] 黄培辉. 信号交叉口通透式施工围挡设置研究 [J]. 市政技术, 2023, 41(12): 147-153.

[6] 邹俊杰, 胡圣能. 围挡施工条件下道路交通组织仿真优化 [J]. 山东交通学院学报, 2023, 31(04): 26-32.

[7] 张辰. PCF 结构无脚手体系安全防护围挡施工技术的应用 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(11): 71-73.

[8] 李瑞杰, 陈鑫鑫, 张哲华, 等. 一种新型降尘辅助道路施工围挡的研究 [J]. 四川水泥, 2020, (10): 258-259.

[9] 李向前. 建筑工程基坑施工阶段围挡降尘效果的数值模拟研究 [D]. 重庆大学, 2020.DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.003904.

[10] 李俊, 刘保材. 福州地铁施工围挡的分级分类设置研究 [J]. 交通节能环保, 2020, 16(01): 138-140.

建筑工程施工中的防水防渗施工技术现状分析

丁永超

湖南省第六工程有限公司，湖南 长沙 410004

摘要： 建筑工程品质标准日益提高，防潮阻漏的施工手法正日益成为建筑领域的核心环节。本篇研究深入探讨了现代建筑领域防水与防漏施工技术的实施现状，探讨了技术障碍及其破解手段。经过探索得出，纵然防水阻漏技术日新月异，施工监管存在缺陷、材料选用不适宜、施工技术不规范现象仍旧存在。为保障建筑项目的持久稳固与安全可靠，提出加强防水防渗技术实施、优化施工工艺、提升施工人员技术水平的意见，着力打造高效建筑防水体系，减少后期维护开销。

关键词： 建筑工程；防水防渗；施工技术；现状分析；问题与策略

Analysis of Waterproofing and Impermeability Construction Technology in Construction of Building Engineering

Ding Yongchao

Hunan Sixth Engineering Co. LTD., Changsha, Hunan 410004

Abstract: The quality standard of construction engineering is increasing day by day, and the construction method of moisture-proof and leak-proof is increasingly becoming the core link in the construction field. This study deeply discusses the implementation status of waterproof and leak-proof construction technology in modern construction field, and discusses the technical obstacles and their cracking methods. After exploration, it is concluded that although the waterproof and leakage resistance technology is changing with each passing day, there are still defects in construction supervision, inappropriate material selection and non-standard construction technology. In order to ensure the lasting stability, safety and reliability of construction projects, suggestions are put forward to strengthen the implementation of waterproof and anti-seepage technology, optimize the construction technology, improve the technical level of construction personnel, and strive to create an efficient building waterproof system to reduce the maintenance cost in the later period.

Keywords: construction engineering; waterproof and impermeable; construction technology; analysis of current situation; problem and strategy

引言

随着越来越多的新材料以及新技术在建筑工程中的应用，很多建筑工程在管理过程中却出现了诸多不足之处，甚至还引发了许多质量性的缺陷问题。而渗漏问题就是建筑工程在开展过程中最为主要的问题之一，渗漏问题的存在不仅会影响到建筑工程的整体质量稳定性，同时，还会为建筑工程内部的用户带来诸多不便之处。基于此，选择刚性施工防水材料，对比出混凝土添加剂的最优配比，进而对地下防水防渗技术进行分析。按照处理流程铺设防水材料，选择化学注浆方法，对地下防水进行二次补足。对屋面的防水工程进行设计，最后对施工结果进行评定。

一、防水防渗常见材料与技术选择

建筑工程中，防水阻漏工序占据着举足轻重的地位，尤其是在地下建筑施工、屋面工程、地下管道敷设等场合，防水防渗材料的挑选对工程的长久运行安全与稳固性具有直接影响。在建筑防水施工中，需要加入不同添加剂，这不仅容易造成混凝土不规

则应力集中，使混凝土产生抗拉力极限强度，还会导致表面变形，因此对混凝土的添加剂配比的调制，也是工程中的一个重要部分。日常防水阻漏产品主要有沥青系列、聚氨酯系列、橡胶系列、丙烯酸系列及无机防水产品等，各种材料皆有其独特的特长与适用的极限。

橡胶类防水产品，合成橡胶防水卷材是其核心产品，该物质

具备优异的高温及低温耐受性，在化学侵蚀抵抗及紫外线抵御性能上表现卓越。全面适应气候变化的建筑防水工艺，在要求极高的耐久性建筑项目中格外突出。不过橡胶材料施工环节对缝隙的对接技术要求较为苛刻，务必实施严谨的施工监督与质量检验。

无基防水化学品，水泥为基础的渗透性结晶防水制剂，此乃近期崭露头角的新型防水涂料。通过水合作用，此类物质转化成了不与水相溶的固态微粒，封合混凝土间隙，优异的阻水特性。尤其适应于地下结构施工空间，非有机防水材料具备出色的持久性与生态友好属性，施工实施要求技术层面达到一定高度，原料费用颇为不菲。

在防水阻漏工程领域，挑选恰当的防水物料需结合建筑特性、周边环境及项目具体要求。例如，历经高温潮湿双重考验的屋顶区域，在防水涂料领域聚氨酯产品当属首选；那些长期受水浸泡影响的地下空间地带，或许应当采用沥青类或水泥基渗透结晶型防水涂料^[1]。在材料筛选阶段，施工团队需全面评估施工难度、工程期限、预算规模及施工完成后的维护要求。

二、建筑工程防水防渗施工中的主要问题

（一）施工质量控制问题

在建筑领域，施工品质把控的必要性不容小觑，尤其在执行防潮防漏的施工阶段。建筑品质的高低直接关系到其耐久年限的长短，这无疑与使用过程中的安全防护及舒适度紧密相连，防渗漏施工技术的品质把控，本描述主要聚焦于施工技术、材料选择、施工操作规范、质量监控等关键点。结合工程施工防水技术研究的同时，要对建筑屋面与地下同时进行防水设计，以保证防水防渗构造的完整性。

施工流程的不规范是决定防水防渗效果的关键因素。实施防水层作业需确保操作的精确度至极，实际上在施工的实际环节，鉴于施工人员技术掌握与经验积累的差异，施工过程中，施工不均、涂层厚度不达标、接缝处理不规范等问题不断涌现。这些问题显著降低了防水层的实际效能，即便在短期内显现出滴水现象。在施工活动期间，周边环境要素对施工品质的优劣产生了重大作用，气象指标如气温与湿度对防水层施工质量影响深远。例如，在极度低温之际，若干防水涂料的固化效果不尽如人意，施工质量遭干扰；处于高湿度的气候状况中，防潮效果不佳的物质易受潮或遭遇化学反应，材料品质退化。

施工质量受影响的根本原因之一是质量监控机制的不足。进行防水防渗工程质量评估时，一般需对材料品质、施工品质、工艺流程进行控制与检查，但实际上在操作阶段，众多项目往往未能构建完整的检验体系，或许鉴定标准未能达成一致，施工过程中品质问题未能得到及时捕捉与修正。此外，若干施工团队对品质审核的重视度偏低，核实流程的合规性，整体施工水平遭遇了质量上的削弱。因此，为了攻克施工品质监管难题，需强化施工人员的技术培训效果跟踪，保证施工活动依照规范执行。务必形成全面的质量检验架构，全方位实施质量管控程序，从原材料入场至项目竣工，每个步骤都必须实施严密监管。

（二）材料选择与施工环境问题

材料选择和施工环境是影响建筑工程防水防渗效果的两个重要因素。在防水防渗工程中，不同的建筑部位和环境条件对材料的要求不同，选择合适的防水材料不仅能够提高防水效果，还能降低工程的维护成本。而施工环境的条件则直接影响防水材料的施工效果，合理的施工环境条件对于确保工程质量至关重要。

防水防渗工程的质量高低，与材料挑选的恰当性紧密相关。防水产品主要可划分为两大类别：此类是常规沥青防水材料的一种，近期广泛采纳的合成聚合物类别的材料，聚氨酯类防水层材料、聚合物水泥型防水材料群等^[2]。选取恰当的防水用品，务必全面考量建筑所处环境、工程构造及材料功能属性。研究地下层构造工程，持续在潮湿气候中浸泡，推荐选用具备优异抗渗性能及长久耐用的水泥基防水建材；针对屋顶或墙体等外露区域，弹性非凡的聚氨酯防水层应用更为恰当，增强其高温耐受性和紫外线抵御力。

施工背景对防水防渗工艺的制约不可忽视。施工条件涉及气候状况、施工场地卫生标准、地基质量等方面。在低温气候之下，若干防水涂层其固化过程呈现迟缓趋势，施工节奏的干扰要素，或造成涂层分布不均匀现象显现，防水效能遭干扰；在湿润的气候环境中逗留，防水层可能遭受潮湿空气的侵害，施工层未能充分固化，黏结力有所下降。此外，防水效果的削弱，施工环境清洁与否直接关系到防水施工质量的高低，假如施工场地布满了尘埃、油脂等杂乱无章的杂物，防水层与基材的结合强度可能下降，防水层结构不稳，进而出现渗漏现象。

施工活动开展时，地基处理问题不容忽视，基础处理不妥是防水层失效及渗水的关键因素之一。施工启动前必须保证地基表层洁净、干燥且水平，对混凝土结构的施工必须格外留心。若基底面存在缝隙或孔洞，必须实施修缮，若非防水材质不能牢固依附，水分子渗透性不良^[3]。因此，为了防水渗透工程得以顺畅进行，需依据建筑场所与构造特性恰当地挑选防水素材。必须保障施工场所气候适宜性达标，挑选合适的建筑作业时间点，并务必保证施工场所的清洁与地基的稳固处理。凭借恰当的物料挑选及施工环境条件的优化调整，大幅提升防水层施工效果，增强建筑物的持久性。

三、优化防水防渗施工技术的策略

（一）完善施工工艺与质量管理

针对建筑物防水与防漏的施工活动，建筑技术及品质维护是工程质量保证的核心要求。施工环节防水阻漏技术操作与品质把控问题分析，触及多个层面，涵盖施工前筹备阶段、施工中作业标准及施工后质量把控与验收等环节。为了提升防水渗透工程的质量，对施工技术及质量监控进行细致优化。防水防渗作业的规范制定与施工步骤的优化是基础。建筑团队执行防潮防漏工程阶段，应当制定详实的施工蓝图，依据施工现场的现实背景，弹性调整作业程序，实施防水工程的技术要求极为严格。施工中涂料层厚度标准、涂层施工的均匀度、施工环境中的温度与湿度状况

均需严格把控。必须保证各道工序的技术要求得到全面实施，并对各项作业进行深入剖析以达成施工标准的统一。建筑队伍应采纳现代的设施与器械，优化施工的细致度和作业效率。

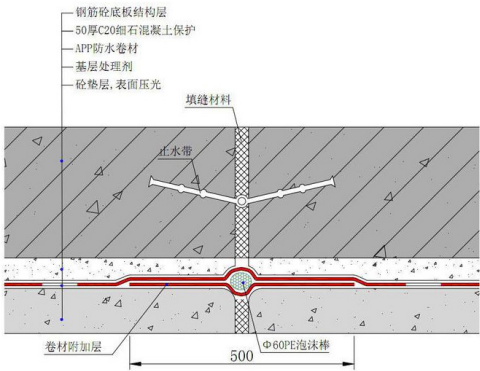
施工质量管理框架迫切需要全面升级。在防水阻漏领域，质量监控所涵盖的步骤极其繁杂，从原材料挑选至施工实施，每个步骤均需严格审查。工程承包商需打造全面的质量管理格局，必须每个阶段设立质量监控责任人。施工前期，务必对每一份物料实施严谨的审查与核实，必须保证其质量与设计施工的技术规范相符合。在工程实施阶段，务必实时现场跟踪与核查，发现异常状况后即刻进行改正，防止操作失误造成不良品质后果。

在建筑防水防渗施工过程中，施工环境的管理和控制是确保工程质量的重要因素。施工环境，尤其是气象状况，施工质量对防水层的防水效果有直接影响，温度、湿度、风速等气象因素对防水施工效果有重大影响，因此，施工实体必须特别强调施工地点的环境要求，合理规划施工进度表，务必保证防水层品质符合预定要求。环境温度与相对湿度对防水材料施工极为关键^[4]。防渗涂料、卷材等建材在施工阶段一般需满足特定的温度与湿度要求，温度与湿度若偏离正常范围，材料的施工效果将显著降低，温度降至极点，防渗涂层或许未能充分硬结，涂层均匀度降低，进而降低了防水效果等级；高温预警信号亮起，涂装可能过早失去黏附力，引发涂层表层快速硬化结壳，对黏附力和全面防水效果产生了影响，湿润气候情境，部分防水产品存在吸水、变软、性能下降等问题，防水效能未达既定质量要求。因此，施工团队需参照气象预报及实时气候环境，精准安排施工时间段，防止在恶劣气候中开展工程活动。

施工过程中，风速与降水量亦属不可忽视的自然条件。强劲的风势可能引起防水层在施工阶段产生位移、气泡或脱落，尤其是那些轻薄型的防水薄膜及卷材产品，风的影响之下易受波动，引发建筑作业缺陷。因此，防水工程最怕遇到降雨天气，尤其在防水层施工完成之际，降水现象对物质的固化及附着度有影响，防水效果大幅削弱。为规避此类困扰，施工团队在动工前应应对气候状况进行细致审查，择取晴朗天气时段进行施工活动，制定全面的危机应对措施，譬如配备雨具或执行遮蔽动作。针对突发的降水情况，力求大幅增强施工品质水平，项目交付使用前，承建单位需遵照既定质量准则和规范实施细致的验收工作。防水防渗工程质量的实现离不开严格的质量审查程序，唯有历经细致核查，唯有如此方可保证防水施工品质达标，力求使用时无渗漏等不良现象在审查阶段需参照建筑项目的具体设计规范，进行彻底的质量检验作业，务必使每一道施工工序及所用材料均严格遵守设计要求。

在质量检验阶段，运用先进的检测技术极为关键。渗透检验与密封性能检测是普遍采纳的检测手段，精确检验防水层的封闭性与耐久性。安全测试模拟水流侵入情形，探讨防水层的阻水效果，务必实现防水功能的彻底封闭；气密性试验可通过检测防水层在各类气压级别下的气体逸出表现，评估其防水性能是否足以抵御空气及水分的侵入。这些检测手段为工程验收提供了坚实的科学凭证，务必保证防水层品质达标，工程队完成品质审查动

作，务必迅速归档审核文件。依据审核成效实施相应修正，一旦在检验阶段暴露出任何品质缺陷，建设团队亟需执行紧急维修动作，务必维持防水层整体效能的完好无损。整改作业必须恪守规范要求全面实施，务必保证修缮后的防水层品质符合设计规范，开展第二次检验，直到防水质量达标为止。



> 图 1. 底板变形缝处防水做法

（二）加强技术培训与人员素质提升

实施防渗工程操作中，施工者的技艺与专业素质对工程品质有直接效应。防水防渗技术的进步，以及新型防水材料的采纳，推动了施工技术的进步，若施工者未能拥有坚实的专业知识及操作能力，工程质量尚无绝对保障。因此，强化技术教育及员工能力培养是破解防水防渗施工难题的关键手段之一^[5]。建筑工人必须周期性地接受专业技艺的进修，熟谙尖端的防潮渗透技术及施工流程，防潮阻漏施工技术的不断进步，施工团队应紧跟时代节拍，采纳并精通先进的施工方法与手段。技术培养当包含施工工艺的增强，需采纳新颖材质与制作技术的操作手法，施工人员对防水涂料的应用技术、施工设备的操作要领以及施工过程中可能碰到的各种问题的处理手段了如指掌。

建筑工人对质量把控的意识需要培养。实施防渗工程操作中，施工各阶段均需施工者严格依照既定规范进行品质把控。通过进行技术磨炼，施工人员得以明显增强操作水平，进一步强化其品质监控观念，务必让其认识到防水防渗工程重质量占据核心地位，任何遗漏均可能触发未来渗漏事故。因此，施工过程应始终包含质量培训内容，自建设初期准备至工程完成后的质量评估，每一过程均需严格把关。施工人员需展现出色的集体配合精神，防水与防渗透作业往往涉及众多工种的紧密配合，团队间的默契协作是工程顺畅推进的关键支撑。在培训中，除了技术内容，还应通过团队建设活动来提升施工人员的协作能力，使他们能够更好地协同工作，共同解决施工过程中出现的问题。

施工管理人员教育提升刻不容缓，整个工程协调与管理工作中由施工管理人员全面承担，充当着串联前后篇章的关键纽带。他们不仅需掌握一定的技术要求，还需展现高效的组织领导才能，精准把握施工进度，促进施工团队的积极性发挥，上述版本中有些表述可能存在细微的重复，但整体上它们都遵循了不同的要求，实现技术培训加强与员工素质的攀升，施工人员实操技艺实现大幅提升，其质量感知及团队协作技巧得到显著提升，为防水防渗作业打造了坚实的人力后盾。

（三）推广新型防水材料的使用

随着建筑科技不断飞跃，崭新防水材料问世，为防水防渗事业开辟了新的天地，日常防水用品，诸如沥青防水卷材、聚氨酯防水涂料等，即便在某个阶段确保了防水特性，工程尺度日益增大，但环境条件亦呈现多样化趋势，传统物质的不当性日益凸显。新型防水材料在技术性能、环保特性、耐用性方面展现出卓越表现，采用创新防水建材的推广是提高防水防渗施工成效的关键手段。新型防水技术产品在防水效果、防潮效果和耐久性方面有显著改进。例如，防水材料中，聚合物水泥基产品具有出色地粘着力，具备应对各类繁杂施工场景的能力，其防渗透特性极为出色，有效抵御水分的渗透侵袭。而此高分子型防水薄膜材质，依托其显著的高强度、优良的耐候性及优异的可塑性，诸多特殊施工领域亦广泛采纳。

新型防水素材在绿色环保与安全性能上实现了重大突破。大量新型防水制品均采纳了环保型原料，充分满足现代建筑生态进步的要求，有害排放物质排放量减少明显，提升了施工区域的安全系数^[6]。这些新材料的大规模实施，明显改善环境质量，增强建筑作业的保障性，且对居住者的体质状况产生正面效应。此外，该新型防水材料在施工方面展现出卓越的性能。在工程实施阶段，当代防水产品一般展现良好的流动性属性，更有效地包容繁杂的构造层面，减少建筑项目的操作复杂性。某些创新防水建材具备迅速安装的特性，减少施工时间跨度，增进工作效率，诸多建材的安装步骤不复杂，可进行即时黏合操作，精简了传统防水材料铺设时所需的烘烤加热等繁杂程序。^[8]

新型防水材料的推广在建筑行业具有重要意义，能够有效提升防水防渗工程的质量和耐久性。然而，在实际应用过程中，新型防水材料的推广仍面临一系列挑战，影响其在市场中的普及程度和应用效果。新型防水材料的价格普遍较高，这使得许多建筑项目在预算有限的情况下难以选择使用。这一问题在一些中小型企业 and 项目中尤为突出，限制了其广泛应用的可能性。虽然新

型防水材料在长期使用中的性能优势非常明显，但由于初期投入较大，许多客户仍然对其高昂的成本表示担忧。

当前新型防水材料在消费者群体中的接纳程度不高。众多建筑企业及施工团队依旧偏爱传统防水建材，对新型防水材料的认识与信任度偏低。此情形导致新型防水产品在市场推广上进展缓慢，业界广泛呈现出对新材料的排斥心理。众多施工人员因缺少必要的专业认知与操作经验，对新型防水材料的施工方法与运用细节掌握不够充分，工程应用难度因之而进一步加大^[7]。前沿防水技术的实施流程要求较高，对照传统防水制品，众多新型防水材料对施工技术及工艺水平提出了更高标准，对施工团队的技术水平提出了更高的标准。某些创新型防水素材展现出更卓越的高温或低温耐受性，施工阶段必须符合特定环境要求与技术支持体系，否则将阻碍其效能的充分发挥。施工人员必须接受专业的技能训练课程，精通创新防水涂层施工工艺。为了实现其运用成效的最大化，借助政策扶持、技术辅导、产业宣传等多元合作，显著增进新型防水材料普及率，极大地增强防水防渗施工质量，此举还能增强建筑物的整体防水性能与持久度，这无疑是建筑领域科技进步的显著标志。^[9] 这标志着建筑领域迈向生态和谐与长远发展的关键步伐。随着科技进步与市场需求的攀升，前沿防水科技预计将在未来得到更普遍的采纳，为当代建筑领域构建稳固的科技后盾。

四、结语

建筑工程中的防水防渗施工技术是保障工程质量和安全的重要环节，随着技术的不断发展，防水防渗材料和施工方法将不断更新和改进。通过分析当前施工中的问题，提出相应的策略，能够有效提高防水施工的质量和效率。未来，随着技术的进步和施工管理模式的改进，防水防渗施工技术将在建筑工程中发挥更大的作用，进一步推动建筑行业的健康发展。^[10]

参考文献

[1] 王齐武. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术现状分析 [J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(6):24-26.
[2] 张黎俐. 建筑工程施工中防水防渗施工技术的运用分析 [J]. 居舍, 2023, (27):42-45.
[3] 庞进军. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术分析 [J]. 居业, 2023, (06):31-33.
[4] 邓仁骏. 分析建筑工程施工中的防水防渗施工技术 [J]. 建筑与预算, 2023, (01):56-58.
[5] 李德刚, 曹富, 张钦龙. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2021, (09):104-105.
[6] 姚旭. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术分析 [J]. 砖瓦, 2021, (09):164+166.
[7] 谢阶煌. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术分析 [J]. 中国高科技, 2021, (17):111-112.
[8] 张永元. 浅谈建筑工程施工中的防水防渗施工技术的应用分析 [J]. 四川水泥, 2021, (09):217-218.
[9] 李席锋. 探究建筑工程施工中的防水防渗施工技术的应用 [J]. 中国住宅设施, 2020, (08):127-128.
[10] 王东彦. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术的实践分析 [J]. 居舍, 2020, (24):81-82.

建筑工程施工中混凝土裂缝及防治措施

吴项

湖南省第六工程有限公司，湖南 长沙 410004

摘 要：在建筑工程领域，混凝土作为应用最为广泛的建筑材料之一，承担着构建各类建筑结构的关键任务。然而，在混凝土的施工过程中裂缝不仅严重影响建筑结构的的外观完整性，更对其结构稳定性、耐久性以及防水性能等关键性能指标构成潜在威胁。一旦裂缝形成，水分、空气以及各种侵蚀性介质便可能乘虚而入，加速混凝土内部钢筋的锈蚀，进而削弱结构的承载能力，缩短建筑物的使用寿命。因此，本文深入研究建筑工程施工中混凝土裂缝的产生原因，并探寻切实有效的防治措施，具有极其重要的现实意义和工程应用价值，这不仅关乎建筑工程的质量与安全，更与社会的可持续发展息息相关。

关 键 词：建筑工程施工；混凝土；裂缝；防治

Concrete Cracks and Prevention Measures in Construction Engineering

Wu Xiang

Hunan Sixth Engineering Co., LTD. Changsha, Hunan 410004

Abstract: In the field of construction engineering, concrete, as one of the most widely used building materials, undertakes the key task of constructing various building structures. However, cracks in the concrete construction process not only seriously affect the appearance integrity of the building structure, but also pose a potential threat to the key performance indicators such as structural stability, durability and waterproof performance. Once cracks are formed, moisture, air and various aggressive media may enter, accelerating the corrosion of steel bars inside the concrete, thereby weakening the bearing capacity of the structure and shortening the service life of the building. Therefore, it is of great practical significance and engineering application value to study the causes of concrete cracks in construction engineering and explore effective prevention and control measures, which is not only related to the quality and safety of construction engineering, but also closely related to the sustainable development of society.

Keywords: construction engineering; concrete; crack; prevention and control

引言

在现代建筑工程的宏大版图中，混凝土凭借其独特的性能优势，成为支撑起城市天际线与基础设施网络的中坚力量。它以强大的抗压能力、良好的可塑性和相对低廉的成本，为人类的建筑梦想提供了坚实的物质基础。然而，混凝土裂缝的出现却如同一颗颗潜伏的“定时炸弹”，随时可能引爆建筑质量与安全的危机。细微的裂缝看似微不足道，却可能成为建筑结构安全的“致命伤”。正因如此，本文以荆州开发区租赁房屋项目裂缝控制及防治措施的研究，深入剖析混凝土裂缝产生的根源，探寻科学有效的防治策略。

一、荆州开发区租赁房屋项目工程概况

本工程为荆州开发区租赁房屋项目，建设用地面积33456.83 m²，总建筑面积118366.3 m²。用地内包括5栋高层及附属工程（商业裙楼、配电房等）组成。整体地下室一层。1#楼23层，建筑高度75.85m，2#、3#、5#、6#楼26层，建筑高度77.95m，桩筏基础，剪力墙结构，拟建租赁房1034户。本工程抗震等级为4级，抗震设防烈度为6度，建筑结构安全等级二级，设计等级乙级，抗震设防类别丙类，建筑设计使用合理年限为50年^[1]。

二、建筑工程施工中混凝土裂缝类型

混凝土裂缝对建筑工程质量影响重大，在荆州开发区租赁房屋项目里也不例外，这些裂缝不仅关乎建筑外观，还存在渗水，更威胁结构安全与使用寿命^[2]。为保障项目质量，我们在施工中严格控制，深入探究房建项目中混凝土裂缝产生的类型，对荆州开发区租赁房屋项目后续施工和维护具有关键指导意义。

（一）塑性收缩裂缝

塑性收缩裂缝多发生于混凝土初凝阶段。此阶段水泥水化反应处于旺盛期，伴随拌合水分急剧散失，引发混凝土体积急剧收

缩。此时胶凝材料尚未形成有效强度骨架，导致收缩应力作用下形成微裂纹。此类裂缝多在浇筑后2-6小时内显现，呈现无规则网状分布特征，裂缝宽度多在0.05-0.2mm之间。夏季户外大体积楼板浇筑作业时，高温、强风及低湿度工况会加剧水分流失，显著提升塑性裂缝发生风险^[3]。在工程实践中因夏季施工期间未实施有效保湿养护，导致楼板表面密集出现塑性裂缝，虽经技术处理仍造成施工周期延长及质量缺陷记录。

（二）温度裂缝

作为典型的热惰性材料，混凝土在施工及服役阶段会因内外散热速率差异形成显著温度梯度。这种温度分布不均引发的应力效应若超过材料抗拉极限，将直接导致温度裂缝的萌生。以大体量混凝土工程为例，水化反应释放的热量可使芯部温度攀升至60-70℃，而表层温度受环境介质影响明显偏低，当内外温差突破25℃临界值时，极易诱发深度可达结构全断面的贯穿性裂缝。此类缺陷不仅破坏构件连续性，更会显著降低结构服役寿命^[4]。工程实践中曾出现因温控措施失当产生网状裂缝，致使承载力折减达30%，后期不得不采用碳纤维布包裹与注浆联合修复方案，此案例印证了温度裂缝控制是工程界公认的难题。

（三）干缩裂缝

混凝土硬化过程中会伴随水分的持续蒸发和体积缩小。当受到周围结构限制无法自由收缩时，内部将产生拉应力，当该应力超过材料抗拉极限即会引发干缩开裂。此类裂缝通常出现在构件成型后4-8周内，典型宽度介于0.05至1.0毫米，走向多与构件短轴方向一致，尤易发生于墙体、楼板等薄型构件。值得注意的是，在低湿度、高通风环境下该现象更为显著。工程实例显示，在工程实践中因施工养护不规范导致混凝土在干燥通风条件下失水过快，墙面形成密集干缩裂缝群，实测最大缝宽达0.8毫米，这不仅造成饰面层破损，更导致墙体渗水率超标达32%。

（四）荷载裂缝

混凝土结构在设计荷载或突发性超载作用下，当内部应力超出材料抗力阈值时，将诱发荷载裂缝的产生^[5]。此类裂缝的几何特征与力学传递路径存在显著对应关系：受弯构件中裂缝多沿构件轴向垂直分布于受拉边缘区域，而剪切作用下则呈现45°斜向开裂模式。试验数据表明，外荷载持续增加将导致裂缝宽度与深度呈现正相关发展，当裂缝扩展至临界尺寸时，结构承载体系将发生渐进性失效。在工程实践中，荷载裂缝问题不可忽视。因受工程造价影响，设计时对楼面荷载预估不足、安全系数取值偏低，交付使用后，部分房间的楼板出现了细微裂缝。经检测，是室内静、动荷载等实际荷载超出预期，致使楼板承受压力不均，产生荷载裂缝。

三、建筑工程施工中混凝土裂缝产生原因分析

（一）材料因素

1. 水泥质量与品种

水泥安定性作为混凝土品质控制的核心指标，其重要性不容忽视。当水泥材料中游离态氧化钙及氧化镁等活性成分含量超标

时，这些物质在硬化后仍会持续进行水化反应，伴随的体积膨胀效应将最终诱发混凝土结构开裂现象。值得关注的是，水泥品种的差异直接导致水化热特性与凝结硬化参数产生显著变化^[6]。以普通硅酸盐水泥为例，其剧烈的水化放热特性在大体积混凝土浇筑作业中尤为突出，若施工过程中选材不当，极易因内部温升效应引发贯穿性温度裂缝的形成。

2. 骨料质量

当骨料中泥质成分含量超标时，将直接影响其与水泥基体的结合强度，加剧混凝土的干燥收缩效应，进而形成结构裂缝。与此同时，骨料颗粒尺寸分布若不符合最优配比标准，会显著提高混凝土内部孔隙率，导致力学性能与抗裂性能双重下降。以细骨料为例，当粒径过小时，不仅会提高拌合物水灰比需求，更会因硬化阶段收缩量增大而显著增加干缩裂缝的形成概率^[7]。

（二）施工因素

1. 混凝土浇筑与振捣

在混凝土施工过程中，若浇筑速率控制不当或下落高度超标，易产生较大动能冲击，致使模板系统发生形变位移，继而诱发结构性裂缝。当振捣作业存在密实度不足时，内部孔隙与蜂窝状缺陷的形成将导致结构强度下降，在外部荷载作用下易形成裂缝。而过度振捣则可能引发粗骨料下沉、水泥浆上浮的离析现象，致使表层砂浆过厚，加剧了表面收缩裂缝的形成风险。

2. 养护措施不当

混凝土浇筑完成后若养护工作未能及时跟进，表层水分快速散失将引发显著的收缩应力，进而形成塑性收缩裂缝与干燥收缩裂缝。由于养护周期不足，混凝土内部水化反应不充分，结构强度发展迟缓，难以有效承受自重及外部荷载作用，由此产生的应力集中现象极易诱发裂缝。以夏季高温条件为例，此时混凝土表面水分子迁移速率急剧加快，若未能及时采取保湿措施，结构开裂概率将呈现几何级数增长态势。

（三）环境因素

1. 温度变化

混凝土在硬化及服役过程中容易受到温度波动的影响。当外界气温骤降时，表层混凝土迅速散热降温，而内部水化热释放形成的温场尚未消散，在此过程中形成的梯度温差将导致材料变形差异。随着内外温差显著扩大，由此引发的温度应力不断累积，一旦这种应力超出混凝土自身的抗拉极限，便会在结构薄弱处形成温度裂缝。特别需要指出的是，冬季施工期间若保温养护工作存在疏漏，新浇筑的混凝土极易因剧烈的温度变化而产生贯穿性裂缝^[8]。

2. 湿度变化

环境湿度波动与混凝土水分蒸发速率之间存在密切关联。处于低湿度条件下时，材料表层水分急剧流失将引发非均匀收缩变形，当这种体积变化受到基底约束时，毛细管张力作用会促使表面收缩裂纹的形成。值得注意的是，周期性干湿交替过程不仅会加剧胶凝材料与骨料界面的应力集中现象，还将导致微观结构损伤的累积效应，这种渐进式劣化过程会显著削弱材料的抗渗透性能，从而提升宏观裂缝发展的概率阈值。

（四）设计因素

1. 结构设计不合理

在建筑结构设计过程中，构件截面尺寸的合理选择及配筋率的科学计算至关重要。当这两个参数未达到规范要求时，混凝土构件的力学性能将显著弱化，特别是在承受荷载时易出现应力集中现象。以梁、板等受弯构件为例，当实际配筋量低于设计标准时，其受拉区混凝土在承载状态下将因拉应力超出材料强度限值而出现结构性裂缝^[9]。

2. 构造措施不完善

在工程实践中若忽视设置必要的伸缩缝或沉降缝，极易导致混凝土结构在温度波动或地基沉降等外界因素作用下产生过大内应力，最终诱发开裂现象。以超长建筑结构为例，当缺乏有效伸缩缝时，混凝土材料的热胀冷缩效应无法得到有效缓冲，这种变形约束将直接转化为结构内部的破坏性能量积累，从而形成可见裂缝。

四、在荆州开发区租赁房屋项目施工中混凝土裂缝防治措施

（一）优化材料选用与配合比设计

选择优质稳定的水泥作为基础性材料是工程实施的关键环节。荆州开发区租赁房屋项目针对大体积混凝土工程特性，应优先选用低热水泥品种，例如中热硅酸盐水泥或低热矿渣硅酸盐水泥，这类水泥能显著降低水化热效应，从而有效控制温度应力对结构完整性的影响，抑制温度裂缝的产生。此外严格执行水泥各项性能指标的检测验收，重点核查体积安定性等核心参数是否达标，以杜绝因胶凝材料品质缺陷引发的混凝土结构开裂风险。在骨料选型阶段，将含泥量控制作为关键指标，优先筛选低含泥量的粗细骨料品种，以增强骨料与水泥基体的界面结合效果。配合比设计作为核心步骤，结合工程实际需求与环境条件对水泥、骨料、水及外加剂等材料的配比量进行精确计算。通过系统试验筛选出最佳水灰比参数，在确保混凝土工作性能达标的同时，合理控制水灰比例以抑制收缩变形。科学运用外加剂可显著改善材料性能，例如施工中减水剂的合理掺入能在维持用水量恒定的前提下提升拌合物流动性，从而降低施工操作难度引发的结构缺陷；而膨胀剂的适量添加则可有效补偿材料收缩特性，对干缩裂缝形成具有明显的预防效果^[10]。上述通过建立数学模型来实现，该模型将帮助确定最佳的材料比例，从而减少裂缝产生的可能性。设 C 为水泥用量（kg/m³），S 为砂子用量（kg/m³），G 为石子用量（kg/m³），W 为水的用量（kg/m³），且假定混凝土的总用量为 V（m³）。则有：

$$V = C + S + G + W$$

考虑到强度和耐久性的要求，引入系数 k₁, k₂, k₃ 分别表示水泥、砂子和石子对混凝土抗压强度的影响系数，以及 k_w 表示水灰比对强度的影响。因此，混凝土的抗压强度 F 可以表示为：

$$F = kC_1 + k_2S + k_3G - k_w(W/C)$$

表 1：不同材料配比下的混凝土抗压强度分析表

材料	水泥 (C)	砂子 (S)	石子 (G)	水 (W)	水灰比 (W/C)	抗压强度 (F)
数据 1	300	750	1100	180	0.6	42
数据 2	320	720	1080	170	0.53	45
数据 3	350	700	1050	160	0.46	48

由表 1 可知，通过调整水泥、砂子、石子和水的比例，可以观察到随着水灰比的降低，混凝土的抗压强度有所提高。例如，从数据 1 到数据 3，水灰比从 0.6 降至 0.46，相应的抗压强度由 42MPa 提升至 48MPa，表明优化材料配比对于提高混凝土质量的重要性。

（二）规范施工流程与强化施工管理

在实施混凝土浇筑作业过程中，荆州开发区租赁房屋项目通过精准掌控浇筑速率与高度，浇筑速率与下落高度严格把控，防止因速率过快或下落高度过大导致模板承受超限侧压力而引发变形风险。特别注意的是，当采用分层浇筑工艺时，每层摊铺厚度宜控制在 40-50cm 范围内，同时须密切监控层间浇筑间隔时间，确保下层混凝土仍处于塑性状态时及时覆盖新拌混凝土，通过这种施工时序控制，既能保证层间结合面的有效粘结，又能有效杜绝冷缝等质量缺陷的形成。

在混凝土施工过程中，振捣作业作为关键工艺环节，其质量直接影响结构密实性。荆州开发区租赁房屋项目根据实际情况选用匹配的振捣设备与操作方法，通过分层有序的振捣工艺消除内部空隙，实现物料均匀分布。特别注意控制振捣强度，当观察到拌合物表面气泡逸出速率减缓、浮浆层稳定形成时，表明已完成有效密实。操作人员应全程监测骨料分布状态，适时调整振捣参数，既需避免欠振导致的蜂窝麻面缺陷，也要防范过振引发的粗骨料下沉离析现象。混凝土浇筑作业完成后，科学实施养护工序是控制裂缝质量的核心环节。要依据工程所处气候特征及现场工况，针对性制定养护策略。项目在高温季节施工时，重点控制表面湿度，通常采用铺设湿麻布结合定时喷淋的方式，保持表面湿润状态，减缓水分蒸发速率，有效抑制塑性收缩裂缝与干缩裂缝的形成；冬季施工着重控制温度，采取覆盖保温材料并搭设挡风屏障等措施，避免混凝土结构因内外温差过大引发温度应力裂缝。养护周期应严格遵循施工技术规程，为混凝土强度发展创造有利条件。为了有效防治荆州开发区租赁房屋项目施工中混凝土裂缝，我们基于温度应力理论建立一个简单的数学模型来评估和控制裂缝风险。设混凝土结构的最大允许温差为 ΔT_{max} ，实际温差为 ΔT ，混凝土的线膨胀系数为 α ，弹性模量为 E，泊松比为 ν ，结构长度为 L。则由温度变化引起的最大应力 σ_{max}

可以通过以下公式计算：

$$\sigma_{max} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

当 $\sigma_{max} > \sigma_{allow}$ (允许的最大应力)，裂缝可能发生。

表 2：温度应力对混凝土裂缝影响分析表

序号	$\Delta T(^{\circ}C)$	$\alpha(1/^{\circ}C)$	E(GPa)	$\sigma_{max}(MPa)$	$\sigma_{allow}(MPa)$
1	15	10×10^{-6}	30	4.5	4
2	10	10×10^{-6}	30	3.0	4
3	5	10×10^{-6}	30	N/A	4

从上表 2 可以看出，随着实际温差 ΔT 的减小， σ_{max} 也

相应减小。在序号3的情况下，即使温差较小，但仍然未达到 σ_{allow} ，表明在规范施工流程和强化施工管理中控制温度变化对于防止混凝土裂缝至关重要。

（三）强化环境因素应对

荆州开发区租赁房屋项目针对混凝土温度场演化控制问题，构建了全周期温度监测体系。针对大体积混凝土结构特性，采用预埋光纤传感装置与智能温控系统相结合的技术方案，同步采集核心与表层温度参数，建立混凝土温度场梯度模型，动态调整保温保湿方案。项目通过敷设闭式循环冷却管网，配合实时水化热释放速率分析，精确调控降温速率，抑制温度应力集聚，从而系统性地阻断温度裂缝萌生机理。在混凝土施工工艺中严格落实管控措施，针对不同季节特征实施差异化养护方案。高温季节施工时，对粗骨料实施洒水喷雾降温预处理，优选低温拌合水调控出机温度，同时在初凝后及时覆盖反光隔热膜，有效削弱太阳辐射热传导效应。寒冷气候作业期间，引入热风幕机等温控设备，构建混凝土水化热蓄存体系，确保模板内部维持标准养护温度，促进水泥水化反应充分进行。项目针对环境湿度变化问题，在干燥工况下施工时采取主动增湿方案，配置移动式雾化机组进行动态湿度调控，有效抑制混凝土表面水分梯度扩散。表面处理宜采用复合型密封养护工艺，通过交替覆盖薄膜与湿麻布形成多重阻隔层，实现水分缓释控制。对于存在干湿交替风险的作业区域，采用三阶段防护体系：首先在拌合阶段掺入有机硅烷类防水添加剂，其次优化振捣工艺提升骨料嵌锁效应，最后通过超细矿物掺合料二次水化反应增强界面过渡区致密性，从而系统提升结构抵抗环境交变应力的能力。为了评估和预防项目施工中由于环境因素导致的混凝土裂缝，建立如下数学模型：假设 E 代表环境影响因子，包括温度变化（T）、湿度变化（H）及风速（W）。我们定义一个综合环境影响系数 EIC，其计算公式为：

$$EIC = aT + bH + cW$$

其中，a、b 和 c 分别是温度、湿度和风速对混凝土裂缝形成的影响权重。

表3：混凝土裂缝防治环境因素影响分析表

测量时间	温度 (°C) TT	湿度 (%)HH	风速 (m/s)WW	环境影响系数 EICEIC
08:00	25	60	3	1.2
12:00	35	40	5	1.8
16:00	30	50	4	1.5

通过观察表3数据，我们可以看出随着温度和风速的增加，环境影响系数 EICEIC 显著上升，表明这些条件加剧了混凝土裂缝的风险。尤其是在中午12点时，尽管湿度降低，但高温和高风速共同作用使得 EICEIC 达到最高值1.8。这说明在炎热且干燥的条件下施工，需特别注意采取措施防止混凝土裂缝的发生和发展。

（四）完善设计方案与加强构造措施

在建筑结构设计过程中，综合考量功能需求、荷载分布及地质特征等多重因素，科学选择结构形式并精准确定构件截面参数。荆州开发区租赁房屋项目与设计沟通，针对梁板等受弯构件，依据规范要求精确配筋计算，确保配筋率符合承载能力

与抗裂性能双重标准，通过优化结构布局，减少几何突变带来的应力集中现象，在地基条件复杂区域布置沉降缝，有效规避差异沉降引发的结构损伤。混凝土构件配筋设计时，着重加强薄弱部位的抗裂构造措施，如在楼板边角区域增设放射筋，通过加强配筋提升局部抗裂能力。墙体结构采用双向网状配筋体系，提升墙体整体刚度及抗裂性能。针对大体量混凝土基础工程，配置温度应力补偿钢筋网，以抵消水化热与外部温差诱发的裂缝风险。我们深知建筑工程混凝土裂缝防治是一项复杂的系统工程，涉及材料配比、施工工艺、环境监测及结构设计等多维度管控。荆州开发区租赁房屋项目通过对各环节实施全过程管理，既确保建筑结构安全性和使用寿命，又实现社会资源的高效配置与可持续发展。针对当前行业现状，要求材料研发机构优化产品性能指标，我们严格执行浇筑养护规范，设计方完善结构应力计算模型，形成多维联动的质量管控机制。建立以项目经理为责任主体的专项治理方案，将裂缝预防标准嵌入工程验收体系，通过技术创新和工艺改良提升混凝土结构耐久性。荆州开发区租赁房屋项目这种通过多方协作的治理模式，不仅有效的降低裂缝发生概率，更为现代城市建设构建了安全可靠的城市发展基础。为了有效预测和控制混凝土结构中的裂缝，项目建立了基于弹性理论的数学模型。我们考虑的是受弯构件的裂缝宽度计算，常用的简化公式如下：

$$w = \beta \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \left(\frac{d_c}{\sqrt{f_m}} \right)$$

其中：

w 为最大裂缝宽度（mm）

β 为考虑裂缝间相互影响的系数

σ_s 为钢筋应力（N/mm²）

E_s 为钢筋弹性模量（N/mm²）

d_c 为混凝土保护层厚度（mm）

f_m 为混凝土平均抗压强度（N/mm²）

表4：混凝土结构裂缝宽度预测模型数据表

序号	β	σ_s (N/mm ²)	E_s (N/mm ²)	d_c (mm)	f_m (N/mm ²)	预测裂缝宽度 w (mm)
1	0.8	300	200000	25	30	0.12
2	0.9	350	210000	30	35	0.14
3	1.0	400	220000	35	40	0.16

通过表4可以看出，随着 β 值 σ_s 和 d_c 的增加以及 f_m 的增强，混凝土结构的最大裂缝宽度呈上升趋势。这表明在设计阶段精确选择材料参数和合理设置构造措施对于控制裂缝至关重要。适当调整这些参数，可有效减小裂缝宽度，提高结构耐久性。

五、总结

通过荆州开发区租赁房屋项目整体研究表明，建筑工程施工中混凝土裂缝的防治是一个系统工程，需要从材料、施工、环境

和设计等多个方面入手，采取综合有效的防治措施。它不仅关乎建筑结构的稳固与安全，更是对建筑使用寿命和社会资源合理利用的有力保障。只有各方齐心协力，秉持严谨的态度和专业的精

神，才能有效攻克混凝土裂缝这一难题，打造出更多优质、安全、耐久的建筑工程，为城市建设和社会发展筑牢坚实根基。

参考文献

- [1] 赵庆斌. 建筑工程施工中混凝土裂缝的成因与治理研究 [J]. 城镇建设, 2020 (2): 87-88.
- [2] 余立新. 建筑工程施工中混凝土裂缝成因与治理措施分析 [J]. 中国房地产业, 2019 (27): 197-198.
- [3] 史殿双, 罗丽娜. 房屋建筑现浇混凝土施工中裂缝原因及技术控制策略 [J]. 新商务周刊, 2019 (4): 209.
- [4] 潘学艳. 浅谈建筑工程施工中混凝土裂缝成因分析及预防措施 [J]. 中国室内装饰装修天地, 2019, 000 (008): 56.
- [5] 周舟. 建筑工程施工中混凝土裂缝防治技术研究 [J]. 中国住宅设施, 2023, (12): 112-114.
- [6] 宁军红. 建筑工程施工中混凝土裂缝及防治措施 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023, (20): 132-134.
- [7] 王少东. 建筑工程施工中混凝土裂缝及防治措施 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023, (07): 38-40.
- [8] 魏自清. 建筑工程施工中混凝土裂缝防治技术的应用 [J]. 居业, 2022, (08): 26-28.
- [9] 黄春娇. 试论建筑工程施工中混凝土裂缝的成因及防治策略 [J]. 江西建材, 2021, (08): 138-139.
- [10] 吕佳文. 建筑工程施工中混凝土与砌体结构的裂缝防治措施 [J]. 江西建材, 2021, (07): 135-136.

花瓶型斜拉桥塔梁固结主塔 π 型下横梁施工支撑体系研究与应用

曹景伟¹, 李浩铭², 黄星亚²

1. 浙江交投高速公路建设管理有限公司, 浙江 杭州 311300

2. 浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311300

摘 要 : 花瓶型斜拉桥塔梁固结体系的主塔 π 型下横梁作为关键传力结构, 其施工质量直接影响桥梁整体受力性能与耐久性。其中支撑体系的设计是下横梁施工的关键环节, 决定了下横梁施工质量的成败。本文以景文高速高岭头水库特大桥索塔下横梁支架工程为背景, 从下横梁施工特点、解决方法、方案比选分析、主要施工方案、实施后的效果进行简要阐述, 针对 π 型下横梁支撑体系工程应用验证了该技术的可行性与经济性, 可为同类桥梁结构的施工提供经验与参考。

关 键 词 : π 型下横梁; 施工特点; 方案比选; 支撑体系;

Research and Application of Construction Support System for Tower Beam Consolidation of Main Tower π -type lower Beam of Vase Cable-Stayed Bridge

Cao Jingwei¹, Li Haoming², Huang Xingya²

1.Zhejiang Jiaotou Expressway construction management Co. LTD. Hangzhou, Zhejiang 311300

2.Zhejiang Jiaogong Hongtu traffic construction Co. LTD. Hangzhou, Zhejiang 311300

Abstract: The π -type lower beam of the main tower in the tower beam consolidation system of vase cable-stayed bridge is the key force transfer structure, and its construction quality directly affects the overall mechanical performance and durability of the bridge. The design of the support system is the key link of the construction of the lower beam, which determines the success or failure of the construction quality of the lower beam. This paper takes the lower beam support project of cable tower of Jingwen high-speed Gaoling Tousehukute Bridge as the background, and briefly expounds the construction characteristics, solution, scheme comparison analysis, main construction scheme and implementation effect of the lower beam, and verifies the feasibility and economy of this technology for the engineering application of π -type lower beam support system, which can provide experience and reference for the construction of similar bridge structures.

Keywords: π -type lower beam; construction characteristics; scheme selection; supporting system;

引言

随着大跨度斜拉桥向高塔、长跨、轻量化方向发展, 塔梁固结体系因其整体刚度高、抗震性能优的特点被广泛应用。主塔下横梁作为塔柱与主梁的固结节点, 承担着传递索力、协调塔梁变形的关键作用。传统矩形截面横梁因自重较大、应力分布不均等问题, 逐渐被 π 型截面取代, 但其空间构造复杂、预应力体系密集、施工荷载耦合效应显著, 对施工工艺提出了更高要求。

当前, 国内外学者针对斜拉桥下横梁施工已开展了部分研究, 如混凝土裂缝控制、下横梁的施工全过程力学行为分析、预应力张拉时序影响及塔梁协同变形控制等, 但在支撑体系设计分析方面存在不足, 同时, 塔梁固结区在施工过程中因支撑体系稳定性问题会造成重大安全责任事故。

本文以景文高速高岭头水库特大桥为工程依托, 聚焦 π 型下横梁施工关键技术, 创新提出非落地支架支撑体系, 解决了在高塔高空有限作业环境下的下横梁施工支架设计与应用问题, 应用成果不仅解决了实际工程难题, 也可为类似桥梁结构的施工提供经验与参考。

一、下横梁施工特点

在塔梁固结体系桥梁中，主梁顶面与主塔下横梁顶面位于同一标高，属于主梁节段划分中的0号块，整个主梁0号块包含了主塔下横梁及其大小里程顺桥向的悬臂梁，主塔下横梁通常采用单箱单室截面，该结构处作为下塔柱和中塔柱的交点，钢筋密集，混凝土浇筑量大，施工荷载大，受力十分复杂，其施工质量对全桥的结构安全起着至关重要的作用，而且直接影响后续部位工程的施工。因此，下横梁的支撑体系设计决定了其施工质量的成败，具有不可逆的工程特性^[1]。

二、解决方法

目前，0号块现浇施工通常采用满堂（钢管）支架、或者劲性牛腿膺架。当0号块距离地面不高且有满堂（钢管）支架搭设

场地时，常采用满堂（钢管）支架工艺。当施工连续刚构桥梁0号块时，采用劲性牛腿膺架，劲性牛腿膺架一般采用万能杆件、贝雷梁、“321”公路梁等拼装，膺架与塔柱的连接采用预埋钢板焊接、预埋工字钢作支撑等形式。当斜拉桥主梁底面为水域或者距离地面较高时，采用满堂（钢管）支架不仅施工困难、成本巨大，而且安全系数低。而采用其它劲性牛腿膺架，又无临时拉索体系支撑，支架刚度控制困难，加之支架与塔身的连接通常为焊接，存在较大安全隐患，后期对预埋钢板的处理也比较困难。因此，需要寻求一种其它结构形式的现浇支架，即非落地式支架工艺进行高塔下横梁施工^[2]。

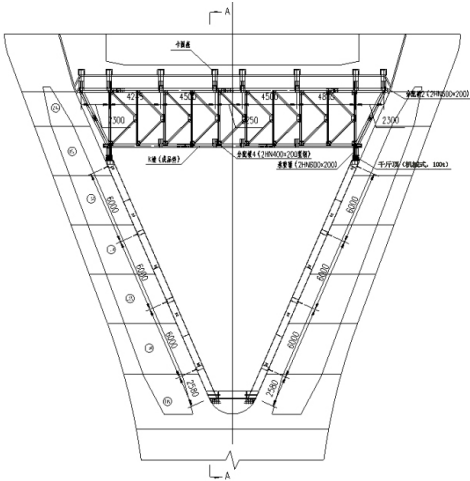
三、方案比选分析

方案比选分析表（高塔环境下）

方案	测算工期（天）	材料投入	吊装量	施工难度	风险系数	费用（万元）	适用性
落地支架	长，经测算，从支架搭设到完成混凝土浇筑总工期需60天	盘扣支架、一定数量的钢管、贝雷片、分配梁、方木	数量多，吊装重量较大	难度极大	极大	约400	不适用
劲性牛腿膺架	较长，经测算，从预埋到安装成型到完成混凝土浇筑总工期需50天	预埋件、钢板、牛腿膺架、分配梁、方木	吊装数量与重量较少	难度适中	较大	约260	适用
非落地式支架	较短，经测算，从支架搭设到完成混凝土浇筑总工期需45天	爬锥、高强螺栓、型钢斜撑、K型桁架、承重梁、分配梁、方木、机械式千斤顶	数量适中，桁架重量较重	难度最小	较小	约140	适用

四、支架设计

下横梁施工总荷载2500吨，根据支架受力计算分析，非落地式支架设计采用以下形式：塔柱内侧采用长20.58米双拼400H型钢斜撑，单侧各设置2道，底端采用同型号型钢进行连接，中间采用2I22a型钢K撑进行横向连接；底模采用CB450型K型桁架，共设置4榀；斜撑与K型桁架支点处采用100t机械式千斤顶、2HN600*200型承重梁；纵向分配梁采用2HN600*200及2HN400*200两种型号（图1）。



> 图1 下横梁支架平面图

五、主要施工方案

（一）施工准备

- （1）施工前，组织技术人员全面研究设计图纸，并将存在疑问之处提请设计单位予以明确，以充分了解设计意图。
- （2）进行混凝土配合比试验并进行优化。
- （3）完成现浇支架等临时结构的设计及受力计算。
- （4）做好主要施工设备选型，安排适时进场工作，并做好进场检验工作。

（二）现浇支架搭设

支架搭设步骤为：塔柱分叉段根部基础混凝土浇筑→塔肢预埋件安装→斜撑、水平撑及联结系安装→垫块及承重梁安装→K型桁架安装→K型桁架范围内三角形悬挑牛腿安装→横桥向分配梁安装→下横梁底模及侧模安装→施工下横梁下半部分→塔柱立面三角形牛腿安装→三角形悬挑牛腿与下横梁固结结构安装→下横梁上半部分盘扣支架安装→悬臂梁底模及侧模安装→施工上半部分下横梁^[3]。

① 基础混凝土浇筑

在下塔柱分叉段底部立模浇筑支架基础混凝土。浇筑前先铺设一层土工布，以便于后期基础混凝土的凿除，按设计要求在支架斜撑底端位置安装预埋钢板和钢筋网片。基础混凝土采用C50，浇筑过程中加强振捣以保证混凝土密实。

② 塔肢预埋件安装

随塔柱施工，在塔肢横桥向内侧及大小里程侧面按设计标高位置预埋 M42/D26.5 爬锥，用以固定斜撑及斜杆牛腿。

③ 斜撑及水平撑安装

塔肢内侧爬模拆除后，利用塔吊在塔肢内侧安装斜撑，单边塔肢内侧各安装 2 道双拼 400H 型钢斜撑，并采用 2I22a 作为横向连接系。吊装到位后通过爬锥将其固定于塔肢，并将杆件底部与基础预埋板焊接固定，然后安装单元间横向连接系，最后安装底部水平撑；吊装到位后通过爬锥将其固定于塔肢，并用螺栓杆件接头连接固定，然后安装单元间横向连接系^[4]。

④ 垫块及承重梁安装

先在斜撑顶部安装施工作业平台（4 片钢牛腿 + 踏板 + 护栏），然后依次安装钢垫块、千斤顶和承重梁。钢垫块采用 2cm 厚钢板制作，采用焊接方式固定于斜撑顶端。承重梁与斜撑之间设置 100t 机械式千斤顶用以调整支架顶面标高及后续支架的卸落，待标高调整到位后采用钢板垫平承重梁与垫块间缝隙，然后卸落千斤顶，使承重梁平稳落到斜撑上。

⑤ K 型桁架及连接杆安装

将运输进场的 K 型桁架构件在主塔下方场地拼装成型（单片桁架全重 18.6t），然后利用主塔两旁的塔吊同步起升抬吊安装，当 K 型桁架底面高于承重梁顶面 50cm 采用倒链将 K 型桁架牵引至安装位置，吊机缓慢松钩将其摆放于承重梁上，然后安装桁架限位件并采用角钢对 K 型桁架做临时支撑以防单榀桁架倾覆，最后吊机摘钩，依次吊装后续桁架，4 榀桁架全部吊装到位后，安装桁架下部连接杆，将 4 榀桁架连成一个整体。

⑥ 纵向分配梁及斜杆安装

将分段加工完毕的分配梁按设计要求进行连接，然后依次吊装到位，并按设计要求采用螺栓将其与 K 型桁架连接牢固。然后吊装依次吊装斜杆，并按设计要求将斜杆与分配梁（或牛腿）连接牢固。

⑦ 横向分配梁安装

将分段加工完毕的分配梁按设计要求连接为整体，然后利用塔吊依次吊装到位并采用焊接方式与纵向分配梁点焊固定。

⑧ 施工下横梁下半部分

铺设底模、安装钢筋、预应力、爬模爬升、浇筑混凝土。

（三）高空下横梁抗倾转结构安装

根据倾转荷载存在于横梁第二次浇筑的情况，利用第一次浇筑的下横梁设置抗倾转抵抗结构。在每个三角牛腿水平杆顶面下横梁两侧设置卡箍座结构，该结构与第一次已浇下横梁底板部分为面接触，仅传递、承受水平推力，将三角牛腿卡在下横梁上，限制三角牛腿水平杆的水平移动，从而限制牛腿及钢桁梁的倾转（图 2）。

① 确定下横梁组件的安装位置；

② 在三角牛腿底座上铺设分配横梁，分配横梁的铺设位置与下横梁组件的安装位置相对应；

③ 将下横梁组件安装至分配横梁上；

④ 确定卡箍座的安装位置，将卡箍座内的限位端板固定安装在下横梁的侧壁上；

⑤ 将卡箍底座与三角牛腿底座、限位端板焊接；

⑥ 焊接件固定安装至卡箍基座的卡接件内，并将焊接件焊接至三角牛腿上；

⑦ 在卡箍基座的两侧再铺设分配横梁。

（四）支架预压

预压荷载以浇筑混凝土工况下支架承受的全部荷载（第二次浇筑时钢筋混凝土实体重量 + 施工荷载）的 1.2 倍考虑，分 3 级进行加载，分别为预压荷载的 60%、100% 和 120%。

（五）模板安装

模板安装过程需与结构钢筋、预应力钢筋安装等工序交叉作业，总体安装顺序为：底模→侧模→内模→端模。

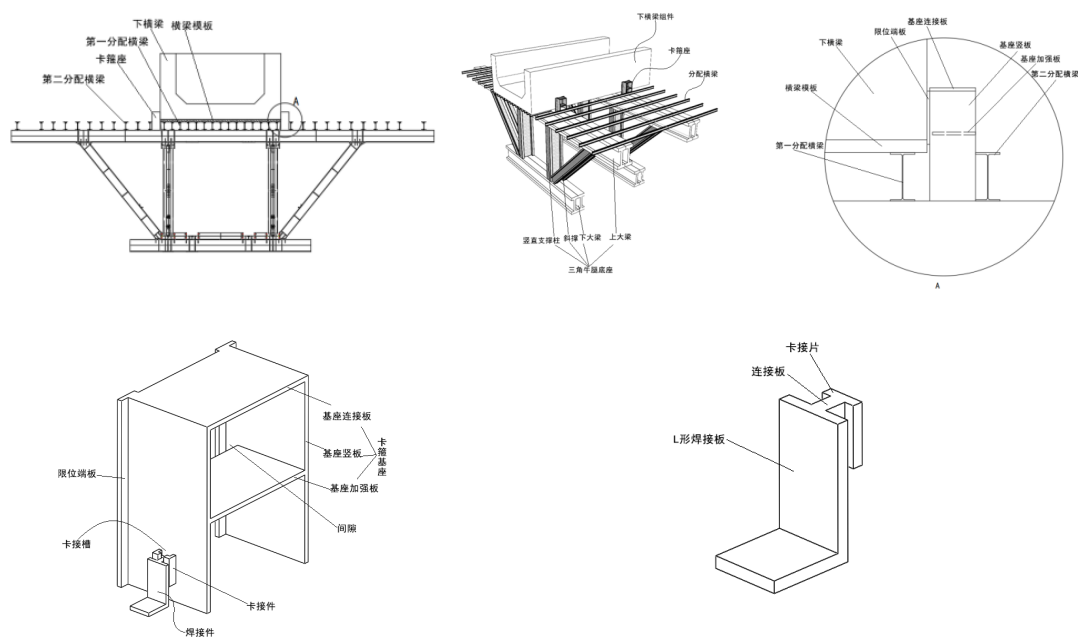


图 2 高空下横梁抗倾转结构安装示意图

（六）钢筋加工及安装

钢筋统一集中加工，现场安装。钢筋分两次绑扎，第一次绑扎下横梁底板、腹板一半高度、人洞钢筋以及相应的倒角钢筋，第二次绑扎下横梁一半腹板、下横梁顶板、 π 型悬臂段及相应的倒角钢筋。受力钢筋接头采用墩粗直螺纹套筒连接，其余钢筋接头采用绑扎或单面搭接焊。

（七）预埋件安装

按照设计图纸、桥梁监控单位要求做好主梁0号块附属工程预埋件、临时辅助设施预埋件和施工监控元件预埋。

（八）预应力管道及锚垫板安装

按设计要求完成锚垫板安装，锚垫板与预埋套筒栓接牢固，并对锚垫板表面上的压浆孔及连接螺孔用棉纱等材料填充，防止浇筑混凝土时泥浆渗入管道内或螺孔内。混凝土浇筑时，应严格封堵套筒，严防混凝土进入套筒内。

（九）混凝土施工

混凝土采用集中场拌，搅拌车运输至现场，通过布设在塔柱两侧的泵送管道，采用泵送方式进行混凝土浇筑。

（十）下横梁预应力张拉

按照设计要求对下横梁进行分两次张拉，采用智能张拉工艺。锚具采用成品Ⅰ类优质锚及其配套设备。

六、实施后的效果

本工艺利用了主塔上的预埋件为承重点，能与主塔结合良好，协同受力，保证了安装过程中桁架稳定性。支架的悬挑牛腿结构稳固、安全性高。通过支架卡箍座的设置，便于对三角牛腿底座与下横梁组件的水平位置进行固定，从而防止三角牛腿底座或下横梁组件受到水平载荷时发生倾转，结构简单，位置有利，施工操作方便，避免了采用其它较复杂结构需在高空悬空状态下作业的不利情况，提高施工的安全性（图3）。



> 图3 现场安装实物图

本工艺运用于景文高速高岭头水库特大桥 Z1、Z2主塔下横梁施工，解决了在高塔环境、不宜设置落地支架情况下下横梁和0号块悬臂段浇筑施工难题。实际施工工期40天，较测算工期减少了5天，有效提高了施工进度。实际施工费用约120万元，较测算费用减少约20万元。较落地支架、劲性膺架相比，取得了显著的经济效益。

七、总结

通过工程案例的成功运用，本工艺具有结构简单、协同受力、结构稳定、安全性能高等优点，适用于高塔高空、空间受限环境下的下横梁及0号块悬臂段的施工，可为类似项目提供借鉴与参考。

参考文献

- [1] 董高钟, 翁杨, 俞君楷. 双塔双索面钢混组合梁斜拉桥塔梁临时固结体系研究 [J]. 中国水运, 2024(8): 142-144.
- [2] 韩涛. 桥梁挂篮施工技术要点研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(002): 000.
- [3] 赵满. 矮塔斜拉桥主梁0#块支架与临时固结设计与应用 [J]. 价值工程, 2023, 42(35): 62-65.
- [4] 刘镇. 连续梁挂篮施工关键技术及控制研究 [J]. 工程技术研究, 2019.D01: CNKI:SUN:YJCO.O.2019-07-028.

大型模块化项目吊装一体化实施因素分析

何斌斌, 焦艳莹, 郭少林
中海福陆重工有限公司, 广东 珠海 519050

摘要：大型模块化项目建造时，结构片吊装风险最高，实现吊装一体化、提升安全系数是项目建设重点。这一举措能提高效率、减少作业次数、降低成本。本文聚焦模块化项目，深入整合分析影响吊装一体化的资源配置、四大协调机制及其他风险因素，旨在为未来专业一体化吊装实施提供助力，推动大型模块化项目高质量、高效率发展。

关键词：大型模块化项目；吊装一体化；资源配置；协调机制

Analysis of Implementation Factors for Integrated Hoisting in Large-scale Modular Projects

He Binbin, Jiao Yanying, Guo Shaolin
COOEC-Fluor Heavy Industries Co., Ltd. Zhuhai, Guangdong 519050

Abstract: When constructing large-scale modular projects, the hoisting of structural panels poses the highest risk. Achieving integrated hoisting and enhancing the safety factor are the key points of the project construction. This measure can improve efficiency, reduce the number of operations and lower costs. This article focuses on modular projects, deeply integrating and analyzing the resource allocation, four major coordination mechanisms, and other risk factors that affect the integration of hoisting and lifting. The aim is to provide assistance for the future implementation of professional integrated hoisting and lifting, and promote the high-quality and efficient development of large-scale modular projects.

Keywords: large modular project; integrated lifting; resource allocation; coordination mechanism

引言

加拿大 LNGC 液化天然气建造项目是一项综合性的模块化工程，其范畴广泛，涵盖设计、结构搭建，以及一座液化操作工厂、各类工具、存储设施、港口，乃至海上卸载设备。中海福陆重工有限公司珠海场地承担了该项目 157 个模块的建设任务，其中包含 393 个需吊装的结构片。

在工程项目中，安全始终是首要基准。项目以打造全球最安全项目为目标，将最大限度提升安全系数、降低安全风险作为项目的第一要义。同时，降低吊装次数、削减施工成本也是项目成本控制的重要目标，而实现一体化作业、扩大一体化吊装的安装范围，则是推动项目进展的关键步骤。

一、项目特点

（一）分包商种类冗杂。模块建造分包商构成繁杂，给项目推进带来了诸多挑战

场地建造中，与项目对接的接口单位情况同样复杂。11 家预制单位各自承担着不同模块、不同部件的预制工作，另外有 4 家总装单位将预制部件进行最终的组装，因技术水平、资源投入的差异，施工进度层次不齐。加之各专业之间存在交叉作业，信息沟通与协调难度大，进一步加剧了进度差异。例如，结构专业若未能按时完成结构框架的搭建，会直接延误配管与电气专业后续的布线、管道铺设工作。这种差异，极大地影响了项目整体的建设节奏，增加了项目管理的难度与不确定性。

（二）模块种类多样

这些模块涵盖了工艺设备、管道、电缆、仪表、暖通设备，可细分为完全不同的四类，模块种类呈现出显著的多样性。尽管模块之间存在一定程度的相似性，但每一类模块在一体化实施过程中，其涵盖范围及实施方式都有各自特点，不过在某些方面仍具有相互参考的价值。

（三）总装区域分散

总装区域分散是项目建造面临的一个显著特点。根据出货条件、船期安排以及模块大小等多种因素综合权衡，对各项目的总装场地进行分配。以 LNGC 项目为例，其总装作业涉及三个不同区域。这些区域在安全位置、地面条件等方面均存在差异，导致吊机带车工作时长增加，对吊装一体化作业效率产生明显影响。

（四）施工周期拉长^[1]

格栅、扶手、管线以及电仪等附加结构，其到货时间深受建造工艺、质量检测流程以及运输时长等因素制约，存在较大不确定性。这种不确定性进一步导致安装时间难以精准把控。在吊装一体化作业中，各环节的紧密配合至关重要。如果附加结构不能按时到货，将直接影响到吊装作业的顺利进行，甚至可能导致整个项目的进度延误。

（五）气候因素制约

珠海市位于珠江口西岸，毗邻广袤的南海，属于典型的南亚热带季风海洋性气候。在这样的气候条件下，连续高温的室外作业环境在很大程度上限制了施工人员的工作效率，进而影响操作的精准度与连贯性，增加施工失误风险；同时，雷雨天气不仅会造成施工中断，还可能对吊装设备及未完成安装的模块造成损害，延误施工进度，给吊装一体化作业的有序开展带来诸多挑战。

二、资源配置

在吊装一体化实施进程中，吊装方案设计至关重要。方案需全面兼顾各个专业以及脚手架等辅助施工的附加结构重量。这些结构重量的累加，对吊索具的承载能力、履带吊的型号提出了更为严苛的要求。因此，在方案设计阶段，要精准核算各类附加结构重量，据此筛选适配的吊索具与履带吊。

现场施工环境复杂多变，不同区域、不同时段对车辆、索具的需求各异，最大限度地合理调配车辆、索具资源，是保障吊装一体化方案在现场施工得以有效执行的关键环节。通过科学规划资源调配，能够避免资源闲置浪费，提高资源利用效率，确保各施工环节紧密衔接，推动吊装一体化作业有条不紊地开展，为项目按时完工提供坚实支撑。

（一）车辆资源配置

在大型生产制造企业中，车辆资源是项目施工不可或缺的重要组成部分，它们在物料运输、设备吊装、现场施工等方面发挥着关键作用。然而，车辆的购置、租赁及维护成本高昂，这使得车辆资源的合理安排成为影响工程效率与项目效益的关键因素。在激烈的市场竞争中，合理安排车辆资源不仅能够保障项目的顺利实施，还能为企业带来显著的经济效益。

以履带吊为例，大型履带吊移动速度缓慢，在吊装作业前期，必须充分考虑其带车时间。在吊机行进路线上，需提前完成路面清理工作，确保吊机能够快速通行，降低待机风险，避免因时间浪费导致租赁成本增加。此外，若遇地面状况不佳，应提前组织现场工人铺设铁皮，防止路面被压坏，从而减少场地维修费用。鉴于此，针对大型吊装作业，在同一建造区域内，应尽可能考虑相邻、相近模块同时的吊装作业，并利用该区域内现有的履带吊资源完成模块结构片的吊装任务，尽量避免跨区域调配吊机车辆，以此缩短吊机带车时长，降低车辆台时。

（二）索具资源配置

吊装索具的准备工作需紧密贴合实际吊装方案，吊装索具的

准备工作是确保吊装作业顺利进行的基础，特别是在场地内多个项目同时进行的情况下，提前筹备并完成挂扣操作显得尤为重要。通过详细解读吊装方案、提前筹备索具资源、完成挂扣操作以及定期检查与维护，可以有效提高索具资源的利用效率，确保吊装作业的安全性和高效性。

为保障总装计划顺利推进，不仅要早下达供施工使用的吊装方案，更要提前细致检查方案中索具的相关情况，检查吊索配有第三方相关认证的证书并查看检验标签，以及平衡梁和吊耳需要100%进行无损检测等举措，及时协调索具资源的倒运工作。这些细致的准备是确保索具资源充分发挥效能的核心要点，也是总装计划得以顺利完成的基础支撑。

（三）人力资源配置

人力资源堪称各类资源中最为关键的部分，在项目中具有举足轻重的地位。项目施工过程中，完备的施工资源固然重要，但人力资源更是不可或缺的核心要素，也是项目运转的有力支撑^[2]。

项目对人力资源的管理模式以及职能划分是否科学合理，直接左右着项目的施工效率。在项目推进过程中，随着不同阶段任务的变化，对人员工作能力的要求也存在显著差异。这就要求项目负责人时刻紧密跟进项目施工进度，依据实际情况灵活、及时地调整人员工作职能，确保人力资源得到精准匹配与高效利用，从而保障项目各环节有序衔接，施工效率稳步提升。

三、四大协调

协调，堪称项目的核心要义，是项目达成生产目标的根本所在^[3]。通过明确项目目标与计划、建立有效的沟通机制、强化团队协作能力和动态调整与优化，项目经理可以实现高效的协调，确保项目顺利推进。高效的协调不仅能够帮助项目达成预期目标，还能助力公司实现最终的盈利目的，为企业的可持续发展提供有力支持。

（一）总装单位内部协调

在大型结构片吊装实施中，总装单位扮演着至关重要的角色。建立健全总装单位内部协调机制^[4]，乃是实现其内部高效协调的基石。通过这一机制，推动总装单位内部结构、配管、电仪、机械等专业的管理工作实现统筹运作与协同联动，确保总装单位能够顺利完成承建项目的施工作业任务。

具体而言，各总装单位首先需全面评估承建项目的施工周期及施工难度，并依据既定施工顺序，安排专人负责全程追踪管理。在此过程中，要对项目的关键时间节点做到了如指掌，并由总装单位内部需进行充分商议，对各节点施工的可行性展开严谨评估，对于存在争议的时间节点，详细记录争议原因，进而逐步制定出完善且合理的施工作业时间节点表。

与此同时，针对已下达的一体化建造清单，总装单位需要反馈无法实施一体化安装的施工项，记录影响因素，逐步形成可追溯性的施工作业状态清单，助力总装单位内部协调工作更加科学、高效地开展。

（二）总装单位与项目组协调

在项目实施进程中，密切沟通始终是关键且不可或缺的核心要素^[6]。项目组职责范畴不仅包含项目的各类安全事务，更为关键的是，要切实承担起项目运转的中心纽带职能。

总装单位作为项目施工的直接执行主体，应依据内部协调整理形成的施工作业时间节点表以及施工作业状态清单，定期且及时地向项目组开展工作汇报，紧密结合实际工作进度以及当下工作需求，实时反馈至项目组指定的对接负责人。项目组在收到反馈信息后，需充分发挥牵头引领作用，针对影响模块施工的各类复杂因素进行系统梳理与分类汇总，并与总装单位及相关各方逐一进行深入沟通，共同研讨解决方案，全力避免因问题堆积而对后续总装施工计划造成不利影响，切实保障项目能够按照既定规划顺利推进。

总装单位与项目组之间应构建常态化的沟通协调机制，定期召开协调会议。由总装单位就施工过程中遇到的资源调配难题、技术瓶颈等问题进行集中反馈，项目组则依据项目整体目标与资源状况，当场给予明确指导意见或协调各方资源予以支持。同时，项目组也要及时向总装单位传达项目的最新要求、变更信息，确保总装单位施工始终与项目整体方向保持一致，双方携手共进，为项目的成功交付奠定坚实基础。

（三）项目组与设计部协调

设计部业务范畴贯穿项目建造的全生命周期。然而，鉴于场地内同时开展四个项目的施工作业，人力资源难以集中全力服务于单个项目。

面对这一局面，项目组首先要充分认识并明确人力资源紧张的现实状况。在此前提下，将简化一体化清单梳理流程^[6]、规避重复作业作为工作的基础，把提升分包商信息反馈的精准度作为关键抓手，及时组织专项会议，精确界定一体化施工的范围，严谨核实分包商反馈施工进度准确性，并将最终确定的一体化清单及时反馈给设计部。同时，为设计部的工程师预留足够时间，以便其对方案进行优化升版，并完成向业主的提交审批流程，从而提升总装吊装作业的安全系数，有效降低现场作业延误的风险。通过项目组与设计部的密切协同和高效沟通，确保项目设计方案与现场施工实际紧密贴合，为项目的顺利推进提供坚实保障。

（四）项目组与现场部门协调

项目组作为项目的核心管理中枢，肩负着管控项目结构预制、油漆喷涂、脚手架搭建等环节的施工进度，制定科学合理总装时间计划表的重任。同时，需构建动态管理机制，以此保障项目施工能够连贯有序地推进，各环节无缝衔接^[7]。

项目组与现场部门之间的高效协调，是吊装一体化安全实施的重要保障。这就意味着项目组需要主动担责。主动与舾装部对接沟通，精准确定油漆作业的完成时间，为后续工序开展提供明确时间节点。主动联系生产运营部，提前申请调配履带吊、汽车吊、叉车等车辆资源，确保在总装作业当日，现场有充足且适配的车辆资源可供调用，避免因车辆短缺延误工期。主动与结构产品部的现场监督人员碰面交流，提前对结构片的现场准备状况进行细致检查，严格对照吊装方案，确保各项准备工作符合方案要

求，杜绝因准备偏差引发安全事故或施工阻碍。主动与起重作业部进行深入沟通，建议对方提前安排起重指挥人员勘察总装场地的施工条件，使其充分熟悉吊装方案，并做好吊装索具的准备工作，确保起重作业安全、高效进行。

一旦在上述任一环节发现实际情况与计划出现偏差，项目组应立即启动处理机制^[8]，调配资源，及时纠正偏差，全力推动项目按照既定计划稳步执行，保障吊装一体化作业顺利开展，助力项目早日圆满完成。

四、吊装一体化实施进步与创新

大型结构片吊装作为项目的核心关键环节，安全始终是重中之重，必须时刻将安全守则铭记于心^[9]。在项目实施过程中，应以严格贯彻公司安全规章制度与一体化策略为根本出发点，在确保吊装能力完全符合技术规范及安全规范要求的基础上，积极响应公司降本增效的号召。通过不断优化吊装方案设计，尽可能提高地面预装配程度，这是贯穿吊装方案设计全过程、始终不渝追求的目标。

吊装一体化成果的达成，高度依赖于项目强大的协调能力。其实施不能单纯凭借设计理论验算来推进，更需要充分激发施工参与各方的积极性与主观能动性。在此过程中，应切实发挥“共同反馈、共同商议、共同评判、共同制定”的四同效用^[10]，全方位降低各方因素对吊装一体化实施的不利影响。以此为项目建设高效推进创造有利条件，为加快施工进度、缩短建造周期增添更多可能，助力项目早日达成预期目标，实现经济效益与社会效益的双丰收。

参考文献

- [1] 何建波. 大型设备吊装一体化总承包管理模式研究[J]. 石油工程建设, 2010, 36(02): 131-134+16
- [2] 艾海玲. 浅析基于组织内部平衡的企业内部高效协调管理机制建设[J]. 焦作大学学报, 2013, 27(01).
- [3] 张瑞华. 企业内部协调的平衡杠杆策略研究[J]. 价值工程, 2013, 32(23): 171-172.
- [4] 濮洪九. 构建企业内部协调有效的运行机制[C]//. 构建新型煤炭工业体系文集. 2007: 688-692.
- [5] 刘军岐, 王俊杰. 浅谈“吊装一体化”中的协调[J]. 安装, 2012(10): 58+64.
- [6] 王利金, 张宗峰. 海洋平台上部组块海上吊装优化分析[J]. 中国造船, 2009, 50(A11): 397-402
- [7] 张耀辉, 尹一军. 企业内、外部能力平衡与公司治理效率研究[J]. 暨南学报(哲学社会科学版), 2020, 42(1): 1-18
- [8] 于洋. 浅谈基于一体化的LNG模块建造管理[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(12): 60-62.
- [9] 温承革, 王勇, 杨晓燕. 组织内部协调机制研究[J]. 山西财经学院学报, 2004, 26(6): 85-90
- [10] 李学栋, 何海燕. 企业管理中的协调问题与管理规范化[J]. 邮政研究, 1999, 15(5): 31-32.

汽爆饲草料加工生产中的工艺参数优化与质量控制

贾涛

北方中郡运营管理（北京）有限公司呼和浩特分公司，内蒙古 呼和浩特 010010

摘 要： 随着现代农业的发展，饲草料作为重要的动物饲料，逐渐成为提高畜牧业生产效率的重要保障。汽爆饲草料加工技术通过高温高压处理改善草料的可消化性和营养价值。然而，工艺参数的优化和质量控制仍然面临挑战。本文分析了温度、压力、时间等工艺参数对饲草料质量的影响，并提出优化方案。研究表明，合理的工艺控制可显著提高饲草料的营养价值、口感和可消化性，从而提高生产效率并降低成本。本文还提出了质量控制措施，包括原料质量、设备监控和产品检测，确保稳定的生产质量。最后，展望了汽爆饲草料加工的未来发展，强调了技术创新在提升效率和环保方面的潜力。

关 键 词： 汽爆饲草料；工艺参数优化；质量控制；生产效率；饲料加工

Process Parameter Optimization and Quality Control in the Processing and Production of Explosive Feed

Jia Tao

North Zhongjun Operation Management (Beijing) Co., Ltd. Hohhot Branch, Hohhot, Inner Mongolia 010010

Abstract: With the development of modern agriculture, forage, as an important animal feed, has gradually become an important guarantee for improving the production efficiency of animal husbandry. The air-blast forage processing technology improves the digestibility and nutritional value of forage through high-temperature and high-pressure treatment. However, the optimization of process parameters and quality control still face challenges. This paper analyzes the influence of process parameters such as temperature, pressure and time on the quality of forage, and proposes an optimization scheme. Studies show that reasonable process control can significantly enhance the nutritional value, taste and digestibility of forage, thereby improving production efficiency and reducing costs. This paper also proposes quality control measures, including raw material quality, equipment monitoring and product testing, to ensure stable production quality. Finally, the future development of explosive feed processing was prospected, and the potential of technological innovation in improving efficiency and environmental protection was emphasized.

Keywords: air-blast forage; optimization of process parameters; quality control; production efficiency; feed processing

引言

饲草料在农业生产中占有重要地位，它直接关系到畜牧业的生产效率与动物的健康。传统的饲草料加工方式，如干草和青贮，虽然在某些领域广泛应用，但其在提高饲草料的营养价值和消化率方面的效果有限。随着农业技术的进步，汽爆饲草料加工技术逐渐成为一种重要的加工方式。该技术利用高温高压处理，可以有效提高饲草料的营养成分，改善其口感和消化性，从而增加牲畜的摄入量，提升动物生产性能。这一技术的应用，特别是在提高动物饲养效率和改善肉质及乳品质量方面，已经取得了显著成果。然而，在汽爆饲草料加工过程中，如何合理控制加工工艺参数以实现最佳的饲草料质量，仍然是业界研究的一个热点问题。温度、压力、时间等关键工艺参数的优化不仅能显著提高饲料的营养价值和消化性，还能够降低生产成本，提升饲料在市场中的竞争力。

一、汽爆饲草料加工的基本原理及应用

（一）汽爆饲草料加工的基本原理

汽爆饲草料加工是通过将草料与蒸汽混合后，在一定的温度和压力条件下进行处理，使草料中的细胞壁破裂，纤维素发生变化，从而提高草料的可消化性和营养价值。该过程通过热处理改

变草料的结构，使其营养成分更加容易被动物吸收^[1]。与传统的饲草料加工方式相比，汽爆处理能够有效地保留草料的营养成分，同时显著提高其消化率。研究表明，汽爆过程中温度通常控制在150° C以上，压力在1.2 MPa至2.0 MPa之间，处理时间一般为20秒至3分钟不等。适当的温度、压力和时间组合能够最大限度地破坏草料中的细胞壁，释放出更多的可溶性糖分和蛋白质，

为动物提供更多的营养来源。不同的草料种类和处理目标决定了具体的工艺参数，因此对各参数的精确控制显得尤为重要。通过调节这些工艺条件，可以根据不同动物的消化需求，优化饲料的营养成分和口感。

（二）汽爆饲草料加工的应用领域

汽爆饲草料在畜牧业中广泛应用，特别是在奶牛、肉牛、羊等牲畜的饲养过程中，效果尤为显著^[2]。通过汽爆处理后的草料，其纤维素和其他复杂结构的降解可以显著提高动物的消化率。研究显示，经过汽爆处理的饲草料更容易被消化吸收，从而增加动物对饲料的摄入量，促进其生长和提高生产性能。尤其对于奶牛和肉牛来说，汽爆饲草料的应用能够增强其乳品和肉类的质量，提升畜牧业的经济效益^[3]。此外，汽爆技术也适用于不同种类的饲料，如青贮饲料、牧草饲料等，不仅适用于牛羊的日常喂养，还能够满足其他动物的营养需求。汽爆饲草料的广泛应用，有助于提高饲养效率、减少资源浪费，促进畜牧业的可持续发展。随着养殖规模的扩大，汽爆饲草料的生产能力和效率也在不断提升，未来有望在更多领域得到应用。

（三）汽爆饲草料加工的挑战

尽管汽爆饲草料加工技术具有广泛的应用前景，但在实际生产过程中仍然面临许多挑战。首先，如何精确控制温度、压力和时间的变化，以确保产品的质量和稳定性，仍然是一个重要问题。不同草料的化学成分和结构差异使得每种草料所需的加工条件不同，如何为不同草料量身定制加工参数，是技术优化的关键^[4]。其次，原料的质量差异也对最终产品的质量产生较大影响，尤其是草料的水分含量、粗纤维含量等因素会影响汽爆处理的效果，因此需要对原料进行严格的质量控制^[4]。此外，汽爆饲草料加工设备的性能和运行状态对生产效率和饲料质量也有重要影响。设备故障或操作不当可能导致处理过程的不稳定，进而影响最终产品的质量。因此，加强设备的日常维护和精确调控系统的管理是保证生产质量的基础。综上所述，虽然汽爆饲草料加工技术在理论上具有巨大优势，但在实际应用中，如何克服这些技术性挑战，优化生产过程，仍然是业界面临的重大问题。

二、汽爆饲草料加工工艺参数的优化

（一）温度对汽爆饲草料质量的影响

温度是影响汽爆饲草料加工质量的一个关键因素。研究表明，在汽爆过程中，温度的变化对草料的细胞壁破裂和营养成分释放具有直接影响。温度控制在150° C至170° C之间时，能够显著提升草料的消化率，同时避免过高温度对其营养成分的破坏。较高的温度能够加速草料细胞壁的裂解，使得草料中的可溶性糖类、蛋白质等营养成分释放出来，从而提高饲料的可消化性。然而，温度过高则可能导致一些热敏感营养成分的降解，特别是一些水溶性维生素和微量元素的损失。因此，温度的合理控制至关重要。研究还发现，当温度低于150° C时，草料的细胞壁可能无法充分破裂，影响饲草料的消化性；而温度过高时，不仅会影响营养成分的保持，还可能导致饲草料的质地发生不利变

化，降低饲料的口感和动物对饲料的接受度^[5]。因此，在实际生产过程中，需要根据草料的种类和养殖对象的消化需求，灵活调节温度，以确保加工效果的最佳平衡。

（二）压力对汽爆饲草料质量的影响

压力是影响汽爆饲草料加工的重要工艺参数。汽爆过程中，适当的压力可以促进蒸汽进入草料内部，从而加速草料细胞壁的破裂，提升草料的可消化性。压力过低时，蒸汽难以均匀渗透至草料内部，导致热处理不均匀，从而影响其质量和消化效果。研究表明，压力控制在1.5 MPa至2.0 MPa之间时，能够有效增强草料的可消化性，确保营养成分均匀释放，并使草料的营养价值达到最佳水平。合理的压力有助于在短时间内完成草料的处理，使得草料保持较高的营养成分，同时改善其口感和消化性。然而，过高的压力可能导致草料过度吸水，影响其口感和后期的储存性能。过高的水分含量可能使草料变得湿润，进而影响其发酵和保存。因此，生产过程中应在确保饲料质量和营养成分最大化的前提下，合理控制压力，以提高生产效率和降低能耗。

（三）时间对汽爆饲草料质量的影响

汽爆时间是影响饲草料热处理效果的另一个关键参数。时间过短可能导致草料未能完全破裂，从而无法充分释放其中的营养成分，影响其消化率和营养价值；而时间过长，则可能导致草料中的一些营养成分，尤其是蛋白质和维生素等热敏感成分的流失，影响最终的饲料质量。因此，如何合理控制汽爆时间，确保草料得到适当的热处理，是提高汽爆饲草料质量的关键^[6]。研究表明，适当延长汽爆时间可以进一步提高草料的消化率，使草料的细胞壁完全破裂，从而提高饲料的营养吸收率。但是，随着时间的延长，草料的结构可能会过度松散，影响其口感和品质。根据不同草料的种类、目标动物的消化特点和生产要求，汽爆时间应根据实际情况进行调整。例如，对于粗纤维含量较高的草料，可以适当延长处理时间，以确保其充分降解，而对于易损害的饲料，则需要控制在较短的时间内完成处理。通过精确的时间控制，能够最大限度地提高饲料的营养价值和消化效果，从而增强饲料的市场竞争力。

三、汽爆饲草料加工过程中的质量控制

（一）原料质量控制

在汽爆饲草料的生产过程中，原料的质量是决定最终饲料质量的关键因素。不同种类的草料、不同产地的草料以及草料的干湿度、粗纤维含量等，都将直接影响到汽爆处理效果和最终产品的质量。例如，湿度过高的原料可能会影响蒸汽与草料的接触效率，导致处理不均匀，从而影响草料的消化性和营养成分的释放。而粗纤维含量过高的草料，可能导致在处理过程中无法完全降解，影响草料的可消化性^[7]。为了确保高质量的汽爆饲草料，必须严格控制原料的选择和预处理。选用优质的草料原料是保证生产过程中各项质量标准达标的前提。在原料选择上，优质草料应具备较低的含水量、适中的粗纤维含量，并且没有受到污染。此外，预处理环节同样重要。通过预处理，可以调整草料的湿度，

使其适合蒸汽处理，并能有效去除不必要的杂质。对原料的预处理不仅可以提高加工效率，还能够最大化保留草料的营养成分，从而提升最终产品的质量。

（二）设备运行监控与维护

汽爆饲草料加工设备的性能和状态直接影响加工效果。设备的温控系统、压力控制系统等关键部件的稳定运行是确保加工质量的前提。如果设备出现故障或运行不稳定，将直接导致加工参数的偏差，从而影响饲草料的质量^[8]。例如，温控系统不稳定可能导致处理温度无法保持在所需范围内，进而影响草料的营养成分和消化性。压力控制系统的失效可能导致草料处理不均匀，导致不同批次的饲草料质量差异较大。因此，加强对设备的监控和维护，确保设备处于最佳工作状态，是提高生产效率和确保饲料质量的有效途径。常见的设备监控手段包括实时温度和压力数据采集系统，这些系统能够精准监测生产过程中各项关键参数，并实时反馈，确保加工过程的稳定性^[9]。同时，定期的设备维护和检修同样至关重要，设备在长期运行过程中容易出现磨损和老化，定期检查和维修能够及时发现问题并进行修复，避免因设备故障而影响生产质量。因此，设备管理与监控系统的优化不仅是提高汽爆饲草料质量的保障，也是提高生产效率、降低成本的关键环节。

（三）最终产品的质量检测

质量检测是确保汽爆饲草料符合标准、满足市场需求的重要环节。通过定期检测饲草料的营养成分、消化率、口感等关键指标，可以及时发现生产过程中的问题，并进行调整。营养成分检测通常包括对草料中蛋白质、脂肪、粗纤维、矿物质和维生素等成分的测定，确保饲料的营养比例符合动物的需求。此外，消化率测试是评估饲草料质量的一个重要指标，能够准确反映草料在动物体内的消化效果和营养吸收率。口感评定则能够从感官角度反映草料的质量，尤其是在奶牛和肉牛等动物饲养中，饲料的接

受度直接影响动物的摄食量，进而影响生产性能。为了确保检测的准确性和全面性，质量检测需要定期进行，并结合生产过程中出现的实际问题进行针对性调整。例如，如果发现某批次饲草料的消化率不达标，可以分析具体原因，是否与加工过程中的温度、时间或压力控制不当有关，进而做出优化调整。定期的质量检测不仅可以保证产品符合标准，还能够帮助生产者及时发现潜在问题，降低生产风险^[10]。

四、汽爆饲草料加工的未来发展方向

未来，汽爆饲草料加工将更加注重节能降耗和环境保护。随着全球对可持续发展和绿色技术的关注增加，汽爆饲草料加工技术也将朝着更加高效和环保的方向发展。采用节能型设备和优化工艺参数，能够有效减少能源消耗，降低生产成本，同时减少对环境的负面影响。随着智能化和自动化技术的不断发展，汽爆饲草料加工将更加精准和高效，能够实现温度、压力、时间等工艺参数的实时监控和调整，从而进一步提升生产效率和产品质量。这种发展趋势不仅能够提高整体生产效能，还能满足市场对高品质饲料的需求，推动农业生产方式的现代化，促进农业产业的可持续发展。

五、结语

汽爆饲草料加工技术作为现代饲料加工的重要手段，通过对工艺参数的优化和质量控制的有效实施，能够显著提升饲草料的营养价值和消化性。随着技术的不断进步和应用的推广，汽爆饲草料加工将进一步提升其在畜牧业中的重要性，为提升动物健康和生产效益提供有力保障。

参考文献

[1] 廖鹏, 陈兴国, 林恒鑫, 等. 流变学在固体农业物料加工领域的应用研究进展 [J]. 中国农机化学报, 2022, 43(03): 84-91. DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2022.03.011.

[2] 马娟, 冯斌, 王超, 等. 面向牛粪与核桃果枝的遥控自走式翻堆机发酵工艺优化 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(S1): 442-448.

[3] 王先柳, 黄引超, 钱文静, 等. 沙棘枝干汽爆加工效果评价 [J]. 中国畜牧杂志, 2023, 59(03): 234-239. DOI: 10.19556/j.0258-7033.20220315-04.

[4] 闫庆忠. 饲草青贮技术及牛羊养殖应用效果 [J]. 农业工程技术, 2022, 42(29): 88+90. DOI: 10.16815/j.cnki.11-5436/s.2022.29.056.

[5] 高雪梅, 焦婷, 雷赵民, 等. 体外产气法评价不同青贮添加剂处理下汽爆玉米秸秆品质 [J]. 草原与草坪, 2021, 41(06): 30-36. DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2021.06.005.

[6] 崔晓琴, 庞鹤鸣, 杨志娟, 等. 藜麦饲草饲喂肉羊育肥效果试验研究 [J]. 畜牧兽医杂志, 2021, 40(01): 16-19.

[7] 冉福, 焦婷, 雷赵民, 等. 不同汽爆处理下玉米秸秆品质综合评价 [J]. 草地学报, 2020, 28(03): 835-843.

[8] 张慧玲, 王志伟, 周中凯. 不同汽爆处理对藜麦秸秆化学组成及纤维结构的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(07): 105-112. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2017.0428.

[9] 张莉莉, 张琳琳, 崔占鸿, 等. 蒸汽爆破处理油菜秸秆与青藏高原常见粗饲料组合效应评价研究 [J]. 饲料研究, 2022, 45(16): 108-114. DOI: 10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2022.16.022.

[10] 王文明, 陈红意, 赵满全. 提高紫花苜蓿热风干燥品质的工艺参数优化 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 337-345.

船舶结构设计中提高疲劳寿命的维护策略

李露露，庞卫芳

镇江集智船舶科技有限公司，江苏 镇江 212000

摘要：船舶结构的安全性是影响其整个使用寿命的重要因素。由于海洋环境的复杂和不确定，船舶结构所面临的风险相对较大。在船舶结构设计中，疲劳寿命预测和维护策略是保证船舶安全的关键环节，对于确保船舶在复杂海洋环境下安全运行具有重要意义。本文通过深入研究船舶结构设计的要点，分析影响其疲劳寿命的各种因素，并详细介绍在船舶结构设计中预测疲劳寿命的方法。同时探讨在船舶结构设计中如何进行疲劳寿命维护，从而提高船舶的使用寿命和安全性能。

关键词：船舶结构；疲劳寿命；维护策略

Maintenance Strategies for Improving Fatigue Life in Ship Structure Design

Li Lulu, Pang Weifang

Zhenjiang Jizhi Ship Technology Co., LTD. Zhenjiang, Jiangsu 212000

Abstract: The safety of ship structures is an important factor affecting their entire service life. Due to the complexity and uncertainty of the Marine environment, the risks faced by ship structures are relatively large. In the structural design of ships, fatigue life prediction and maintenance strategies are key links to ensure the safety of ships and are of great significance for ensuring the safe operation of ships in complex Marine environments. This paper conducts in-depth research on the key points of ship structure design, analyzes various factors affecting its fatigue life, and elaborates on the methods for predicting fatigue life in ship structure design. Meanwhile, it explores how to carry out fatigue life maintenance in the structural design of ships, so as to improve the service life and safety performance of ships.

Keywords: ship structure; fatigue life; maintenance strategy

引言

优化船只构造的设计对于保证其在运作期间抵御各类外部压力来说至关重要。随着服务期的延长（一般可达二十年），因长时间操作导致船身构件产生持续性的压力，从而引发船体的磨损，削弱其安全性和使用期限。

一、船舶结构疲劳寿命概述

（一）疲劳寿命的定义

船舶结构疲劳寿命是指在特定工作条件下，船舶结构能够承受无数次重复载荷作用而不发生疲劳破坏的寿命。疲劳寿命是船舶结构设计、建造和运营的重要参数，直接关系到船舶的安全性和经济效益^[1]。

（二）疲劳寿命的影响因素

1. 材料特性：船舶结构疲劳寿命与材料本身的抗疲劳性能密切相关。不同材料的疲劳性能差异较大，如不锈钢、铝合金、钛合金等。2. 载荷特性：船舶结构在运行过程中，所承受的载荷具有重复性和复杂性。载荷特性包括载荷大小、载荷频率、载荷波形等。3. 结构形状：船舶结构形状对疲劳寿命也有一定影响。结构形状越复杂，疲劳寿命越低^[2]。4. 环境因素：海洋环境、气候条件、船舶运行速度等环境因素对船舶结构疲劳寿命有显著影响。5. 制造工艺：船舶结构制造工艺对疲劳寿命有重要影响。良好的

制造工艺可以降低残余应力，提高疲劳寿命。

（三）疲劳寿命评估方法

1. 基于经验的疲劳寿命评估：通过分析船舶结构在实际运行过程中的疲劳破坏情况，总结出相应的经验公式，对船舶结构疲劳寿命进行评估^[3]。2. 基于有限元分析的疲劳寿命评估：利用有限元软件对船舶结构进行建模，分析其在不同载荷条件下的应力分布和疲劳寿命。3. 基于实验的疲劳寿命评估：通过疲劳试验，对船舶结构在不同载荷条件下的疲劳寿命进行评估。

二、船舶结构设计中提高疲劳寿命的方法

（一）基本原则

船舶结构设计中的疲劳寿命预测与维护策略深度融合了材料力学特性与工程实践经验，其核心在于构建具备动态适应性的评估体系，既要满足船舶全生命周期内的结构完整性要求，又要兼顾运营成本控制的现实考量。在安全性维度，设计者必须建立基

于非线性损伤累积模型的预警机制，这类模型通过整合波浪载荷谱与材料断裂韧性参数，可精确评估结构节点在交变应力作用下的裂纹萌生阈值——特别是针对焊接接头这类应力集中区，其疲劳寿命往往比母材缩短42%~65%，这要求设计阶段必须采用梯度匹配原则^[4]。

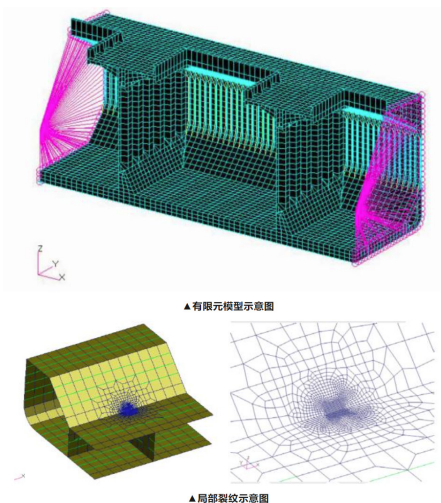
（二）材料选择与匹配

材料匹配策略的本质是建立性能参数的动态平衡，选择合适的材料是提高疲劳寿命的基础。根据船舶船体和其他结构的应用环境和受力特点，选择具有良好疲劳性能的材料，如高强度钢、铝合金、钛合金或复合材料。材料的微观结构，如晶粒大小、相分布和微观缺陷，也会影响其疲劳寿命。通过热处理、冷加工等方法优化材料的微观结构，可以提高其抗疲劳性能^[5]。此外，表面处理技术如喷丸、滚压和涂层，可以引入有利的残余应力分布，提高材料的疲劳强度。在刚度匹配层面，甲板结构采用的5083-H116铝合金与船体钢结构的弹性协调需要精确计算热膨胀系数差异，当温度变化幅度超过30℃时，界面处的应力集中因子会增至1.8~2.3，这直接推动了梯度过渡连接技术的创新应用。耐腐蚀体系的构建则呈现出多层次特征，双相不锈钢的钝化膜自修复能力（点蚀电位可达+1050mV）与有机硅烷涂层的物理屏障作用形成协同效应，使得关键部位的腐蚀速率稳定控制在0.03mm/a阈值之下。在焊接工艺领域，基于热-力耦合效应的数值模拟技术可准确预测不同线能量输入下的HAZ软化程度，当采用低氢型焊条配合多层多道焊技术时，接头区的冲击韧性值可提升至基准材料的85%以上，这种工艺革新显著改善了高强钢焊接结构的疲劳性能图谱。

（三）船舶结构采用合理的结构布局

在船舶结构形式与布局的决策过程中，设计者需要建立多维度的性能映射矩阵，这种映射关系不仅涉及静态力学参数的优化配置，更需考量动态服役环境下的性能衰减轨迹^[6]。单壳体结构作为基础船型的主流选择，其设计优化着重于应力传递路径的拓扑重构——通过计算等效应力云图确定肋骨间距与板材厚度的最佳配比（常规货船肋骨间距多控制在600—800mm区间），这种布局策略能够在降低钢材用量约8%~12%的同时，确保船体梁在遭遇波浪弯矩时的整体挠度不超过L/1500的临界值（L为船长）。双壳体结构的创新应用则源于对破损稳性要求的重新诠释，其内外壳板的协同变形机制需通过弹塑性有限元分析精确把控，特别是在碰撞工况下，当外层板发生屈曲变形吸收约35%~45%的冲击能量时，内层板的应力水平仍能维持在材料屈服强度的70%以下，这种分级耗能设计使得油轮这类高危船型的破损概率降低了60%以上。多壳体结构的技术突破体现在相变材料的创新应用上，某些极地船舶的中间壳体层填充的微胶囊相变材料（相变焓值达220~250kJ/kg），能在-30℃至5℃温域范围内通过潜热吸收有效延缓冰层挤压导致的应力累积，这种结构创新使破冰作业时的结构损伤速率降低了约30%。结构布局的优化本质上是空间利用效率与力学性能的博弈过程，货舱区域的梁格系统设计需要遵循双向弯矩平衡原则——通过调整纵桁与强横梁的截面模量比（通常控制在1:1.2至1:1.5之间），使甲板与船底板在货物载

荷下的相对变形量收敛于3mm/m的许可范围^[7]。机舱布置的独特挑战在于动力设备振动谱与结构固有频率的错峰设计，采用质量调谐阻尼器（总质量占比约0.8%~1.2%）配合局部加强筋布局，可将共振工况下的应力幅值削减至静载工况的40%以下。在稳定性调控层面，压载水舱的拓扑优化需满足惯性矩匹配准则，通过调整舱室分布使横摇固有周期偏离常见波浪周期带（4~8秒）至少20%，这种频率解耦策略能有效降低船舶在4~6级海况下的运动响应幅度。



（四）制造工艺改进

1. 严格控制制造过程中的残余应力

当受到外部力量的影响，物质会出现形变并引发抵抗变形的力——这被称为内力（internal pressure）。单位面积上的内力称为应力，而在焊接过程中形成的此类效应就是“焊接应力”。发生在焊接完成之后留存其中的焊接应力被叫作焊接残余应力。通过对局部加热来实现金属结构焊接，通常让局部金属达到熔化的温度，然后慢慢降温至凝固的状态。在此期间，部分材质需要经历从高温到回落再到上升的反复循环。与此同时，金属会因为在冷凝中发生相变产生变化^[8]。

在焊件出现应力的过程中，会同步呈现出伸长、缩短、弯曲、翘曲以及扭转等各类变形情况。变形与应力二者相互关联，倘若在焊接过程中，焊件能够自由地进行伸缩，那么焊接完成后，焊件会产生较大的变形，而焊接残余应力则相对较小；若焊件是在夹具中进行焊接，或者焊件本身具有较大的刚度，使得局部焊接变形极小，也就是在外部约束条件下开展焊接工作时，焊接残余应力将会进一步增大。

在船舶建造领域，焊缝在结构中所处的位置、结构的刚性以及几何尺寸、装配与焊接的先后顺序、焊接电流的大小、焊接速度的快慢以及焊接方向等因素，均会对焊接应力和变形产生极为显著的影响。在实际生产作业中，焊接完成后的结构既会出现一定程度的变形，又会存在一定的焊接残余应力。焊接应力包含瞬时应力和残余应力，其中焊接残余应力又可分为纵向残余应力和横向残余应力。相关试验数据显示，船体钢材具备良好的塑性，焊接残余应力对船体的静载荷强度并无影响^[9]。然而，当因结构和工艺因素导致的局部高应力集中点与结构拉伸的塑性变形区域相

遇时,该尖端处便会产生平面应力,甚至演变为立体应力。特别是在立体应力的作用下,金属的塑性变形会变得更加困难。再加上温度急剧下降,或者处于钢材存在缺陷、焊缝存在缺陷等不利状况时,这个区域就有发生脆裂的可能性。

焊接残余应力的产生会对焊接结构的脆性断裂、疲劳断裂、失稳破坏以及应力腐蚀破坏等方面产生重大影响。降低焊接残余应力可以通过两个主要方向来实现:一是通过优化设计,二是通过调整生产过程。在构件的设计阶段,需要关注其强度的保持、稳固性和成本效益,同时也必须考虑到因设计不当而产生的焊接压力问题。需要注意的是,为了确保结构的强度,应该适当地利用冲压技术;采取较小的焊接标准;缩小焊缝的大小与长度;正确挑选切割角度;防止焊缝过于密集于某个特定区域;并尽力让平行焊缝数量最少^[10];同时,对于等距排列的焊缝,最好将其置于结构中轴线上方,这样能有效避免发生形变或者应力过大;选择结构传力截面和选择焊接接头形式时要尽量使传力线均匀分布,如避免截面尺寸突变,对不同截面的对接接头应尽可能作平缓圆滑过渡。

2. 提高焊接质量

在造船阶段,工厂必须严密遵循生产流程,构建全面的品控体系。对于每一个操作步骤及其结果都要进行核查,以便尽早识别并解决焊接中存在的潜在问题,降低焊接残余应力的影响。针对某些构造可采取如预热法、回火法、局部低温热处理等方法来优化其应力状况。当验收船只时,执行验船师应该对其所有工作终身负责任(尤其是当地船检),仔细审阅相关制程文档、焊接标准表格、外部板展平图及相关构件的设计信息,以保证船体架构能达到规定的强韧度且无过大的焊接残余应力产生的可能。同时,也应对船舶结构设计的合理性和可能引发的焊接应力与形变问题进行深入评估。在实际测试环节,要细致检查船厂钢铁材料的使用情况;对建设过程中的焊接程序和技巧实施适当监管,防止因管理不当导致船体出现大面积的焊接残余应力;对焊接效果的鉴定应从开始到结束全程跟踪,涵盖焊前检查、焊接进程监测和焊后产品验证,找出焊接瑕疵,检测焊接接头性能,评定焊接质量。尤其要加强对高应力区段焊缝的检查力度,务必清除存在的问题和风险。

三、船舶结构设计在提高疲劳寿命的新技术

(一) 复合材料的创新应用

目前玻纤维和碳纤维复合材料在海上能源开发、船舶制造、海洋工程修复领域发挥着巨大的作用;在海洋工程建筑中碳纤维有着很高的优势,碳纤维材料有着较轻的质量,高强度耐腐蚀特性,多以结构件的形式代替传统建筑材料,减轻重量给运费带来的高昂运费、海水侵蚀传统钢筋材料带来的问题。与海水会迅速腐蚀的钢相比,用耐化学性树脂制成的复合材料几乎没有腐蚀。对于平台组件,例如柱管(从平台向下延伸到水面以下以供应海水的管)和消防水系统(用于扑灭潜在火灾的管),这种抗腐蚀性能意味着多年的免维护服务,将大幅提高船舶的疲劳寿命。

(二) 人工智能和数字孪生在船体结构安全评估中的应用

从数字孪生的相关定义和理论解析中可以得出,数字孪生具备以下特征:

- 1) 终极目标是在虚拟环境中建立物理实体的数字化转型。
- 2) 数字化转型的基本需求是保持高度的真实性;
- 3) 实施方法是运用数值模拟技术。
- 4) 主要方式是实体和虚拟环境的数据互动。

对船舶构造来说,传统梁理论、有限元和非线性有限元等方法都提供了不同的模拟模型及计算成果,即前述特性的首项和末项已经具备一定的基础,而当前要完成船舶构造数字孪生的关键任务是提高模拟模型及其仿真效果的精确度。

当前,基于载荷-模型-应力结果的结构安全评估方法被广泛应用。

尽管现阶段的有限元方法被广泛应用于船体结构的安全性能评价中,其精确模拟效果具有高度认可度,然而,由于实际船只的大小及复杂运行条件的影响,这种模拟结果真实性不能完全保证。同时,从数据输入的角度来看,目前船体结构安全性的评估主要依赖于概率理论推算的船舶可承受的最大量化效应负载,这与实际情况中船舶所受负载存在差异,在数值、组合形式和作用形式等方面有很大的不同。

采用波浪监测数据、经数据同化反演的载荷或逆有限元法能够根据极少的测量信息预估船只总体构造中的压力状况,进而对船体架构的坚固性和磨损程度作出评价;使用模拟数据,并配合基于数据驱动的技术,整合过往记录与路线计划,可以推测出裂缝扩张的情况及构件的剩余疲劳寿命。

结语:对于船舶构造的设计来说,疲劳使用期限是一个关键因素,它与船只常规操作的安全性和稳定性有密切关系。为了提升船舶构造的使用年限和性能,需要强化对其使用的预估和研究,改善船舶构造设计的精确度,选择更优质的材质,并增强保养措施,这样可以显著增加船舶构造的耐用期,保证它们能在恶劣海域的环境下正常运作,从而推动中国造船业向着更为稳定的高速增长迈进。

参考文献

- [1] 张捷. 船舶结构可靠性优化设计方法研究 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(8): 56-58.
- [2] 夏镇磊. 船舶焊接与结构设计优化分析 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(11): 8-10.
- [3] 童红兵, 杨忆, 付宗魁. 船舶结构疲劳控制设计数据库的研究 [J]. 舰船科学技术, 2021, 38(4): 37-39.
- [4] 侯文武. 船体结构设计及建造中的细节处理 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(4): 39-41.
- [5] 中国船级社:《船体结构疲劳强度指南》2021版.
- [6] 童乐为; 任珍珍; 景爽; 牛立超. 高强度结构钢系列的疲劳裂纹扩展速率试验研究 [J]. 工程力学, 2020(12).
- [7] 黄维; 高真凤; 丁伟; 陈付红. 我国船板钢现状及技术发展趋势 [J]. 上海金属, 2014(04).
- [8] 王旭亮. 不确定性疲劳寿命预测方法研究 [D]. 南京航空航天大学, 2009.
- [9] 冯国庆. 船舶结构疲劳强度评估方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2006.
- [10] 许一敏; 冷文浩; 周炜; 田志峰; 程成. 船舶折边甲板建模与有限元划分的设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2013(08).

PLC 技术在电气工程及其自动化控制中的应用探讨

唐永泉

宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315211

摘 要 : 在信息技术不断深入各行业的背景下, 电气工程及其自动化控制也逐渐向智能化方向发展, 为经济的进一步发展奠定的技术基础。在电气工程控制技术中, PLC 技术 (可编程逻辑控制器技术) 成为核心技术, 对提升电气工程自动化控制技术的质量和效率方面发挥了重要价值, 保障电气工程始终处于最佳工作状态。文章主要对 PLC 技术进行介绍, 并阐述其在电气工程及其自动化控制中的具体应用, 探究其优化策略, 希望促进电气工程及其自动化控制的发展进步。

关 键 词 : PLC 技术; 电气工程及其自动化控制; 应用

Application of PLC Technology in Electrical Engineering and Its Automatic Control

Tang Yongquan

School of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315211

Abstract: Under the background of the continuous deepening of information technology in various industries, electrical engineering and its automatic control are also gradually developing in the direction of intelligence, which lays the technical foundation for the further development of economy. In the electrical engineering control technology, PLC technology (programmable logic controller technology) has become the core technology, which has played an important value in improving the quality and efficiency of electrical engineering automation control technology, and ensure that electrical engineering is always in the best working state. This paper mainly introduces PLC technology, expounds its specific application in electrical engineering and its automatic control, explores its optimization strategy, and hopes to promote the development and progress of electrical engineering and its automatic control.

Keywords: PLC technology; electrical engineering and its automatic control; apply

引言

在工业智能化发展背景下, PLC 技术推动电力工程与自动控制从传统的制造业向新兴的智能化产业发展, PLC 具有控制功能强、可编程能力强、工作可靠等优点, 已逐渐成为实现工业自动化和提高生产效率的重要手段。不管是单纯的切换, 或是复杂的逻辑控制流程, PLC 都可以利用内部的定时、计数和逻辑运算等多种函数来进行精密的控制。伴随着物联网、大数据和云计算等技术的快速发展, 为 PLC 技术发挥作用提供更多可能, 使其成为一种更加智能和高效的自动控制体系。

一、PLC 技术的简介

(一) PLC 技术的概念和关键组成部分

PLC 技术就是可编程逻辑控制器技术, 它通过数字化技术以及可编程存储器电子系统来对各种工程内部结构进行各种操作和指令, 当用户收到这些指令时, 就可以通过模拟传输功能来对所有机器进行有效控制^[1]。PLC 控制系统的组成包括: 中央处理器, 电源模块, I/O 扩展接口, 输出接口, 输入接口; 在内存中, 每一个模组都由一条资料线及一条电力线来连结。PLC 控制系统的工作程序包括输入采样、应用程序执行、储存输出和刷新, 这是 PLC 系统完成对电气数据通信和传输的集中体现^[2]。PLC 控制技术应用于电气控制领域凸显出极大的技术优势。

(二) PLC 技术的控制原理

在运用 PLC 技术的时候, 可以判定并分析电力工程的信息的内容, 将系统探测的重要程度给予足够的重视, 保证数据的合理与精确, 实现高效率的信息的输出与输入。PLC 技术可以对程序控制器进行全面的掌握, 在使用的时候, 必须要遵守一些根本的原理和需求, 必须要有一个完备的、简洁的程序设计, 这样才能提高整个程序的程序工作效率, 这样才能最大限度地减少整个系统的运营费用, 保证项目的自动控制效果。在运用 PLC 的时候, 也要注意界面上的表现, 保证设计的科学、合理, 从而达到整个系统的最优更新。PLC 技术可以有效地提升电力装备的自动控制效能, 在实践中可以实现对输入、输出的自动管理, 保证了软件运行的可靠、稳定。在此流程中, 输入取样, PLC 技术可以高效

地运用资料扫描的方法，设定特定的映像区，可以进行程式的运算与运行，采用从上至下的作业次序，在资料的输出时，要注意映像区内的资料的完备性，正确地锁定回路，以保证装置资料的运行效能，并使整个传动工作具有很好的合理性。

二、PLC 技术在电气工程及其自动化控制中的具体应用

（一）PLC 技术应用于电机控制

PLC 技术以其特有的柔性和效率，已逐渐成为驱动工业不断革新和发展的重要动力。特别是在最关键的电动机控制方面，采用可编程逻辑控制器，使整个系统的智能程度大大提高，同时也大大提高了系统的稳定性与反应能力^[3]。在电机的控制方面，可以对电机的启动，运转，停机，速度调节等各个部分进行准确的控制，保证电机按预先设定的运行方式，有效地、平稳地工作。常规的电动机控制方式很难对电动机进行精密的调速和精密的位置调节，而 PLC 通过内置的 PID 控制方法，能够很容易地完成从低到高的平稳转换，或者在高的时候进行细微的调节。另外，PLC 与编码器或位置传感器相配合，可以对电动机进行精密的定位和控制，在数控机床和机器人等高精密装备中得到了普遍的使用。而且电机在使用中不可避免地会出现过负荷、短路和过热等故障。PLC 技术能够利用内部的故障诊断软件，对电动机的工作状况进行了实时监控，如果出现不正常情况，可以及时报警，并进行自动断电、减速或切换到后备电动机等适当的防护手段，从而可以防止装置的损伤，防止出现安全问题。PLC 技术与物联网技术相融合的技术，可以对电机进行远程监测，并对其进行智能化管理。通过云端或专门的应用程序，用户可以随时了解电机的运行状况，调整控制参数，及时发出故障报警，从而极大地提升了电机运行的效率和反应能力^[4]。PLC 技术还能够控制多台电机联动。在复杂的机械结构中，经常有多台电动机同时工作的现象。PLC 技术运算能力强，可方便进行多轴电动机的联动或顺序控制，保证了每台电动机的准确协调，在自动化生产线、机械臂、自动化仓库等领域有着广阔的用途。比如在对发电厂生产的垃圾进行有效分离时，由于其中包含很多燃烧物，因此工作人员无法靠近，就需要通过 PLC 技术控制顺序自动运行，完成垃圾的分类。

（二）PLC 技术应用于电力分配与管理的自动控制

PLC 技术能够实现电源的自动切换，体现在当电气自动化工程系统出现事故或停电时，可快速地自动切换后备电源供电，保证供电的持续稳定。PLC 通过对主机供电状况进行监控，当发现有不正常情况时（如电压跌落、掉电等），可以立刻启动后备电源。在数据中心和工业生产等重大项目领域有着广阔的应用前景^[5]。PLC 利用内部的传感器或者接口，从电网中获取电压和电流等参数，在进行逻辑判定之后，对保护或接触器进行操作，以达到迅速的开关目的。PLC 技术还能够实现电力分配的自动化，实现电力资源的优化配置是提高系统运行效率的一种有效途径。在工控系统中，各个执行器对电源的要求相差很大，采用 PLC 对

其进行负荷平衡控制，能够保证每个装置都在容许的限度之内工作，防止出现超载、超负荷等现象。这样，不但可以增加装置的使用年限，而且可以使整体的运行更加稳定，更加高效。PLC 可基于采集到的各个装置的工作状况（如电流、功率因数等），利用预先设定的算法进行优化配置，通过调节电源线路或者调节装置的操作参数来达到负荷的自动均衡。PLC 技术最基本的控制管理作用还是实现开关量的控制，它主要用来对电机的启停、阀门的开闭等进行控制。但要求电力工程装置有充足的时间来利用该自动控制系统来提高操作效率。如果自动控制系统的工作效能低下，将会使电力工程装备系统的工作效能大大降低，从而造成了大量的资源浪费，给企业带来了巨大的经济效益。利用 PLC 技术可以对电力工程自动控制中的开关量进行调整，可以减少电力工程自动化控制的周期，使其发挥出最大的作用，为企业带来更大的经济效益。

（三）PLC 技术应用于闭环控制环节

电气过程及其自动化中闭环控制是一项非常普遍的技术，它在工业自动制造中占有很大的比例，它的目的是为了能够在工作过程中，对部件出现的突然出现的问题进行实时的处理，并对其进行相应的调节和纠正，保证了产品的品质和生产的效率，降低了不需要的费用损失，节约了生产费用^[6]。闭环控制是指在给定的条件下，通过对输入信号进行动态调节，使得其最大限度地逼近预定的目标。闭环控制是电力工程和自动控制领域广泛应用的一种控制方式，如电机调速，温控，压力调节等。因此，在实际应用中，需要有准确、快速的控制方法。采用 PLC 技术，能准确地对电动机进行速度和转速的控制。通过对电机速度和电流的读取，PLC 能对电机的电源进行动态调节，达到对电机速度的准确控制。同时，PLC 能随负荷的改变，对扭矩进行调节，保证了电机的稳定运转。在热处理和化工等工业生产过程中，温控是闭环控制中一个非常关键的环节。PLC 利用温度传感器对现场的温度进行在线检测，然后按照测量结果和目标的误差来调节升温或降温速率，达到对控温精度的要求。该方法既可有效地改善产品的性能，又可减少能源消耗及费用。气压调整：在液压系统和给水系统中，为了保证系统的正常工作，必须对其进行适当的调整。可编程控制器利用压力传感器获得当前的压力，根据设置的数值来调节阀的开启和水泵的出力，以达到准确的压力控制。该方法能够保证在高、低压条件下均能平稳工作。PLC 的结构是模块化的，使得每个组件都是相互独立的，便于维修和替换。同时，PLC 具有较强的自检测能力，可以对出现的问题进行快速检测和解决，保证了整个系统的平稳运转。而且 PLC 技术可兼容各种程序设计、通讯协定等，可方便地与其它控制器进行整合与扩充，能适用于多种不同的生产现场。

三、PLC 技术在电气工程及其自动化控制中的优化应用措施

（一）进一步优化 PLC 技术的数据控制功能

可编程逻辑控制器是电力系统中的核心部件，它担负着数据控制、逻辑运算以及自动控制等多种功能。随着工业生产的自动化程度越来越高，对可编程控制器提出了更高的要求。因此，要使 PLC 的应用潜能得到最大限度的利用，就必须对其进行优化。通过对 PLC 技术中的数据处理能力进行分析，并对其进行改进，改进算法，增强通讯能力，以进一步提升 PLC 的工作效能与可靠度^[7]。PLC 的数据处理是 PLC 控制系统的一个重要组成部分，它包含了对信号的接收、处理和输出的控制，优化其数据控制功能就需要采用神经网络，模糊控制等高级算法来改善资料的处理效果与准确性，可有效地处理复杂的非线性、时变等复杂数据，增强其数据处理的稳定性。还可以采用多核心处理器进行并行处理，将复杂的工作分割为若干子任务进行平行运算，大大加快了系统的运行效率。通过优化记忆体的分布与恢复，降低记忆体的片段数，提升记忆体的使用效率。利用高速缓存技术降低了读写次数，加快存取速率。还需要优化 PLC 技术编程，为用户提供图形化的程序设计（如梯形图、结构文字等），减少程序设计的复杂程度，减少错误的发生。这就要求对电动挖掘机的电气系统和工作机理有深入的了解，才能保证所设计的梯形图能准确有效地控制各种功能^[8]。另外，还提供程序的自动产生函数，大大的提升程序的运行速度。对软件开发人员在实际应用中对编程的逻辑及算法进行实时的检测与模拟。为 PLC 的硬件配置，程序逻辑，维修记录等，以方便以后的维护与更新。

（二）增强 PLC 技术对干扰因素的抵抗能力

PLC 技术在对电气工程及其自动化进行控制期间会面临不可避免地干扰因素，如电磁干扰，电源波动，信号噪声等^[9]。因此，对电力线载波通信系统进行优化设计是十分必要的。在硬件层次上进行抗干扰的设计包括：防护和接地措施，为了降低电磁干扰，必须对 PLC 和有关的装置进行有效的隔离。采用金属壳

体或特殊防护材料对重要部位进行封装，可以防止外界电磁干扰^[10]。还需要进行合理的接地设计，保证 PLC 各装置的接地电阻尽量低，并使其与地面构成等电势，以便对外部的扰动进行有效的抑制。通过在电力线的输入侧增加优质的滤波器及稳压设备，有效地降低了由于电力线的起伏或瞬间的过压对电力线通信的影响。选用带过流防护的功率组件，可对室内线路起到一定的防护作用。在进行信号传送时，使用差动信号或者是屏蔽的线缆，在一些关键的信号线路上，也可以采用光缆进行传输，从而达到彻底屏蔽电磁干扰的目的。在软件设计层面：采用数字滤波方法，可以减少由于噪音造成的误读取和数据缺失。采用均值滤波、中值滤波等滤波方法对数据进行滤波，可以使数据得到较好的滤波效果，从而改善了数据的精度和稳定性。通过多数投票等方法进行软件冗余处理，在不同的传感器采集到的信息有差异的情况下，能够对故障信息进行自动判定和剔除。另外，系统还整合了 CRC 校验和奇偶校验等差错探测和纠错技术，能够在数据传递期间对差错进行及时的识别和修正。将自适应控制、模糊控制等先进控制方法相融合，使得 PLC 能够在各种工作条件下进行自适应调节，增强其对外部环境的自适应能力，进而抑制扰动造成的不稳定。在科技进步的过程中，出现了许多新型的抗病毒方法和方法。通过对 PLC 的控制程序和硬件进行周期性的升级，使其能够引进最先进的干扰抑制能力，并对其进行优化，从而提高整个系统的运行效率。

四、结束语

电气工程及其自动化行业是工业和经济发展的基础，而 PLC 技术又是促进电气工程自动化和智能化控制的关键技术。因此相关人员需要进一步对其原理和核心技术进行研究，探究 PLC 技术在自动化控制中的具体应用，通过优化技术数据处理和软硬件系统等措施使其发挥更大的作用。而未来还需要进一步探究 PLC 技术在自动化控制安全和预警方面的作用，不断实现技术的升级，为自动化控制的安全和智能化发展提供良好的技术基础。

参考文献

- [1] 刘剑. 智能技术在电气工程自动化控制中的应用探讨 [J]. 中国设备工程, 2023, (24): 37-39.
- [2] 任永翔. 电气自动化中 PLC 控制技术的应用探究 [J]. 数字通信世界, 2023, (12): 117-119.
- [3] 雷丹. 电气工程及自动化控制技术在混合动力汽车中的应用 [J]. 内燃机工程, 2023, 44 (06): 8.
- [4] 于建勇. PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用 [J]. 大众标准化, 2023, (22): 159-161.
- [5] 冯军. PLC 技术在电气工程及其自动化控制中的应用分析 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52 (11): 79-81.
- [6] 房宝平. 基于 PLC 技术的自动化控制系统分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40 (11): 274-276.
- [7] 何丽阳. PLC 技术原理及其在电气设备自动化控制中的实践 [J]. 自动化应用, 2023, 64 (21): 43-46.
- [8] 刘艳. 探究当前智能化技术在电气工程自动化控制中的运用 [J]. 家电维修, 2023, (11): 32-35.
- [9] 仲军. 基于 PLC 技术的电气设备自动化控制应用分析 [J]. 中国设备工程, 2023, (20): 233-235.
- [10] 韦增习, 蒋婷, 廖华, 张丽, 陈森光. 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用标准 [J]. 大众标准化, 2023, (19): 38-40.

智能变电站二次系统集成技术与可靠性分析

陈东

国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210000

摘要：随着智能电网技术日新月异，智能变电站作为其中的关键枢纽，其地位愈发凸显。二次系统作为智能变电站的“神经中枢”，其集成技术的先进程度与可靠性高低，直接关乎电网能否安全、稳定、高效运行。因此，深入研究二次系统集成技术，提升其可靠性，具有重大现实意义。本文阐述了智能变电站二次系统的基本构成与功能，进而深入探讨了二次系统集成技术，包括信息集成、功能集成以及设备集成等方面，通过采用先进的集成技术和科学的可靠性管理措施，可以显著提高智能变电站二次系统的整体性能与可靠性，为智能电网的安全稳定运行提供有力保障。

关键词：智能变电站；二次系统；集成技术；可靠性

Integration Technology and Reliability Analysis of Secondary System in Intelligent Substation

Chen Dong

Guodian Nanjing Automation Co., Ltd. Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract: With the rapid development of smart grid technology, the position of smart substations as a key hub is becoming increasingly prominent. As the "nerve center" of intelligent substations, the advanced level and reliability of the integrated technology of the secondary system directly affect the safe, stable, and efficient operation of the power grid. Therefore, conducting in-depth research on secondary system integration technology and improving its reliability has significant practical significance. This article elaborates on the basic composition and functions of the secondary system of smart substations, and further explores the integration technology of secondary systems, including information integration, function integration, and equipment integration. By adopting advanced integration technology and scientific reliability management measures, the overall performance and reliability of the secondary system of smart substations can be significantly improved, providing strong guarantees for the safe and stable operation of smart grids.

Keywords: intelligent substation; secondary system; integrated technology; reliability

引言

智能变电站作为智能电网的重要组成部分，承担着电能传输、分配与转换的关键任务。二次系统作为智能变电站的“大脑”，负责监控、保护、测量、控制以及通信等功能，其性能与可靠性直接关系到整个变电站乃至电网的安全稳定运行。随着信息技术的飞速发展，智能变电站二次系统正朝着集成化、智能化、网络化的方向发展，如何实现二次系统的高效集成与可靠运行，成为当前电力行业亟待解决的重要问题。

一、智能变电站二次系统概述

（一）二次系统的基本构成

智能变电站二次系统主要由保护装置、测控装置、监控系统、通信系统以及自动化设备等部分组成。保护装置负责变电站内电气设备的故障检测与切除，保障设备安全；测控装置则对变电站的运行参数进行实时监测与控制；监控系统通过人机交互界面，实现对变电站运行状态的全面监控与管理；通信系统为二次系统内部各设备之间以及与外部系统之间的信息交互提供通道；自动化设备则包括智能终端、合并单元等，用于实现数据的采集与传输。

（二）二次系统的功能

1. 数据采集与处理

智能变电站二次系统借助高精度传感器与先进测量技术，犹如配备了一双双敏锐的“眼睛”，可实时、精准地采集变电站内电压、电流、功率等各类电气量数据。采集到的海量数据，经过系统的高效处理与分析，转化为有价值的信息，为后续功能实现提供坚实的数据基础。^[1]

2. 故障检测与保护

二次系统内置先进的保护算法与逻辑判断机制，如同变电站的“安全卫士”。它可对电气设备进行全方位、实时监测，一旦检测到故障迹象，迅速启动保护动作，快速切除故障设备，将事

故影响范围控制在最小，有效防止事故扩大，保障变电站设备安全。

3. 运行监控与管理

监控系统是二次系统的“智慧大脑”，它对变电站的运行状态进行24小时不间断实时监测。通过对各类运行数据的深入分析，系统能够及时发现潜在问题，并为运行人员提供精准的决策支持，辅助运行人员做出科学合理的操作决策，确保变电站稳定运行。^[2]

4. 通信与信息交互

通信系统作为二次系统的“信息高速公路”，实现了系统内部各设备之间以及与外部系统之间的无缝信息共享与协同工作。通过高效的信息交互，打破了设备间的信息壁垒，使变电站各部分能够紧密配合、协同运作，提升了整个变电站的运行效率与智能化水平。

二、智能变电站二次系统集成技术

（一）信息集成

信息集成是智能变电站二次系统集成的基石。智能变电站内设备繁多、系统复杂，信息集成旨在打破设备与系统间的信息壁垒，实现信息共享与交互。通过构建统一的信息模型和通信协议，对各类设备信息进行标准化处理，并搭建统一信息平台^[3]。此举可集中存储、管理与分析信息，极大提高二次系统的信息处理效率，减少信息冗余与不一致问题，为变电站智能化运行提供坚实的数据支撑，让信息流通更顺畅、准确。

（二）功能集成

功能集成致力于整合二次系统中多个独立功能模块，达成功能协同与优化配置。以保护、测控、监控等功能为例，将其集成于综合自动化装置中，不仅能减少设备数量、节省占地面积，还能提升系统可靠性与可维护性。更重要的是，功能集成实现了不同功能间的信息共享与协同决策，使二次系统整体性能与响应速度显著提高，让变电站运行更加高效、灵活。^[4]

（三）设备集成

设备集成聚焦于二次系统硬件设备的集成化设计，以提高设备集成度与可靠性。采用智能终端与合并单元一体化设计，减少了设备接口与连接，降低了故障发生的风险。同时，运用模块化设计理念，实现设备的即插即用与快速更换，极大提高了系统的可扩展性与可维护性。设备集成简化了二次系统结构，降低了系统复杂度，为变电站的稳定运行提供了有力保障。

（四）协同效应

在智能变电站二次系统集成中，信息集成、功能集成与设备集成并非孤立存在，而是相互协同、相互促进。信息集成为功能集成和设备集成提供了数据基础，使功能协同与设备运行更加精准；功能集成和设备集成则进一步丰富了信息集成的内涵，提升了信息的利用价值。三者协同作用，共同推动智能变电站二次系统向更高集成度、更高可靠性、更高智能化水平发展，为智能电网的安全稳定运行奠定坚实基础。

三、智能变电站二次系统可靠性分析

（一）硬件可靠性

硬件可靠性是智能变电站二次系统稳定运行的基石。智能变电站二次系统的硬件设备犹如系统的“骨骼”，其可靠性直接关系到整个系统的稳定程度。硬件可靠性涵盖设备本身的可靠性以及设备之间的连接可靠性。设备本身的可靠性受多种因素制约，元器件质量不佳、制造工艺粗糙、工作环境恶劣等，都可能导致设备故障频发。

为提升硬件可靠性，需从源头把控，选用高质量的元器件，确保其性能稳定、寿命长久；采用先进的制造工艺，提高设备的制造精度与质量；对设备进行严格的环境适应性测试，使其能够适应不同的工作环境。同时，设备之间的连接可靠性也不容忽视，应采用可靠的连接方式与接口标准，减少因连接问题引发的故障，保障硬件系统的整体稳定性。

（二）软件可靠性

软件可靠性是智能变电站二次系统可靠性的核心要素。软件如同系统的“大脑”，其正确性、稳定性与安全性至关重要。软件的正确性是基础，只有准确执行各项功能，才能保证系统的正常运行；稳定性是保障，在长时间运行过程中保持性能稳定，避免出现卡顿、崩溃等问题；安全性是防线，抵御外部攻击与干扰，防止数据泄露与系统被破坏。

为提高软件可靠性，要采用先进的软件开发方法与工具，确保软件设计合理、代码规范；进行严格的软件测试与验证，及时发现并修复软件中的漏洞与缺陷；建立完善的软件维护与更新机制，及时对软件进行升级与优化，以适应不断变化的需求。

（三）网络可靠性

网络可靠性是智能变电站二次系统可靠性的关键支撑。网络的连通性、带宽与延迟等性能指标，直接影响着系统的数据传输与通信效率。良好的连通性保证各节点之间稳定通信，足够的带宽满足数据传输需求，低延迟确保信息及时传递。^[5]

为提高网络可靠性，可采用冗余设计，当某一网络节点出现故障时，系统能够自动切换到备用节点，保证网络的正常运行；运用负载均衡技术，合理分配网络资源，提高网络的性能表现。同时，建立完善的网络监控与管理机制，实时监测网络状态，及时发现并处理网络故障，确保网络的稳定可靠。

（四）人为因素

人为因素是智能变电站二次系统可靠性的重要影响因素。运行人员的操作失误、维护不当以及安全管理不到位等，都可能给系统带来严重的安全隐患。

为降低人为因素对系统可靠性的影响，应加强对运行人员的培训与管理，提高其业务水平与安全意识，使其能够熟练掌握操作技能，规范操作行为；建立完善的操作规程与维护制度，明确各项操作流程与标准，确保运行人员有章可循；加强对二次系统的安全管理，采取必要的安全防护措施，如设置访问权限、安装防火墙等，防止外部攻击与干扰，保障系统的安全稳定运行。^[6]

四、智能变电站二次系统可靠性提升策略

（一）集成技术革新，强化系统整体性

采用先进的集成技术是提升智能变电站二次系统可靠性的核心举措。信息集成技术可打破信息孤岛，实现不同设备、系统间信息的无缝共享与交互，消除信息冗余与不一致性，让数据流通更高效准确。功能集成将保护、测控、监控等功能模块有机整合，实现功能的协同运作与优化配置，提高系统的整体性能与响应速度，使二次系统在面对各种复杂情况时能迅速做出正确决策。设备集成则通过一体化设计与模块化理念，简化二次系统结构，降低系统复杂度，减少设备接口与连接，降低故障风险，提高设备的可扩展性与可维护性。通过这三种集成技术的协同应用，能够显著提升二次系统的集成度与可靠性，为智能变电站的稳定运行奠定坚实基础。^[7]

（二）严格硬件选型，把控制造工艺

硬件质量是二次系统可靠性的物质基础。在硬件选型上，应优先选用高质量的元器件，确保其性能稳定、寿命长久，能够适应智能变电站复杂的工作环境。同时，对硬件制造商的制造工艺进行严格评估，选择采用先进制造工艺的企业，保证硬件设备的制造精度与质量。在硬件设备进入变电站前，要进行严格的环境适应性测试，模拟实际运行中的各种恶劣条件，如高温、低温、潮湿、电磁干扰等，确保设备在各种环境下都能稳定可靠运行。^[8]

（三）规范软件开发，强化安全防护

软件是二次系统的“大脑”，其可靠性至关重要。在软件开发过程中，应采用先进的软件开发方法与工具，遵循严格的软件开发流程与规范，确保软件设计合理、代码规范。进行全面的软件测试与验证，包括功能测试、性能测试、安全测试等，及时发现并修复软件中的漏洞与缺陷。建立完善的软件维护与更新机制，根据系统运行需求与技术发展，及时对软件进行升级与优化，提高软件的稳定性与安全性，抵御外部攻击与干扰。

（四）构建网络监控，保障通信畅通

网络作为二次系统信息传输的关键通道，其可靠性对系统整体性能起着决定性作用。为保障通信畅通，构建完善的网络监控与管理机制势在必行。引入先进的网络监控技术与管理工具，对网络运行状态展开全方位实时监测与分析。密切关注网络连通性，确保各节点间稳定通信；精准把控带宽利用率，避免因流量过载导致网络拥堵；实时监测延迟情况，保障信息传输的及时性。一旦监测到网络故障或异常，系统应立即发出警报，并凭借先进的定位技术迅速锁定故障点。运维人员可依据故障定位结果，快速采取针对性的处理措施，如重启设备、调整网络配置等，及时恢复网络正常运行，最大程度降低网络故障对二次系统的影响。

（五）强化人员培训，提升业务素质

运行人员是二次系统的直接操作者与维护者，其业务水平与安全意识直接关系到系统的可靠性。定期组织业务培训与安全教育活动，邀请行业专家进行授课，使运行人员深入了解二次系统的原理、结构与操作流程。通过案例分析、模拟演练等方式，让

运行人员熟练掌握常见故障的处理方法。建立完善的操作规程与维护制度，明确各项操作的标准流程与注意事项，规范运行人员的操作行为与维护流程，从源头上杜绝因操作失误或维护不当引发的系统故障。同时，建立科学的绩效考核与激励机制，将工作表现与绩效紧密挂钩，对表现优秀的运行人员给予奖励，激发其工作积极性与责任心，全面提升运行人员的整体素质。^[9]

（六）完善应急体系，增强应对能力

完善的应急管理体系是提高二次系统可靠性的重要保障。制定详细且具有针对性的应急预案，涵盖可能出现的各种故障与突发事件，明确应急响应流程、责任分工与具体处理措施。定期组织应急演练，模拟真实故障场景，让运行人员在实践中提高应急处置能力与协同配合能力。同时，储备必要的应急物资与设备，如备用网络设备、电源等，并进行定期检查与维护，确保在紧急情况下能够迅速投入使用。通过完善应急体系，增强智能变电站二次系统应对突发事件的能力，在故障发生时能够迅速响应、有效处置，最大程度减少故障损失，保障电网的安全稳定运行。^[10]

五、结束语

综上所述，智能变电站二次系统的集成技术与可靠性对于智能电网的安全稳定运行至关重要。通过采用先进的集成技术和科学的可靠性管理措施，可以显著提高二次系统的整体性能与可靠性。未来，随着信息技术的不断发展和智能电网建设的深入推进，智能变电站二次系统将朝着更加集成化、智能化、网络化的方向发展。因此，需要不断加强相关技术的研究与创新，提高二次系统的可靠性与智能化水平，为智能电网的安全稳定运行提供有力保障。同时，还需要加强行业间的合作与交流，共同推动智能变电站二次系统技术的发展与应用。

参考文献

- [1] 修黎明，高湛军，黄德斌，唐毅. 智能变电站二次系统设计方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 124-128.
- [2] 胡刚，夏勇军，蔡勇，陶赛，陈宏. 智能变电站二次系统设计现状和展望[J]. 湖北电力, 2010, 34(S1): 58-60.
- [3] 修黎明，高湛军，黄德斌，唐毅. 智能变电站二次系统设计方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 124-128.
- [4] 胡刚，夏勇军，蔡勇，陶赛，陈宏. 智能变电站二次系统设计现状和展望[J]. 湖北电力, 2010, 34(S1): 58-60.
- [5] 闫阳. 500kV 花果山智能变电站的二次系统设计及应用[D]. 南京理工大学, 2022.
- [6] 杜恒，司雪莹. 变电站继电保护二次系统接地技术分析[J]. 光源与照明, 2024, (3): 150-152.
- [7] 范琪琦. 智能变电站二次系统设计及其工程应用研究[J]. 光源与照明, 2024, (3): 156-158.
- [8] 李明节，刘宇，舒治淮，等. 中国变电站二次系统技术发展趋势分析[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 1-12.
- [9] 滕予非，王大兴，林波. 智能变电站二次系统测试及性能评价关键技术研究及应用[J]. 安装, 2023, (S1): 184-185.
- [10] 高宏. 智能变电站二次系统优化配置方案设计研究[J]. 建筑与预算, 2023, (7): 52-54.

基于可靠性的电气设备全生命周期维护策略在电力工程中的应用

陈向东

广东东南能源系统科技有限公司，广东 广州 510000

摘 要： 随着电力工程规模的不断扩大和技术的日益复杂，电气设备的可靠性对于电力系统的稳定运行至关重要。本文聚焦于基于可靠性的电气设备全生命周期维护策略在电力工程中的应用研究。详细阐述了电气设备全生命周期的各个阶段，包括规划设计、采购安装、运行维护以及退役处置，并深入探讨在每个阶段如何将可靠性理念融入维护策略中。通过对设备可靠性评估方法的分析，如故障树分析、可靠性指标计算等，为制定科学合理的维护决策提供依据。同时，探讨了大数据、人工智能等新兴技术在电气设备全生命周期维护中的应用，以实现设备状态的实时监测、故障预测和精准维护。研究表明，基于可靠性的全生命周期维护策略能够有效提高电气设备的可靠性，降低设备故障率，减少维护成本，提升电力工程的整体效益。本文的研究成果对于推动电力工程领域的可持续发展具有重要的理论和实践意义。

关 键 词： 电气设备；全生命周期维护；可靠性；电力工程；故障预测

Application of Whole-life Cycle Maintenance Strategy of Electrical Equipment in Power Engineering

Chen Xiangdong

Guangdong Southeast Energy System Technology Co., LTD. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract: With the continuous expansion of the power engineering scale and the increasing complexity of the technology, the reliability of the electrical equipment is very important for the stable operation of the power system. This paper focuses on the application research of reliability-based full-life cycle maintenance strategy of electrical equipment in power engineering. It details the various stages of the whole life cycle of electrical equipment, including planning and design, procurement, installation, operation and maintenance, and de-commissioning and disposal, and discusses in depth how to integrate reliability concepts into the maintenance strategy in each stage. Through the analysis of equipment reliability evaluation methods, such as fault tree analysis, reliability index calculation, etc., to provide a basis for the formulation of scientific and reasonable maintenance decisions. At the same time, the paper discusses the application of big data, artificial intelligence and other emerging technologies in the maintenance of the whole life cycle of electrical equipment, so as to realize the real-time monitoring, fault prediction and accurate maintenance of equipment status. The research shows that the reliability-based full-life-cycle maintenance strategy can effectively improve the reliability of electrical equipment, reduce the equipment failure rate, reduce the maintenance cost, and improve the overall benefit of power engineering. The research results of this paper have important theoretical and practical significance for promoting the sustainable development in the field of electric power engineering.

Keywords: electrical equipment; full life cycle maintenance; reliability; power engineering; fault prediction

引言

在现代社会，电力作为一种关键能源，其稳定供应直接关系到经济发展和社会生活的各个方面。电力工程中的电气设备作为电能转换、传输和分配的核心载体，其运行可靠性起着决定性作用。任何电气设备的故障都可能引发局部甚至大面积的停电事故，不仅会给电力企业带来巨大的经济损失，还会对工业生产、居民生活等造成严重影响。^[1]

传统的电气设备维护策略往往侧重于事后维修或定期检修，这种方式缺乏对设备实际运行状态的精准把握，容易导致过度维修或维修不足的情况。随着电力系统规模的不断扩大和设备复杂性的增加，传统维护策略已难以满足日益增长的可靠性要求。基于可靠性的电气设备全生命周期维护策略应运而生，它从设备的规划设计阶段开始，贯穿采购安装、运行维护直至退役处置的整个生命周期，始终将设备的可靠性作为核心考量因素，通过科学的方法和先进的技术手段，实现对设备维护的精细化管理，确保设备在整个生命周期内都能保持较高的可靠性水平。因此，研究基于可靠性的电气设备全生命周期维护策略在电力工程中的应用具有重要的现实意义和广阔的应用前景。^[2]

一、电气设备全生命周期阶段划分

（一）规划设计阶段

电气设备全生命周期始于规划设计阶段，此阶段综合考量电力工程实际需求、运行环境及未来发展规划。精准的负荷预测为设备选型与容量配置提供关键依据，像变电站变压器需依据区域用电负荷增长趋势与季节性变化确定合适容量与类型，避免容量不当影响可靠性或造成资源浪费。^[3]合理的设备布局设计至关重要，充分考虑电气连接、散热及维护便利性，减少电磁干扰，提升运行稳定性并方便后期巡检维护。引入如平均无故障时间（MTBF）、故障概率等可靠性指标，模拟不同工况预测故障模式，提前优化设计，从源头保障设备可靠性，为后续阶段筑牢根基。

（二）采购安装阶段

采购安装是将规划设计转化为实体设备的关键环节。采购时严格筛选供应商，审查设备技术参数、制造工艺及质量检测报告，确保符合设计要求与相关标准，对于高压断路器等关键设备，重点关注开断能力、绝缘性能等直接影响运行可靠性的指标。安装过程遵循严格规范与工艺流程，安装人员凭借专业技能与丰富经验，确保设备安装牢固、接线正确、调试精准。安装完成后全面开展电气性能、机械性能及可靠性试验等验收测试，只有通过测试的设备才能投入运行，为设备在运行阶段的可靠表现奠定坚实基础，保障设备从初始投入就具备良好性能。

（三）运行维护及退役资源管理

运行维护是全生命周期中历时最长且最为关键的阶段。建立完善的设备监测体系，借助传感器实时采集温度、湿度、振动、电流、电压等参数，如变压器通过绕组和铁芯上的温度传感器监测温度，超阈值及时预警。运用数据挖掘、机器学习等技术建立故障预测模型，如利用支持向量机（SVM）分析变压器油色谱数据预测潜伏性故障，并据此制定差异化维护计划。当设备进入退役处置阶段，全面评估剩余价值与可再利用性，修复改造有价值设备实现资源合理利用，对含有害物质设备按环保要求专门回收处理，防止污染，同时整理归档设备数据，为新设备规划设计与维护提供参考，实现设备全生命周期的资源有效管理与环保目标。

二、基于可靠性的电气设备维护策略制定

（一）可靠性评估方法

准确的可靠性评估是制定合理维护策略的基础。故障树分析（FTA）是一种常用的可靠性评估方法，它通过对设备故障现象进行层层分解，找出导致故障发生的各种原因及其逻辑关系，构建故障树模型。通过对故障树模型的定性和定量分析，可以计算出设备的故障概率、重要度等可靠性指标，从而确定设备的薄弱环节和关键故障模式。^[4]

此外，还可以采用可靠性指标计算的方法，如平均无故障时间（MTBF）、平均修复时间（MTTR）等。MTBF 反映了设备

在两次相邻故障之间的平均工作时间，MTTR 则表示设备发生故障后平均修复所需的时间。通过对这些可靠性指标的计算和分析，可以评估设备的整体可靠性水平，并与行业标准或设计要求进行对比，为维护策略的制定提供数据支持。

（二）维护决策制定

基于可靠性评估结果，制定科学合理的维护决策。对于故障概率较高、对系统可靠性影响较大的设备或部件，应优先安排维护工作，采取预防性维护措施，如定期更换易损件、进行设备检修和调试等。对于故障概率较低但一旦发生故障后果严重的设备，要加强状态监测，实时掌握设备运行状态，一旦发现异常及时进行处理。

在维护决策制定过程中，还需综合考虑维护成本、设备可用性以及电力系统运行的实际需求等因素。采用优化算法，如遗传算法、粒子群优化算法等，对维护计划进行优化，以实现维护成本与设备可靠性之间的最佳平衡。例如，通过优化算法确定设备的最佳维护周期，在保证设备可靠性的前提下，使维护成本最小化。

（三）维护资源配置

合理配置维护资源是确保维护策略有效实施的关键。维护资源包括人力资源、物资资源和技术资源等。在人力资源方面，要根据设备的数量、类型以及维护工作的复杂程度，配备足够数量且具备专业技能的运维人员。对运维人员进行定期培训，提高其技术水平和故障处理能力。

在物资资源方面，要建立完善的备品备件管理体系，根据设备的易损件清单和历史故障数据，合理储备备品备件，确保在设备发生故障时能够及时更换，减少设备停机时间。同时，要加强对物资的采购、存储和配送管理，提高物资资源的利用效率。在技术资源方面，要引进先进的检测设备和诊断技术，如红外热成像仪、局部放电检测仪等，为设备的状态监测和故障诊断提供技术支持。

（四）风险评估与应对策略

在电气设备运行过程中，面临着诸多内外部风险因素，对设备可靠性产生影响。风险评估需综合考虑设备老化、环境变化、操作失误以及自然灾害等因素。例如，对于地处恶劣气候环境的电气设备，如高温、高湿或强风地区的输电线路和变电站设备，需评估极端天气对设备绝缘性能、结构稳定性等方面的影响。采用失效模式与影响分析（FMEA）方法，识别设备可能出现的失效模式，分析其对系统功能的影响程度，并确定风险等级。针对高风险的失效模式，制定相应的应对策略，如加强设备防护措施、增加巡检频次、制定应急预案等，以降低风险发生的概率和影响程度，保障设备的可靠运行。

（五）维护策略的动态调整

电气设备的运行状态和工作环境处于动态变化之中，因此维护策略也应具备动态调整能力。建立设备运行状态实时监测与反馈机制，利用物联网技术将设备的各类运行数据实时传输至维护管理系统。通过数据分析算法，持续评估设备的可靠性水平和维护策略的有效性。当设备运行状态发生显著变化，如出现异常的

振动、温度升高等情况，或电力系统运行需求发生改变，如负荷突然增加时，系统自动触发维护策略调整流程。根据设备的实时状态和新的可靠性评估结果，重新优化维护计划，包括调整维护周期、更换维护方式以及调配维护资源等，确保维护策略始终与设备实际情况相适配，最大程度提升设备的可靠性和电力系统的运行稳定性。^[4]

三、新兴技术在电气设备全生命周期维护中的应用

（一）大数据技术

大数据技术在电气设备全生命周期维护中具有巨大的应用潜力。通过对设备在规划设计、采购安装、运行维护和退役处置等各个阶段产生的海量数据进行收集、存储和分析，可以挖掘出设备运行的规律和潜在的故障信息。例如，在运行维护阶段，利用大数据分析技术对设备的历史监测数据进行分析，建立设备性能趋势模型，预测设备的剩余使用寿命和可能出现的故障类型。

大数据技术还可以实现对设备维护资源的优化配置。通过对维护历史数据的分析，了解不同设备在不同时间段的维护需求，合理安排运维人员和备品备件的调配，提高维护工作的效率和质量。此外，大数据技术还可以为电力企业的决策提供支持，如在设备采购决策中，通过分析市场上不同品牌、型号设备的可靠性数据和用户反馈，选择最适合电力工程需求的设备。

（二）人工智能技术

人工智能技术，如机器学习、深度学习等，在电气设备故障诊断和预测方面具有显著优势。机器学习算法可以根据设备的监测数据和故障历史数据进行训练，建立故障诊断模型，实现对设备故障的快速准确诊断。例如，利用深度学习中的卷积神经网络（CNN）对设备的图像数据（如变压器的油色谱图像）进行分析，识别设备内部的故障特征，判断故障类型和严重程度。

人工智能技术还可以实现设备的智能运维。通过智能算法，根据设备的实时运行状态和维护计划，自动生成最优的运维方案，并对运维过程进行实时监控和调整。例如，利用强化学习算法，让设备运维系统在不断的实践中学习最优的维护策略，提高设备的可靠性和维护效率。

（三）物联网技术

物联网技术为电气设备的全生命周期维护提供了便捷的通信和数据交互平台。通过在设备上安装物联网传感器，实现设备与设备之间、设备与运维人员之间的互联互通。运维人员可以通过移动终端随时随地获取设备的运行状态信息，及时接收设备故障报警信号，并远程对设备进行控制和调试。

物联网技术还可以实现设备的远程协同维护。当设备发生故障时，不同地区的专家可以通过物联网平台实时共享设备数据，进行远程会诊和协作处理，提高故障处理的效率和准确性。此外，物联网技术还可以将设备的运行数据上传至云端，为大数据分析和人工智能应用提供数据基础。^[5]

（四）云计算技术

云计算技术在电气设备全生命周期维护中发挥着重要作用。

在设备规划设计阶段，借助云计算强大的计算能力，可对不同设计方案进行大规模模拟与优化。设计人员能够在云端快速构建虚拟模型，模拟设备在各种工况下的运行情况，通过分析大量数据评估设计方案的可靠性与性能，缩短设计周期并降低成本。

在运行维护阶段，云计算平台可集中存储和处理海量设备监测数据。通过弹性计算资源分配，确保数据处理的高效性，即使面对突发的大量数据涌入也能稳定运行。例如，利用云服务器对实时采集的设备振动、温度等数据进行实时分析，及时发现设备潜在问题。同时，基于云计算的软件即服务（SaaS）模式，为电力企业提供便捷的设备维护管理软件，企业无需在本地部署复杂软件系统，通过浏览器即可访问和使用，降低软件维护成本，提升维护管理的便捷性与灵活性。

四、结束语

基于可靠性的电气设备全生命周期维护策略在电力工程中具有重要的应用价值。通过在设备的规划设计、采购安装、运行维护和退役处置等各个阶段融入可靠性理念，采用科学的可靠性评估方法和维护决策制定机制，合理配置维护资源，并充分利用大数据、人工智能、物联网等新兴技术，能够有效提高电气设备的可靠性，降低设备故障率，减少维护成本，提升电力工程的整体运行效益。

然而，在实际应用过程中，仍面临一些挑战，如数据安全与隐私保护、技术标准的统一以及专业人才的短缺等。未来，需要进一步加强相关技术的研究和创新，完善技术标准体系，加强人才培养，推动基于可靠性的电气设备全生命周期维护策略在电力工程中的广泛应用和持续发展。随着技术的不断进步和应用的深入，相信这一维护策略将为电力行业的可持续发展提供更加强有力的支撑，保障电力系统的安全、稳定、可靠运行。

参考文献

- [1] 卢鲁振. 基于电气自动化技术在电力工程中的应用研究 [J]. 山东工业技术, 2017(4): 1.
- [2] 林江. 基于电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用 [J]. 轻松学电脑, 2021, 000(006): P.1-1.
- [3] 王明. 电气设备可靠性分析与维护策略研究 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 123-128.
- [4] 陈峰, 刘华. 基于状态监测的电气设备故障预测研究 [C]. 电气工程与自动化控制, 2018.
- [5] 张宇, 赵丽. 可靠性分析在电力工程中的应用与展望 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 112-118.

基于复合改性提升介电弹性体驱动性能的研究进展

丁国通, 吕祥鸿 *

西安石油大学, 陕西 西安 710065

摘 要 : 介电弹性体 (DEs) 因其优异的电致变形性能广泛应用于柔性驱动器、人工肌肉和传感器等领域, 但仍面临力学强度、稳定性和耐用性等问题。为提升驱动性能和使用寿命, 复合改性技术 (如导电填料复合、纳米复合、纤维增强复合和交联改性) 被广泛采用, 这些方法有效改善了 DEs 的电致应变、力学性能和耐久性。本文综述了复合改性策略在提升 DEs 驱动性能方面的研究进展, 分析了不同改性方法的机制, 并展望了未来的发展方向与挑战。

关 键 词 : 介电弹性体; 复合材料; 驱动性能

Research Progress on Improving the Driving Performance of Dielectric Elastomers Based on Composite Modification

Ding Guotong, Lv Xianghong *

Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract: Dielectric elastomers (DEs) are widely used in flexible actuators, artificial muscles and sensors due to their excellent electrodeformability, but they still face problems such as mechanical strength, stability and durability. In order to improve the driving performance and service life, composite modification technologies (such as conductive filler composite, nanocomposite, fiber reinforced composite and crosslinking modification) are widely used, which effectively improve the electroinduced strain, mechanical properties and durability of DEs. In this paper, the research progress of compound modification strategy in improving DEs driving performance is reviewed, the mechanism of different modification methods is analyzed, and the future development direction and challenges are prospected.

Keywords: dielectric elastomer; composite material; driving performance

引言

介电弹性体 (DEs) 因其优异的电致变形性能, 广泛应用于柔性驱动器、人工肌肉和传感器等领域, 具有高效、良好的柔韧性和低驱动电压, 适合大形变驱动任务^[1]。然而, 力学强度、稳定性和耐用性等问题仍限制了其广泛应用。通过引入纳米材料、导电填料和增强纤维等成分, 可以有效提升 DEs 的导电性、力学性能和电致应变。例如, 碳纳米管和石墨烯等填料能提高介电常数, 增强电致响应能力; 增强纤维和无机纳米粒子的引入则有助于提高机械强度和稳定性。这些改性方法显著提升了 DEs 的性能, 为其在高性能柔性器件中的应用奠定了基础。

本文综述了近年来基于复合改性方法提升介电弹性体驱动性能的研究进展。首先, 简要介绍介电弹性体的基本原理及主要分类, 为理论基础奠定基础; 接着, 重点分析各类复合改性策略在提升导电性、力学性能和电致应变能力方面的研究成果与机制; 最后, 探讨复合改性介电弹性体的发展现状, 分析实际应用中的挑战, 并展望未来研究方向。

一、介电弹性体的工作原理及分类

(一) 介电弹性体的工作原理

介电弹性体的工作原理基于 Maxwell 应力效应^[2]。当电场作用于材料时, 电极表面产生静电力 (Maxwell 应力, p), 导致材料发生压缩形变, 如图 1-1 所示。具体来说, 电场施加在致动器的上下电极时, 电荷在电极表面集中, 电荷间的排斥作用使材料横向膨胀, 而相反电荷则产生吸引力, 使材料厚度方向收缩。

电场移除后, 电荷恢复无序分布, 材料回到原始状态。

当驱动应变较小 ($< 20\%$) 时, 介电弹性体的形变可以通过以下公式进行计算:

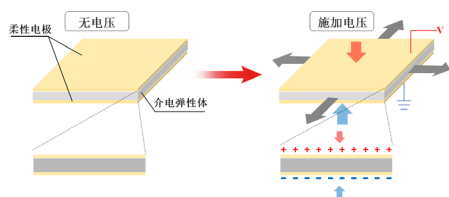
$$S_3 = -\frac{p}{Y} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{Y} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{Y} \left(\frac{U}{d} \right)^2 \quad (1-1)$$

式中, S_3 表示材料厚度方向的形变 (3 表示厚度方向, 负号表示材料被压缩), ϵ_0 为真空介电常数、 ϵ_r 为材料的相对介电常数、 E 为施加的电场、 Y 为弹性模量、 U 为施加电压、 d 为薄膜

作者简介: 丁国通 (1998.03-) 男, 汉族, 籍贯: 山东省青岛市莱西市, 学历: 硕士研究生, 研究方向: 介电弹性体驱动性能研究;

通讯作者: 吕祥鸿, 男, 汉族, 籍贯: 江苏省徐州市, 职称: 教授, 邮箱: lxhong71@sina.com

厚度。



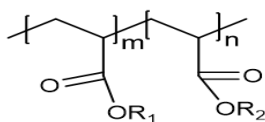
> 图 1-1 介电弹性体的工作原理

(二) 介电弹性体的分类

目前常见的 DE 材料主要包括聚丙烯酸酯 (PA)^[3]、硅基弹性体、聚氨酯 (PU)^[4] 和氢化丁腈橡胶 (HNBR) 等。这些材料在外加电场作用下能显著变形, 展现出优异的电致驱动性能。

1. 聚丙烯酸酯类介电弹性体

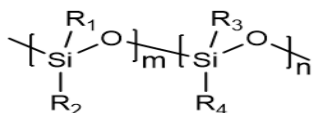
聚丙烯酸酯材料因其较高的介电常数和较低的介电损耗, 在电场驱动下展现出优异的形变能力。这些材料的分子结构包含极性的丙烯酸酯基团, 能在外加电场作用下产生显著的极化效应, 从而引起形变。最常用的是由美国 3M 公司生产 VHB 系列薄膜, 其分子式见图 1-2。



> 图 1-2 VHB 材料分子式

2. 硅橡胶类介电弹性体

硅橡胶类介电弹性体因其较低的玻璃化转变温度 (T_g), 能够在较广温度范围内保持良好的电驱动性能。此外, 硅橡胶具有卓越的弹性和可逆形变能力, 在电场作用下能产生显著形变, 成为高柔性和大变形驱动应用的理想选择。硅橡胶属于具有硅-氧骨架结构的聚合物, 通常以交联或氢化形式存在。常见类型包括有机硅橡胶、氟硅橡胶和氢硅橡胶, 其分子式见图 1-3。



> 图 1-3 硅橡胶材料分子式

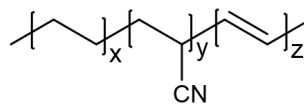
3. 聚氨酯类介电弹性体

聚氨酯类介电弹性体在驱动方面具有良好的柔韧性和大变形能力, 能够在低电压下实现显著致动效果。其优异的机械性能和电性能使其成为理想的柔性驱动材料。这些特点源于聚氨酯中有有机聚酯链段和氨基化学基团, 它们能在电场作用下有效产生极化效应, 同时分子结构的柔性赋予材料较好的变形能力。常用的聚氨酯类介电弹性体包括聚醚型、聚酯型热塑性聚氨酯及聚氨酯/复合材料。

4. HNBR 类介电弹性体

HNBR 材料具有较高的介电强度, 能在较高电场强度下运行而不发生电击穿, 确保其在高电压下的可靠性。同时, HNBR 的低电导率有助于减少电场中的能量损失, 从而提升驱动性能。常见的 HNBR 类介电弹性体包括 HNBR 本体、HNBR/ 聚氨酯复合材料、HNBR/ 硅橡胶复合材料和 HNBR/ 填料复合材料, 其分子

式见图 1-4。



> 图 1-4 HNBR 材料分子式

二、复合改性方法概述

随着柔性电子和智能材料技术的发展, DEs 因其优异的电致应变性能和可拉伸性, 成为柔性驱动器、传感器及人工肌肉等领域的关键材料。然而, 传统单一聚合物基 DE 材料存在导电性低、力学强度不足和耐久性差的问题, 限制了其应用。为克服这些问题, 研究者提出并采用了多种复合改性策略, 如导电填料复合、纳米复合、纤维增强复合和交联改性等, 这些技术有效提升了 DEs 的电致应变能力、力学性能和耐久性, 拓展了其在智能材料和柔性电子器件中的应用前景。

(一) 导电填料复合

为提升 DE 在柔性驱动器中的驱动性能, 研究人员提出了多种创新技术, 旨在优化其电学性能和机械响应。引入导电填料 (如碳黑、导电纳米粒子等) 以提高介电常数, 已被证明是一种有效策略, 能够显著改善电致应变性能。

Seo 等人^[5]设计了一种胶囊状混合填料, 通过在二氧化钛纳米线表面涂覆聚多巴胺 (PDA), 并将纳米级还原氧化石墨烯 (nrGO) 与 PDA 通过共价键结合, 构建了具有良好界面相容性的填料。该填料与低粘度聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 混合, 制成柔性弹性体薄膜。复合材料在提高介电常数的同时抑制了损耗因子的增加, 能够在 $1.6 \text{ V}/\mu\text{m}$ 下实现 2% 的致动应变, 在 $28 \text{ V}/\mu\text{m}$ 下达到 27.31% 的最大应变。制成的锥形致动器可驱动最大 200 克负载, 展现了优异的输出能力, 为介电弹性体性能提升提供了新的应用前景。

(二) 纳米复合改性

纳米填料的引入已成为提升 DE 性能的重要策略。通过在聚合物基体中添加碳纳米管、石墨烯等纳米级填料, 能够有效提高材料的介电常数、导电性和热稳定性, 从而显著改善其电致驱动性能。

Feng 等人^[6]提出了一种新方法, 通过脱羧开环聚合 (ROP) 反应在低电压下构建高性能介电弹性体纳米复合材料。该方法使用 KOH/ 二甲苯体系制备阴离子引发剂 MXeneK, 引发 COS 与 FGE 的聚合, 并通过 BMI 实现动态共价交联, 获得 MXeneK-FGE-BMI 复合体系。材料通过 MXene 面接枝聚硫醚链段, 提升了界面相容性和填料分散性, 确保高介电常数 ($\epsilon' = 12.3 @ 10^3 \text{ Hz}$) 并抑制了介电损耗 ($\tan \delta = 0.03 @ 10^3 \text{ Hz}$)。在 $11.9 \text{ V}/\mu\text{m}$ 电场下, 材料实现了 17.1% 的致动应变, 展现了在低能耗仿生驱动器件中的应用潜力。

(三) 纤维增强复合

纤维增强复合是提升 DE 综合性能的有效策略。通过在聚合物基体中引入增强纤维 (如碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维等), 不

仅能显著提高材料的力学强度和抗疲劳性，还能增强其在大应变和高负载条件下的形状保持能力和稳定性，从而拓宽其在复杂环境中的应用范围。

Zhao 等人探讨了碳纳米管（CNT）纤维作为增强组分在 DE 材料中的应用可行性。基于其良好的机电响应特性，研究者引入剪切滞后模型，构建界面过渡层以表征应变不一致性，并建立 CNT 纤维应变与 DE 整体应变的关系模型。该模型在 0.05 Hz、20 kV/mm 条件下预测误差低于 4%，验证了其在自感应柔性驱动系统中的有效性，为增强纤维驱动系统的设计提供了理论依据。

（四）交联改性

交联改性在提升 DE 力学性能和电场响应能力方面发挥着重要作用。通过调控聚合物基体的交联密度，可以增强材料的机械强度和热稳定性，同时保持其柔性和可变形性，从而优化驱动性能。较高的交联度有助于提高抗老化性和力学强度，而适度的交联度则有助于保持较大的可伸展性和响应灵敏度。

Li 等人^[7]通过刚性短链交联剂对弛豫型铁电聚合物进行化学交联，构建出兼具高介电常数（35）和低介电损耗（0.09）的本

征弹性体。该材料在高达 80% 应变下仍保持稳定的铁电响应和良好弛豫行为，展现出优异的机电耦合性能与形变适应性。研究为降低高介电弹性体损耗、拓展其在可穿戴电子和柔性传感等领域的应用提供了理论与材料支持。

三、结语

尽管 DE 材料在驱动性能、力学强度和稳定性方面取得了显著进展，整体发展仍处于探索阶段。研究者通过导电填料掺杂、纳米复合和纤维增强等改性策略，提升了介电常数和机械性能，拓展了其在柔性电子器件、人工肌肉和软体机器人等领域的应用。然而，微观结构设计、组分间协同作用机制及其对宏观介电性能的影响仍缺乏系统性研究和理论支持。未来，随着高性能纳米填料的开发和界面调控技术的成熟，DE 材料有望在机电耦合效率、耐久性和可加工性方面实现进一步提升，为工程应用提供更坚实的基础。

参考文献

- [1] Yang L, Wang H, Zhang D, et al. Large deformation, high energy density dielectric elastomer actuators: Principles, factors, optimization, applications, and prospects[J]. Chemical Engineering Journal, 2024: 151402.
- [2] Pelrine R, Kornbluh R, Kofod G. High-Strain Actuator Materials Based on Dielectric Elastomers [J]. Advanced Materials, 2000, 12(16): 1223–5.
- [3] Lu G, Zhang Y, Zhang J, et al. Trade-offs between ion-conducting and mechanical properties: The case of polyacrylate electrolytes[J]. Carbon Energy, 2023, 5(2): e287.
- [4] Delavarde A, Savin G, Derkenne P, et al. Sustainable polyurethanes: toward new cutting-edge opportunities[J]. Progress in Polymer Science, 2024: 101805.
- [5] Seo J S, Park K T, Oh S M, et al. Nano-Sized rGO-Encapsulated TiO₂ Nanowire-Filled PDMS cone type dielectric elastomer actuator operating at low applied electric field[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 494: 152801.
- [6] Feng Z, Feng G, Yue X, et al. Poly (thioether) grafted Ti₃C₂Tx MXenes: new dielectric elastomer nanocomposites with high area strain at low driving voltage[J]. European Polymer Journal, 2023, 188: 111945.
- [7] Li F, Wang L, Gao L, et al. Reducing Dielectric Loss of High-Dielectric-Constant Elastomer via Rigid Short-Chain Crosslinking[J]. Advanced Materials, 2024, 36(47): 2411082.

电气火灾预防措施与消防技术改进策略分析

吕东旭

河北省廊坊市固安县消防救援大队，河北 廊坊 065500

摘要： 电气火灾作为一种常见火灾，对人身安全、财产损失和社会稳定造成显著威胁。本研究在阐述电气火灾产生原因的基础上，对其危害性进行论述，对现阶段电气火灾预防措施及消防技术提升策略进行分析。着重探讨促进电气设备安全性，加强安装和维护规范及强化公众安全意识在开发高效灭火技术过程中的一些具体措施、深入分析消防设备创新与响应效率提高。通过评价已有技术和管理措施，提出多层次电气火灾防控策略。研究表明不断进行技术创新和规范化管理是降低电气火灾的关键因素。

关键词： 电气火灾；预防措施；消防技术；高效灭火；设备创新

Analysis of Preventive Measures of Electrical Fire and Improvement Strategies of Fire Fighting Technology

Lv Dongxu

Langfang city, Hebei province, Gu'an county fire rescue brigade, Langfang, Hebei 065500

Abstract: As a common fire, electrical fire poses a significant threat to personal safety, property loss and social stability. On the basis of explaining the causes of electrical fire, this study discusses the harmfulness of electrical fire, and analyzes the prevention measures and fire-fighting technology improvement strategies at the present stage. It focuses on some specific measures to promote the safety of electrical equipment, strengthen the installation and maintenance norms and strengthen the public safety awareness in the process of developing efficient fire extinguishing technology, in-depth analysis of fire equipment innovation and response efficiency improvement. Through the evaluation of the existing technology and management measures, the multi-layer electric fire prevention and control strategy is put forward. The research shows that continuous technological innovation and standardized management are the key factors to reduce electrical fire.

Keywords: electrical fire; preventive measures; fire fighting technology; efficient fire fighting; equipment innovation

引言

电气火灾因具有隐蔽性和突发性等特点，在消防安全领域中始终处于重点难点问题。在电气设备应用越来越广泛的情况下，电气火灾发生的频率也在逐年增加，并且所造成的危害范围以及影响也更加严重。研究表明电气火灾在威胁个人及财产安全的同时，也会给社会经济和公共安全带来深刻影响。现有电气火灾防控体系正面临着技术滞后和管理不善的双重困境，迫切需探索更有效的预防措施和应对策略。本研究的目的是在分析电气火灾发生原因及危害的基础上，综合运用最新消防技术及管理手段提出综合性防控策略，以期降低电气火灾发生率提供理论依据及实践指导。

一、电气火灾的成因与危害

（一）电气火灾的常见起因

电气火灾发生的原因复杂多变，设备故障、线路老化等是最普遍发生的一种。随着人们对电力需求越来越大，电气设备以及线路所携带的载荷也在逐渐增加，这大大加快设备老化的进程。老化电缆及接线端子往往会因绝缘层磨损或者腐蚀造成短路现象。特别是在高温、湿气的恶劣环境中，线路老化现象更加凸显，为电气火灾的发生埋下隐患。装置长时间超负荷运行是造成

火灾发生的重要原因。电气设备的设计使用不规范造成设备负载过大，易发生过热或者短路引起火灾的发生^[1]。

电气安装过程中存在的问题也是电气火灾的潜在原因之一。不标准安装、接头松动和电气元件使用不过关往往造成电气设备失效。电气线路接头处特别易成为火灾“隐患重灾区”。不恰当的连接或者接触不良都将大大增加电流在流过过程中热量的积累加大火灾危险。电气设备管理与维护水平在火灾预防中起着关键作用，经常检查并及时更换陈旧设备，是避免电气火灾发生的一项重要措施。

（二）电气火灾的危害分析

电气火灾危害性表现为人身安全，财产安全，社会经济等诸多威胁。一是电气火灾给人员安全造成特别大威胁。火灾通常在电气设备难以察觉的状况下爆发，初期很难被察觉，这导致火势迅速蔓延，极有能导致人员受伤或死亡。火灾发生初期电弧放电，高温和毒烟排放，都是致命性危险源，一旦人员不能及时疏散，其后果将不堪设想。

二是电气火灾破坏性高一般火灾往往造成巨大财产损失。特别是当关键的设施，例如电力中心和通信基站遭遇火灾，这不仅会导致设备的损坏，还会引发长时间的停工或断电对生产和日常生活造成重大的经济损失。电气火灾具有蔓延性和扑救困难等特点，通常很难在短期内全部扑灭，无疑会加重火灾造成的财产损失。灭火时温度过高以及燃烧排放有害气体还会造成更大范围的破坏会进一步加剧灾难的复杂程度^[2]。

（三）电气火灾的社会影响

电气火灾给社会带来了全方位的影响，它不限于物质上的损失，而是对社会运作、公共安全等领域都有着深刻的影响。问题的提出电气火灾发生后，往往导致社会生产长期停滞不前，特别是当电力供应系统失效后，将大大地扰乱社会正常的运行。电力作为维系现代社会发展的核心资源，其中断不只会对日常生活产生影响，甚至还会造成更大规模的社会和经济危机。所以电气火灾给社会带来的直接后果表现为生产力损失和生活不便。

二是电气火灾也会给社会稳定与公共安全造成不可忽视的间接影响。火灾的出现常常会给市民造成不安与恐慌，特别是在城市密集区，由火灾所产生的恐惧心理会很快扩散开来影响到社会秩序的安定。公共安全问题往往由此愈演愈烈，火灾所带来的人员伤亡与损失都将不同程度地加剧社会矛盾。所以电气火灾并不只是灾难性事件，其造成的社会影响通常都会与火灾自身有关，牵涉到社会各阶层的应急响应与社会治理问题^[3]。

二、电气火灾的预防措施

（一）提升电气设备的安全性

电气设备是否安全，直接决定电气火灾发生的频率和严重程度。随着现代工业的发展与社会的进步，电气设备得到越来越广泛的应用，而如何确保这类设备安全运行就成防止电气火灾发生的一个重要环节。该装置的设计、制造及材料选择等是影响该装置安全的关键因素。电气设备在设计阶段就应该严格按照国际和国内有关安全标准进行设计，以保证在普通运行工况下能有充分耐受能力。对高风险设备尤其是负荷时间较长的电气装置要使用更先进的工艺、更耐久的材料来增强它们在极端环境中的稳定性及抗风险能力^[4]。

安全性的提高也表现为电气设备日常巡检和监测。设备在长时间运行过程中难免发生磨损，老化和失效等问题，如不及时发现和维修就会给火灾隐患累积创造条件。所以建立和完善设备检查维护机制是保证电气设施工作在最佳状态的关键。对于温度高、湿度大的工作环境应采用与环境更适应的电气设备和实时

监测系统可对设备运行状态进行及时的反馈。当装置出现异常情况时，该系统可以即时报警继而减少火灾的能性。

（二）强化电气安装与维护的规范

电气安装和维修是否规范，决定电气火灾发生的频度和严重程度。标准的电气安装既能提升设备运行效率又能降低故障出现几率。每项电气设施安装都要严格执行国家标准及行业规范，避免线路连接不合适及电气元件过载运行。尤其对于高层建筑和工业区这样人流集中的场所，电气设施安装一定要通过专业技术人员进行严格的检查，以保证设备能承载自身的设计负荷，以免因为设计缺陷或者不恰当的操作而导致火灾发生。针对电气设施安装环境要定期进行检查，避免灰尘和腐蚀对电气设施产生长远影响，促使火灾风险增加^[5]。

对电气设施进行维修和管理，也同样要引起人们的重视。随着电气系统使用时间的延长，线路老化和设备损坏等风险也在逐渐增大，需要有关单位定期进行检测与维修计划。维护计划要涉及电气设备，接线系统和保护装置的多方面检验，以保证它们不发生故障。尤其是电气设施投入运行之初，其检验和试验工作尤其要认真，凡有微小隐患及早消除。对老化迹象明显的电气设备要及时更换或者更新，以免降低设备性能引起火灾。

（三）增强公众安全意识

加强公众电气火灾安全意识，是减少火灾发生频次的主要举措之一。尽管电气设施在现代社会得到了普遍而广泛的应用，但是很多家庭与单位对电气设备正确的使用与保养却认识不足。社会各界应加强电气火灾安全教育，保证广大人民群众对电气设备常见危险及防范措施有所认识。学校、社区和单位可通过经常举办消防安全知识讲座和应急演练来增强民众安全意识有效地规避日常生活中电气火灾。对于那些频繁使用电气设备的群体，例如建筑工地和工厂的员工，进行专门的培训和模拟演练，以增强他们的安全操作和应急处理能力，也应该是安全教育的一个重要组成部分^[6]。

实施电气安全教育并不局限于传授知识，还包括塑造公众的心理预期与行为习惯。很多人没有充分认识到电气设备火灾风险，往往忽略设备维护和检验，甚至产生侥幸心理来对待运行。所以教育工作不只是促进大众对于火灾危险性之认知，更重要的是透过实际的操作去改变其不正当之使用习惯。比如通过对火灾情境的模拟来展示错误操作所能造成的严重后果，让人们对电气火灾的恐怖有一个深刻的认识提高他们积极参与安全防范措施。

三、消防技术的改进策略

（一）高效灭火技术的发展

高效灭火技术的进化，反映出现代消防领域对于精准灭火和快速反应的持续追求。传统灭火方法扑灭电气火灾面临着许多制约因素，特别是水基灭火技术应用于电气设备火灾时囿于水电作用，会导致二次事故发生。在灭火技术不断革新的今天，干粉灭火剂，二氧化碳灭火系统和泡沫灭火技术等的使用渐成主流。干粉灭火剂对于电气火灾效果特别显著，它能快速隔绝火源和氧气

接触，阻止火势蔓延而不增加电气设备的损坏^[7]。

智能灭火系统的引入使火灾应对方式更为精准与高效。采用火灾监测系统和传感器网络实现灭火装置对火灾发生的自动识别和反应，降低人为操作延迟和误差。在扑救电气火灾时，智能灭火技术可以在火灾发生初期阶段就快速启动，并通过对火源的准确定位和灭火剂投放量的自动调整有效地控制火势蔓延。这类系统在加强灭火高效性的同时，也极大地降低火灾扑救时存在的隐患为消防工作的开展提供技术保障。在传感技术与物联网技术不断进步的背景下，预计未来灭火技术将进一步提高其智能化、精确化与反应速度，为更复杂电气火灾的处置提供更多可靠支撑。

（二）消防设备的创新

消防设备的革新涉及到很多层次的技术改进，核心目的是促进火灾探测，反应以及扑灭效率。传统消防设备最大的不足是对火灾响应落后，而且很多灭火设备都是针对某一类火灾进行灭火，且现代消防设备在设计上越来越重视多功能性和智能化。以智能烟雾探测器为例，早期火灾阶段即可以准确地识别出火灾的征兆，并且将警报信息以网络的形式实时地传送到有关的人或者装置上达到快速响应的目的。将大数据和云计算技术相结合，新型火灾监测分析系统可以对火灾现场数据进行实时分析，为火灾预警和响应提供更准确的方案。该多重功能整合在有效改善火灾响应及时性的同时，也会增强装置安全性与适应性^[8]。

除烟雾探测器以外，自动灭火系统是消防设备革新的一个主要方面。现代自动喷水灭火系统和气体灭火装置的推广应用，使灭火作业在着火初期就能自动进行，并尽量减少人为因素干扰。气体灭火系统尤其在电气火灾高效扑灭方面已经成为很多高风险场所优先选择设备。通过释放气体速度快，能很快地消耗火源需要的氧气并遏制火势。除这些基本的灭火设备外，新型的灭火工具，如灭火机器人和消防无人机等，也逐渐成为关键的技术发展趋势^[9]。在高风险或难以靠近的火灾现场，这些创新设备起到不可或缺的作用。它们可代替人工完成灭火作业和复杂环境下的精准操作，显著提升消防效率。

（三）消防响应效率的提升

增强消防响应效率不仅是火灾救援流程优化的中心目的，更是降低电气火灾损失的关键途径。一旦发生火灾，快速有效地反应是保障人员安全、保护财产的关键所在。既有消防响应体系经常会遇到信息滞后和决策延误的情况，特别是当大规模火灾来临时，如何有效地动员资源就成一个不可忽视的问题。现代消防部门在先进通信技术及智能调度系统的帮助下，可实现火灾现场实时监控及信息共享，从而使消防资源得到更准确的分配。消防指挥中心将大数据分析和云计算相结合，能实时获取火灾现场最新信息，及时作出决策保障扑救工作的高效开展。

提升消防响应效率，另一关键因素是设备现代化，应急预案细化。训练消防队员不仅要掌握消防基本技能，更重要的是要能熟练地操作高新技术设备并能快速地在复杂的环境下完成任务。随着无人机和机器人等高科技装备的使用，消防响应效率显著提升，它们能对火灾现场进行自动巡查和火源辨识、投加灭火剂大大降低人进入火场的危险。消防队伍还通过信息化管理系统对资源配置和人员调度进行优化，提高快速反应能力。在这些科技手段的帮助下，灭火过程越来越准确和有效，保证在最短的时间内排除火灾隐患和保障人民群众生命财产安全^[10]。

四、结论

预防和控制电气火灾需从很多方面着手，涉及到设备安全、安装与维修、技术创新及公众教育几个层次。促进电气设备安全，尤其要严格把好设计和维护阶段关，这是避免火灾的根本之策。规范电气安装及维护流程和定期对设备进行检测和维修可以有效减少因设备老化或者安装不合适而引发火灾的风险。消防技术的发展，特别是高效灭火技术以及智能化消防设备在消防中的运用，极大地促进了应急响应和火灾扑灭效率的提高，保证火灾在初期得到有效的控制。最后公众安全意识的提高也是至关重要的，只有达成全民共识才能建立起较为健全的防火体系。

参考文献

- [1] 刘静. 消防监督检查中电气设备及线路的检查策略分析 [J]. 中国设备工程, 2023(14): 141-143.
- [2] 贺胜, 疏学明, 胡俊, 等. 基于消防大数据的电气火灾风险预测预警方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2024(003): 064.
- [3] 邸曼, 厉剑, 张明, 等. 电气火灾分析与防治策略的研究 [J]. 消防科学与技术, 2018, 27(1): 5.
- [4] 姜涛. 电气火灾隐患分析及预防对策 [J]. 消防科学与技术, 2014, 23(B05): 2.
- [5] 马凯. 消防电气设计与电气火灾的防范策略 [J]. 砖瓦世界, 2021, 000(019): 247-248.
- [6] 张学利. 电气线路故障引发的火灾事故调查分析 [J]. 今日消防, 2023, 8(12): 119-121.
- [7] 郑强强. 建筑电气火灾主要原因分析及预防策略探讨 [J]. 消防界 (电子版), 2023, 9(19): 75-77.
- [8] 张一伟. 电气火灾预防的有效对策思考 [J]. 今日消防, 2021, 6(09): 91-93.
- [9] 郭子杨. 防范家用电器火灾发生的措施分析 [J]. 消防界 (电子版), 2019, 5(18): 10+12.
- [10] 胡鸿军. 浅析电气火灾多发原因及预防措施 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2017, (10): 69-70.

电气工程及其自动化无功补偿技术的应用研究

唐永泉

宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315211

摘要： 电力工程及其自动化是当今科技领域的重要分支，主要研究电能的产生、传输、分配和应用。随着科学技术的不断发展，电气自动化技术已被越来越多地运用到生产生活的各个方面，对提高生产效率、节能降耗起着十分关键的作用。然而，在电力系统的运行过程中，无功功率问题严重影响电能质量、设备利用率和电网的稳定运行。无功补偿技术是一种能够提高电网运行效率、电网供电质量的方法，已成为当前研究的热点。在此背景下，本文概述了无功补偿技术的基本原理与分类，分析了无功补偿技术在电气工程自动化中的应用，针对无功补偿技术面临的挑战提出了相应的解决方案，旨在为相关技术人员提供书面参考。

关键词： 电气工程；电气工程自动化；无功补偿技术

Application Research of Electrical Engineering and Its Automatic Reactive Power Compensation Technology

Tang Yongquan

School of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315211

Abstract: Electric power engineering and its automation is an important branch in the field of science and technology, mainly studying the generation, transmission, distribution and application of electric energy. With the continuous development of science and technology, electrical automation technology has been more and more applied to all aspects of production and life, and plays a very key role in improving production efficiency, energy saving and consumption reduction. However, during the operation of the power system, reactive power problems seriously affect the power quality, equipment utilization and stable operation of the grid. Reactive power compensation technology is a method that can improve the operation efficiency and power supply quality of power grid, and has become a hot topic in current research. In this context, this paper summarizes the basic principle and classification of reactive power compensation technology, analyzes the application of reactive power compensation technology in electrical engineering automation, and puts forward corresponding solutions for the challenges faced by reactive power compensation technology, aiming at providing written reference for relevant technicians.

Keywords: electrical engineering; electrical engineering automation; reactive power compensation technology

引言

随着人工智能、物联网、云计算等新兴科技的兴起，电气工程及其自动化领域正在逐渐向智能化和网络化的方向发展，各种先进工艺手段的应用，如现场总线、分布式控制系统等，提升了工业生产的智能化水平。在电气工程及其自动化工程中，无功补偿技术的重要性不容忽视。其目的在于改善电力系统的电力品质，减少电力系统中的无功流量，进而减少电力变压器和输电线路的损失，提高电力系统的整体稳定性与安全性。同时，无功补偿技术还可以改善电力系统的运行状况，减少电网中的谐波，提高装置的使用年限，为电力系统的安全可靠运行奠定基础。因此，无功补偿技术在电气工程领域有着广泛的应用价值与发展前景。

一、无功补偿技术的基本原理与分类

（一）无功功率的定义与作用

无功功率通常用 Q 来表示，指的是在具有电抗的交流电路中，电场或磁场在一周期的一部分时间内从电源吸收能量，另一部分时间则释放能量，在整个周期内平均功率是零，但能量在电源和电抗元件（电容、电感）之间不停地交换。交换率的最大值

即为“无功功率”。与有功功率相比，它并没有真正意义上的电能转化和电能转移，只起到对线路中电容、电感等无功的作用。在电力系统中，无功功率是一个非常关键的环节，也是计算电路总功率因素的主要参数之一。功率因数是指电力系统对电力系统的使用效率，而电力系统中的无功功率是衡量电力系统运行效率的重要指标。在电力系统中，无功功率是保证电网稳定运行和改善电能质量的关键。若无功功率供给不足，将引起电压下降，线路

损耗增大，严重时还会引起系统失稳。因此，为了保证电力系统的安全和高效运行，必须采用有效的无功补偿技术^[1]。

（二）无功补偿技术的分类

无功补偿技术主要分为两类，分别是静态无功补偿和动态无功补偿。以 SVC（静止无功补偿器）为代表的静态无功补偿技术，其特点是利用电容器或电感等不变的元器件对电容器进行切换，从而调节电网功率，实现无功功率的目的。该技术具有设备简单、造价低廉等优点，但其补偿能力比较弱，而且其动态特性也比较缓慢，适合在负载波动比较平缓的情况下使用。以 STATCOM（静止同步补偿器）为代表的动态无功补偿技术，利用电力电子学手段，通过调节交流侧的电流相位、幅度等参数，实现对电网负荷与网络的动态响应，从而快速、准确地补偿无功功率。该方法具有良好的补偿性能和快速的反应能力，适合于负载快速变动的情况。此外，还有传统的同步电动机补偿、现代无功补偿技术，如 SVG（静止无功发生器）等，各种方法都有其优点和不足之处，需要结合实际情况选择^[2]。

二、无功补偿技术在电气工程自动化中的应用

（一）智慧电网中的应用

随着电力系统的发展，智能电网中的无功补偿技术越来越受到人们的重视。由于用电负荷不断增加，电网容量不断增大，无功补偿技术成为实现智能电网必不可少的环节。无功电力是指在电网中没有发电能力，但却对电网运行起着不可替代作用的电流和电压，无功补偿技术通过对电网的重组与调节，将无功迅速地转移到可利用的电容量，进而提升整体供电效能。其次，无功补偿技术通过自动化控制实现无功功率的实时监测与动态补偿。在智能电网中的无功补偿装置，如 SVC 和 STATCOM，采用以 IGBT（绝缘栅双极型晶体管）为代表的新型功率电子器件，可以有效进行能量的转化与调控。该技术可实现对电力系统无功负荷的实时监控，并按负荷动态调节系统的无功出力，可有效应对负荷变动引起的电压起伏及电力因素降低等问题，实现电力系统在多种复杂工作条件下的平稳运行。因此，将无功补偿技术引入到智慧电网，既可适应电网对无功功率均衡的要求，又可为实现其安全可靠、有效的调度提供重要支撑^[3]。

（二）配电自动化中的应用

在电气工程自动化的配电自动化领域中，无功补偿是一个非常重要的环节。在配电网中，采用无功补偿方法可以减少或消除电力供应的波动，改善电力供应品质。电容器组、SVC 及 STATCOM 等无功补偿设备，可根据电网需求迅速做出反应，动态调整无功功率的输出或吸收，有助于保证电网的安全性与可靠性。将 SVC 与 STATCOM 技术用于低压配电系统，二者都具有较好的无功补偿，但都具有各自的特点。SVC 通过对可控硅整流器的导通角度进行调整，以调整电网中电抗器及电容器的容量，进而使电网的导纳发生变化，实现无功补偿。STATCOM 则由可断开功率器件构成的自换型线路，可通过调整 AC 端的输入电压幅度、相位或对其 AC 端的电流进行调控，从而达到对电网进行快

速、动态的无功补偿。与 SVC 相比，STATCOM 在电网电压波动时，其反应速率快、工作范围广，可为电网的无功功率供应带来更好的稳定性。同时，STATCOM 具有对电网中的谐波进行追踪和补偿的功能，从而改善了系统的供电品质。因此，STATCOM 作为一种新型的电力系统，已逐渐被用于低压配电系统，有助于提升供电质量与稳定性^[4]。

（三）可再生能源并网中的应用

以智能化无功补偿技术为代表的无功补偿技术，已被越来越多地用于风电、光伏发电等可再生能源并网。由于新能源的存在，运行方式受到天气变化的强烈影响，其波动、不稳定等特点，对电力系统的无功输出有着重要的影响。由于受天气、季节等诸多因素的共同作用，风力发电及光伏发电系统的出力往往会受到各种因素的影响，从而使并网点有功功率出现波动。因此，对电力系统进行有效的无功补偿是非常必要的。通过对电容器、电感等设备的适当布置，实现对电网中所发生的无功进行有效的补偿，使整个电力系统的能量均衡。例如，在太阳能发电系统中，由于其并网，将引起系统的电压不稳定、谐波污染等问题。同时，提出一种新型的基于 SVG 的无功补偿技术，并对其进行改进。SVG 无功补偿装置通过精确控制电流的相位与幅值，能进行快速、动态的无功补偿，保证光伏电站的稳定、高效运行，为可再生能源规模化接入提供重要的技术支撑^[5]。

（四）工业电网系统中的应用

在工业电网系统中，无功功率的补偿是实现电网最优、最平稳的一项关键技术。电机、变压器等大型工业装备在正常运转时，需要消耗相当大的无功功率，一般占其额定功率的 30%–50%。比如，一个 100kW 的电机，一般要求 30kvar–50kvar 的无功才能使电动机正常启动和运转。这种装置依靠无功来保持充足的电流，并在其周围产生一种磁场，以实现高效的电能输送。但是，电网中过量的无功损耗不但会增大电网负荷，而且会引起电网的电压波动、电网的谐波含量升高，严重影响电网的稳定与安全^[6]。无功补偿将无功输入到电网中，使电网中的无功功率达到均衡，提高电网的电力效率。功率因数是反映有功功率和视在功率的比值，是评价电能质量和电能效率的一个关键参数。随着电感负荷的增加，电网的功率因数将降低，从而降低电网的运行可靠性和效率。无功补偿指通过调节电容器、电抗器的投切来对电网中的无功进行实时的补偿，以提高电力系统的功率因数，保证电网的平稳运行。同时，采用无功补偿方法可以减少工业电网的能量消耗。由于电网中的无功功率的流动，会造成输电线路和变压器等设备的损失增大，采用无功补偿方法可以有效减少电网中的无功流量，减少电网的损失，提高能量的利用效率。特别是在工业生产中，大规模装备的运行对电网提出了更高的要求，利用无功补偿能够有效减少装置的能源消耗，从而降低企业的生产成本^[7]。

三、无功补偿技术面临的挑战与解决方案

（一）挑战分析

电气工程及其自动化中的无功补偿技术，是提高电力系统效

能和稳定性的重要手段，但在实际应用中仍存在一系列的问题。首先，技术复杂性。为了保证无功补偿技术的准确性、实时性，必须有较强的自动控制和较高的数据分析功能。由于电力系统规模不断增大，系统结构日趋复杂，如何实现高效精确的无功补偿是一个迫切需要解决的问题。其次，设备成本与维护成本高。目前，高性能的无功补偿设备造价昂贵，为了保证其长时间的稳定运转，必须进行经常性的维护与检修，给资金有限的供电企业和用户带来较大的财政负担。最后，与其他电力系统的兼容性也是一个很大的难题。为了达到最佳的补偿效果，必须与其他设备的技术参数密切配合，如变压器和开关等。但由于各装置在工艺指标及工作特性上的差别，造成系统可能存在兼容性问题，从而降低系统的无功补偿效果及整个电力系统的稳定性。因此，提高无功补偿技术与电网其他设备的兼容度，是目前电气工程及其自动化领域研究中需要解决的问题^[8]。

（二）解决方案

第一，解决电力系统中的无功补偿技术的复杂性问题，应提高系统的智能程度。引入现代自动控制方法，采用大量的资料处理方法，有效提高系统的实时性、准确性。比如，以电力电子技术为基础的 SVG、STATCOM 等可快速准确地进行无功补偿。在此基础上，利用模糊控制、自适应 PID 控制及谐波消除等智能控制方法，实现对电网负荷的实时调节。借助物联网、大数据等手段，通过将智能传感器接入到装置中，对电力系统中的无功补偿设备进行远程监控与数据分析，并将其上载到云中，使操作人员能够及时发现并处理故障，进而提升其工作的可靠性和工作效率。例如，基于航顺 HK32F103A 系列 MCU 的智能无功补偿器，其信号分析功能强，可达到高精度的无功补偿。采用智能方法，使系统具有自动故障、自动恢复等功能，在正常工作状态下，能及时处理出现的问题，缩短系统的停工周期，增加设备的可用性。该技术在提高电网无功补偿效能的同时，减少对人为干预的过度依赖，为电网安全稳定运行提供强有力的支撑^[9]。

第二，由于其造价高、维修费用高，制约了无功补偿技术的广泛应用。为此，应优化设备成本与维护策略，通过技术创新降

低设备的初始投资成本。以航顺 HK32F103A 为代表的国产芯片，不但可以减少物料清单的费用，而且可以进行模组扩充，以满足各种电源的需求。此外，通过对装备的结构、制造技术进行改进，可以有效提高装备的寿命和可靠性，从而减少装备的整个寿命周期费用。为了减少运营费用，应优化设备的维护策略。常规的维护方法常常存在过度维护或维护不足的情况。建议引入基于实际状态的维护策略，并将其与智能传感及远程监测相结合，实现对装备的精确维修。比如，通过对温度、电流、电压等重要参量的在线检测，可以提前发现可能出现的问题，从而有针对性地进行维修，这样既可以避免一些不必要的维护工作，又可以提高设备的寿命，降低维护成本。

第三，为了提高系统的兼容性，必须在设备选择与设计阶段充分考虑各种设备的技术参数及运行特点。例如，在智能电网建设过程中，采用标准化的接口与协议，实现新型无功补偿装置与传统电网设备的无缝对接。落实模块化的设计理念，将无功补偿装置与其他用电设备（如变压器、开关等）进行集成，形成整体解决方案，有效提升系统的综合性能及兼容性。比如，以可编程控制器为核心的 10 kV 动态无功补偿控制系统，集成了多种先进技术，能够高效解决电网无功损耗和电压下降的问题，这种模块化的设计，既可提高设备的互用性，又可简化安装调试流程，提高无功补偿效果，从而有效增强电网的整体稳定性^[10]。

四、结语

综上所述，无功补偿技术作为电气工程及其自动化领域的关键技术之一，是提高系统运行效率、电能质量和电网稳定水平的重要手段。随着技术的不断发展、智能化和网络化趋势的加强，无功补偿技术的应用将更加广泛且深入。面对应用无功补偿技术面临的挑战，应不断改进补偿方案，提升装置的运行效率，实现更加高效、智能和绿色的供电。未来，在电气工程及其自动化领域高效应用无功补偿技术，有助于构建更加安全、可靠、可持续发展的现代能源体系。

参考文献

- [1] 贾宝成. 电工电子技术在无功补偿自动控制中的应用 [J]. 中国高新科技, 2023, (13): 52-54.
- [2] 陈搏. 无功补偿技术在电气自动化中的应用分析 [J]. 中国设备工程, 2023, (S1): 102-104.
- [3] 龚莉强. 自动化无功补偿技术的应用 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(10): 106-107.
- [4] 韩冬. 电气自动化中无功补偿技术及其应用探究 [J]. 科技与创新, 2022, (18): 47-49.
- [5] 王丽艳. 自动化中的智能无功补偿技术应用 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(09): 98-99.
- [6] 边茂洲. 探析电气自动化中无功补偿技术要点 [J]. 科技与创新, 2022, (10): 42-44+48.
- [7] 吴国兴. 电气工程中电气自动化技术的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(06): 103-105.
- [8] 陆向东, 向荣华. 智能无功补偿技术在电气工程自动化中的应用研究 [J]. 科技风, 2020, (21): 7.
- [9] 湛伟越. 电气工程及其自动化无功补偿技术的实际应用研究 [J]. 科技创新导报, 2020, 17(06): 45-46.
- [10] 吴娟. 智能无功补偿技术在电气工程自动化中应用 [J]. 通讯世界, 2020, 27(01): 257-258.

浅谈质子医院机电施工 BIM 解决方案及技术措施

张曾水, 陈豪, 卢亮, 张昌波, 邹发涛
中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122

摘 要 : 质子放疗是目前国际尖端前沿的癌症放疗技术, 具有精度高, 效果好, 副作用极小的优点, 是未来癌症放疗的主要趋势之一^[1]。质子医院是提供质子放疗的专业性医院, 在我国处于刚起步状态, 其建设过程与常规医院相比具有特殊的复杂性, 机电及工艺配套系统多, 作业面不规则且空间紧张, 同时需要在大体积屏蔽混凝土中预埋大量的机电管线, 同时须满足防辐射泄漏和精准定位的要求。BIM (Building Information Modeling) 技术由于其成熟的可视化及模拟性等技术优点, 是非常方便和高效的技术工具, 同时现场也需要配合其它辅助技术措施才能使这些施工难点能够顺利解决。本文依托合肥离子医学中心项目, 针对机电安装工程难点的 BIM 解决方案及相关技术措施进行归纳和总结, 为类似医院项目的建设提供参考和借鉴。

关 键 词 : BIM; 质子医院; 机电施工

A Brief Discussion on BIM Solutions and Technical Measures for Mechanical and Electrical Construction in Proton Therapy Hospitals

Zhang Zengshui, Chen Hao, Lu Liang, Zhang Changbo, Zou Fatao
China Construction Eighth Engineering Division Corp., Ltd. Shanghai 200122

Abstract: Proton radiotherapy is currently the cutting-edge cancer radiotherapy technology in the world, with advantages of high precision, good efficacy, and minimal side effects. It is one of the main trends in cancer radiotherapy in the future^[1]. Proton hospitals are specialized hospitals that provide proton radiotherapy, and they are just emerging in China. Compared with conventional hospitals, their construction process has special complexities, with many mechanical, electrical, and process supporting systems, irregular work surfaces, and tight spaces. At the same time, it is necessary to embed a large number of mechanical and electrical pipelines in large-volume shielded concrete, while meeting the requirements of radiation leakage prevention and precise positioning. BIM (Building Information Modeling) technology, due to its mature technical advantages such as visualization and simulation, is a very convenient and efficient technical tool. However, on-site construction also requires other auxiliary technical measures to smoothly solve these construction difficulties. This article relies on the Hefei Ion Medical Center project to summarize BIM solutions and related technical measures for the difficulties of mechanical and electrical installation engineering, providing reference and lessons for the construction of similar hospital projects.

Keywords: BIM; proton therapy hospital; mechanical and electrical construction

一、项目简介

合肥离子医学中心是合肥综合性国家科学中心七大创新平台之一, 项目引进美国瓦里安先进成熟的 ProBeam 质子治疗系统配套诊疗系统, 建成后每年能够治愈超 2000 名癌症患者。中心总建筑面积约 3.3 万平方米, 主体结构分为非质子区和质子区。非质子区主要包含辅助治疗区, 病房, 公用站房, 办公区等。质子区为放射治疗区, 是本项目的核心区, 主要包含回旋加速器舱室, 治疗舱室以及束流沟等区域。质子区内部的质子设备是医院最重要的核心医疗设备。质子设备的运行需要大量的电气、暖通、气体、消防等外围机电及工艺辅助系统, 这些机电系统的管线需要质子区变化多样和紧张的空间内排布, 同时进入舱室内部时要穿越大体积屏蔽混凝土。为保证这些管线能够合理排布和精准预埋, 本项目采用 BIM 技术进行全方位模拟和优化, 从深化设计、

空间排布、模拟施工安排到模块化安装等给出相应的解决方案, 同时采取了模块化安装、EBIM 云管理技术、三维激光扫描技术和管线成品保护等措施, 保障了整个质子区机电施工顺利实施与推进。

二、系统深化设计

质子区涉及的机电及工艺管线包含: 暖通风管、空调冷热水管、消防管、给排水管、强弱电桥架、技术气体管、医用气体管、气体采样管、电气线管等。其中部分图纸为国外设计机构设计, 需要进行详细审查, 以满足国内规范和使用要求, 例如国外设计中技术氢气管和技术氧气管的间距小于 250mm, 不满足国内规范《氢气安全使用规程》GB4962-2008 的要求^[2], 需要进行调整; 国外设计没有设置技术气体的备用管道, 而实际使用方提出

为了今后检修方便需要增加备用管；国外设计中预埋 JDG 电气线管按照常规管径选择，结合预埋的长度及弯头数量，现场各方提出需要将管径增大以增加穿线通过率等。

三、BIM 空间优化

系统和方案深化设计完成后就需要用 BIM 工具进行空间布局调整和优化。优化的区域主要分为三块，分别是公共走道和各个辅房，舱室内部，大体积混凝土内部的管线预埋。

在公共走道和辅助房间区域高度变化多，形状不规则，需要考虑不同区域的净高要求，以满足净高和设备搬运的需求以及方便各个专业施工队的搭接和后期检修。管线排布的原则是，电气桥架走最上方，其次水管，气体管，再下面风管，特殊情况下也可以调整次序或者混合排布，但是水管不能放在桥架上方。有压管道让无压管道，小管让大管，尽量考虑综合支吊架排布等。确定好方案后由 BIM 软件导出施工平面图，并按由上至下的施工顺序安排施工班组进场施工。舱室内部的管线较少，空间较大，主要考虑管线排布的整齐美观，方便操作和维修即可。大体积混凝土内部管线的排布需要满足防辐射要求，即管道在防护用混凝土中不得出现直接穿透，必须拐弯进行，以“U”或“Z”字迷路形式穿越屏蔽体，弯曲次数为2~3次，不能超过4次。同时管道排布时还需要考虑与钢筋网架的碰撞，需要避开钢筋网的型钢立柱和横梁，尽量少破坏主筋，如的确避不开主筋则需确定加固方案后才能实施。所以这个区域的深化要综合机电各个专业和土建钢筋网架的 BIM 模型，同时结合各方需求进行全方位协调和优化，在满足要求的前提下解决所有碰撞后才能出图并实施。

四、BIM 模拟及施工安排

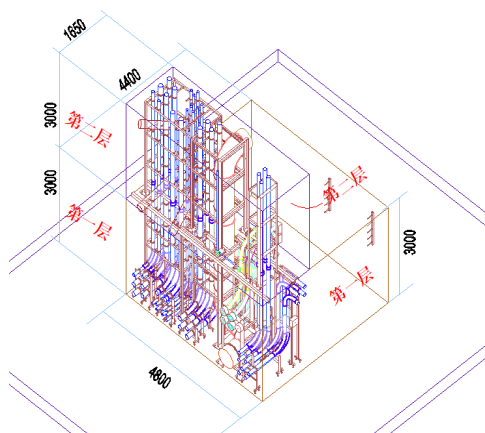
质子区的施工是一个复杂工程，涉及到庞大的钢筋网架设、管线预埋，模板施工、大体积混凝土长时间连续浇筑，精装修施工和明敷管线的安装等。现场采取各个专业相互搭接的流水作业方式。具体要点如下：在质子区垫层完成浇筑后进行大底板的钢筋绑扎，此时在地板上层筋安装前需要完成预埋机电排水管的施工。土建地板浇筑完成后开始架设上层钢筋骨架，此时安装队伍应尽快完成模块化吊装作业，并将作业面交给土建作业队伍，其它散装的管线根据钢筋网架的进度和混凝土的分层浇筑方案进行穿插施工，不能超前也不能滞后，钢筋网和机电管线安装好一层就浇筑一层，层层递推依次向上直至完成整个质子区的主体工程。在这个阶段中采用 BIM 4D 模拟施工技术可以很好地辅助现场施工，具体来说就是利用 BIM 技术详细分解空间各个层面的施工作业任务和施工节点要求和关键作业点，以动画和讲解形式展示整个施工过程和施工计划，并对各个施工队伍进行可视化交底，从而让各个作业队伍准确理解施工进度节点、各个阶段的工程量和不同队伍之间的配合施工顺序及要点。同时施工管理团队每天根据 BIM 的模拟划分对现场作业情况进行实时跟踪，对作业队伍的人员，材料和进度实施精细化管理，出现偏差和问题及时

纠偏和协调解决，保证整个进度按计划进行。主体工程完工后就进入机电管线明敷和装饰装修及二次结构相互配合的施工阶段，这个阶段机电安装要配合二次结构的留孔和预埋等，同时需要协调好机电及工艺各个专业队伍之间的搭接，要做到作业面分配合理，进场有序，相互成品保护措施可靠。机电管线的室内布局和装饰装修之间要配合好，以确保机电终端定位准确，相互搭接施工及时等。

五、技术措施

（一）BIM 模块化安装和样板试块制度

大体积混凝土内的机电管线除了要满足防辐射要求外，其管线定位精度必须在位正负误差10mm 以内，以满足质子设备的高精度安装要求。考虑到钢筋网的柔性和在钢筋中施工的不便性，现场对集中密集的机电管线采取了场外预制，模块化安装的施工方案。首先利用 BIM 技术进行模块化拆分，将机电管线密集的区域拆分成若干个模块出图（如图1所示），然后在场外放线，将同一模块内的机电管线安装在同一型钢架体内，并保证标高和相对之间的安装精度，架体的型钢除了强度需满足机电管线的荷载外还需有一定的稳定性，保证整体不会歪斜扭曲和变形，架体底部需要焊接钢板，并在钢板上预留地脚螺栓孔。模块预制完成后，利用吊车进行整体吊装，并在现场放线将模块的位置调整到位，所有模块安装完毕并复测达到精度要求后模块间用角钢或者槽钢相互间焊接固定，模块底脚用螺栓和地面固定，从而保证整个模块在后续钢筋、模板和混凝土浇筑过程中的稳定性和安全性。



> 图1 预埋管线模块化出图

为保证施工质量和施工方案的可靠性，本项目中质子区管线密集处的施工采用样板试块的方式。在场外样板区按照1:1复制现场的模块安装区。由现场参建单位各方进行检査和提议并进行优化，如管道的固定点的选择、架体的强度和刚度的保证，钢筋穿插施工的方式等。试块浇筑和养护完后对混凝土的质量和机电管线进行全方位检查，以核定各项指标是否满足设计和使用要求。为保证施工过程的可追溯性和质量问题原因的查找，现场每个管口出均贴有二维码，其链接的网站里面记录了各个管道的代号、功能、品牌、规格、材质、安装技术参数，模型定位以及施工过程照片等^[4]。如果施工质量有不合格的地方可以通过扫描二

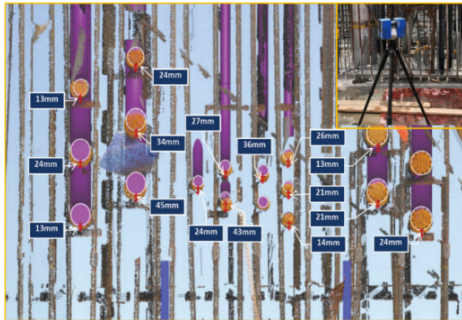
维码查找原因,并制定可靠的措施后再应用于现场施工,同时为将来使用方的管理和维修提供了非常方便的工具,样板试块如图2所示。



> 图2 样板试块

(二) 三维激光扫描技术

为了保证预埋机电管线的安装精度,项目采用三维激光扫描技术进行复核。三维激光扫描是一种高清晰三维实景复制技术和测量工具,它是利用三维扫描仪配合球形坐标靶和棱镜进行现场扫描,通过物体表面对激光的反射作用,快速自动获取的空间点云数据并建立现场实景的三维可视化数字模型,同时可以获得现场任何实景物体的距离、面积及体积的精确数据,其效率和精度远远超过传统的单点式采集方式。通过将三维扫描建立的模型与原 BIM 模型进行分析软件对比,可以得出每个预埋管口的施工偏差方位及数据,为现场的调整提供了可视化和精准的参照依据(如图3所示),从而保证了现场精预埋、精定位的施工能够快速、准确、高效的完成。



> 图3 三维扫描及偏差分析结果

(三) EBIM 云平台技术

为了有效利用 BIM 技术来指导和管理施工,现场采用 EBIM 云平台技术,施工管理人员可以通过手机上或者平板电脑上的 EBIM 终端软件登录项目的服务器并获取最新的 BIM 模型。在 EBIM 软件上可以对模型进行细节显示和测量等操作,同时 EBIM 软件融合了 BIM 4D 技术,可以展示施工的模拟动画与节点要求,通过与施工现场比对可以容易地发现安装偏差和施工进度问题,克服了传统管理方式容易产生的滞后性。此外,EBIM 软件还支持实时上传现场照片与问题记录,施工人员可以通过平台进行反馈,技术人员远程提供解决方案,实现了远程与现场的无缝衔接。EBIM 实时可以对不同的问题的严重程度设置不同的解决时限

要求并知会相关方领导,从而使现场施工管理人员可以快速有效地进行管理和协调,大大提高了工作效率。同时,平台还可以生成各类报表和统计数据,帮助管理者更好地进行决策分析。它还支持跨部门的协同工作,使得沟通更加顺畅,减少了信息传递中的滞后和误差。这样一来,不仅提高了施工的精准度,还进一步优化了整体项目管理流程^[5]。

(四) 施工过程中的保护

大体积混凝土的浇筑量大,浇筑点多,施工过程对预埋机电管线的扰动大,并且出了问题现场很难及时修复处理,因此做好浇筑过程中的成品保护尤为重要。现场主要通过两个措施来确保机电管线的安全。首先是优化混凝土下料口的位置,在浇筑以前通过和土建技术团队的内部协商,优化混凝土的下口位置,使其避开下方的机电管线,并且尽量远离机电管线密集处,以减小混凝土出料时对预埋管线的冲击。其次在预埋机电管线上方的钢筋网上沿管线走向图上油漆标记,并给土建施工班组交底严禁在标记处进行混凝土振捣作业,浇筑时要派专人在现场监管,防止工人误操作损伤机电预埋管线,另外漏出混凝土的管口要用木盒保护,贴上禁止踩踏的标记,以保护管口在混凝土浇筑过程中不被污染和破坏。

六、结语

质子医院作为国内新兴的建筑安装工程领域,其质子区配套的机电及工艺系统有特殊的复杂性,施工安装质量要求高,难度大,不同专业之间的流水搭接和穿插作业紧密。项目利用 BIM 技术进行深化设计、三维建模、模拟施工,同时配合模块化安装、EBIM 云管理、三维激光扫描技术和管线成品保护等技术措施进行辅助,确保了机电安装工程的顺利实施和推进,为工程最终目标的顺利实现打下了坚实的基础。

参考文献

- [1] 蔡伟明,穆向魁.质子治疗肿瘤:国内外进展现状及其前景.实用肿瘤杂志,2007,22(6):475-478.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.中国国家标准化管理委员会,氢气安全使用规程:GB4962-2008.中国标准出版社,2009.
- [3] 陈文伟,黄新颖,程思.BIM技术在大型医院项目机电安装施工中的应用[J].建设科技,2023(1):28-30.
- [4] 吴启明.大型公建及综合性医院机电安装施工技术分析[J].中国设备工程,2023,(09):220-222.
- [5] 王竞千,陈艳超,周大伟,彭琳,蒋建云.BIM技术在上海莱佛士国际医院机电系统施工中的应用[J].建筑机械化,2022,43(03):59-61.

物联网技术在仓储物流中的运用研究

安慧燕

河北科技学院, 河北 唐山 063000

摘 要 : 仓储物流是现代物流体系中十分关键的构成部分, 在商品生产、流通、消费等多个环节发挥着至关重要的作用。但是, 传统的仓储物流存在多种制约因素, 造成仓储物流效率和质量低下, 不利于其持续发展。而物联网技术的应用, 能够有效解决这些问题, 改善仓储物流系统的效率, 增强其信息透明度。基于此, 本文主要对物联网技术在仓储物流中的运用进行研究, 以供参考。

关 键 词 : 物联网技术; 仓储物流; 运用

Research on the application of Internet of Things Technology in Warehousing and logistics

An Huiyan

Hebei University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063000

Abstract: Warehousing logistics is a very key part of the modern logistics system, playing a vital role in commodity production, circulation, consumption and other links. However, there are many constraints in traditional warehousing logistics, which result in low efficiency and quality of warehousing logistics, which is not conducive to its sustainable development. The application of the Internet of Things technology can effectively solve these problems, improve the efficiency of the warehousing and logistics system, and enhance its information transparency. Based on this, this paper mainly studies the application of the Internet of Things technology in warehousing and logistics for its reference.

Keywords: Internet of Things technology; warehousing and logistics; application

在仓储物流中, 加大物联网技术的应用力度, 能够有效缩短物理距离, 并有利于提高各类资源的利用率, 进一步提高工作效率。因此, 仓储物流业在转型发展中, 应正确认识物联网技术的应用价值, 提高仓储物流服务水平, 为人们提供更加智能化的物流服务。

一、物联网技术在仓储物流中的运用优势

(一) 有利于提高工作质量和效率

以往的仓储管理, 更多依赖人工管理, 详细记录各类货物的名称、型号、数量等关键信息, 以此加强货物的进出库管理。在此过程中, 部分管理人员即便使用条形码, 也需要全面扫描、搬动货物, 整体工作效率低下。而物联网技术的应用, 能够在货物上使用 RFID 电子标签, 并将读写器安装在仓库门上、入口位置等。在先进技术和设备的支持下, 商品入库过程中, 自动记录商品的相关信息, 保存在系统数据库内。此外, 工作人员可以将读写器安装在货架上, 进而发挥读写器的应用优势, 读取并记录商品的具体位置信息, 发送数据库。管理人员实时掌握商品库存信息, 并在系统中输入物资编码, 进而获取所需的商品信息, 工作效率大幅度提升^[1]。

(二) 有利于供应链及库存管理

工作人员可以在产品生产的过程中, 将 RFID 安装在关键零部件中, 进而实时跟踪产品生产的全过程, 动态化监控其生产进度。同时, 在完成生产工作后, 仓储部门借助 RFID 标签, 实时

监测产品的库存, 确保发货补货的及时性, 合理控制产品库存数量, 提高库存管理的有效性。此外, 在物联网的应用层, 构建信息共享网络系统, 有利于各个部门及时进行有效沟通, 全面采集信息, 实现信息共享, 最大程度降低信息错误率, 保障管理工作质量。

(三) 有利于保障货物的安全性

在货物入库过程中, 选择适宜的位置安装 RFID 标签, 当货物没有经过许可之后进行移动时, 系统及时发出警报信息, 确保货物的安全性。同时, 利用 RFID 电子标签, 加强货物的时间管理, 详细记录其相关信息, 以便于管理人员及时发现接近过期的产品, 并及时处理, 提高其利用率, 避免产生经济损失。

二、仓储物流中物联网技术的具体应用

(一) 感知技术的应用

物联网技术水平不断提升, 在多个行业被广泛应用, 获得良好的应用效果。其中 RFID 技术十分常见。在仓储物流行业中, 相关人员逐渐认识到物联网技术的应用优势, 进而在开展仓储运输

作者简介: 安慧燕 (2003—), 女, 汉族, 河北秦皇岛, 2021 级物联网工程专业本科在读, 研究方向: 物联网技术。

工作的过程中，合理引入智能无线射频手持终端，将托盘系统和感知技术进行有机结合，最大程度减少商品管理成本。感知技术的应用，可以加快商品拣选效率，提高工作质量，提升仓储运输服务水平，使得客户的满意度提升到最高水平。当前，许多仓储系统中，合理应用条形码自动识别技术，结合商品的电子标签，高效率完成拣选工作，有效减轻了工作人员的工作量。同时，基于物联网技术，合理分解商品进出库订单，生成货架上的任务，并借助电子显示技术为商品拣选系统提供支持，提高物流分拣质量和效率^[9]。

例如：某制造企业生产多种类型的产品，增加了仓储物流管理的难度，进而频繁出现一些工作问题，增加成本，降低运营效率。对此，该企业投入更多资金，强化感知技术的应用，在商品信息、仓储位置记录工作中，充分发挥红外线、激光等优势，提高物流的自动化、智能化水平，有效提高了物流分拣质效。同时，该企业利用视频感知监控系统，实时监控仓储拣选工作开展的实际情况，实现该环节的透明化。此外，该企业结合商品仓储物流的实际情况和需求，合理应用传感器技术，动态化监测仓库的温度、湿度等环境条件，为管理人员提供有效参考，提高了企业运营质量和效率，节约成本，创造更多经济效益。

（二）传输技术与智能仓储的应用

仓储物流行业迅速发展，广泛应用了智能终端技术，特别是语音功能、视频监控的先进技术，进一步保障各项开展的有效性。先进的物联网技术实现了商品无人搬运、商品自动识别等，提高了仓储物流的整体管理水平。比如，智能仓储管控系统具有显著的应用优势，充分体现出物联网技术在仓储物流领域中的应用价值，促进仓储物流逐渐实现智能化发展目标。物联网技术主要涉及商品销售、配送和运输等关键环节，具体如下：1. 商品销售。在该领域中，通过物联网技术，能够快速、准确地定位已经销售的商品信息，并将其及时传送给距离消费者最近的仓库。工作人员借助后台系统，更加全面地了解商品信息，并在最短时间内高效完成商品出库工作。物联网技术的应用，加快了商品出库速度，避免出现物流延迟、商品配错等现象，进一步提高了商品出库、存储过程的安全性。2. 商品配送。在商品配送环节，工作人员可以借助无线射频技术，全面优化商品配货流程，提高工作质效。在具体操作中，工作人员利用该技术，详细分析各类商品在仓库的具体位置，并对商品信息进行实时监控，确保数据传送的安全可靠性。在明确特定商品的具体位置之后，工作人员可以借助无线扫描终端，迅速找到商品位置，做好相应的打包处理工作，以便于运输车辆到达现场后，迅速完成出库任务^[9]。无线射频技术的应用，提高了商品配送的自动化处理水平，减少人员工作量，节约人工成本，并避免由于人工操作失误，出现商品配送问题，确保开展的有效性。3. 商品运输。在商品运输中，合理应用传感器技术、GPS 定位技术，动态化监控和管理商品运输情况，确保商品安全。同时，工作人员在技术的支持下，准确掌握商品运输车辆的相关信息，提高商品运输全过程的透明化。此外，消费者可以利用网络平台，实时查询商品运输的具体位置信息，为其带来良好的网络购物体验^[9]。

（三）数据储存与处理技术的应用

在仓储物流中包含多种类型的信息数据，如商品信息、订单信息、库存信息等。对此，工作人员应强化数据储存和处理技术在仓储物流中的应用，基于实际情况和工作需求，构建数据库管理系统，提高仓库相关信息数据的储存、管理水平。工作人员可以通过该系统，快速访问仓储物流的相关信息数据，以此保障工作决策制定的科学合理性。同时，工作人员可以利用多种智能化设备、条形码等自动识别技术，动态化采集、传输商品数量、位置和仓库温湿度等相关信息。将这些信息传送到云平台的过程中，需要选择适宜的通信技术，进一步保证数据传输的安全可靠性^[9]。

由于仓储物流的原始数据来源有所不同，可能存在冗余、错误等现象。对此，工作人员进行数据分析和处理之前，需要做好清洗、整理工作，保证各类信息的真实可靠性和一致性。工作人员深入分析并挖掘仓储物流中的各类数据，探寻其规律和趋势，及时发现异常现象，并借助数据分析算法和模型，提高库存管理和供应链管理。工作人员深入分析和处理仓储物流的实时数据，可以针对性监控仓库运营的具体情况，并结合相应的规则，设定阈值，优化预警机制。比如，当商品超过安全库存水平、仓库温湿度超出可控范围时，系统自动发出警报信息，提示相关管理人员及时处理。此外，工作人员借助先进技术，结合自身需求，通过图表、仪表盘等多种形式，可视化展示处理后的相关数据，进而更加准确了解仓储物流的相关指标和性能。在管理人员制定决策的过程中，可以结合数据报告，掌握仓库运营的实际情况和需求，保障制定决策的有效性^[9]。

（四）通信技术的应用

通信技术在仓储物流中具有重要作用，有利于各项信息交流，并推动仓储物流行业顺利进入互联网时代。目前仓储物流范围持续扩大，贸易量呈现出持续增加的趋势，进而为仓储物流企业带来更多新的挑战。因此，仓储物流企业应当加强商品管理，保证商品仓储、物流过程的安全可靠性，确保商品能够按时交付。同时，现代仓储物流在物联网技术的支持下，逐渐向自动化、智能化方向发展。仓储物流企业应当全面整合生产、现代化仓储配送等系统。在此过程中，企业应当不断优化内部系统网络，构建独立网络体系。仓储物流网络规模较大，不同网点都需要在局域网、互联网之间实现各类信息数据的有效传送^[7]。对此，仓储物流企业应合理应用物联网技术，构建全新、完善的智能化物流体系，全面覆盖仓储物流的各个环节，全过程监测、管控整个物流链，确保物流信息、库存、运输、配送等管理工作开展的实效性。智能化仓储系统在实际应用中，可以借助物联网技术，实现仓储物流集中管理、自动化操作，提高工作质效，节约人员成本。此外，将该系统和物流信息系统进行全面整合，以便于仓储物流企业更加迅速响应，高质量、高效率地完成商品配送任务，提高仓储物流服务质量，得到更多客户的认可。

（五）安全与隐私保护技术的应用

该技术在仓储物流中应用，能够进一步保证仓储操作的有效性，提高相关信息数据的安全可靠性，避免出现未经授权的人员获取相关敏感信息。比如：访问控制技术具有较多应用优势，可

以通过身份验证、权限管理、访问控制策略等多种形式，进一步保证仓库内部区域和系统的相关信息数据安全性^[8]。同时，在仓储物流管理中，应用门禁系统、识别技术、电子钥匙等多种先进技术，对仓库的入口加强管理，避免未经授权的人员进入。在用户身份验证过程中，可以利用用户名和密码登录、多因素认证等方式，提高仓储物流安全和隐私保护水平。

工作人员可以在仓库内部、周围区域加强安全管理，合理安装视频监控系统，并优化系统智能分析、报警、记录储存等各项功能。通过该系统对仓库进行实时监控，并确保相关数据的可追溯性，防止潜在安全威胁，提供充足的证据^[9]。此外，在仓储物流中，部分商品具有较高的保密性，在仓库内外部交互传输订单信息、客户数据等敏感信息的过程中，需要引入先进技术，保障信息安全。如，加密技术等，避免数据传输中出现丢失、被盗取、篡改等现象。同时，仓储物流企业构建安全的网络连接，配置防火墙，完善网络病毒入侵检测系统，防止多种因素对仓库内部网络带来威胁。工作人员还应当定期进行关键数据的备份，建立灾难恢复计划，在系统出现故障、突发事件等问题时，可以及时恢复重要信息，避免对仓储物流带来不良影响。

三、物联网技术在仓储物流中应用的展望

（一）实现仓储物流一体化

信息化时代背景下，各行业不断加大一体化信息化管理的建设力度。而仓储物流领域中，我国大部分企业缺乏一体化的信息

化管理，依然存在资源浪费等现象。因此，为了进一步推动仓储物流领域的创新发展，应加大物联网技术的研究和应用力度，积极构建一体化的仓储物流智能管理系统。在此基础上，为了发挥物联网技术的最大应用价值，相关人员应当对接电子商务网络，强化云计算、AI、大数据等先进技术的运用，提高仓储物流的智能运作管理水平，提高商品配送服务水平，满足人们个性化需求，充分体现出我国仓储物流领域的先进技术含量^[10]。

（二）实现仓储作业的智能化管理

部分仓储物流企业逐渐实现了机械化的仓储作业，而部分中小型仓储物流公司，依然沿用人工操作的方式，整体工作质量和效率低下。对此，在仓储作业中，相关人员应加强机器人技术、物联网技术的应用，实现仓储作业的智能化管理。同时，仓储物流企业应当详细分析物联网技术的应用特点和需求，在未来尝试融合无人起降机、无人搬运车、机器人的应用，自动化完成商品下架、堆垛、上架等各项工作，全过程自动化定位、识别和感知商品，提高仓储作业的智能化管理水平。

四、结语

在仓储物流信息化建设和发展中，物联网技术作为重要的技术手段，需要引起相关人员的高度重视，提高其在仓储物流领域中的应用水平，促进仓储物流行业转型升级。同时，相关技术人员应深入研究物联网技术，提高技术水平，发挥其在仓储物流领域的最大应用价值，实现仓储物流的一体化、仓储作业的智能化管理。

参考文献

- [1] 陈思思. 浅谈物联网技术在仓储物流中的运用 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2023: 205-206.
- [2] 周小平. 浅谈物联网技术在仓储物流中的应用 [J]. 中国物流与采购, 2024(4): 100-101.
- [3] 周仕伟. 物联网技术在仓储物流领域中的应用分析 [J]. 新潮电子, 2023(7): 292-294.
- [4] 林秋妍. 物联网技术在仓储物流领域的运用 [J]. 中国储运, 2022(9): 178-179.
- [5] 田诗雨. 物联网技术在仓储物流领域应用与展望 [J]. 中国储运, 2023(9): 121-122.
- [6] 刺海静, 李秀丽, 刘莎莎. 基于物联网技术的兰州市物流园区智能化建设 [J]. 物流技术, 2021, 40(6): 7.
- [7] 余自凌. 基于物联网和人工智能的现代物流及仓储应用技术研究 [J]. 今日财富, 2020(3): 31-31.
- [8] 孙建军. 物联网技术在仓储物流领域中的应用研究 [J]. 物流工程与管理, 2023, 45(12): 40-42.
- [9] 谢煜坚, 赵笑梅. 探析物联网技术在仓储物流领域中的应用分析与展望 [J]. 软件, 2022, 43(12): 159-161.
- [10] 王玉叶, 金晓, 王东珍, 等. 物联网在物流仓储管理中的运用探究 [J]. 中国物流与采购, 2023(9): 93-94.

地质测绘新技术在矿产资源勘查中的应用

范攀¹, 董焰锋², 李旭¹

1. 昆明市土地开发整理中心, 云南 昆明 650000

2. 国检测试控股集团云南有限公司, 云南 昆明 650000

摘要: 以提高地质矿产资源测绘的准确性与效率为目标, 以 GNSS RTK 技术为基础, 从技术参数确定、矿山控制测量、地形测量与实际施工、数据采集与数字化测图等方面入手, 结合矿山地质勘测测量工程实际, 对 GNSS RTK 技术在矿山地质勘探测量中的应用进行分析。研究表明, GNSS RTK 技术操作简单, 速度快, 劳动强度小, 节省现场费用, 提高了工作效率, 是一种很好的选择。本文的研究可为同类条件下的地质矿产勘查工作提供参考。

关键词: GNSS RTK 技术; 地质矿产测绘; 应用实践

The Application of New Geological Surveying and Mapping Technologies in Mineral Resources Exploration

Fan Pan¹, Dong Yanfeng², Li Xu¹

1. Kunming Land Development and Consolidation Center, Kunming, Yunnan 650000

2. China Testing & Inspection Group Yunnan Co., LTD. Kunming, Yunnan 650000

Abstract: Aiming at improving the accuracy and efficiency of geological and mineral resources mapping, based on GNSS RTK technology, starting from aspects such as the determination of technical parameters, mine control surveying, topographic surveying and actual construction, data acquisition and digital mapping, combined with the actual situation of mine geological survey and surveying engineering, The application of GNSS RTK technology in mine geological exploration and measurement is analyzed. The research results show that GNSS RTK technology is simple to operate, fast, has low labor intensity, saves on-site costs and improves work efficiency. It is a very good choice. The research of this paper can provide a reference for geological and mineral exploration work under similar conditions.

Keywords: GNSS RTK technology; geological and mineral surveying and mapping; application practice

引言

在传统的地质矿产勘查工作中, 往往受各种自然因素的影响, 大多数的地图绘制工作都是人工进行, 工作量很大, 难度也很大^[1]。在进行地图绘制时, 既费时费力, 又不能保证地图的准确性^[2]。随着科技的进步与创新, GNSS 实时动态定位在工程建设中得到越来越多的应用, 大大提高工程测量的精度, 促进工程质量的不断提高^[3]。

随着 GNSS RTK 技术在矿产资源勘查中的应用, 其在矿井找矿中的应用也日益受到关注, 本文将 GNSS RTK 技术作为山地城镇建设的重要技术手段, 具有精度高、速度快、24 小时不间断运行等优点, 可使煤炭资源得到最大程度的开发利用, 满足对煤炭资源的勘探需求^[4]。另外, GNSS RTK 技术减轻测绘工作的负担, 提高煤田勘查工作的效率^[5-7]。本文的研究目的是为进一步提高工程变更预测的精度与效率, 改善工程建设的品质, 同时也可可为其他产业提供借鉴。

一、矿产资源勘查的目的即意义

(一) 保障国家经济持续健康发展的基石

矿产资源是工业生产的基本原料, 对于推动国家工业化进程、保障国民经济稳定运行具有不可替代的作用。随着我国经济的快速发展, 对矿产资源的需求日益增长, 矿产资源勘查及时发现和评价新的矿产资源, 为经济发展提供充足的资源保障, 确保工业生产线的稳定运行, 促进产业链的完善, 为国家经济的持续增长提供有力支撑^[8]。

(二) 维护国家安全具有重要意义

矿产资源是国家安全的重要组成部分, 特别是在当前国际政治经济格局下, 资源安全问题日益凸显。我国作为世界上最大的发展中国家, 对矿产资源的需求量大, 对外依存度高, 加强矿产资源勘查, 提高国内矿产资源的自给能力, 有效降低对外部资源的依赖, 增强国家的资源安全保障能力, 维护国家战略安全。

(三) 于推动科技创新和绿色发展

矿产资源勘查过程中, 地质工作者需要运用先进的地质理论和技术手段, 这无疑会促进地质科学技术的进步, 勘查活动可以

发现新的矿产资源类型，为新能源、新材料等战略性新兴产业的发展提供资源支持。

二、GNSS 在矿产资源勘查中的应用

1. 确定技术参数

利用 GNSS 进行矿区测绘，就是为了精确地获得矿区内的测绘资料，从而提高了矿区的测绘精度，并获得了必需的资料，为有关部门开展前期调查和矿区测绘工作打下了基础^[10]。在 GNSS 精密计画中，制图者应重视控制网的选取，通常采用一省一地的 GNSS 控制网来进行^[11]。

2. 矿山控制测量

控制测量是矿产勘查中的一个重要环节^[12]。传统的煤矿勘查监测方法是先在矿区内布设各类测控点位，然后按照这些测点构成相应的控制网络，该方法可以减少或避免测试结果的错误，为以后的工作提供帮助，从而提高测试的效率^[13]。但是，常规的测量和控制技术在施工中易受各种因素的影响，如气象条件和施工环境等。这不仅增加了工程施工的工作量，而且降低了测试的准确性，而且无法得到准确地测试与控制。为此，传统的静态微动法（static static microphase）方法，即利用全球卫星导航（GNSS）对某一特定距离内的每个控制点进行高精度定位，并对其测量精度进行最优调节。应用卫星导航技术进行工程勘察，不仅能有效地解决施工环境和自然环境等问题，而且能有效地解决工程勘察中存在的问题。

3. 地形测量与实际施工

当工程规模较大、地形较为复杂时，施工时要充分认识矿山的实际地形，深入分析研究矿山的内部地形。在此过程中，利用航空摄影技术，根据传统的测量方式获取必要的矿区图像，然后解译矿区图像，并补充所用的测量仪器。但是，受限于环境，该方法难以实现，需要多次试验，难以有效提升检测效率。在煤矿施工及勘查工作中，需要建立一套完善的、便于勘察工作的、与 CNSS 技术相结合的监测体系。然后，通过联合观测站和观测站，构建覆盖矿区的时间－空间坐标体系，对相关数据进行处理，提高监测的准确性和效率。

4. 数据采集

在实际应用中，GNSS 必须利用系统内部的传感器获得非电流和各类电流，并将有关数据存入数据库，以备后续计算和分析。在井下测量和资料获取工作中，本系统能有效地探测到设备区域，并对采集到的电流信号进行 A/D 转换，并转换为相应的数字信号。在完成了转化之后，通过内置的芯片将数据传送到了电脑中。

5. 数字化测图

采用现场采集的方法，对 GPS 最终成图结果进行了数字化处理。在数字化制图过程中，利用 GNSS 进行大比例尺地图的绘制，可以根据使用者的特殊需求，对比例尺进行相应的调整，以适应不同工作人员的需求。测绘时，应根据相关标准对测绘区的地形地貌进行精确复制，采用 GIS 技术，建立能直接反映测绘区地形、地貌特点的 3D 数字模型。

三、地质测绘新技术在矿产资源勘查中的应用

（一）工程概况

本课题拟开展 1/10000 地形图绘制及相关工程地质调查。该地区的地形非常复杂，在全国范围内的三角点数量较少且分布不均匀。但由于其台站密度大、观测困难，使得对它的观测具有较大的难度。

（二）GNSS RTK 图根控制测量

GNSS RTK 技术不受气象、地形、通信网络等多种因素的干扰，在实际应用中有很大的优越性。利用 GNSS RTK 进行矿山地质调查，可以获得矿区的准确定位和监测结果，提高了工作效率。通过对测区数据的采集、换算参数的计算、参考站的选定与建立、流动站的设定、测前的质量检验、内部数据的处理等步骤，最终获得数据。

（三）数据结果验证分析

将所测得的数据（坐标文件）转化为对应的软件格式的文件，并将其导入该软件，然后按照所测图根的技术要求，通过软件调整，即可得到各测点的坐标和高程。为了更好地了解 RTK 的应用范围和精度，在图根引线上使用 RTK 控制点，并将其与现场测量值进行比较，见表 1。

表 1 测量结果对比表

点号	图根导向观测结果			RTK 观测结果			结果比对	
	X	Y	H	X1	Y1	H1	Δ S	Δ H
T1	20975.109	8449.499	109.238	20975.129	8449.486	109.204	0.024	0.020
T2	20892.323	8331.656	108.738	20892.308	8331.642	108.752	0.021	-0.016
T3	20841.089	8240.248	109.137	20841.081	8240.236	118.071	0.014	-0.008
T4	20805.284	8085.192	109.298	20840.910	8085.189	109.279	0.014	-0.014
T5	21638.863	8159.313	125.415	21638.879	8159.321	125.402	0.019	0.017
T6	21689.950	8011.607	133.370	21689.956	8011.584	133.383	0.024	0.006
T7	20787.161	7676.811	109.621	20787.132	7676.791	109.594	0.031	-0.029
T8	21987.348	8497.939	133.044	21987.358	8200.947	133.069	0.014	0.011
T9	22151.766	8409.487	133.579	22151.752	8409.460	133.556	0.030	-0.014
T10	22115.406	8652.973	121.309	22115.390	8652.981	121.322	0.018	-0.016

由表 1 可知，点位误差和高程误差分别为 $\pm 1.97\text{cm}$ 和 $\pm 1.50\text{cm}$ 。因此，利用 RTK 技术对图根控制点进行可靠性分析是可行的。

（四）RTK 与全站仪测量结果对比表

RTK 与全站仪测量结果对比如表 2 所示。

表2 全站仪测量和 RTK 结果对比表

点号	RTK 测量结果		全站仪测量结果		坐标较差 /m		备注
	X1	Y1	X	Y	Δ X	Δ Y	
B1	149319.517	131251.847	149318.951	131232.252	0.572	-0.207	部分遮挡
B2	-	-	149322.951	131247.528	-	-	完全遮挡
B5	149345.792	131242.198	149345.903	131241.944	-0.112	0.257	部分遮挡
B6	149350.918	131217.893	149349.862	131218.470	1.067	-0.583	部分遮挡
B8	149324.157	131241.926	149324.138	131241.944	0.019	-0.018	空旷
B9	-	-	149338.144	131223.370	-	-	完全遮挡

表2的结果表明，两种探测方法在平地与开阔地形下的探测精度基本相当，但 RTK 探测速度较快，且在林地、建筑群等地形条件下探测精度较高。

四、结论

结合某矿区的工程实践，对 GNSS RTK 在矿产资源勘查的应用进行了分析，得到了如下成果。

1.GNSS RTK 测量技术在自动化程度上优于传统的测量方法。该方法可以在不经过后期处理的情况下，对观测值进行实时观测。

2. GNSS RTK 可实现无误差累积的长距离三维空间坐标传递。这样，既能提高定位精度，又能保证数据的安全可靠。

3.GNSS RTK 技术操作简便，工作速度快，劳动强度小，可以节约场地成本，提高工作效率，是一种很好的选择。

参考文献

[1] 王光宇. 有色金属矿产资源勘查关键点及合理布局 [J]. 世界有色金属, 2024, (04): 146-148.

[2] 文钦宇. 地质矿产资源勘查技术的应用及重难点分析 [J]. 中国金属通报, 2024, (02): 134-137.

[3] 陈蓉, 黎文甫, 田建喜, 等. 浅析地质工程测绘在矿产资源勘查中的重要性 [J]. 世界有色金属, 2018, (11): 27+29.

[4] 吴倩. 测绘新技术在地质测绘工程中的应用研究 [J]. 魅力中国, 2019(30): 266.

[5] 金萍. 测绘工程测量中测绘新技术的应用 [J]. 居舍, 2018, (34).

[6] 赵璇玑. 测绘新技术在地质测绘工程中的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2019(23): 192-193.

[7] 邓萍. 浅析地质工程测绘在矿产资源勘查中的重要性 [J]. 新疆有色金属, 2024, 47(05): 9-10.

[8] 王星桥. 测绘新技术在地质工程勘察中的运用分析 [J]. 中国设备工程, 2024, (13): 83-85.

[9] 陆超. 地质矿产资源勘查及合理开发 [J]. 中国金属通报, 2024, (04): 146-148.

[10] 王燕燕. 地质矿产资源勘查中存在的问题及对策 [J]. 世界有色金属, 2022, (04): 102-104.

[11] 江佳琳. 无人机遥感测绘在矿产资源勘查中的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2021, (12): 94-95.

[12] 周宜康. 地质矿产资源勘查问题及对策 [J]. 冶金管理, 2021, (05): 76-77.

[13] 王广. 无人机测绘技术在复杂地形区矿产资源勘查中的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2020, (21): 26-27.

犀牛软件在水尺及船名标记放样中的应用技巧

刘剑

镇江集智船舶科技有限公司, 江苏 镇江 212000

摘 要 : 船舶设计复杂精细, 水尺与船名标记放样是关键环节。水尺关乎航行安全与载货量计算, 船名标记影响船舶形象。传统放样方法效率低、精度有限, 难以满足需求。犀牛软件基于 NURBS 理论, 有强大曲面建模能力, 提供全新解决方案。本文将深入探讨犀牛软件在这两方面的应用技巧, 为船舶设计领域提供有益的参考。

关 键 词 : 犀牛软件; 水尺放样; 船名标记放样; 船舶设计

Rhinoceros Software in the Water Gauge and Ship Name Mark Lofting Application Skills

Liu Jian

Zhenjiang Jizhi ship technology Co., LTD. Zhenjiang, Jiangsu 212000

Abstract: Ship design is complex and fine, and the key link is the lofting of water gauge and ship name mark. Water gauge is related to navigation safety and cargo load calculation, and ship name mark affects ship image. The traditional lofting method has low efficiency and limited precision, so it is difficult to meet the demand. Rhino Software is based on NURBS theory and has powerful surface modeling capabilities to provide new solutions. This paper will deeply discuss the application skills of rhino software in these two aspects, and provide useful reference for the field of ship design.

Keywords: rhino software; water gauge lofting; ship name marking lofting; ship design

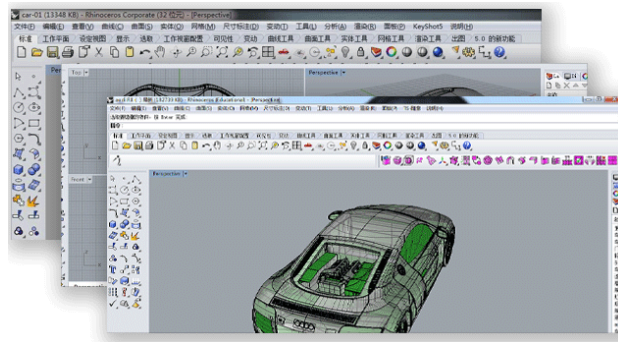
引言

船名编制主要通过设计提供的船名编制结构图进行, 包括船名的安装部位, 船名的字体样式, 船名格式要求。船舶是一个结构型, 整个形状很复杂, 其外形不但满足各规则的规定, 而且满足各项技术指标的要求。犀牛软件是以 NURBS (NURBS) 理论为基础, 能够构造具有高精度平滑曲面的软件, 为船舶、船舶等水表样划线提供了较好的几何学保障。不管是复杂的船舶形状, 还是精美的字符样, 犀牛都可以很容易处理, 达到精确的模型样放样的效果。利用犀牛软件, 设计员就可以准确地按照船舶建造的要求, 准确地定位和确定尺寸, 进行外观的布置。此系统利用“放样”命令, 很快可生成所需放样面, 并且可通过面编辑器进行调整, 以保证水表放样的精度和美观。另外, 此系统还具有多种形式文件的输入输出, 可以很好地实现和其他软件之间的数据交换和协作, 大大地提高设计效率。

一、犀牛软件概述

犀牛 (Rhinoceros, 亦称 Rhino) 软件“犀牛” (Rhinoceros, Rhinoceros) 是1998年由美国 RoberMcNeel& Assoc 公司开发的一款功能强大的三维建模软件。近年来, 犀牛软件以其较强的建模能力满足了现代建筑外形的需求, 并提供了大量的可扩展插件, 如 Visual-ARQ, 参数化插件 Grasshopper, BIM 插件 RhinoBIM (beta) 等。最近一次发布的是 Rhinoceros4.0SR9, 而下一次发布的是 Rhinoceros5.0 WIP (工作流程)。与 Maya 和 SoftImageXSI 相比, 它需要在 WindowsNT, Windows2000, WindowsXP, 或者 SGI 的显卡上运行, 而且还得有一块很贵的高级显卡。而 Rhino 只需要 Windows 95, 一块 ISA 图形卡, 或者一台老式486电脑就可以了。另外, 它的安装包很小, 整个安装过程只需要20兆。该软件具有对 NURBS 曲面, 曲线, 实体的创建, 分析, 编辑等功能, 无角度, 无大小限制, 能很好地

建立模型^[1]。同时, 它的界面友好, 易于设计者使用, 也是巩固 Thinking 和 Alias 学习的好基础。引进 Flamingo 和 BMRT 等渲染软件后, 其画质已经达到了与高档渲染软件相当的水平。



> 图1犀牛 Rhino 效果图

二、犀牛软件在水尺及船名标记放样中的应用优势

（一）精准的曲面建模能力

犀牛软件是基于 NURBS（非均匀有理 B 样条曲线）理论，可以构建精确、平滑、光顺的曲面，而水尺和船名标记放样对曲面精度要求非常高^[2]。水尺和船名标记一般位于船体复杂曲面区域，而且对曲面的光滑程度和光顺度有着极高的要求。犀牛软件中强大的曲面建模命令如放样、扫描、混接等都为设计者创造了良好的条件，能很快制作出水尺及船名标记放样需要的复杂曲面，而这些曲面光顺高精确，又容易纳入船体总布置中去，为水尺及船名放样提供精确的几何基础。如用犀牛软件的 NURBS 曲面建模功能创建船体曲面，其自由度大，可以灵活地控制曲面的控制点和权值来形成与船体相吻合的曲面几何形状^[3]。

（二）灵活的插件支持

犀牛软件提供的 Grasshopper、T-Spline 等插件软件，可以丰富和拓展软件的功能，支持参数化设计、自动化建模等高级功能的应用，提高设计效率。在水尺及船名标记放样过程中，可以通过 Grasshopper 等插件对设计方案参数的快速调整和方案的多轮迭代优化，找到设计方案的最优解。Grasshopper 插件可以将设计人员编写的算法用来生成复杂的几何形状，而不再需要手工绘制每一个几何形状。参数化设计可以帮助提升设计效率、灵活性和调整性，也可以和 AutoCAD、SolidWorks 等其他设计软件整合，实现不同平台间的数据交换和协同设计，提高设计流程的便利性和效率^[4]。

（三）良好的兼容性

犀牛软件具有较强的兼容性，支持 DWG、DXF、IGES、STEP 等多种格式文件，方便了与其他设计软件进行数据交换、协同设计，在进行水尺及船名标记放样时，设计师可以利用犀牛软件与其他设计软件兼容性好的特点，将放样结果导出为其他软件支持的格式进行放样设计数据的加工制造和工程管理。如可以在犀牛软件中进行水尺及船名标记放样设计，然后将设计结果导出为 DWG 格式后，再利用 AutoCAD 进行编辑标注，或者导出 STEP 格式，在 SolidWorks 中进行建模，进行工程分析等，可以大大提高设计效率、降低设计成本，使设计师可以较为灵活地利用各种设计工具完成设计任务^[4]。

三、犀牛软件在水尺及船名标记放样中的具体技巧

（一）水尺放样技巧

水尺是船舶上用来表明吃水深度的标志，其放样精度将直接影响船舶的航行安全性和装货量核算。用犀牛软件来放样水尺，可按如下步骤和技巧来完成：

1. 计算水尺位置及尺寸：依据船舶设计手册，计算出水尺的位置和尺寸，即水尺的位置和起始和终止水尺线的高度、宽度等相关尺寸，需要注意的问题是在确定水尺位置和尺寸的同时，应充分考虑船体的形状、装载货物的需求、安全性要求以及法规的要求，充分保证水尺的位置和尺寸符合设计的要求，同时也可

以保证水尺可以正常测量船体的实际尺寸，以满足实际工作的需要^[5]。例如，确定某型船舶的水尺位置和尺寸时，需要确保水尺位置不和船体结构发生干涉，满足不同的载货量的测量要求。

2. 绘制水尺轮廓线：打开犀牛软件，在犀牛软件中选择合适的草图面（如上视基准面），使用“草图绘制”功能绘制出水尺闭环的轮廓线。在绘制轮廓线时，要求轮廓线与水尺的实际轮廓及尺寸完全一致，以便下步放样。绘制轮廓线时可以采用犀牛软件中相关的辅助功能如网格线、对称线等辅助其绘制。且轮廓线应光滑闭合，切忌断线和尖角。

3. 生成放样曲面：选择放样命令，逐次选取绘制完成的水尺轮廓线，按回车生成放样曲面。在放样过程中可以通过调节放样参数，（平移距离、角度等）控制放样曲面形状、大小。犀牛软件提供多种放样选择，例如：封闭放样、开放放样等，可以选择不同地放样方式满足需求^[6]。生成放样曲面后需要检查放样曲面质量、精度，确定曲面可满足后续加工制造、工程管理的需要。

4. 曲面质量优化：放样出曲面后，运用犀牛软件自带的曲面编辑工具（曲面剪切、曲面拉伸、曲面倒角等）对曲面进行二次加工优化，使曲面质量达到要求。在进行曲面质量优化时，需考虑曲面的几何特征，如曲率、连续性等，使曲面既符合设计规范，又具备良好的形状特征，同时运用犀牛软件中的曲面曲率分析、曲面连续性分析等分析工具对曲面质量进行分析。

5. 标注细节：根据设计要求在水尺曲面上增加标注和细节，包括刻画线条、数字、单位等，这些标注和细节要明确、准确，有利于后续加工制造和工程管理；标注细节可以利用犀牛软件的文本工具、标注尺寸工具等提高标注准确性和速度；同时标注细节位置、大小、字体等也要根据要求设置，避免遗漏出错。

（二）船名标记放样技巧

船名标记是船舶的身份标识，其放样的准确和美观程度直接关系到一艘船舶的整体外观^[7]。运用犀牛软件对于船名标记放样可参照以下步骤及技巧使放样既精确，又美观。

1. 创建船名字体模型

使用犀牛软件中的“文字”命令输入船名的文字，选择船名字体与船名字号，形成文字曲线。船名曲线非常重要，文字曲线直接关系船名标志形状与样式，字体的选择应根据船舶设计风格与外形特点选择。字号大小应综合考虑船舶整体外观与形状特点，大小适当，形成船名字样曲线。

2. 生成放样曲面

以生成的文字曲线作为放样轮廓线，点击“放样”，生成船名标记曲面，在此过程中可通过平移距离、旋转角度、旋转比例等放样参数来控制曲面形状的大小和位置，需要船名标记设计师对各种曲面放样知识有一定的积累，同时还需敏锐地捕捉到设计意图和船舶本身的需求，调整至曲面形状达到合适的状态，需要不断去试验调整。

3. 优化曲面质量

在产生放样曲面之后，使用犀牛软件的曲面编辑功能进行曲面编辑。包括对曲面的修剪、延长、倒角操作，使曲面更平滑更精细。编辑曲面时要认真观察表面上的每个部分，保证没有瑕疵

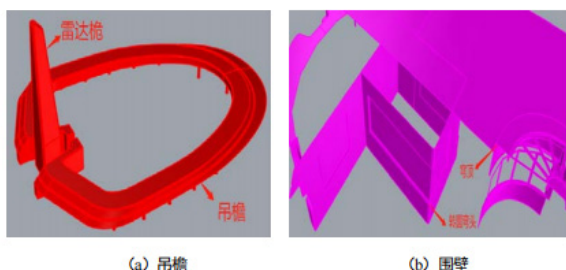
不平现象^[9]。并且按设计要求对曲面的边倒角、修剪,能使船名标记更加美观大方。

4. 添加细节和装饰

按设计要求将必须细节内容及装饰元素,如图案花纹、装饰边框等,加入船名标记曲面上;细节装饰元素可提升船名标记外观的审美程度,更能烘托出船的别致个性与品位,应充分考虑这些细节、装饰元素与设计风格的协调度。

四、犀牛软件应用实例

并以某观光邮轮项目为实例,运用 AM 软件对该项目进行了综合建模。主船体为单体双体船,其上部建筑物有线型吊檐、线型围壁和穹顶等多种型式。由于外墙与外墙之间的连接部位采取了多种弯折方式(见图2),给建筑立面的建模带来了很大的困难和工作量。



> 图2 吊檐与围壁

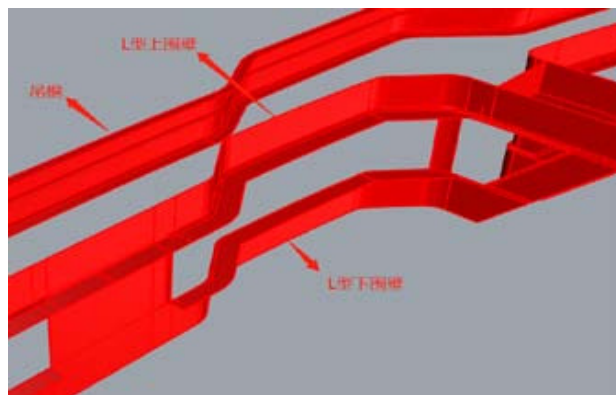
本例上建模型表面叠加很复杂,其初始建模思想为:首先对表面进行命名,然后将其输入到 AM 中进行拼接^[10]。考虑到檐口和檐口大多是 L 形的,厚度一般在 4~6 mm,施工中要求檐口和檐口的 L 形圆角部分采用板式压折法代替管道连接。不过,在实际应用中,存在着许多问题:曲面数目太多,模型转换频繁;表面预划分不合理,需要进行返修;一面有多个形状,构造板接缝要有一定的范围, L 形结构边缝模型经常提示分值,要减小约束范围;平面模型设计师抱怨表面过多,不能用来作为边界。由于本课题的设计时间较短,任务较多,因此需要对模型进行改进。例如,在工业设计中使用的犀牛系统(Rhino),在产品外形建模上做得很好^[9]。Rhino 可以输出各种软件可以辨认的文件格式,操作简便,界面直观,快捷键可以参考 CAD 来写,操作步骤有命令行提示,很容易就能学会,很有希望解决目前的模型问题。

应用 Rhino 软件对板接缝的建模,主要有六个步骤:

- 1) 在工具卡中,可以将基本单位设定为毫米(刀具、选项、档案属性、单位)。
- 2) 利用文件选项卡里的输入函数,将一层的上盖表面导入,表面是事先保存好的 igs 格式(档案→导入)。
- 3) 为便于后续的平面及表面造型,本项目拟利用编辑选项卡中的“删除”功能,在 Perspective 界面中对各个区域的表面进行“编辑→删除/裁剪”操作,以便于后续的平面及表面造型。
- 4) 按照 AM 造型的要求,通过对曲面选项卡中的边缘、交叉等函数进行复制,提取出板缝,并将其按照阿拉伯数的次序依次命名(轨迹:曲线→由对象创建曲线→复制边/相交;【面板→

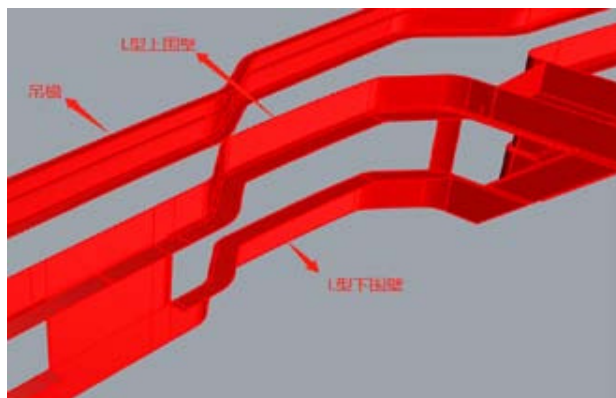
对象属性→名称】通过对可融合行的合并,降低了板缝数目,防止因同名引起的输出损失(参见图中的关键步骤)。

5) 把曲面和抽出线都以 igs 格式保存,然后用 AM 的表面管理器模块把 AM 软件导入。打开表面管理器→全表面→导入文件→选择 Rhino 导出的 igs→释放表面)。在建立模型时,可以直接抽取出板的接缝(如图3),同时,也可以让平面设计师以此为参照物,大大缩短了设计的时间。



> 图3 Rhino 提取的板缝线

6) 进入 AM 软件曲面建模模块,选对应曲面构建曲面板缝,可直接从库调用 Rhino 中提取的板缝线,无范围限制(路径:Curved Hull→相关选项→Get curve from External Source)。该设计成果经后期生产验证,板件尺寸准、外板成型佳(见图4)。



> 图4 外板成型效果

船名标记是船舶形象的一个元素,其放样既要考虑视觉效果,又要考虑规范性。运用犀牛软件制作船名标记放样:①选取字体:参照船舶设计风格、船名特征等因素确定使用字体。犀牛软件中字体可选用字体格式很多,可参照多种字体格式进行放样。②船名标记的尺寸大小:根据船名标记位置、曲面的曲率选择合适的船名标记尺寸大小。通过犀牛软件的缩放功能实现船名标记精确尺寸大小的确定。③船名标记位置:利用犀牛软件中的曲面分析找到船名标记的最优放样位置,保证最佳的船名标记位置和视觉效果、规范性。④船名标记曲面贴合:运用犀牛软件曲面贴合功能将船名标记紧密地贴合在船舶曲面上。⑤采用 Grasshopper 等插件,实现参数化设计、自动化建模。通过插件快速调整设计参数方案、方案的多轮优化得到最佳方案设计。运用犀牛软件与相关设计软件的相互链接进行联动设计。如将犀牛

软件船名标记放样的结果输出成 DWG 或 DXF，进行其他设计和加工。

五、结语

综上，犀牛软件具有在水尺及船名标记放样工作中的巨大性能与优势：犀牛软件强大的曲面建模性能可以快速建模船舶的复

杂曲面，为水尺及船名标记提供几何放样的依据；强大的插件支持性能，如 Grasshopper 等可以实现参数化设计以及自动建模，大大地提高了设计效率；良好的兼容性能可以使其快速与其他软件之间互相转换，做到数据协同设计。针对观光邮轮项目实例，犀牛软件在复杂曲面建模中起到了重要的作用。犀牛软件操作简单，界面可视化，快捷键可按照 CAD 编写，便于设计人员学习。

参考文献

- [1] 王国庆, 殷旭, 朱博锐, 等. 基于 Rhino 的双曲面结构交互建模放样研究 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(30):163-166.DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2023.30.040.
- [2] 袁永莉, 蒋伯林. 犀牛 (Rhino) 软件在水工钢结构中的展开应用 [J]. 华东科技: 学术版, 2016(1):2.
- [3] 张瑜. 犀牛软件在 (双) 曲面玻璃深加工中的应用 [J]. 玻璃, 2020, 47(7):6.
- [4] 钱真卿, 邵梅芳. 计算机辅助工业设计犀牛软件课程教学探析 [J]. 现代商贸工业, 2022, 43(24):256-257.DOI:10.19311/j.cnki.1672-3198.2022.24.107.
- [5] 杨秀峰, 于湃, 刘泽旭, 等. 应用 EFSPD 系统展开船名, 水尺等字体的方法 [J]. 广东造船, 2021, 40(01):102-104.
- [6] 钱江, 张桂荣, 姚江, 等. 基于连通域分析和笔画宽度变换的船名检测方法 [J]. 珠江水运, 2018(18):3.DOI:CNKI:SUN:ZJSI.0.2018-18-051.
- [7] 朱鸣, 王春磊. 使用犀牛软件及 Grasshopper 插件实现双层网壳结构快速建模 [J]. 建筑结构, 2012(S2).
- [8] 郑洋. 参数化建模在肋环型网格结构中的应用 [J]. 江西科学, 2015(02).
- [9] 颜金永, 李海亭. 犀牛软件在邮轮生产设计中的应用 [J]. 船舶标准化工程师, 2021(06).
- [10] 张玮; 顾立君; 刘茜. 电装生产设计精细化探索历程 [J]. 船舶设计通讯, 2013(S1).

森林火灾无人机协同监测与精准扑救技术研发

秦艳

河南华安消防技术有限公司，河南 郑州 450001

摘要：森林火灾严重威胁生态环境、人民生命财产安全及社会经济发展。无人机技术的兴起为森林火灾的监测与扑救带来新契机。本文聚焦森林火灾无人机协同监测与精准扑救技术研发，阐述了无人机在森林火灾防控中的重要意义。深入分析无人机协同监测的关键技术，包括多机通信与协作机制、传感器融合技术等；探讨精准扑救技术，如智能决策系统、高效灭火装置集成等。通过研究这些技术，旨在构建一套高效、智能的无人机协同监测与精准扑救体系，提升森林火灾防控能力，为森林资源保护提供有力技术支持。

关键词：森林火灾；无人机；协同监测；精准扑救；传感器融合

Research and development of collaborative monitoring and precision fire fighting technology for forest fires by UAVs

Qin Yan

Henan Hua'an Fire Technology Co., LTD. Zhengzhou, Henan 450001

Abstract: Forest fires pose a severe threat to the ecological environment, people's lives and property, as well as social and economic development. The rise of drone technology has brought new opportunities for monitoring and combating forest fires. This paper focuses on the research and development of collaborative monitoring and precise firefighting technologies using drones in forest fire prevention and control, highlighting the significant role of drones in this field. It delves into key technologies for collaborative monitoring, including multi-drone communication and collaboration mechanisms, sensor fusion technology, and explores precise firefighting techniques such as intelligent decision-making systems and efficient fire suppression device integration. Through the study of these technologies, the aim is to establish an efficient and intelligent system for collaborative monitoring and precise firefighting using drones, enhancing forest fire prevention capabilities and providing robust technical support for forest resource protection.

Keywords: forest fire; UAV; collaborative monitoring; accurate suppression; sensor fusion

引言

随着无人机技术的飞速发展，其在森林火灾防控领域的应用日益广泛。无人机具有机动性强、部署灵活、可在复杂环境下作业等优势，能够快速抵达火灾现场，获取实时信息。多架无人机协同作业，可实现对大面积森林的全方位、动态监测，及时发现火灾隐患并准确确定火灾位置。同时，搭载先进灭火装置和智能决策系统的无人机，能够实现精准扑救，提高灭火效率，减少火灾损失。因此，开展森林火灾无人机协同监测与精准扑救技术研发具有重要的现实意义。

一、无人机协同监测技术

（一）多机通信与协作机制

多架无人机协同监测森林火灾，需要建立高效可靠的通信与协作机制。目前，常用的无人机通信技术包括数传电台、卫星通信和 4G/5G 通信等。数传电台具有成本低、抗干扰能力强的优点，但通信距离有限；卫星通信覆盖范围广，但通信延迟较大；4G/5G 通信具有高速率、低延迟的特点，但在偏远山区可能存在信号覆盖不足的问题。^[1] 因此，应根据实际应用场景，选择合适的通信技术或采用多种通信技术融合的方式，确保无人机之间以及无人机与地面控制站之间的稳定通信。

在协作机制方面，采用分布式任务分配算法，根据无人机的类型、性能、位置以及火灾现场的情况，合理分配监测任务。例如，利用搭载高清摄像头的无人机进行火灾现场的图像采集，搭载热成像仪的无人机负责火源探测，搭载气象传感器的无人机监测火灾现场的气象参数。同时，建立无人机之间的信息共享机制，使各无人机能够实时获取其他无人机的监测数据，实现协同作业。

（二）传感器融合技术

为了获取更全面、准确的火灾信息，无人机需要搭载多种传感器，如光学摄像头、热成像仪、红外传感器、气象传感器等。传感器融合技术能够将不同传感器采集到的数据进行综合处理，

提高数据的准确性和可靠性。

数据层融合是最直接的融合方式，将来自不同传感器的原始数据进行融合处理。例如，将光学摄像头和热成像仪采集到的图像数据进行融合，既能获取火灾现场的清晰图像，又能准确识别火源位置。特征层融合则是先对各传感器采集的数据进行特征提取，然后将特征信息进行融合。这种方式可以减少数据量，提高处理效率，同时保留关键信息。决策层融合是在各传感器独立进行决策的基础上，将决策结果进行融合。例如，通过分析光学摄像头、热成像仪和红外传感器的数据，分别判断火灾的规模、发展趋势等，然后综合各传感器的决策结果，得出更准确的火灾评估结论。

（三）路径规划与自主导航技术

无人机在执行森林火灾监测任务时，需要合理规划飞行路径，以确保能够快速、全面地监测火灾现场，同时避免与障碍物碰撞。^[2] 路径规划算法应综合考虑火灾区域的地形、气象条件、无人机的性能等因素。常用的路径规划算法包括 Dijkstra 算法、A 算法、遗传算法等。Dijkstra 算法和 A 算法属于基于图搜索的算法，能够找到从起点到终点的最优路径，但计算复杂度较高；遗传算法是一种仿生优化算法，通过模拟自然进化过程寻找最优解，具有较好的全局搜索能力和鲁棒性。

为了实现无人机的自主导航，需要结合全球定位系统（GPS）、惯性导航系统（INS）和视觉导航技术等。GPS 提供无人机的位置信息，但在卫星信号受遮挡的情况下，定位精度会受到影响；INS 通过测量无人机的加速度和角速度来推算其位置和姿态，具有自主性强、短期精度高的特点，但存在累积误差；视觉导航技术则利用无人机搭载的摄像头获取周围环境的图像信息，通过图像处理和分析实现自主导航。将多种导航技术融合使用，可以提高无人机导航的准确性和可靠性。

二、无人机精准扑救技术

（一）智能决策系统

智能决策系统是实现无人机精准扑救的核心技术之一。该系统基于大数据、人工智能和机器学习技术，对无人机采集的火灾数据进行处理和分析，预测火灾的发展趋势，制定最优的扑救方案。

首先，建立火灾模型，根据火灾现场的温度、风速、风向、地形等因素，模拟火灾的蔓延过程。通过对大量历史火灾数据的学习和分析，优化火灾模型的参数，提高预测的准确性。然后，利用机器学习算法，对无人机采集的图像、视频和传感器数据进行特征提取和分类，识别火灾的类型、规模和危险程度。根据火灾的预测结果和识别信息，结合无人机的性能和搭载的灭火装置，制定个性化的扑救方案。例如，对于小规模火灾，可以采用无人机直接投放灭火药剂的方式；对于大规模火灾，则需要协调多架无人机进行协同扑救，并合理安排灭火顺序和方式。^[3]

（二）高效灭火装置集成

为了提高无人机的灭火效率，需要研发和集成高效的灭火装

置。目前，常用的无人机灭火装置包括干粉灭火器、水基灭火器、二氧化碳灭火器等。干粉灭火器具有灭火速度快、适用范围广的优点，但对环境有一定污染；水基灭火器环保、灭火效果好，但重量较大，对无人机的负载能力要求较高；二氧化碳灭火器灭火后不留痕迹，适用于对环境要求较高的场所，但成本较高。

在灭火装置的设计和集成过程中，需要考虑无人机的负载能力、飞行稳定性和灭火效果等因素。采用轻量化、小型化的设计理念，优化灭火装置的结构和性能，提高其与无人机的适配性。同时，研发新型灭火药剂和灭火技术，如超细干粉灭火剂、泡沫灭火剂等，提高灭火效率和效果。此外，还可以将灭火装置与无人机的导航系统和智能决策系统相结合，实现灭火装置的自动瞄准和精准投放，提高灭火的准确性。

（三）通信与指挥系统优化

在无人机精准扑救过程中，通信与指挥系统的稳定性和高效性至关重要。一方面，要确保无人机与地面控制站之间的通信畅通，及时传输火灾数据和扑救指令；另一方面，要实现多架无人机之间的协同指挥，确保扑救行动的有序进行。

采用先进的通信技术，如 5G 通信、卫星通信等，提高通信的带宽和稳定性，减少数据传输延迟。建立统一的指挥平台，对多架无人机进行集中管理和指挥。指挥平台可以实时显示无人机的位置、状态、任务执行情况以及火灾现场的实时图像和数据，方便指挥员进行决策和调度。同时，利用虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术，为指挥员提供更加直观、准确的火灾现场信息，提高指挥决策的科学性和准确性。^[4]

（四）扑救路径智能规划

在执行精准扑救任务时，无人机需依据复杂的火灾现场环境规划最佳飞行路径。借助地理信息系统（GIS）与实时获取的火灾现场数据，构建精确的三维地形和火势分布模型。通过智能路径规划算法，综合考虑障碍物（如树木、山峰等）、风向风速对火势蔓延及无人机飞行的影响，以及与其他协同作业无人机的路径避让需求，为每架无人机规划出安全且高效的飞行路线。例如，在面对火势呈扇形蔓延且前方有大面积树林阻碍的情况，算法能够自动规划出从火势侧翼迂回靠近火源核心区域的飞行路径，确保无人机在躲避障碍物的同时，能以最短时间抵达最佳扑救位置，提高扑救效率并保障无人机飞行安全。

（五）灭火效果实时评估与反馈机制

灭火行动完成后，及时准确地评估灭火效果对于后续扑救决策调整极为关键。利用无人机搭载的多光谱相机、热成像仪等设备，在灭火后对火灾区域进行二次扫描监测。通过分析拍摄的图像和数据，对比灭火前后火源区域的温度变化、烟雾浓度消散情况以及过火面积变化等参数，结合机器学习算法构建的灭火效果评估模型，实时量化评估灭火成效。若发现仍存在残余火源或火势复燃迹象，系统将自动生成反馈信息，快速传输至地面指挥中心与智能决策系统。智能决策系统据此迅速调整扑救策略，如调度附近无人机再次执行扑救任务或重新规划后续扑救方案，形成“扑救 - 评估 - 反馈 - 再扑救”的闭环流程，持续提升森林火灾

扑救的精准性与有效性。

三、技术研发面临的挑战与应对策略

（一）能源与续航问题

无人机的能源主要依赖电池，而电池的能量密度有限，导致无人机续航时间较短，难以满足长时间的森林火灾监测与扑救需求。为了解决这一问题，一方面，研发新型电池技术，如固态电池、氢燃料电池等，提高电池的能量密度和续航能力；另一方面，探索无人机的无线充电技术，在森林中设置无线充电基站，使无人机在飞行过程中能够进行无线充电，延长续航时间。此外，还可以采用多机轮换作业的方式，提高无人机的使用效率。

（二）复杂环境适应性

森林环境复杂，存在地形起伏、树木遮挡、恶劣天气等因素，给无人机的飞行和监测带来了很大挑战。为了提高无人机在复杂环境下的适应性，采用先进的避障技术，如激光雷达、超声波传感器等，使无人机能够实时感知周围环境，自动避开障碍物。^[5]同时，优化无人机的飞行控制算法，提高其在大风、降雨等恶劣天气条件下的飞行稳定性。此外，加强无人机的防护设计，提高其抗摔、防水、防尘等性能。

（三）数据处理与分析能力

无人机在监测过程中会产生大量的数据，如高清图像、视频、传感器数据等，对这些数据的快速处理和准确分析是实现协同监测与精准扑救的关键。为了提高数据处理与分析能力，采用高性能的处理器和数据处理算法，对数据进行实时处理和分析。利用云计算和边缘计算技术，将部分数据处理任务卸载到云端或边缘设备上，减轻无人机的计算负担。同时，加强数据管理和存储，建立数据仓库和数据库，方便数据的查询和检索。

（四）通信稳定性问题

森林区域地势复杂，信号容易受到山体、茂密植被等阻挡而减弱或中断，这对无人机与地面控制站之间的通信稳定性造成极大影响。一旦通信中断，无人机可能失去控制，无法及时回传关键数据，严重影响监测与扑救任务的开展。应对此挑战，一方面，选用抗干扰能力强的通信频段，并采用自适应调制解调技术，根据信号强度和干扰情况自动调整通信参数，确保通信链路的稳定。另一方面，构建多链路通信冗余系统，结合卫星通信、4G/5G 通信以及自组网通信技术，当某一通信链路出现故障时，能迅速切换至其他可用链路，保障数据传输的连续性。此外，在森林中合理部署通信中继节点，增强信号覆盖范围，优化信号传输质量。

四、结束语

森林火灾无人机协同监测与精准扑救技术的研发，为森林火灾防控提供了新的技术手段和解决方案。通过多机通信与协作机制、传感器融合技术、路径规划与自主导航技术等协同监测技术，以及智能决策系统、高效灭火装置集成、通信与指挥系统优化等精准扑救技术的研发和应用，有望实现对森林火灾的快速监测、准确预警和高效扑救。

然而，目前该技术仍面临能源与续航、复杂环境适应性、数据处理与分析能力等诸多挑战。未来，需要进一步加强相关技术的研发和创新，突破技术瓶颈，提高无人机在森林火灾防控中的应用水平。同时，还应加强与其他相关领域的交叉融合，如人工智能、大数据、物联网等，推动森林火灾防控技术的智能化、信息化发展，为保护森林资源、维护生态平衡做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 杨敬, 王馐, 吴鑫. 基于遥感和物联网技术的森林火灾协同监测体系建立 [J]. 湖南林业科技, 2017, 44(2):6.
- [2] 马宏伟, 胡坤, 李宁, 等. 基于无人机和机器人陆天一体化的物联网森林火灾监测预警灭火系统设计 [J]. 计算机科学与应用, 2021, 11(5):4.
- [3] 谈文伟. 无人机技术在森林火灾监测与预防中的应用研究 [J]. 消防界 (电子版), 2024, 10(24):39-41.
- [4] 钟懿, 齐洁. 面向森林火灾搜救的无人机集群异构任务分配方法 [C]//2023第七届全国集群智能与协同控制大会论文集. 2023.
- [5] 陈昶宇, 钟琪, 许正豪, 等. 智能消防机器人与无人机协同系统 [J]. 科学与信息化, 2022(009):000.

海洋工程装备项目建造阶段数字化管理实践

于琦, 吴涛, 宋亚楠, 姜晗, 申勃, 张瑞
海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266520

摘要: 本文深入探讨了海洋工程装备制造数字化管理特点、面临挑战、实践案例及未来发展趋势。随着科技的不断进步, 数字化管理在海洋工程装备制造领域的应用日益广泛。通过阐述数字化技术的特点与优势, 以及海洋工程装备制造的特殊性, 强调了数字化管理的必要性。以海洋石油工程(青岛)有限公司的项目案例为基础, 在指出海洋工程装备制造数字化管理面临的技术和人才挑战的同时, 分析数字化技术应用等方面的成功经验。最后, 阐述了数字化管理在提高效率、质量与安全性等方面的优势, 并展望了其未来的技术创新趋势和可持续发展方向。

关键词: 海洋工程装备; 数字化; PCMS

Digital Management Practices in the Construction Phase of Marine Engineering Equipment Projects

Yu Qi, Wu Tao, Song Yanan, Jiang Han, Shen Qing, Zhang Rui
Offshore Oil Engineering (Qingdao) CO., LTD. Qingdao, Shandong 266520

Abstract: This article delves into the characteristics, challenges faced, practical cases, and future development trends of digital management in marine engineering equipment manufacturing. With the continuous advancement of technology, the application of digital management in the field of marine engineering equipment manufacturing has become increasingly widespread. By elucidating the features and advantages of digital technology, as well as the uniqueness of marine engineering equipment manufacturing, the necessity of digital management is emphasized. Based on project cases from Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., Ltd., while pointing out the technical and talent challenges faced by digital management in marine engineering equipment manufacturing, the article analyzes successful experiences in areas such as the application of digital technology. Finally, it elaborates on the advantages of digital management in enhancing efficiency, quality, and safety, and offers insights into future trends in technological innovation and sustainable development directions.

Keywords: marine engineering equipment; digital management; PCMS

一、研究背景

海洋工程装备制造作为国家战略性新兴产业, 对于开发海洋资源、保障国家能源安全具有至关重要的意义。在当今数字化时代, 海洋工程装备制造数字化管理的重要性日益凸显。^[1] 随着科技的不断进步, 数字化技术在海洋工程装备制造领域的应用越来越广泛。目前, 我国海洋工程装备制造业数字化转型虽起步较晚, 但发展迅速。例如, 海洋石油工程股份有限公司在数字化项目管理平台方面的成功实践, 为行业数字化转型提供了新思路。^[2] 项目数字化管理技术已广泛应用于海洋工程装备制造过程, 显著提升了生产效率和质量。

二、研究目的

本研究旨在探讨数字化管理在海洋工程装备制造中的实践, 分析其在提高生产效率、降低成本、提升产品质量等方面的作用。^[3] 同时, 通过对现有实践案例的研究, 探索数字化管理在海洋工程装备制造中的发展方向, 为我国海洋工程装备制造业的转型升级提供参考。具体而言, 将深入研究数字化技术在设计、生产、管理等环节的应用, 以及如何通过数字化管理实现海洋工程装备制造的智能化、高效化和可持续发展。

作者简介:

于琦(1982.08-), 男, 汉族, 山东省青岛市莱西市人, 中级职称, 大学本科, 毕业院校: 中国石油大学(华东);
吴涛(1988.02-), 男, 汉族, 山东省荣成市人, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 数字化;
宋亚楠(1994.08-), 女, 汉族, 内蒙古自治区乌兰察布市人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 数字化;
姜晗(1992.11-), 男, 汉族, 山东省青岛市人, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 数字化;
申勃(1994.08-), 女, 汉族, 辽宁省抚顺市人, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 数字化;
张瑞(2001.01-), 男, 汉族, 山东省临沂市人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 数字化。

三、海洋工程装备项目建造阶段数字化管理实践

（一）海洋油气工程项目建造阶段数字化管理特点

1. 多专业数据集成

海洋油气工程项目建造阶段从设计到完工涉及大量数据，包括结构、管线、电仪等专业的物料清单、工作量明细、施工监控、质检反馈的相关数据。^[4] 数字化管理集成这些数据，形成统一数据平台，实现数据的处理与分析，为项目决策提供有力支持。

2. 作业协同与共享

数字化管理平台可以打破地域和时间限制，实现项目团队之间的无缝协同作业。^[5] 项目成员可以在平台上共享信息、分配任务，提高团队协作效率。

3. 智能化决策

基于大数据分析和人工智能技术，数字化管理可以实现对海量数据的深度挖掘，发现数据背后的规律与趋势，为项目管理者提供智能化的决策支持，提高决策的科学性和准确性。

（二）海洋油气工程项目建造阶段数字化管理面临挑战

1. 数据孤岛

在海洋油气工程项目建造过程中，各部门业务流程严格分割，各业务流程相对独立，各部门拥有自己的系统和数据库，导致项目数据无法流畅传递，出现数据孤岛现象。

2. 数据质量

数据的准确性、完整性和时效性对于决策至关重要，由于缺乏统一数据标准和规范，导致数据格式、编码、命名方面存在差异，难以有效整合和共享。

3. 数据应用

原始数据往往难以直接用于决策，这要求企业具备强大的数据分析能力，能够将复杂的数据转化为易于理解的图表和报告，为决策者提供直观、清晰的信息。

4. 人才短缺

数字化管理需要既懂技术又懂管理的复合型人才。然而，目前这类人才相对短缺，难以满足海洋油气工程项目建造阶段对数字化管理的需求。^[6] 因此，如何培养和引进更多高素质、复合型人才是数字化管理面临的另一个重要挑战。

（三）海洋油气工程项目建造阶段数字化管理应对策略实践

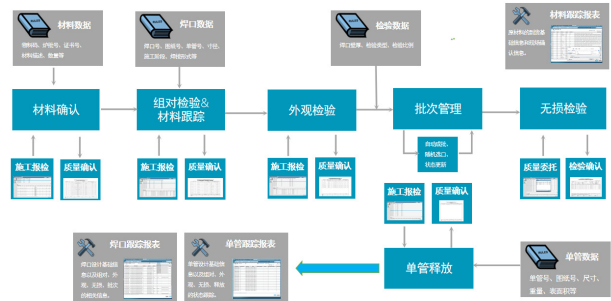
海洋石油工程（青岛）有限公司近年来在工程项目建造阶段数字化管理方面不断深耕，持续推进工程建造管理系统（PCMS）的研发与应用，提高工程项目运行效率、降低人力成本投入，在国际项目中获得良好口碑，推动海洋油气工程项目可持续发展。以下将以海洋石油工程（青岛）有限公司项目建造阶段数字化管理应对策略并结合实践进行分析。



> 图1. 工程建造管理系统（PCMS）

1. 流程线上化

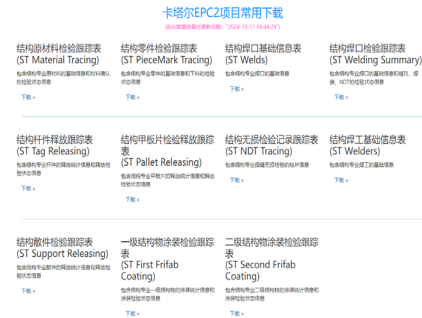
生产流程线上化是打破数据孤岛的关键，跨部门将生产的各个环节衔接，将材料跟踪、组对、焊接、批次管理、无损检验等检验环节的报检流程纳入线上，同时建立完善的建造过程数据采集，串联起设计、材料、施工、质检、计划、费用各项管理板块，为建造阶段提供全方位的数据支持。



> 图2. 管线专业线上报检流程图

2. 数据标准化

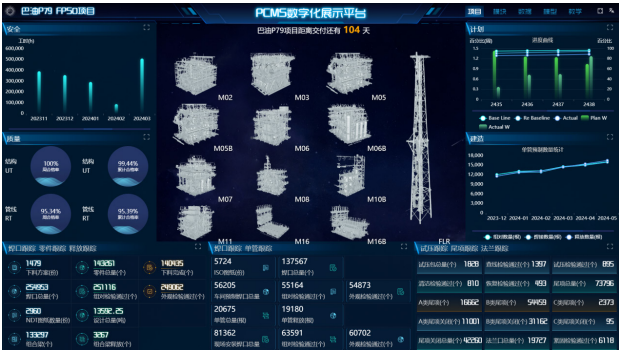
结合海洋工程的实际情况，制定包括数据格式、命名规则、编码标准等在内的统一数据标准，确保各阶段、各部门之间的数据能够无缝对接和共享。需要建立完善的数据采集、清洗、整合和校验机制，以确保数据的准确性和完整性。每个项目建立数据中心，对采集到的数据进行统一存储、管理和服务。^[7] 通过数据中心，可以实现对数据的集中管理、高效处理和快速响应，为海洋工程建造提供有力的数据支持。



> 图3. 项目数据中心

3. 数据可视化

原始数据往往难以直接用于决策，需要通过专业的工具和方法进行解析和可视化处理。^[8] 这要求企业具备强大的数据分析能力，能够将复杂的数据转化为易于理解的图表和报告，为决策者提供直观、清晰的信息。



> 图4. 数字化展示平台

众所周知，管道施工的工作在整个海洋工程建造过程中占较大比重，平台还实现了管线专业4D可视化功能，即将3D模型与项目数据中心的建造数据进行自动匹配，用不同颜色展示每根管道的施工进展，包括材料发放、下料、预制、释放、涂装、吊装等任何 PCMS 系统能够捕捉的状态。



> 图5. 4D 可视化

4. 运维常态化

持续做好项目数字化管理，系统运维至关重要。^[9] 为适应项目合同要求和自身管理需要，工程建造管理系统（PCMS）多次完成

迭代升级，仅巴西某 FPSO 项目，系统完成迭代达215次。海洋石油工程（青岛）有限公司近年来在系统研发、数字化人才培养方面持续投入，打造出一支集技术研发、系统维护、后台管理为核心的运维队伍，每个项目都配备运维专职团队以支持项目数字化管理常态化运行。

四、未来趋势

海洋工程装备建造阶段未来应通过引入人工智能技术，实现生产线的智能化调度和优化，根据实时数据调整生产计划，确保生产流程的顺畅和高效。^[10] 通过数字孪生技术，将实际设备的运行状态与数字化模型进行实时同步，实现对设备和管线建造进展的全面监测和管理。利用大数据技术对建造过程中的质量数据进行全面分析，识别潜在的质量问题，并采取相应的纠正措施。随着大数据技术的不断发展，未来海洋工程装备项目的建造阶段将更加依赖于数据驱动的决策支持。通过全面收集和分析项目数据，为决策者提供准确、及时的决策依据，提高决策的科学性和有效性。

参考文献

[1] 沈彬, 张高尉, 刘加伟, 等. Smart Material 软件在海工平台建造中的应用研究 [J]. 港工技术, 2019, 56(1): 55-59.
[2] 吴涛, 曹纪慧, 沈彬, 等. 基于 PCMS 系统的企鹅 FPSO 浮体专业项目管理应用与研究 [J]. 石油和化工设备, 2019, 22(7): 68-70.
[3] 管延敏; 周洋. 基于 VB.net 的船舶建造管理信息系统设计 [J]. 船舶工程, 2012, 12(12).
[4] 刘祥博, 伍朝晖, 朱明华, 等. 船舶数字化集成制造平台开发与应用 [Z]. 江南造船 (集团) 有限责任公司. 2014.
[5] 蔡虎振. 风险管控在海洋工程装备建造项目中的应用研究 [J]. 管理观察, 2011(36): 219-222.
[6] 王志勇. 挣值管理法在舰船与海洋工程装备建造项目管理中的应用 [C]// 中国造船工程学会造船工艺学术委员会 2011 造船企业精益生产学术研讨会论文集. 2011: 254-259.
[7] 吕慧超. 海洋工程装备项目材料追溯管理技术研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2013.
[8] 李钊. 海洋工程装备项目进度监控模式及预警 DSS 总体设计 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2011.
[9] 朱传超, 李志全. 海洋工程船舶建造项目的甲方管理 [J]. 项目管理技术, 2016, 14(12): 84-87.
[10] 石海, 牛建华, 薄浩, 等. 关于海洋工程装备项目中的碳排放研究 [J]. 石油化工建设, 2022, 44(11): 80-82.

用于飞行品质分析的操纵差错分析技术及应用

张雨乐, 庄夏, 王泽潭, 孙晓雨
中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307

摘要 : 作为飞行安全的决定因素, 飞行员核心胜任能力是民航安全的重要保障, 如何在初始训练阶段尽快实现从基于任务 / 科目的训练向基于胜任力的训练转变是当前全行业面临的课题。本文研究了用于飞行品质分析的飞行操纵差错分析技术, 构建了飞行航线差错评估体系, 开发了飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台, 能实现航线飞行操纵差错的智能化识别和预警, 并把飞行员航线操纵出现的差错类型、持续时间、是否修正等因素进行统计, 形成科学的统计数据, 给训练机构作为训练方案制定的依据。

关键词 : 飞行品质分析; 操纵差错; 模型; 智能化

Analysis Technique and Application of Maneuvering Errors for Flight Quality Evaluation

Zhang Yule, Zhuang Xia, Wang Zetan, Sun Xiaoyu
Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan 618307

Abstract: As a determining factor of flight safety, the core competency of pilots is an important guarantee for civil aviation safety. How to quickly transition from task/subject-based training to competency-based training in the initial training stage is a current issue facing the entire industry. This paper investigates flight maneuvering error analysis techniques for flight quality evaluation, constructs an evaluation system for flight route errors, and develops an intelligent management platform for pilot flight maneuvering errors. This platform enables intelligent identification and early warning of flight maneuvering errors, and collects statistical data on the types of errors, duration, and whether corrections were made during pilot flight maneuvers. These scientific statistics provide a basis for training institutions to develop training programs.

Keywords: flight quality analysis; maneuvering errors; model; intelligence

引言

通用航空领域的飞行事故多数是人为因素造成的, 面对通航从业人员的技术薄弱环节, 民航局对飞行员训练和培训提出了更高要求。民航飞行员的培养模式要与时俱进, 需要实现三个转变, 即培训理念上, 从执照飞行员到职业飞行员培养的转变; 训练方式上, 从基于科目和时间的积累到基于核心胜任能力训练与评估的转变; 管理模式上, 从飞行员培训分阶段管理到全生命周期管理的转变。因此, 如何提高飞行员训练效率与质量 and 如何对飞行员操纵飞机时出现的差错进行监控、量化和评估, 是飞行品质监控研究的关键问题, 也是飞行员核心胜任能力训练与评估智能化、科学化的关键技术^[1]。

飞行训练成绩是判别飞行员训练水平最直观有效的方法。传统的飞行训练评分方法通常由飞行教员或专家根据对飞行员操纵行为的观察, 结合其飞行经验以及飞行参数与训练轨迹大纲要求的对比, 进行人工评分。然而, 这种评分方式容易受到评分人员的主观判断和能力差异的影响, 并且需要大量人力, 评分过程既耗时又低效, 且具有一定的随机性和主观性。因此, 运用大数据和新兴计算机技术, 建立飞行训练的差错分析和评估模型, 实现应用软件平台, 对飞行训练中的人工差错进行自动评分, 实现飞行训练数据和成绩的信息化管理, 这能提升飞行学员的飞行技能和安全意识, 从而减少飞行事故中由人为因素引起的风险^[2]。

一、TEM 模型

威胁与差错管理 (Threat and Error Management, TEM) 模型是一种以主动预防和动态干预为核心的安全管理工具, 旨在通过系统化流程帮助操作者识别、评估和应对威胁与差错, 从而

将风险控制在可接受范围内。在飞行训练品质监控中, TEM 模型不仅为提升训练效果提供理论支撑, 更成为优化飞行员决策能力、强化安全文化的重要工具。飞行训练的核心目标是通过模拟真实飞行环境, 培养学员的风险感知能力、技术操作水平和应急处置技能。训练过程中学员可能面临多重挑战, 传统训练模式往

基金项目: 四川省科技计划项目 (2023YFG0171)。

作者简介: 张雨乐 (1999.03-), 女, 在校研究生, 研究领域计算机网络。

往侧重技术动作的重复练习，而 TEM 模型则从“人－机－环境”交互的视角切入，强调在动态情境中培养学员的主动风险管理能力。这种理念与飞行训练品质监控的目标高度契合——后者需要通过数据收集、行为分析和反馈改进，持续提升训练的科学与安全性^[3]。

(一) 威胁识别与训练场景设计

飞行训练品质监控的首要任务是确保训练场景能够真实反映实际飞行中的威胁。基于 TEM 模型，威胁可分为两类：显性威胁：如模拟湍流、引擎失效、起降跑道冲突等，需通过高保真模拟器或特情课目设计复现；隐性威胁：如学员的认知负荷超限、团队沟通障碍或决策犹豫，需借助生理监测设备（如眼动仪、心率传感器）和语音记录分析捕捉。

在品质监控中，教员需结合学员的能力阶段，动态调整威胁的复杂程度。例如，初级学员以单一威胁应对为主（如侧风着陆训练），而高级学员则需在多重威胁叠加的场景中（如低能见度下应对通讯中断）锻炼优先级判断能力。训练系统通过记录学员的决策路径、操作响应时间及错误率，量化其威胁管理水平，并为个性化训练方案提供依据。

(二) 差错分析与行为矫正

飞行训练中的差错是学员能力成长的必经环节，但未经管理的差错可能固化为危险习惯。TEM 模型强调“差错可管理”而非“零差错”，这一理念在飞行品质监控中体现为以下步骤：

差错分类：根据国际航空标准，将差错分为技能型（如操纵动作粗糙）、程序型（如检查单执行遗漏）和决策型（如绕飞路径选择不当）。

根源追溯：通过回放飞行参数（如舵面偏转幅度、航向保持精度）和舱内语音记录，分析差错是源自知识缺口、情境意识不足还是心理压力。

干预策略：针对高频差错设计专项训练模块。例如，若学员在紧急下降程序中频繁忽略高度检查，可通过虚拟现实（VR）场景强化视觉－听觉提示训练；若团队协作差错突出，则引入机组资源管理（CRM）模拟课目。

二、航线飞行操纵差错的智能化识别和预警机制

通过大数据处理平台，把监视数据、气象数据、航图数据、飞机性能数据和飞行计划数据等进行数据挖掘和数据融合处理，建立航线智能匹配算法，根据航线飞行操纵差错标准体系，建立地面实时评估预警平台。为飞行员对飞机在航线上的飞行操纵实时监测，时刻提醒飞行员飞机在航线上的姿态，为飞行学员的技术提高提供一种教学方法。为了实时智能化识别操纵差错并给出预警，需要涉及多个传感器的数据，包括数据获取、数据预处理、数据融合、算法匹配、预警方法和预警机制。

(一) 多源数据获取及预处理

多源数据获取是航线飞行操纵差错智能管理系统的核心基础，其目标是通过多样化的数据采集渠道与先进的技术手段，实时、完整地获取飞行运行中“人－机－环”多维数据，为后续差

错识别与预警提供可靠的数据支撑。本文针对通航飞机数据采集分散、实时性不足等问题，构建了一套融合机载传感器、地面监视系统与气象情报的多源异构数据采集体系，数据来源多样，各数据源在差错管理中的核心作用如下表所示。

表1 多源数据功能作用表

数据类别	典型参数	功能作用
机载传感器数据	俯仰角偏差、舵面响应延迟	直接量化飞行员操纵精度，识别杆量过大、修正滞后等技术短板
	ADS-B 轨迹数据	航迹偏离距离、地速波动
气象数据	侧风分量、湍流强度	区分环境干扰与人为失误，例如加强侧风下航向偏差的容错阈值动态调整
机型性能数据	失速速度	设定速度包线告警阈值，防止学员在低速机动中触发失速
语音与视频数据	检查单执行时间、标准喊话遗漏	评估 CRM（机组资源管理）能力，识别程序执行疏漏与非技术性差错

针对设备数据接口的多样性、数据传输协议各不相同，在数据集中处理平台的基础上，构建多源异构数据综合治理体系，包含统一的数据标准体系、数据采集、数据交换、数据开放、数据质量等的建设，实现对各类元数据处理，为多源异构数据的共享提供有效保证。数据预处理是确保数据质量的关键，主要步骤包括：缺失值处理、异常值检测与处理、时间格式统一、地理数据处理、数据规范化和特征工程等。

(二) 多源数据融合技术问题

1. 数据异构性与语义对齐

飞行训练数据涵盖结构化参数（如高度、速度）、半结构化数据（如飞行计划）及非结构化数据（语音指令、视频画面）。这些数据在格式、频率、语义上存在显著差异，如语音数据中的“检查单响应延迟”需与 SD 卡记录的舵面动作时间戳匹配。若未实现有效对齐，可能导致误判。解决方案：开发事件驱动架构（EDA），以 UTC 时间戳为核心构建全局事件总线，所有数据源在预处理阶段注入事件标签（如“起飞阶段开始”“进近指令下达”），通过复杂事件处理引擎实现跨模式关联。

2. 实时性与计算资源瓶颈

飞行数据具有高吞吐（单机 1Hz 产生 200+ 参数）、低延迟（预警响应≤1.5 秒）的特点，传统批处理架构难以满足需求。初期测试中，未优化的 LSTM 模型推理延迟达 120 ms，导致多架次并行处理时系统吞吐量不足，预警延迟飙升至 3 秒以上。解决方案：采用分层计算优化策略，尽量匹配低冗余度方案，目前将实时性要求降低，待后续网云或硬件加速技术成熟后，再提高实时性指标。

3. 极端场景下的鲁棒性保障

飞行训练中偶尔出现 ADS-B 信号丢失、气象站数据中断等极端情况，可能引发系统误判。初期测试显示，在 ADS-B 信号丢失

超过30秒时,系统错误率上升明显。解决方案:设计动态降级策略:一级降级:信号丢失<10秒时,启用卡尔曼滤波预测航迹;二级降级:丢失10~30秒时,切换至SD卡数据+惯性导航补偿;三级降级:丢失>30秒时,触发“数据不可靠”告警,建议教员接管。

(三) 预警机制与方法

基于TEM模型,本文构建了“威胁预判→差错抑制→状态恢复”的三级闭环管理预计机制。其核心逻辑为:(1)威胁预判:通过历史案例库与实时环境数据预测潜在风险,例如在强侧风区域提前收紧航向偏差阈值;(2)差错抑制:利用规则引擎匹配飞行参数异常,触发标准化修正指令(如“增加右舵量10%”);(3)状态恢复:对持续未修正的UAS实施强制介入(如教员接管或终端告警),确保安全裕度恢复。

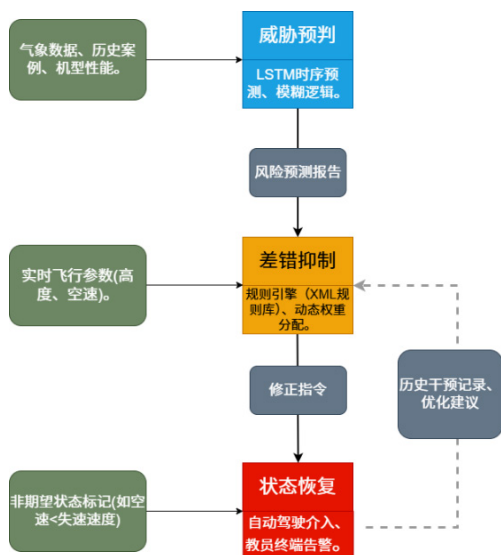


图1 三级闭环管理预计机制

本文采用基于规则的预警机制。根据《航线运输驾驶员整体课程训练大纲》中对学员航线飞行偏差控制的标准要求,结合威胁差错管理理念,将学员在航线飞行中出现的偏差按程度分为威胁、差错、非预期状态三类,利用大数据平台记录学员在航线飞行中出现的差错种类和频次,对学员飞行质量进行科学分析,并结合数据提出训练建议。

1. 私照转场阶段

威胁:高度偏差 $\pm 50\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 10^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.5\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 10\text{kt}$ 。

差错:高度偏差 $\pm 100\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 15^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 1\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 15\text{kt}$ 。

非预期状态:高度偏差 $\pm 200\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 20^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 2\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 00\text{kt}$ 。

2. 仪表转场阶段

威胁:高度偏差 $\pm 50\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 5^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.3\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 5\text{kt}$ 。

差错:高度偏差 $\pm 100\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 10^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.5\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 10\text{kt}$ 。

非预期状态:高度偏差 $\pm 150\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 20^\circ$ 、航迹偏

差 $\pm 1\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 20\text{kt}$ 。

3. 商照训练阶段

威胁:高度偏差 $\pm 50\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 5^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.3\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 5\text{kt}$ 。修正时间15s。

差错:高度偏差 $\pm 100\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 10^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.5\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 10\text{kt}$ 。修正时间15s。

非预期状态:高度偏差 $\pm 150\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 20^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 1\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 20\text{kt}$ 。修正时间30s。

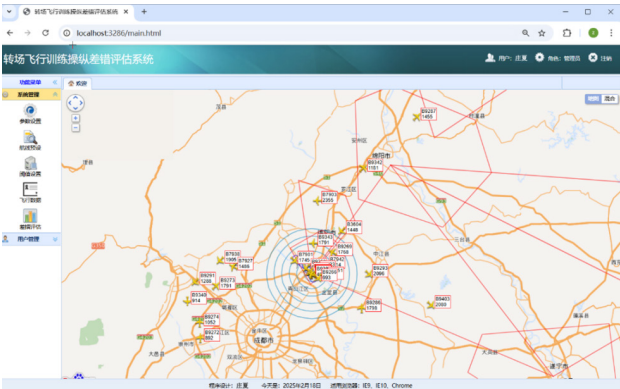
三、飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台

基于本文理论,开发实现的飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台涉及飞行管理、航空器监控、轨迹还原、飞行任务及航空器航线规划等方面,利用后台基础数据如航图、地形、人员、飞行课程及飞机信息等数据,绑定飞行器和飞行学员、飞行教官等不同角色,参照飞行大纲要求,以多源数据为驱动,评价航线飞行操纵品质、还原飞行行为、改进飞行操纵等为飞行训练评价提供支撑。基于现有的ADS-B系统,融合SD卡中的飞行参数、气象数据、航图数据、飞机性能数据和飞行计划数据,实现飞行参数的获取和实时传输,最终构建飞行员航线飞行操纵差错评估模型,实现对飞行员在航线上操纵飞机时出现差错的智能评估和管理^[4-5]。



图2 飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台系统构架

飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台设计目标是提高飞行安全性,通过实时监测和分析飞行员的操纵行为,及时发现潜在的操纵差错,减少事故风险;为飞行员提供针对性的培训建议,帮助其提升操作技能和应对能力;为飞行训练和飞行管理部门提供决策支持,优化飞行操作流程和管理策略;通过智能分析和优化建议,帮助飞行员更高效地完成飞行任务。系统平台上线后,在绵阳分院进行了试用,经过近半年的系统使用和测试,不断优化完善系统功能,实测该平台性能参数优异,其监控目标数: ≥ 500 个/秒;信息显示响应时间: ≤ 1 秒;系统并发数: ≥ 50 个;虚假率: $\leq 5\%$;平均无故障时间: $\geq 7 \times 24$ 小时。基于该平台的飞行操纵差错标准体系在飞行教员及学员中的满意度超过90%^[6-7]。



> 图3 管理平台数据源处理显示

四、结论

本文阐述了威胁与差错管理模型在飞行品质监控中的应用场景，研究了用于飞行品质分析的飞行操纵差错分析技术，构建了飞行航线差错评估体系，开发了飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台，对飞行训练中的人工差错进行自动评分，实现飞行训练数据和成绩的信息化管理，这能提升飞行学员的飞行技能和安全意识，从而减少飞行事故中由人为因素引起的风险。

参考文献

- [1] 周长春, 蒋澜, 赵新宇. 通用航空飞行品质监控运行管理 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2019, 30(01): 39-42.
- [2] Munir N, Awrangjeb M, Stantic B. Power Line Extraction and Reconstruction Methods from Laser Scanning Data: A Literature Review[J]. Remote Sensing, 2023, 15(4): 973.
- [3] Sun H, Zhou X, Zhang P, et al. Competency-based assessment of pilots' manual flight performance during instrument flight training[J]. Cognition, Technology & Work, 2023, 25(4): 345-356.
- [4] 尹大伟. 基于飞参数据的飞行学员飞行训练质量辅助评估研究 [J]. 航空标准化与质量, 2023, (S1): 116-120.
- [5] 汪磊, 邹颖, 王朔. QAR 数据驱动的飞行员不安全操作行为量化评价 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(05): 49-56.
- [6] 徐建航. 私照训练阶段飞行学员胜任力评级标准研究 [D]. 中国民用航空飞行学院, 2024.
- [7] 刘浩, 王昊, 孟光磊, 等. 基于动态贝叶斯网络和模糊灰度理论的飞行训练评估 [J]. 航空学报, 2021, 42(08): 250-261.

