



Volume 9
Issue 23

December 2025

ISSN 2591-7153(Print) 2591-7161(Online)

工程技术与管理

ENGINEERING TECHNOLOGY & MANAGEMENT

工程技术与管理 ENGINEERING TECHNOLOGY & MANAGEMENT

Volume 9 • Issue 23 • December 2025 • ISSN 2591-7153(Print) 2591-7161(Online)

SYNERGY
PUBLISHING PTE. LTD.

Tel: +65 65881289
E-mail: contact@s-p.sg
Website: ojs.s-p.sg



中文刊名: 工程技术与管理
ISSN: 2591-7153 (纸质) 2591-7161 (网络)
出版语言: 华文
期刊网址: <https://ojs.s-p.sg/index.php/gcjsygl>
出版社名称: 新加坡协同出版社

Serial Title: Engineering Technology & Management
ISSN: 2591-7153 (Print) 2591-7161 (Online)
Language: Chinese
URL: <https://ojs.s-p.sg/index.php/gcjsygl>
Publisher: Synergy Publishing Pte. Ltd.

《工程技术与管理》征稿函

Database Inclusion



Google Scholar



Superstar Journals Database



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明 / Copyright

协同出版社出版的电子版和纸质版等文章和其他辅助材料, 除另作说明外, 作者有权依据 Creative Commons 国际署名-非商业使用 4.0 版权对于引用、评价及其他方面的要求, 对文章进行公开使用、改编和处理。读者在分享及采用本刊文章时, 必须注明原文作者及出处, 并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归协同出版社所有。

All articles and any accompanying materials published by Synergy Publishing on any media (e.g. online, print etc.), unless otherwise indicated, are licensed by the respective author(s) for public use, adaptation and distribution but subjected to appropriate citation, crediting of the original source and other requirements in accordance with the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) license. In terms of sharing and using the article(s) of this journal, user(s) must mark the author(s) information and attribution, as well as modification of the article(s). Synergy Publishing Pte. Ltd. reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Synergy Publishing Pte. Ltd.

电子邮箱 /E-mail: contact@s-p.sg

官方网址 /Official Website: www.s-p.sg

地址 /Address: 12 Eu Tong Sen Street, #07-169, Singapore 059819



期刊概况:

中文刊名: 工程技术与管理

ISSN: 2591-7153 (Print) 2591-7161 (Online)

出版语言: 华文

期刊网址: <https://ojs.s-p.sg/index.php/gcjsygl>

出版社名称: 新加坡协同出版社

出版格式要求:

- 稿件格式: Microsoft Word
- 稿件长度: 字符数 (计空格) 4500以上; 图表核算200字符
- 测量单位: 国际单位
- 论文出版格式: Adobe PDF
- 参考文献: 温哥华体例

出刊及存档:

- 电子版出刊 (公司期刊网页上)
- 纸质版出刊
- 出版社进行期刊存档
- 新加坡图书馆存档
- 中国知网 (CNKI)、谷歌学术 (Google Scholar)、超星等数据库收录
- 文章能够在数据库进行网上检索

作者权益:

- 期刊为 OA 期刊, 但作者拥有文章的版权;
- 所发表文章能够被分享、再次使用并免费归档;
- 以开放获取为指导方针, 期刊将成为极具影响力的国际期刊;
- 为作者提供即时审稿服务, 即在确保文字质量最优的前提下, 在最短时间内完成审稿流程。

评审过程:

编辑部和主编根据期刊的收录范围, 组织编委团队中同领域的专家评审员对文章进行评审, 并选取专业的高质量稿件进行编辑、校对、排版、刊登, 提供高效、快捷、专业的出版平台。

工程技术与管理

ENGINEERING TECHNOLOGY & MANAGEMENT

国际标准刊号/ International Standard Serial Number

ISSN : 2591-7153 (纸质版) / 2591-7161 (网络版)

2025 年 12 月 第 9 卷第 23 期

编委会 / Editorial Team

主 编 / Editor-in-chief

刘国富 Guofu Liu

齐鲁工业大学 (山东省科学院) Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences)

编 委 / Editorial Board

章瑾

Jin Zhang

同济大学浙江学院

Tongji Zhejiang College

曹江涛

Jiangtao Cao

中国电科网络通信研究院

China Electronics Technology Group Corporation

赵雨

Yu Zhao

中能智新科技产业发展有限公司

Zhongneng Zhixin Technology Industry Development Co., Ltd.

成柏璇

Boxuan Cheng

北京光谷创新置业有限公司

Beijing Optics Valley Innovation Real Estate Co., Ltd.

张龙

Long Zhang

沂源龙裕工贸有限公司

Yiyuan Longyu Industry and Trade Co., Ltd.

1	四驱越野叉车真空轮胎漏气原因及改进对策 / 刘浩				/ 汤富强
4	建筑类企业 EPC 总承包项目招投标风险识别与管控研究 / 张靖		38	基于无损检测技术的路桥结构病害识别与评估研究 / 王茂	
7	华中地区交直流输配线路对天然气管网阴极保护腐蚀风险评估 / 刘勇 胡龙飞 廖强		42	高速公路机电系统数字化管理探索与应用 / 舒国平 张丙照	
11	新型建筑材料应用对工程造价的影响及管控策略 / 张磊		45	水库除险加固工程中大坝帷幕灌浆施工探究 / 邓丽红	
14	城市轨道交通盖下车辆段咽喉区火灾烟气模拟与危险性分析 / 江文倩		48	建筑工程估算与概算衔接要点及协同管控机制研究 / 刘凯月	
17	数字化计量下高速 EPC 造价动态调整机制研究 / 沈春梅		51	水利水电工程施工项目风险管理探析 / 李超 李加干 李太洪	
20	沥青路面抗滑性能试验检测方法对比和优化 / 孙艳		54	高强度预应力混凝土在输水隧洞内的应用 / 郝艳	
23	航空器维修作业的安全管理与风险控制 / 朱丹鹏		57	三维激光扫描在轨道交通施工测量中的精度控制与实践 / 王晓明 杨玉龙	
26	双测站法联系三角形测量技术的运用与研究 / 高健民		60	实景三维创新导向工程技术方法优化与测绘成果质控 / 欧为林	
29	公路工程安全环保分级监管指标体系构建 / 陈敏		63	构建以“价值信任”为核心的工业设备销售体系研究 / 卢志强	
32	发动机电控系统标定与 OBD 故障诊断一体化方法研究 / 魏娜 申展 潘海朝		66	全过程工程咨询模式下质量管理协同管控新路径 / 郭联欢 马腾	
35	低温环境下新能源汽车电池热管理与节能协同控制		69	深度调峰目标下火电厂自动化控制优化策略的研究与应用 / 王刚	
			72	风电工程项目混塔吊装施工方法与质量控制对策研究 / 易生	

- 1 Causes and improvement measures of vacuum tire leakage in four-wheel drive off-road forklift
/ Hao Liu
- 4 Research on Risk Identification and Control in EPC General Contracting Projects for Construction Enterprises
/ Jing Zhang
- 7 Corrosion Risk Assessment of AC/DC Transmission and Distribution Lines to Natural Gas Pipeline Network in Central China
/ Yong Liu Longfei Hu Qiang Liao
- 11 The Impact of the Application of New Building Materials on Project Cost and Control Strategies
/ Lei Zhang
- 14 Simulation and hazard analysis of smoke and fire in the throat area of the metro car depot under the cover of urban rail transit
/ Wenqian Jiang
- 17 Research on Dynamic Adjustment Mechanism of High-speed EPC Cost under Digital Measurement
/ Chunmei Shen
- 20 Comparison and Optimization of Anti-skid Test Methods for High-speed Asphalt Pavement
/ Yan Sun
- 23 Safety Management and Risk Control of Aircraft Maintenance Operations
/ Danpeng Zhu
- 26 Application and Research of the Double-Station Method Linked Triangle Measurement Technology
/ Jianmin Gao
- 29 Construction of the Index System of the Graded Supervision of Highway Engineering Safety and Environmental Protection
/ Min Chen
- 32 Research on the Integrated Method of Engine Electronic Control System Calibration and OBD Fault Diagnosis
/ Na Wei Zhan Shen Haichao Pan
- 35 Thermal Management and Energy Saving Co-control of New Energy Vehicle Battery in Low Temperature Environment
/ Fuqiang Tang
- 38 Research on Identification and Evaluation of Road and Bridge Structures Based on Nondestructive Testing Technology
/ Mao Wang
- 42 Exploration and Application of Digital Management of Expressway Mechanical and Electrical Systems
/ Guoping Shu Bingzhao Zhang
- 45 Research on Dam Curtain Grouting Construction in Reservoir Reinforcement Project
/ Lihong Deng
- 48 Research on Key Points of Connection between Estimation and Budget Estimate of Construction Projects and Collaborative Control Mechanism
/ Kaiyue Liu
- 51 Analysis of Risk Management in Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction Projects
/ Chao Li Jiagan Li Taihong Li
- 54 Application of High Strength Prestressed Concrete in Water Conveying Tunnel
/ Yan Hao
- 57 Precision Control and Practice of 3D Laser Scanning in Construction Surveying of Rail Transit
/ Xiaoming Wang Yulong Yang
- 60 Optimization of Engineering Technology Methods and Quality Control of Surveying and Mapping Results Oriented by Innovation in Real-Scene 3D Construction
/ Weilin Ou
- 63 Research on Building an Industrial Equipment Sales System Centered on "Value Trust"
/ Zhiqiang Lu
- 66 New Path for Collaborative Quality Management and Control under the Whole Process Engineering Consulting Model
/ Lianhuan Guo Teng Ma
- 69 Research and Application of Optimization Strategy of Automation Control for Thermal Power Plant under Deep Peak Shaving Target
/ Gang Wang
- 72 Research on Construction Method and Quality Control Countermeasure of Mixed Tower Lifting in Wind Power Project
/ Sheng Yi

Causes and improvement measures of vacuum tire leakage in four-wheel drive off-road forklift

Hao Liu

Baoji Combined Forklift Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721001, China

Abstract

A four-wheel-drive off-road forklift model innovatively adopted vacuum tire structures on both front and rear axles to enhance driving stability and off-road performance on unpaved roads. However, users frequently encountered varying degrees of rear tire leakage during actual operation, severely compromising product reliability and user experience. To address this issue, a systematic analysis was conducted from multiple dimensions including structural design, manufacturing processes, material quality, and operational conditions. The primary causes of leakage were identified, leading to a series of targeted improvement measures. Through practical production tracking and multi-round verification, the modified tires demonstrated significantly improved airtightness, effectively controlling leakage issues while ensuring the product's quality and long-term operational stability. This paper details the fault analysis process, structural and process optimization methods, and summarizes the improvement outcomes, aiming to provide reference for vacuum tire system design and quality control in similar engineering vehicles.

Keywords

4WD off-road forklift; vacuum tires; leak detection; structural optimization; process improvement; airtightness testing

四驱越野叉车真空轮胎漏气原因及改进对策

刘浩

宝鸡合力叉车有限公司, 中国·陕西 宝鸡 721001

摘 要

某型四驱越野叉车在其前后桥创新性地采用了真空轮胎结构,旨在提升整车在非铺装路面条件下的行驶稳定性和通过性。然而,在用户实际使用过程中,频繁出现后轮不同程度漏气的现象,严重影响了产品的可靠性与用户体验。针对该问题,从结构设计、制造工艺、材料质量以及实际工况等多个维度展开系统性分析与排查,明确了导致漏气的主要原因,并据此提出了一系列针对性的改进措施。经实际生产跟踪与多轮验证,改进后的轮胎气密性显著提升,漏气问题得到有效控制,保障了四驱越野叉车的产品质量与长期运行稳定性。本文详细阐述了故障分析过程、结构及工艺优化方法,并对改进效果进行了总结,以期为同类工程车辆真空轮胎系统的设计与质量控制提供参考。

关键词

四驱越野叉车; 真空轮胎; 漏气分析; 结构优化; 工艺改进; 气密性测试

1 引言

四驱越野叉车适配复杂非铺装路面,具备两种驱动模式,后轮四驱时兼具传扭与转向功能,承受较大交变载荷。真空胎因多优势被应用于该车型,但后轮存在慢性漏气问题,影响使用、经济性及安全。本文针对此问题,结合理论与实验开展故障分析、排查及对策研究,提出改进方案并评估效果,既解决产品质量问题,也为真空胎在重型越野车辆的应用积累经验。

2 故障现象

该型四驱越野叉车在出厂前检测及用户使用阶段均发

现后轮真空胎压持续下降的现象。初步检测结果显示,部分轮胎总成在轮辋-轮胎界面存在局部漏气。尽管装车前进行过气密性检验并结果合格,但部分车辆在完成强化跑合试验后仍出现气压显著下降,初始气压 550 kPa 可在数日内降至 380–480 kPa,明显低于使用要求,严重影响车辆的正常作业。

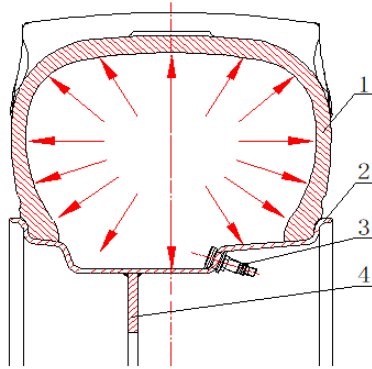
为全面掌握故障情况,我们对连续三个批次的车辆进行了气压跟踪记录,并结合不同路况进行试验,发现漏气现象在颠簸路面和高速转向工况下尤为明显。此外,漏气轮胎多集中于后轮,且左右轮漏气程度存在差异,说明该问题既与零部件质量相关,也与整车工况和受力状态有关。

3 原因分析

真空轮胎在汽车领域已广泛应用,其密封原理主要依靠充气后轮胎胎唇与轮辋密封面之间的过盈配合。该结构省

【作者简介】刘浩(1987–),男,中国陕西咸阳人,本科,工程师,从事机械设计制造及其自动化研究。

去了内胎、衬带和弹性缩圈，依靠轮胎自身的弹性与轮辋紧密贴合实现密封，具有结构简单、重量轻、生热低等优点。然而，在越野叉车这类恶劣工况下，由于载荷复杂、冲击大、转向频繁，对密封系统的可靠性提出了更高要求（结构原理见图1）。



1—轮胎 2—轮辋 3—气门嘴 4—轮辐

图1 真空轮胎安装结构

基于现有故障样本，我们重点从轮辋制造质量、轮胎唇口结构以及整车工况三个维度进行排查，并结合皂液检测、三坐标测量、粗糙度检测等多种手段进行定量分析。

3.1 轮辋制造缺陷

真空轮胎的密封效果高度依赖于胎唇与轮辋密封面之间的过盈配合。通过对漏气轮胎进行细致的皂液检测，发现泄漏点多集中于轮辋-轮胎接触周圈，呈间断性分布。拆解分析后进一步发现，轮辋密封面存在局部凹陷与凸起，其成因主要在于轮辋卷圆焊接后依赖人工进行打磨修整，导致质量一致性差。该类局部缺陷超出了胎唇材料的弹性补偿能力，从而形成微观泄漏通道。（见图2）



图2 轮辋制造缺陷

3.2 轮辋形位公差超标

轮辋密封面的径向跳动是影响密封性能的关键形位公差。检测数据显示，部分轮辋的径向跳动量达到2.5 mm，远超设计允许范围（通常应控制在1.5 mm以内）。径向跳动过大会导致胎唇与轮辋之间的接触压力分布不均，局部区域密封不严。

此外，轮辋密封面的表面粗糙度也偏大（ $Ra > 12.5 \mu m$ ），不利于胎唇的均匀贴合，容易造成局部应力集中，进一步削

弱气密性。图3和图4分别展示了轮辋径向跳动和表面粗糙度的检测情况

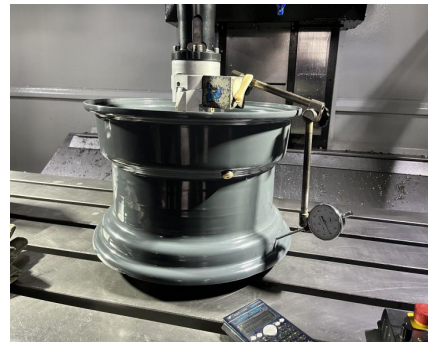


图3 轮辋径向跳动量检测



图4 轮辋表面粗糙度

3.3 工况载荷影响

该型叉车后轮在四驱模式下同时承担驱动和转向功能，在高速转向或恶劣路况下承受较大的侧向力。若胎唇与轮辋间的静摩擦力不足以抵抗该侧向力，则可能发生瞬时的相对位移甚至唇口局部脱开，导致气体泄漏。尤其是在轮胎气压略有不足时，这种风险显著增加。

此外，车辆在非铺装路面上行驶时，轮胎受到的交变冲击载荷较大，易引起轮辋-轮胎界面的微观滑移，长期累积也会破坏密封界面，加剧漏气。

4 改进措施

4.1 提高轮辋设计与制造标准

形位公差优化：将轮辋密封面径向跳动公差由原2.0 mm收紧至1.5 mm，确保胎唇周向均匀贴合；

表面质量提升：密封面粗糙度要求由 $Ra \leq 12.5 \mu m$ 提高至 $Ra \leq 3.2 \mu m$ ，减少微观泄漏通道；

工艺改进：取消传统的人工打磨方式，引入数控机床对焊接后的轮辋密封面进行精加工，保证尺寸一致性及表面质量，彻底消除人工操作带来的不确定性。

4.2 轮胎唇口结构优化

轮胎与轮辋间的密封依赖于轮胎与轮辋在密封唇口处所产生的静摩擦力，计算公式如下：

$$F = \mu \cdot N$$

式中： F 表示轮胎单侧所能承受的摩擦力； μ 表示轮胎与轮辋接触面间的最大静摩擦系数； N 表示轮胎对轮辋接触面间所施加的正压力。

其中轮胎对轮辋接触面间所施加的正压力 N 值计算公式如下：

$$N = P \cdot S$$

式中： N 表示轮胎对轮辋接触面间所施加的正压力； P 表示轮胎内腔的气体压强； S 表示轮胎与轮辋接触面积。

在 P 与 μ 难以显著提升的前提下，通过将胎唇宽度从 18 mm 增至 28 mm，有效增大接触面积 S ，从而提高整体密封可靠性。（见图 5）



图 5 改进前后的轮胎密封唇口尺寸对比

4.3 加强过程检验与气密性测试

为确保每一台出厂车辆的气密性，我们强化了过程检验体系：

引入高精度数显气压表进行充气与检测，避免人为读数误差；

对每条轮胎标注充气日期与气压值，实现全程追溯；

依据 GB/T 40716-2021《工程机械轮胎气密性试验方法》标准，进行 48 小时静置气密性试验；

强化跑合试验后复测气压，实行多重检验保障，确保车辆在实际工况下的密封性能。

5 效果验证

实施上述改进措施后，我们对连续 30 个工作日内生产的近 200 台车辆进行了全面跟踪验证。结果显示：所有车辆后轮在静置 48 小时后气压保持稳定，未出现下降现象；强化跑合试验后复测气压，同样未发现漏气情况。改进措施有效解决了真空胎漏气问题，提高了整车的可靠性与用户满意度。

此外，我们还对改进后的轮辋进行了批次抽检，其径

向跳动与表面粗糙度合格率均达到 100%，表明制造工艺的稳定性和一致性得到显著提升。

6 结语

四驱越野叉车真空轮胎漏气问题是一个涉及设计、工艺、材料及工况等多因素的综合性问题。本文通过系统的故障分析与实验验证，明确了轮辋制造质量、形位公差、工况载荷是导致漏气的主要原因，并据此提出了提高轮辋加工标准、优化胎唇结构、加强气密性检验等一系列措施。实践证明，这些改进显著提升了轮胎的密封性能与整车的质量可靠性。

本研究成果已通过图纸、工艺文件、作业指导书和品质标准等形式固化，并推广应用于后续车型。值得注意的是，尽管当前改进效果显著，但仍需关注轮胎橡胶硬度、密封结构形式等因素对长期密封性能的影响。未来，我们将进一步开展极端工况下的轮胎耐久性研究，持续提升产品适应性 with 可靠性，为行业技术进步贡献更多力量。

参考文献

- [1] 汤超,宋文博,范学付,等. 不同外倾角和侧偏角对轮胎耐久性能的影响[J].轮胎工业,2025(04):252-255
- [2] 李慧敏,刘宝涛,张凯凯,等. 带束层结构对轮胎侧偏特性的影响研究[J].橡胶科技,2025(02):74-77
- [3] 陈鹏书,李子然,汪洋. 不同工况下轮胎疲劳寿命探究[J].橡胶工业,2024(09):643-649
- [4] 方厚勇,张良,汪芳棋,等. 冷却工艺对轮胎外缘尺寸及性能的影响[J].轮胎工业,2024(05):303-307
- [5] 刘文选,石光林,邹业伟,等. 考虑焊接影响的轮辋扩口成形缺陷研究[J].时代汽车,2023(02):23-29
- [6] 王艳君. 钢制轮辋专用缝焊机机构设计[J].设备管理与维修,2018(21):118
- [7] 朱则刚. 重载车辆轻量化的全钢子午线真空无内胎轮胎解密[J].中国轮胎资源综合利用,2016(11):43-48
- [8] 王熙清. 真空轮胎慢泄气的原因及修补方法[J].摩托车,2006(05):40
- [9] 张海山,田军. 真空轮胎气压大小有讲究[J].汽车运用,1999(12):43
- [10] 苏平芝,申玉德,朱维娟,等. 大型无内胎工程机械轮胎设计和制造要点[J].轮胎工业,2007(05):281-283
- [11] 季晨宸. 天津万达轮胎:漏气终结者[J].新能源科技,2017(04):32
- [12] 王伟,许喆,赵树高. 滚动状态下轮胎漏气过程的有限元模拟[J].弹性体,2011(04):40-42

Research on Risk Identification and Control in EPC General Contracting Projects for Construction Enterprises

Jing Zhang

Hydropower and Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing, 100120, China

Abstract

In the current context of sluggish global economic growth, insufficient domestic effective demand, overcapacity in the construction industry, and intensified market competition, international expansion has become an inevitable choice for construction enterprises. The imperative to “go global,” “maintain stability,” and “ensure success” reflects the essential needs of corporate reform and development. Since the beginning of the 21st century, EPC engineering general contracting projects have gradually emerged as the mainstream construction management model and trend in the international engineering contracting market, with the fundamental core objectives of cost control and schedule assurance. This paper focuses on EPC general contracting projects as the primary research subject, concentrating on the bidding and tendering phase. The study aims to explore effective application of cost management and control measures under the EPC model, thereby enhancing the quality and efficiency of engineering project management and supporting the high-quality development of construction enterprises.

Keywords

EPC; General Contracting; Bidding; Risk Identification; Control Measures

建筑类企业 EPC 总承包项目招投标风险识别与管控研究

张靖

水电水利规划设计总院有限公司，中国·北京 100120

摘要

当前，在全球经济增长乏力、国内有效需求不足、建筑行业产能过剩、市场竞争加剧的背景下，建筑类企业开拓国际市场是必然选择，要“走出去”“走得稳”“走得好”更是企业改革发展的需要。进入21世纪以来，EPC工程总承包项目逐渐成为国际工程承包市场的主流建设管理模式和趋势，其根本核心目标是为了控制造价和保证工期。本文以EPC总承包项目为主要研究对象，将研究视角聚焦在招投标阶段，以期探寻EPC总承包模式下造价管理与控制措施的有效应用，进而提高工程建设项目管理质效，助力建筑类企业高质量发展。

关键词

EPC；总承包；招投标；风险识别；管控措施

1 引言

建筑类企业（也称“EPC 总承包商”）要制定严谨细致的方案，在招投标阶段，既要做好对工程建设单位（也称“业主”）的投标工作，还要做好对施工专业分包商的招标工作，梳理研究风险点，实施有效的风险管控，合理制定管控方案，才能确保工程造价可控、在控。本文将研究视角聚焦在 EPC 项目对“上游”工程建设单位投标和对“下游”施工单位的投标阶段风险的识别和管控上，希望对 EPC 总承包模式实践提供一定理论参考。

2 EPC 总承包项目招投标阶段风险管控的作用

近几年，国内建筑行业情况不容乐观。“走出去”既是响应国家“一带一路”倡议的使命，也是破解国内市场竞争、挖掘海外基建市场潜力、实现建筑类企业可持续发展的必由之路，但是发展与挑战是共存的，国外市场风险的不确定性和收益回报可观是共存的，只有采取有效的管控措施才能够促进企业高质量发展，具体表现在以下几个方面，第一，深入的市场调查，面对国内市场相对成熟和公开化的建设、安装、建材供应成本，国外市场的相关人工成本、建材价格等公开化、透明化相对较弱，需要企业充分的开展市场调研，同时前提了解分包商的项目成本，才能准确的计算工程建设的投标成本，赢在“工程造价”的可控、在控。第二，合理的进行设计施工优化。在招投标过程中，要充分做好项目的踏勘工作，尽可能准确地预测项目隐蔽工程的施工难度

【作者简介】张靖（1987-），女，中国陕西丹凤人，本科，高级经济师，从事法律、审计、会计和纪检等研究。

和施工量。同时要组织专家认真研究业主提供的初步设计图纸,利用施工经验和现场踏勘结果,给施工优化留下空间,进一步确保造价的可控、在控。第三,要努力做到风险共担。工程建设项目最大风险就是施工过程中的不确定性,可以选择“小股东参股”“共享部分投资收益”等方式,做到和上游(业主)或者下游企业(分包商)进行风险共担,才能有效化解施工过程中的风险,有效解决变更索赔迟迟不决、分包商“难管”等问题。

3 EPC 总承包模式下项目招投标阶段存在的风险

3.1 市场风险

国外市场为了维护本国市场建材销售市场的稳定,多多少少都会设定一些带有“地方保护主义”的门槛,如果EPC总承包商对工程项目所在地市场政策和建筑材料价格了解不够深入,对当地施工现场的条件了解不够细致,对当地用工需求了解不够深入,就会导致制作标书所采用的预算定额与当地市场价格偏差较大,受当地政策影响产生的不确定性就会增加。建筑类企业从国内进口建材、引入专业队伍所带来的税务筹划、运输、用工等风险激增,这些风险都增加了投标文件中有关工程建设项目造价成本的准确测算。

3.2 设计存在的风险

在建筑工程EPC总承包模式运行过程当中,一般由业主提供初步设计方案,EPC总承包商在初步设计的基础上进行施工图设计。尽管总承包商在施工图设计时会与业主进行及时的交流和互动,也不可避免在施工过程当中,根据施工现场情况而发生的建立合同时还无法确定的风险,或者发生业主想提高某项工程的设计标准、增加额外配套设施、改变现场施工组织方式等问题,从而向总承包商进行修改或重新设计,让整个工程变得不确定,造成原设计方案偏离,导致基于原设计方案而测算的投标报价发生重大偏差。在设计变更的过程中,又因为耽误分包商的施工工期,不可避免的产生因工期延迟而增加分包商变更索赔等问题。

3.3 招投标文件编制风险

编制招投标文件时,对施工内容约定不清晰、不准确,进而对未来的合同执行造成严重影响,并埋下合同变更和索赔等潜在隐患。例如,编制的投标文件没有明确总承包商进场施工时,业主应提供的施工现场条件;没有明确征地主责任和征地费用的支付;没有明确装修的标准和品牌;没有明确施工工期;没有合理的施工款支付条件等问题。这些问题约定不准确、不清晰,不论对业主的投标还是对分包商招标,总承包商都容易处于弱势地位。因为现场条件往往决定了承包商入场后要达到的施工条件的前期成本,质量要求及工期则会与承包商的总体成本控制有极大的关联性,而恰恰这些门槛,会使某些业主指定供货商占据优势地位。没有合理的施工看支付条件,又会增加施工企业的资金成本和筹资难

度,因此,相关企业在编制招标文件时,要将现场情况、质量要求、工期节点等具体条款列出来,并且付款的时间和方式必须合理。

3.4 项目施工过程中的管理风险

分包商之间的合作不协调,缺乏有效沟通,会导致EPC总承包商施工风险增加。实际施工中,有的项目分包涉及几个施工标段施工现场的衔接,有的涉及土建分包施工和安装施工分包的配合等等,由于各分包商对工程施工标准、设计规范的理解与总承包商或业主存在差异工程,导致现场施工和施工方案产生偏差;各分包商之间信息交互不够及时,配合默契不够,增加了沟通成本;各分包商履约能力存在差异,而履约效率直接关系项目整体施工进度与总工期等等,任一分包商或者施工组织出现纰漏,不仅会阻碍后续施工推进,也会影响到工程项目整体的利润。

4 EPC 总承包模式下项目管控措施

4.1 重视前期的市场调研和现场踏勘

深入的市场调研和现场踏勘是有效、合理开展对业主投标报价的测算和对分包商投标报价的审核。现场踏勘主要是指在充分勘察施工现场地质水文条件、气候环境特征的基础上,结合业主提供的相关技术资料与基础文件,进一步分析和确定风险源和安全隐患,进而采取相应的措施及时反馈在报价当中。市场调研要深入考察工程项目所在地的政治环境、社会风俗、历史及文化环境以及经济政策因素,更要分析工程所在地的市场物价、供应能力和运输能力,甚至还要考察用工市场和用工政策。有了市场调研和现场踏勘的成果,就能为编制合理的投标报价以及审核分包商投标报价奠定良好的基础,助力合同的竞争,降低工程承包的造价,减少因政策等掌握不清而造成的风险。

4.2 要制定稳妥的投标报价和招标文件设计策略

在提供给业主的投标报价时就要考虑到将来可能发生变更索赔的问题,一方面在投标报价的时候,对招标文件中没有提到工程量而只有单价的要高报单价,对预计到工程量增加的部分,要考虑单价高报,对设计深度不够或者设计不明显的部分,工程量可能增加的,要考虑单价高报。同时,考虑到因业主原因产生的工期拖延等问题,在投标文件中,列出一个初步的变更索赔原则,明确对工程量或者单价的计算方式。在设计分包方案时,要充分考虑项目施工过程中可能产生的风险,可以考虑通过“小股东比例参股分包商”“部分变更与索赔收益共享”等方式,调动分包商的积极性,与分包商共享施工过程中不可遇见的风险。

4.3 设计阶段的风险管理

在招投标阶段,设计人员在认真研究业主提供的初步设计图后,需要将施工图纸与业主的实际需求结合起来,并基于实际情况逐步完善施工图设计,并借助模型工具,完成整个工程建设项目造价成本的测算,同时依靠现场踏勘的结

果,合理的进行施工优化,掌握工程建设项目“隐形”成本节约节点。此外,要加强同业主的合同谈判,一方面要让业主同意施工优化原则,另一方面采取总额+变动的合同价格条款,对今后施工过程中变更较小的项目要及时测算工程造价成本,如果在可承受的造价范围之内,为了取得良好的信誉和口碑,可以考虑让渡一些利益,采取“总额”包干,对于业主临时增加较大的施工量,要制定合理的合同条款,采取“变动”的合同价格,确保今后的变更与索赔能够落地。

4.4 培养稳定的分包商

在EPC总承包模式下,建立长期、稳定的分包商有利于提高项目的执行效率和竞争力。总承包商可以优先选择具有专业能力和信誉良好的分包商,并通过长期有效的合作,选定稳定的分包商团队,甚至可以投资分包商,以“小股东”参股的形式深入分包商队伍的管理。如果选用的是项目所在地的分包商,还可以借助其长期驻地的优势,及时掌握市场动态、经济环境、政策等情况,科学制定投标策略,提高报价的合理性及竞争力。

4.5 选择合适的总承包项目团队

在招投标阶段,还要提前谋划好总承包项目团队。要选择合适的总承包项目经理,总承包项目经理不仅要有优秀的硬件条件,例如除了学历、职业资格等条件外,要有重大项目建设的土建、安装等方面的经验,要有很强的现场协调能力,能够协助业主对施工现场的管理,准确传递项目推进信息、反馈关键问题,有效地避免彼此之间的矛盾冲突,全面提升项目设计管理与施工执行的质量效率。总承包项目经理还要能够协调各个分包商管理。同时,团队里还要配备相应的设计、工程管理、安全、财务、造价等专业的人员,能够及时应对工程建设项目现场突发的问题和日常管理,有效处理设计与施工、施工与造价、施工与安排等方面的协作,共同助力项目建设。在人员的选择上,还要考虑人数的控制,除了满足业主的最低要求外,要注意人员投入的时间、批次,最大化的节约造价成本。

4.6 合同审查

在EPC总承包项目的招标阶段,合同审查是项目成功的关键前置环节和核心风险管理措施。此阶段的管理核心在于构建一个系统化、多层次的审查机制。首先,应成立由法

律、商务、技术、造价等专业人员组成的跨部门合同审查小组,确保审查视角的全面性。审查重点应聚焦于几个核心层面:一是合同条款的严谨性与公平性,特别是工作范围、设计标准、性能保证指标、变更与调整机制、风险分担原则以及违约责任等关键条款,必须清晰、无歧义,并与招标文件、投标人澄清承诺形成闭环;二是价格与支付结构的合理性,审查付款节点是否与工程里程碑和成果交付紧密挂钩,以确保现金流健康并有效约束承包商履约;三是针对EPC模式特点,严格审查合同对“设计、采购、施工”三者界面的责任划分,避免范围模糊或责任空白。此外,必须将招标文件、技术规格书、投标方案等所有文件纳入合同包进行一致性审查,确保其构成合同的完整性与统一性。通过这种前瞻性、结构化的合同审查管理,旨在从源头上识别和规避重大合同风险,为后续项目的顺利执行奠定坚实的法律与商务基础。

5 结语

综上所述,EPC总承包项目招投标阶段的风险管控是决定工程建设项目成败的关键,其风险管控水平直接影响项目的最终效益。文章系统识别了市场、设计、文件编制及项目管理四类主要风险,并据此构建了应对措施:通过深入的市场调研与现场踏勘夯实决策基础;制定预留风险缓冲的投标报价与文件策略;强化设计阶段的风险前置控制;培养稳定的分包商资源以保障执行效率;并构建系统化的合同审查机制,从源头上明确权责、锁定风险。

总之,面对国际工程的复杂性,企业必须将招投标阶段视为动态的风险管理窗口,通过建立前瞻性、系统化的管控体系,将风险防范关口前移,方能在全球市场中提升竞争力,实现可持续发展。未来的研究可进一步着眼于风险量化评估模型及智能化管控工具的探索,以推动风险管理迈向更精准、动态的新阶段。

参考文献

- [1] 杜雨,王海明,魏昌智.总承包商视角下EPC总承包工程项目的合同风险管理[J].建筑技术开发,2022,49(21):65-68.
- [2] 朱彦斌,蒋宁.基于EPC总承包模式的工程项目风险识别及应对策略探讨[J].冶金丛刊,2022(005):007.
- [3] 司训练,李颖.国际工程EPC总承包项目风险管理研究综述[J].项目管理技术,2022,20(1):8.

Corrosion Risk Assessment of AC/DC Transmission and Distribution Lines to Natural Gas Pipeline Network in Central China

Yong Liu Longfei Hu Qiang Liao

Huazhong Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 433100, China

Abstract

As a pivotal energy hub in China, the Central China region faces significant challenges from electromagnetic interference (EMI) generated by power transmission and distribution lines. Such interference can compromise the effectiveness of cathodic protection systems in natural gas pipelines, increasing corrosion risks and jeopardizing pipeline safety. This study systematically analyzes the interference mechanisms of AC/DC transmission lines on cathodic protection in natural gas pipelines, based on electromagnetic induction and electrochemical corrosion principles. It clarifies the operational pathways of AC and DC interference. By examining three critical dimensions—transmission line parameters, pipeline installation conditions, and environmental factors—the research identifies key corrosion risk factors. A risk assessment framework is developed, incorporating interference intensity, cathodic protection failure severity, and pipeline vulnerability. The risk evaluation model combines Analytic Hierarchy Process (AHP) with fuzzy comprehensive evaluation. Tailored risk mitigation strategies are proposed for high, medium, and low risk levels, providing technical support for the safe operation and corrosion protection of natural gas pipelines in Central China, thereby ensuring stable energy transmission system performance.

Keywords

AC/DC transmission and distribution lines; natural gas pipeline networks; cathodic protection; corrosion risks; risk assessment

华中地区交直流输配线路对天然气管网阴极保护腐蚀风险评估

刘勇 胡龙飞 廖强

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

华中地区作为我国能源枢纽, 输配线路产生的电磁干扰易破坏天然气管网阴极保护系统的有效性, 引发管道腐蚀风险, 威胁管网运行安全。本文基于电磁感应与电化学腐蚀原理, 系统分析交直流输配线路对天然气管网阴极保护的干扰机制, 明确交流干扰与直流干扰的作用路径。从输配线路参数、管网铺设条件、环境因素三个维度, 识别影响腐蚀风险的关键因子, 构建包含干扰强度、阴极保护失效程度、管网脆弱性的风险评估指标体系, 采用层次分析与模糊综合评价相结合的方法建立风险评估模型。针对高、中、低不同风险等级, 提出针对性的风险防控措施, 为华中地区天然气管网的安全运维与腐蚀防护提供技术支撑, 保障能源输送系统的稳定运行。

关键词

交直流输配线路; 天然气管网; 阴极保护; 腐蚀风险; 风险评估

1 引言

华中地区囊括湖北、湖南、河南、江西四省, 是我国中部能源产出、传输与消耗的关键区域。随着电力工业和天然气产业的迅猛发展, 交直流输配线路与天然气管网的建设规模不断拓展。受土地资源制约与规划布局影响, 两类管网在同一区域交叉、并排敷设的状况日趋普遍, 形成复杂的能

源管网交错局面。天然气输配管网普遍采用钢质管道, 阴极保护系统是抑制管道腐蚀、延长使用寿命的关键技术, 通过施加外部电流或牺牲阳极, 使管道表面生成稳定钝化膜, 阻止电化学腐蚀反应。交直流输配线路在运行期间会产生强电场与强磁场, 通过电磁感应、传导等途径对临近天然气管网造成电磁干扰, 导致管道阴极保护电位偏移, 打破原有腐蚀防护平衡。目前有关输配线路对管道阴极保护的干扰研究大多集中在单一干扰类型或特定区域, 针对华中地区能源管网交织特点的系统性风险评估研究较为欠缺。因此, 开展华中

【作者简介】刘勇 (1988–), 男, 中国湖北荆州人, 本科, 助理工程师, 从事管道保护研究。

地区交直流输配线路对天然气管网阴极保护的腐蚀风险评估,分析干扰机制与关键风险要素,构建科学的评估方法,提出有效的防控手段,对于保障区域能源安全、降低运维成本具有重要的现实意义与工程价值。

2 工程概况

本次评估所涉范围包含华中地区湖北省、湖南省、河南省、江西省核心区域的天然气管网,其涉及的主干管网总长度达1280km,支线管网总长度有860km,管道口径范围为300~1200mm,管壁的厚度介于8~22mm,主要采用的是L360、X80等钢质管材,设计压力为4.0~10.0MPa。

管网沿线总计和32条交流输配线路、16条直流输配线路呈现交叉或者并行敷设状况,全程长度420km,其中与交流输配线路并行距离在50~300m的段落长度为280km,跟直流输配线路并行间距为80~500m的段落长140km;总计有108处交叉点位,其中和高压交流输配线路产生交叉的有65处,和高压直流输配线路有43处交叉,交叉角度跨度为30°~90°;沿线土壤主要类型为粉质黏土、砂壤土,其土壤电阻率处于30~500Ω·m范围,有部分区域的pH值是4.0~6.5,当地气候系亚热带季风气候,年均降水量处于1200~1800mm范围,空气呈现较大湿度,土壤整体的腐蚀程度呈中等偏强态势。

管网当下的阴极保护系统包含着18座强制电流阴极保护站、320组牺牲阳极,经前期监测可知,76处监测点的阴极保护电位偏离了-0.85~-1.2V的最佳保护区间,最大偏移数值为0.62V,23处管道的涂层出现了损坏,存在显著的腐蚀风险隐患。

3 交直流输配线路对天然气管网阴极保护的干扰机制

3.1 交流干扰机制

交流输电线是引发交流干扰的主要源头,其干扰效应主要通过电磁感应与电容耦合两条途径实现。电磁感应是核心干扰形式,交流输电线运行时产生周期性变化的磁场,天然气管网作为闭合导体,在变化磁场中会感应生成感应电流与感应电压。感应电压的大小与输电线电流强度、线路与管道的平行长度、间距及土壤电阻率等因素相关,当感应电压叠加到管道阴极保护电位上时,会导致管道电位偏离最优保

护范围^[1]。

电容耦合干扰多发生在高压交流输电线与天然气管网间距较近的场景,输电线与管道之间形成电容回路,高压电场通过电容耦合使管道表面聚集电荷,造成电位波动。交流输配线路的故障电流(如短路电流)会通过大地传导,使局部土壤电位分布发生变化,形成地电位梯度,导致管道与土壤之间出现电势差,引发电化学腐蚀。交流干扰会降低管道阴极保护系统的极化效果,出现“过保护”或“欠保护”情况,同时可能诱发管道表面电解腐蚀,加速管道损坏。

3.2 直流干扰机制

直流输配线路(如高压直流输电线路、电气化铁路牵引供电线路)对天然气管网的干扰主要通过大地电流传导,即直流杂散电流干扰。直流输配线路运行时,部分电流会通过接地极流入大地,在土壤中形成稳定的电位场,天然气管网与大地构成导电回路,杂散电流会从土壤进入管道,再从管道流出到土壤,形成电流回路^[2]。

当杂散电流进入管道时,管道成为阴极,无腐蚀发生;但当杂散电流从管道流出进入土壤时,管道表面金属原子失去电子发生氧化反应,形成腐蚀电池,造成管道局部腐蚀。直流干扰也会导致管道阴极保护电位正向偏移,使阴极保护系统的有效防护范围缩小,原本受保护的管道区域变为腐蚀敏感区。直流输配线路的极性反转、接地极故障等异常情况,会导致土壤中电位场突然变化,进一步加重对天然气管网阴极保护系统的干扰,引发严重腐蚀隐患。

4 腐蚀风险评估指标体系构建

4.1 指标体系构建原则

为全面、准确评估华中地区交直流输配线路对天然气管网阴极保护的腐蚀隐患,指标选择基于电磁干扰与电化学腐蚀原理,体现风险产生的内在规律;涵盖干扰源、保护系统、管网自身及环境等多个层面,搭建完整的风险评估框架;结合华中地区地形、气候、管网布局特征,选定具有区域特殊性的指标;指标定义清晰,数据易获取或通过技术手段监测,便于实际操作^[3]。

4.2 指标体系构成

按照风险评估的核心要素,将腐蚀风险评估指标体系分为目标层、准则层与指标层三个层级,具体如下表1所示。

表1 腐蚀风险评估指标体系及权重表

目标层	准则层 (权重)	指标层	指标 类型	权重	数据获取方式	量化标准
华中地区 交直流输 配线路对 天然气管 网阴极保 护的腐蚀 风险	干扰强度 (0.35)	1. 输配线路与管网平行长度	定量	0.12	现场勘测+图纸核对	> 5km=10分, 3~5km=7分, < 3km=3分
		2. 输配线路与管网间距	定量	0.10	现场勘测	< 100m=10分, 100~300m=6分, > 300m=2分
		3. 输配线路工作电流	定量	0.08	运维记录+在线监测	> 1000A=10分, 500~1000A=7分, < 500A=3分
		4. 土壤电导率	定量	0.05	现场检测	> 100mS/m=10分, 50~100mS/m=6分, < 50mS/m=2分

目标层	准则层 (权重)	指标层	指标类型	权重	数据获取方式	量化标准
华中地区交直流输电线路对天然气管网阴极保护的腐蚀风险	阴极保护失效程度 (0.30)	5. 阴极保护电位偏移幅度	定量	0.15	在线监测	> 0.5V=10 分, 0.2~0.5V=6 分, < 0.2V=2 分
		6. 阴极保护电流密度变动率	定量	0.09	设备运行数据统计	> 20%=10 分, 10%~20%=6 分, < 10%=2 分
		7. 保护系统响应速度	定性	0.06	专家评估 + 设备测试	> 30min=10 分, 10~30min=6 分, < 10min=2 分
	管网脆弱性 (0.35)	8. 管道材质与壁厚	定量	0.07	设计文件 + 现场检测	普通碳钢且壁厚 < 10mm=10 分, 普通碳钢且壁厚 ≥ 10mm=6 分, 合金材质 =2 分
		9. 管道运营年限	定量	0.07	运维记录	> 15 年 =10 分, 8~15 年 =6 分, < 8 年 =2 分
		10. 管道涂层完好率	定量	0.08	现场检测 + 无人机巡检	< 85%=10 分, 85%~95%=6 分, > 95%=2 分
		11. 土壤腐蚀性等级	定性	0.07	现场检测 + 专家评定	强腐蚀 =10 分, 中等腐蚀 =6 分, 弱腐蚀 =2 分
		12. 管线铺设地貌复杂度	定性	0.06	现场勘测 + 地图分析	山地 / 丘陵 =10 分, 平原 + 少量洼地 =6 分, 平坦平原 =2 分

4.3 指标权重确定

采用层次分析法 (AHP) 确定各指标权重, 邀请电力工程、管道腐蚀防护、能源管网运维等领域 12 名专家, 采用 1-9 标度法对指标进行两两比较打分, 构建判断矩阵并通过一致性检验 (一致性比例 $CR=0.072 < 0.1$), 最终得到各准则层与指标层权重, 准则层权重分布如下图 1 所示。

5 腐蚀风险评估模型建立

5.1 模糊综合评价模型

考虑到腐蚀风险评估中存在较多模糊性因素 (如“高

干扰强度”“强土壤腐蚀性”) , 采用模糊综合评价法判定风险等级^[4]。将腐蚀风险分为高风险、中风险、低风险三个等级, 明确各等级划分标准 (如下表 2 所示); 根据指标实际监测数据或评估结果, 确定各指标隶属于不同风险等级的隶属度; 将指标权重与模糊关系矩阵相乘, 计算综合隶属度, 依据最大隶属度原则判定风险等级。

5.2 评估流程

腐蚀风险评估的具体流程如下图 2 所示, 流程包括数据采集与监控→指标量化→权重计算与一致性检验→模糊综合评价→风险等级判定→风险成因分析。

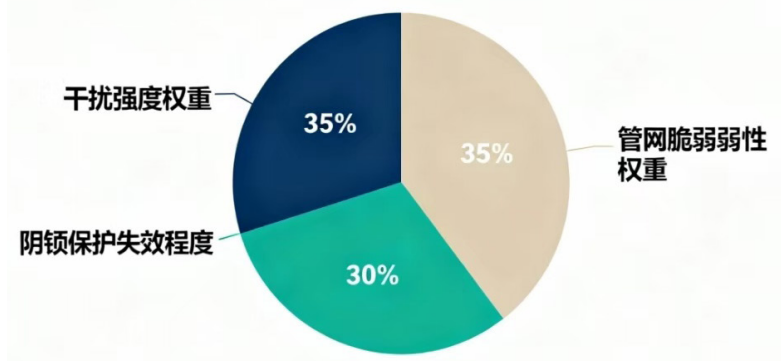


图 1 准则层指标权重分布饼图

表 2 腐蚀风险等级划分标准表

风险等级	干扰强度 (满分 10 分)	阴极保护失效程度 (满分 10 分)	管网脆弱性 (满分 10 分)	综合判定标准 (综合得分)
高风险	≥ 8 分 (满足 ≥ 2 项高强度干扰指标)	≥ 8 分 (电位偏移 ≥ 0.5V 或电流密度变动率 ≥ 20%)	≥ 8 分 (满足 ≥ 3 项高脆弱性指标)	≥ 80 分
中风险	5~7 分 (满足 1 项高强度干扰指标或 ≥ 2 项中等强度指标)	5~7 分 (电位偏移 0.2~0.5V 或电流密度变动率 10%~20%)	5~7 分 (满足 1~2 项高脆弱性指标)	60~79 分
低风险	≤ 4 分 (无高强度干扰指标, 中等强度指标 ≤ 1 项)	≤ 4 分 (电位偏移 < 0.2V 且电流密度变动率 < 10%)	≤ 4 分 (无高脆弱性指标)	< 60 分

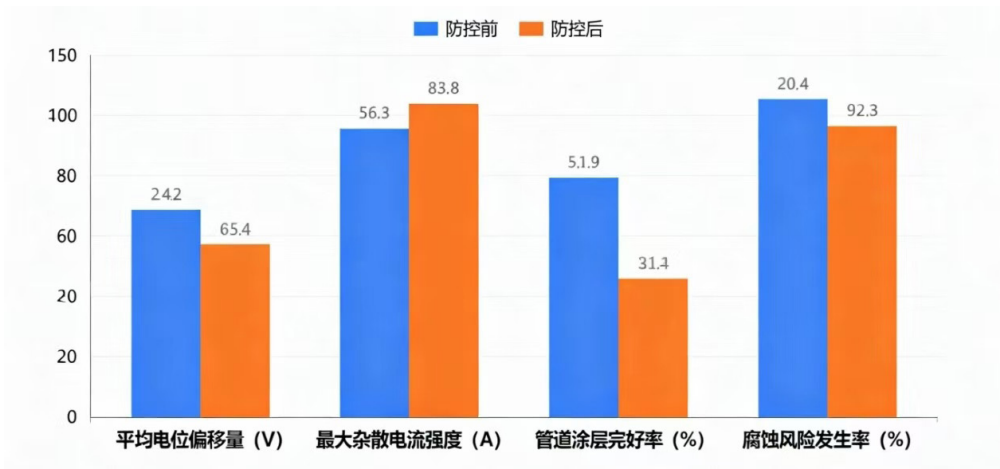


图 2 腐蚀风险评估流程图

6 评估应用效果

以华中地区某总长 150km 的天然气管网段落为试点进行风险评估与防控工作，该段落跟 8 条交流输配线路、4 条直流输配线路并行进行敷设，评估结果呈现：高危险路段 42km、中危险路段 68km、低危险路段 40km，针对高风险区域采取线路改道、增添排流设备等举措，中风险段调整阴极保护的参数，低风险段加大常态化监测力度，历经 12 个月的运行监测，各风险段关键指标改善情况如下表 4 所示。

表 4 试点段落防控前后关键指标对比表

指标	防控前	防控后	改善幅度
平均电位偏移量 (V)	0.48	0.19	60.4%
最大杂散电流强度 (A)	3.2	0.8	75.0%
管道涂层完好率 (%)	82.3	96.7	17.5%
腐蚀风险发生率 (%)	38.7	7.2	81.4%
设备故障次数 (次/年)	16	3	81.2%

7 结语

华中地区交直流输配线路与天然气管网的交叉排布，导致电磁干扰引发的管网阴极保护腐蚀风险日益突出。交流

输配线路通过电磁感应与电容耦合产生干扰，直流输配线路依靠杂散电流传导形成干扰，均会破坏管道阴极保护系统的有效性，引发腐蚀隐患。本文构建的包含 3 个准则层、12 项指标的风险评估指标体系，全面涵盖了风险影响因素；结合层次分析法与模糊综合评价法的风险评估模型，能够科学、准确地判定腐蚀风险等级。针对高、中、低不同风险等级制定的防控措施，具有较强的针对性与可操作性，为天然气管网的腐蚀防护提供了系统解决方案。未来，随着华中地区能源管网规模的进一步拓展与技术的持续发展，交直流输配线路对天然气管网阴极保护的腐蚀风险评估将向更精准、智能的方向迈进，为区域能源安全提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 张丰,何国军,刘洋,等.直流接地极对浙江省天然气管网的干扰与防治[J].全面腐蚀控制,2023,37(12):7-13.
- [2] 杨立超.埋地天然气管网外加电流的阴极保护措施研究[J].低碳世界,2022,12(08):196-198.
- [3] 蔡成武.强制电流阴极保护在城市燃气钢制管道中的应用[J].城市燃气,2022,(06):1-8.
- [4] 吴有更,李亚菲,张巍威,等.基于同步通断的管道断电电位测量方法[J].天然气技术与经济,2021,15(06):36-41.

The Impact of the Application of New Building Materials on Project Cost and Control Strategies

Lei Zhang

China Metallurgical Group Corporation SEDI Shanghai Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

Abstract

Against the backdrop of the green and low-carbon transformation in the construction industry, the promotion and application of new building materials have become the core driving force for industry upgrading, but their characteristics also pose new challenges to the control of project costs. This article focuses on the definition, classification and core characteristics of new building materials, systematically analyzes their full-cycle impact on the design bidding and tendering in the early stage of engineering, the cost in the construction stage, and the expenses in the operation and maintenance stage, and reveals the dual effects of enhancing the long-term value of the project while causing cost fluctuations. In response to the problems existing in the current management and control, such as the disconnection in the early selection, insufficient construction coordination, incomplete later accounting, and the lack of external standards, a closed-loop management and control strategy is proposed from four dimensions: early source control, refined management of the construction process, full-cycle optimization in the later stage, and improvement of the external support system. The research results can provide theoretical references and practical guidance for the project party to rationally apply new building materials and balance costs and benefits.

Keywords

New building materials; Project cost; Control strategy

新型建筑材料应用对工程造价的影响及管控策略

张磊

中冶赛迪上海工程技术有限公司, 中国 · 上海 200000

摘要

在建筑行业绿色低碳转型背景下, 新型建筑材料的推广应用成为行业升级的核心驱动力, 但其特性也对工程造价管控提出新挑战。本文围绕新型建筑材料的定义、分类与核心特性, 系统分析其对工程前期设计招投标、施工阶段成本、运营维护阶段费用的全周期影响, 揭示其在提升工程长期价值的同时引发成本波动的双重效应。针对当前管控中存在的前期选型脱节、施工协同不足、后期核算不健全及外部标准缺失等问题, 从前期源头把控、施工过程精细化管理、后期全周期优化及外部支撑体系完善四个维度, 提出闭环管控策略。研究成果可为项目方合理应用新型建筑材料、平衡成本与效益提供理论参考与实践指引。

关键词

新型建筑材料; 工程造价; 管控策略

1 引言

在“双碳”目标与新型城镇化战略推动下, 建筑行业正加速向绿色化、智能化、低碳化转型升级, 新型建筑材料凭借节能环保、高性能、功能集成等核心优势, 成为破解传统建材高能耗、低效率痛点的关键, 在绿色建筑、装配式建筑、智能建筑中的推广应用呈现爆发式增长趋势。与此同时, 工程造价管控作为项目全生命周期管理的核心环节, 直接决定项目投资效益与市场竞争力, 而新型建筑材料普遍存在价格波动大、供应链不稳定、施工工艺适配性要求高、全生命

周期成本核算复杂等特点, 打破了传统造价管控的固有逻辑, 给项目成本控制带来新的挑战与机遇, 亟需系统性探究其影响机制。

在新型建筑材料推广应用的关键期, 项目方普遍面临“材料选型难、成本控制难、风险预判难”的困境。本研究提出的针对性管控策略, 能够为建设单位、施工企业、造价咨询机构提供实操指引, 助力其在保障工程质量与绿色低碳目标的前提下, 合理选择新型材料、优化成本结构、规避造价风险, 实现项目投资效益最大化与行业可持续发展。

2 新型建筑材料概述

2.1 定义与分类

新型建筑材料是指在技术研发、性能指标、应用功能

【作者简介】张磊 (1980-), 男, 中国上海人, 工程师, 从事工程经济研究。

上突破传统建材局限,以节能环保、高性能、智能化为核心导向,能适应绿色建筑、低碳工程需求的一类创新材料。常见类型可分为四类:一是绿色环保材料(如再生骨料混凝土、低VOC涂料),二是节能保温材料(如真空绝热板、气凝胶毡),三是智能建材(如自修复混凝土、光电一体化建材),四是高性能结构材料(如超高强钢筋、纤维增强复合材料)。

2.2 核心特性

技术特性上,兼具高强度、高耐久性、低能耗、环保无污染等优势,且功能集成化程度高,能实现保温、防火、隔音等多重需求。应用特性上,需匹配专项施工工艺与设备,适配住宅、公共建筑、基础设施等多元场景,同时受技术迭代驱动,产品更新速度快,性能与应用范围持续拓展。

3 新型建筑材料应用对工程造价的影响分析

3.1 对工程前期造价的影响

设计阶段,新型建筑材料的特性直接主导设计方案优化方向,其功能集成性可能减少构件数量、简化施工流程,降低工程量;但部分材料的特殊规格与安装要求会增加设计复杂度,导致设计周期延长与设计费用上升。招投标阶段,新型材料市场成熟度不足,价格缺乏统一标准且波动频繁,加之供应商资源有限,使得投标方难以精准核算成本,易出现报价偏高或低估风险,影响招投标阶段的造价管控精度。

3.2 对工程施工阶段造价的影响

材料采购成本方面,新型材料研发投入大、生产规模有限,单价普遍高于传统建材,且供应链稳定性较弱,原材料价格波动、物流运输限制等因素易引发采购成本额外增加。施工成本上,适配新型材料的施工工艺往往需要专用设备购置或改造,同时施工人员需接受专业培训以掌握操作技能,直接推高人工与设备投入。工期成本方面,部分新型材料施工效率更高(如装配式构件),可缩短工期降低间接成本;但工艺磨合不当或技术适配不足可能导致返工,延长工期并增加额外费用。

3.3 对工程运营维护阶段造价的影响

短期来看,新型材料较高的初期采购与施工投入会拉高项目前期造价;但长期而言,其节能环保特性可显著降低运营阶段的能耗费用,耐久性优势能减少维修更换频次,大幅降低维护成本。从全生命周期造价视角,新型材料通过优化前期建设成本与后期运营成本的配比,实现项目全周期成本的整体优化,尤其在绿色建筑项目中,长期效益更为突出。

3.4 影响机制总结

直接影响体现为材料本身的采购价格、运输仓储费用等直接计入造价的成本项,其价格波动与供应稳定性直接决定造价基础水平。间接影响则通过工艺适配成本、人工设备升级费用、工期变化衍生成本、运营维护损耗等隐性成本传导,这类影响具有滞后性与不确定性,是新型材料应用下造价管控的重点与难点。

4 新型建筑材料应用下工程造价管控现存问题

4.1 前期管控问题

设计阶段存在明显的“技术选型优先、造价管控滞后”现象,设计人员多聚焦新型材料的技术性能与环保指标,缺乏对材料成本的精细化考量,常出现选型与造价预算严重脱节的情况;同时,多数设计方案仅关注初期建设成本,忽视全生命周期视角下的运营维护成本优化,导致项目长期效益受损。市场调研环节存在显著短板,一方面对新型材料的价格构成、波动规律缺乏系统跟踪,难以精准预判成本走势;另一方面对供应商的生产能力、资质等级、供货稳定性评估不充分,未建立备选供应商库,为后续采购埋下风险隐患。

4.2 施工阶段管控问题

采购管理乱象突出,新型材料供应链成熟度不足,上游原材料价格波动、产能限制等因素易引发供应中断或价格暴涨,而部分企业缺乏规范的采购流程,存在分散采购、临时采购等情况,难以通过规模效应降低成本,还可能因合同条款不明确导致供需纠纷,增加额外支出。施工协同衔接不畅,新型材料的施工工艺与传统工艺差异较大,部分施工企业未提前开展技术交底与人员培训,施工队伍对材料安装要求、设备操作规范不熟悉,导致新型材料与施工工艺适配性不足,频繁出现工序衔接失误、施工质量不达标等问题,返工返修率居高不下,直接推高施工成本。

4.3 后期管控问题

运营维护缺乏针对性方案,多数项目沿用传统建材的维护模式,未结合新型材料的特性制定专项维护流程,维护人员对材料的保养要求、故障排查方法掌握不足,易出现维护不当导致材料性能衰减的情况,进而增加维护频次与费用,造成成本超支。全生命周期造价核算体系不健全,当前核算多集中于前期建设成本,对运营阶段的能耗费用、维护成本、残值回收等数据缺乏系统记录与统计,核算指标不全面、核算方法不科学,导致后期成本追溯困难,无法为后续项目的材料选型与造价管控提供有效数据支撑。

4.4 外部环境问题

政策与标准体系不完善,部分新型材料因研发周期短、推广速度快,尚未形成统一的产品标准、质量验收标准与价格指导体系,市场上同类产品质量参差不齐、价格混乱,企业难以精准判断材料性价比,质量与价格管控难度极大。市场环境波动加剧风险,一方面,大宗商品价格波动直接传导至新型材料生产环节,导致其市场价格频繁变动;另一方面,技术迭代速度快使得部分新型材料快速面临淘汰,前期投入的设备、材料可能因技术过时无法复用,造成资产浪费,进一步加剧造价管控的不确定性。

5 新型建筑材料应用下工程造价管控策略

5.1 前期管控:源头把控造价风险

设计阶段推行“限额设计+全生命周期成本”双向向

管控模式,以项目投资预算为约束,将新材料的前期采购成本、中期施工成本与后期运营维护成本纳入综合考量,建立材料选型性价比评估模型,优先选择技术成熟、成本可控、长期效益显著的新型材料;同时加强设计与造价咨询的协同衔接,造价人员提前介入设计流程,对材料选型方案进行成本测算与优化,避免设计与预算脱节。市场调研环节搭建常态化信息跟踪机制,建立涵盖新材料技术参数、价格构成、波动趋势、供应商资质、供货能力等信息的动态数据库,通过大数据分析预判价格走势;同步构建多维度供应商评估体系,筛选优质供应商建立长期合作名录与备选供应商库,为采购决策提供数据支撑。

5.2 施工阶段管控:过程精细化管理

采购优化方面,推行集中采购与批量采购模式,通过规模效应降低材料单价;与核心供应商签订长期战略合作协议,明确价格波动调整机制与供货保障条款,锁定采购成本;针对供应链风险,制定应急采购预案,当主供渠道出现中断时,快速启动备选供应商资源,避免因供应短缺导致工期延误与成本增加。施工协同上,提前开展专项技术交底,组织施工人员参加新型材料施工工艺与设备操作培训,确保施工队伍熟练掌握操作规范;结合材料特性优化施工组织设计,调整工序衔接流程,配置专用施工设备,减少工艺适配不当引发的返工损耗。成本动态监控需搭建实时跟踪平台,整合材料采购、施工消耗、人工设备投入等数据,对比实际成本与预算偏差,分析偏差成因,及时采取调整采购方案、优化施工流程等管控措施,实现成本动态平衡。

5.3 后期管控:全生命周期造价优化

运营维护阶段制定新材料专项维护方案,结合材料特性明确维护周期、保养方法、故障排查流程,配备专业维护人员与工具;建立维护成本台账,记录维护费用、材料损耗等数据,通过数据分析优化维护策略,降低长期运营成本。造价核算环节构建全生命周期造价核算体系,完善核算指标体系,将前期建设成本、运营阶段能耗费用、维护成本、残值回收等纳入核算范围,采用全周期成本分析方法开展核算工作;建立成本追溯机制,对各阶段造价数据进行系统归档与分析,形成项目造价数据库,为后续项目的材料选型、成本预算制定提供参考,实现造价管控的闭环管理。

5.4 外部保障:完善支撑体系

政策对接方面,安排专人跟踪建筑行业政策与新型材

料标准动态,及时适配最新行业规范与质量验收要求,避免因政策变动导致的返工整改成本;主动对接政府部门,梳理绿色建筑、低碳材料应用相关的补贴政策与税收优惠,积极申报争取政策支持,降低项目成本。技术支撑上,加强与科研机构、材料生产企业的合作,参与新材料技术研发与成果转化,推动材料性能升级与生产成本降低;引入数字化、智能化技术,如BIM技术模拟材料应用效果与成本消耗,提升造价管控的精准度与效率,通过技术创新进一步优化新型材料应用的性价比。

6 结语

本研究系统剖析了新型建筑材料应用对工程造价的双重影响:一方面,其节能环保、高性能的特性可优化项目全生命周期成本结构,降低运营维护损耗,提升工程长期价值;另一方面,受技术成熟度、供应链稳定性等因素影响,其前期采购成本高、价格波动大,且施工适配性要求带来隐性成本,易引发造价波动风险。研究明确,全生命周期视角下的多阶段管控是核心解决方案,需通过前期源头把控材料选型与市场风险、施工阶段精细化管控过程成本、后期优化运营维护与造价核算,结合外部政策与技术支撑,形成“前期预判-过程管控-后期优化-外部保障”的闭环管控体系,实现材料应用价值与造价可控的平衡。

随着新型建筑材料技术迭代加速,低碳化、功能集成化、智能化将成为主流趋势,未来造价管控需更注重动态适配材料技术升级,强化成本与性能的动态平衡分析。同时,数字化、智能化手段的深度应用将成为核心方向,BIM技术、大数据、人工智能等将推动造价数据实时共享、风险精准预判与管控方案智能优化,实现从“被动应对”向“主动预判”的转型。此外,行业标准体系的完善与跨主体协同机制的构建,将进一步降低新材料应用的造价管控难度,为建筑行业绿色低碳转型提供更坚实的成本保障。

参考文献

- [1] 陈芬芳.新型建筑材料的开发与应用对工程造价的影响[J].居舍,2024(05)
- [2] 刘正.试析新型建筑材料对建筑工程造价管理的影响——以墙体材料为例[J].中国建筑装饰装修,2023(12)
- [3] 钟桂芬.新型绿色环保建筑材料对建筑工程造价管理的影响[J].陶瓷,2023(03)

Simulation and hazard analysis of smoke and fire in the throat area of the metro car depot under the cover of urban rail transit

Wenqian Jiang

China Railway Siyuan Survey and Design Group Co.,Ltd., Wuhan, Hubei, 430063, China

Abstract

With the acceleration of urbanization, over-track development in urban rail transit has gradually become a development trend. Over-track development offers advantages such as alleviating urban land shortages, promoting residential and commercial development in the over-track areas, and enhancing the overall image and quality of the city. However, it also presents drawbacks, including challenges in fire protection design, high fire risks, and difficulties in fire control. Effective smoke control in buildings after a fire outbreak is a crucial means of protecting people's lives and property. This paper simulates fires in the throat area beneath urban rail transit over-track depots, analyzes the combustible conditions and fire characteristics in the throat area, presents smoke simulation results under fire scenarios, and proposes criteria for ensuring life safety as well as smoke control strategies for the throat area.

Keywords

rail transit; Throat area; Fire simulation; Smoke control

城市轨道交通盖下车辆段咽喉区火灾烟气模拟与危险性分析

江文倩

武汉科铁人才发展有限公司了, 中国·湖北 武汉 430063

摘要

随着城市化进程的加速, 城市轨道交通上盖开发逐渐成为发展的趋势。上盖开发具有缓解城市用地紧张、带动上盖开发区的住宅、商业等发展的特点, 同时上盖开发提升城市的整体形象及品质; 然而, 也带来消防设计困难、火灾危险性大、火灾控制困难等缺点。建筑物发生火灾后, 烟气的有效控制是保护人民生命财产安全的有效及重要手段, 本文针对城市轨道交通盖下车辆段咽喉区火灾进行模拟, 分析了咽喉区可燃物的情况及火灾特性, 给出了火灾场景下烟气模拟结果, 提出了人员生命安全的判定标准和咽喉区的烟气控制策略。

关键词

轨道交通; 咽喉区; 火灾模拟; 烟气控制

1 引言

城市轨道交通上盖开发, 也被称为上盖物业开发, 是一种在轨道交通途径的地方的上方或邻近周边进行民用建筑开发建设的土地开发方式。随着城市化进程的加速, 土地资源变得日益紧缺。为了更有效地利用土地资源, 城市轨道交通上盖开发逐渐成了一种趋势。上盖开发具有提高土地利用效率, 增加建筑面积, 缓解城市用地紧张的问题; 可以带动上盖开发区的住宅、商业等发展, 形成新的经济增长点; 同时上盖开发伴随着高效、优质的建筑设计与建造, 可提升城市的整体形象及品质。然而, 上盖开发也带来一些问题, 如开发成本高、减振降噪要求高、消防设计困难等缺点。

火灾对人员的威胁体现在中毒作用、热辐射作用、遮

光及引起心理恐慌。建筑物发生火灾后, 烟气的有效控制是保护人民生命财产安全的有效及重要手段。根据《NFPA 92 Standard for Smoke Control Systems》^[1], 烟气控制系统设计实现的主要目标为: 禁止烟气进入楼梯间, 出口, 电梯井道或类似区域; 在疏散所需的时间内, 在出口处保持良好的环境; 抑制烟气蔓延; 在烟气区域外提供条件, 使救援人员能够进行搜救行动, 并控制火势; 有助于保护生命和减少财产损失。本文针对盖下车辆段咽喉区的列车发生火灾进行研究, 给出了人员生命安全的判定标准, 分析了咽喉区火灾烟气对人员生命安全影响。

2 研究方法

2.1 火灾设计

2.1.1 火灾场景

本次火灾场景为盖下咽喉区一节车厢发生火灾, 火灾

【作者简介】江文倩(1994-), 女, 中国甘肃兰州人, 本科, 工程师, 从事城市轨道交通研究。

为电气线路短路引起的火灾。位置如图1所示，其中图1(a)为盖下咽喉区火灾三维场景模型图，图1(b)为盖下咽喉区火灾平面图。

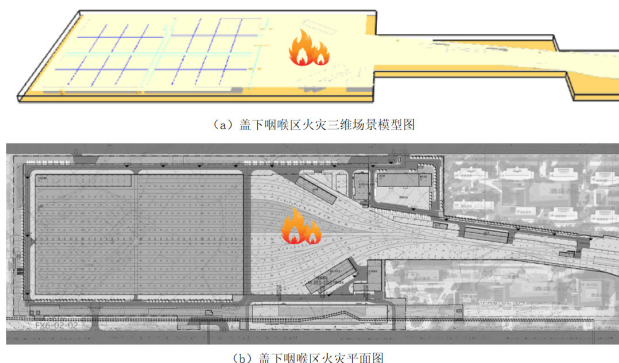


图1 咽喉区火灾位置示意

2.1.2 热释放速率

热释放速率是指单位时间内火源放出的热量，一般用kW或MW为单位。热释放速率是决定火灾发展和火灾危害的主要参数，是采取消防对策的基本依据。热释放速率除了可以通过实验测定之外，还可以通过模型计算、经验估算以及参考相关文献规范的数据。针对地铁列车车厢火灾，《地铁设计防火标准》(GB 51298-2018)^[2]第8.2.4条条文说明：国内地铁列车的设计火灾规模根据车辆类型通常取用7.5MW~10.5MW。本次列车热释放速率设定为10.5MW。

表1 火灾稳态时的热释放速率

建筑类别	是否设置喷淋	热释放速率 (MW)
汽车库	无喷淋	3.0
	有喷淋	1.5
厂房	无喷淋	8.0
	有喷淋	2.5
仓库	无喷淋	20.0
	有喷淋	4.0

2.1.3 火灾增长系数

火灾增长系数 α 是以热释放速率表征火灾增长快慢程度的重要参数，理想的做法是通过实验确定，而在一般的工程计算中可采用表2的划分方法。目前地铁车体材料一般采用轻型不锈钢材料，车体承载结构材料全部采用钢材^[3]。客室侧墙、端墙、内装饰板采用大型玻璃钢成型板材嵌装结构，材料具有良好的阻燃性。所有电线、电缆均采用难燃、阻燃型；地板采用在波纹钢板上面铺设陶粒砂和粘贴地板布的非木结构型式，具有良好的阻燃性。考虑火灾增长类型为快速火，本次火灾增长系数设定为0.044kW/s²。

2.2 人员生命安全判定标准

火灾危险性分析中可耐受指标为烟气层高度、烟气温度、烟气浓度与毒性、烟气能见度等，可作为人员生命安全的判定标准。

表2 火灾增长系数分类表

可燃材料分类	火灾类别	火灾增长系数 (kW/s ²)
硬木家具	慢速火	0.00278
棉质、聚酯垫子	中速火	0.011
装满的邮件袋、木质货架 托盘、泡沫塑料	快速火	0.044
池火、快速燃烧的装饰家具、轻质窗帘	超快速火	0.178

2.2.1 烟气层高度

火灾中的烟气常伴有一定量的热量、胶质、有害燃烧产物等，是影响人员疏散与救援行动的主要障碍。在火灾中，烟气层只有保持在人群头部以上一定高度，使人在疏散时不必从烟气中穿过或受到热烟气层的热辐射威胁，保证人员疏散的安全。参照《建筑防排烟系统技术标准》(GB 51251-2017)^[4]，空间内最小清晰高度为： $H_d=1.6+0.1H_d$ ，其中， H_d 为最小清晰高度， H_d 为排烟空间的建筑净高度。

2.2.2 烟气温度

依据中暑或体温升高给人员生命安全所产生的危害，60℃作为界定疏散区域的热环境对人员疏散构成威胁的热临界温度是一个相对保守的数值。火灾产生的局部热环境，特别在高湿热的环境中，疏散人员可能因体温升高而丧失行为能力甚至导致死亡。人员长时间暴露在过热环境里，即便缓慢的升温未能引燃空间内的可燃物，但却有可能造成空间内疏散人员的身体烧伤。综合考虑造成人体伤害的热环境暴露时间和热强度，热临界温度值作为热环境危害人员生命安全判定指标已经得到广泛的认可。为确保疏散安全，本次将热临界温度设定为50℃。

2.2.3 烟气浓度与毒性

一氧化碳被视为在火灾产生的有毒气体中最为危险的物质，一旦人员体内积累了一定量的一氧化碳就将导致死亡。由Los Angeles Residential Test Program实验报告可知，如果暴露在3000ppm浓度的一氧化碳超过15min，人员就会出现头疼及视线模糊的现象，从而对室内人员的疏散能力产生影响。本次设计中，一氧化碳的临界浓度指标设置为500ppm。

2.2.4 烟气能见度

火灾烟气同其它主要的燃烧产物一样，是研究火灾发展的重要参数之一。火灾烟气通常用能见度进行表征。烟气浓度高则能见度低，澳大利亚《消防工程师指引》给出了适用于小空间和大空间的最低能见度，如表3所示。大空间内为确定疏散方向需要看得更远，因此要求能见度更大。

表3 大面积区域与普通房间的火灾最低能见度

能见度	大面积区域	普通房间
最低能见度	10m	5m

综上，本项目设定安全判定标准为：

- (1) 危险高度以下空间内烟气温度不超过50℃；
- (2) 危险高度以下空间内CO浓度不超过500ppm；

(3) 危险高度以下空间内能见度不低于 10m。

2.3 研究方法

本项目利用火灾动力学模拟软件(FDS)对火灾发展过程及烟气控制过程进行数值模拟计算,验证初步设计能够达到的烟气控制效果,并及时对初步设计的烟气控制系统及其参数值进行调整以满足设计要求,确定最终的烟气控制系统设计方案及其设计参数值。

3 研究结果与分析

3.1 计算初设条件

表 3 FDS 计算初设条件

初始条件	参数及要求
火灾增长方式	快速
火灾热释放速率	10.5MW
自动灭火系统	未设置
防排烟设置	咽喉区未要求,两侧自然通风

3.2 模拟结果

如图 2 所示为烟粒子分布情况,所示为咽喉区火灾发生后 100S~1800S 等时刻烟气在咽喉内的分布情况。火灾发生后,烟气向盖下咽喉区顶部蔓延,到达顶棚后向四周扩散,最终由盖边开敞区排除。

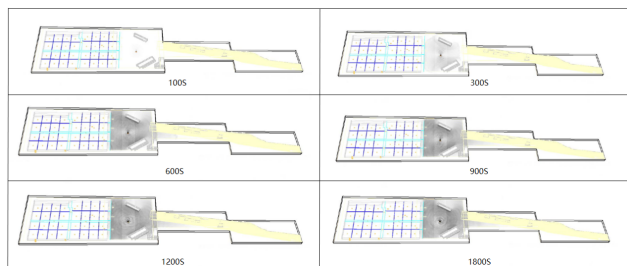


图 2 不同时刻咽喉区烟气分布情况

经模拟,除着火点附近区域外,在计算时间 1800S 内,盖下停车场的能见度、温度、CO 浓度均未达到为危险判据值,满足本项目的人员生命安全判定标准。图 3 为咽喉区火灾发生后 1800S 时危险高度处能见度、温度、CO 浓度等检测参数云图,从图中可以看出,火灾发生后 1800S 时,Z=2.8m 高度处可耐受指标(烟气的能见度、温度、CO 浓度)均满足烟气温度不超过 50℃、CO 浓度不超过 500ppm、空间内能见度不低于 10m 的要求;同时,火灾发生后 1800S 时,X 方向处可耐受指标(烟气的能见度、温度、CO 浓度)除着火点附近外其他区域均满足烟气温度不超过 50℃、CO 浓度不超过 500ppm、空间内能见度不低于 10m 的要求。

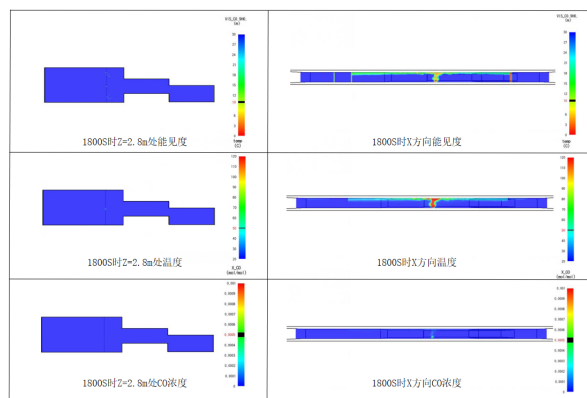


图 3 咽喉区火灾发生后 1800S 时检测参数云图

《地铁设计防火标准》(GB 51298-2018)第 8.2.7 条的条文解释指出:其他库外以轨行区为主的交通区域基本无可燃物,亦非人员长期居留场所,且空间高大,因此未要求设排烟设施。结合前述模拟及分析,盖下咽喉区不要求设置排烟设施,两侧自然通风即可满足人员生命安全判定标准。因此,盖下咽喉区不设置排烟措施满足规范及人员生命安全判断标准的要求。

4 结语

本文针对盖下车辆段咽喉区列车火灾进行模拟与分析,分析了可燃物情况及火灾特性,确定了火灾场景的设计参数及人员生命安全判定标准,获得了火灾场景下咽喉区的火灾危险性,并提出了盖下咽喉区火灾的设计方法。具体结论如下:

火灾情况下安全判定标准可为危险高度以下空间内烟气温度不超过 50℃、CO 浓度不超过 500ppm 及空间内能见度不低于 10m。

咽喉区发生火灾,烟气向四周扩散,30 分钟内可满足生命安全判定标准。

咽喉区不设置排烟措施,利用自然通风可满足规范及实际需求。

参考文献

- [1] NFPA 92-2018.Standard for Smoke Control Systems[S]
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.地铁设计防火标准:GB 51298-2018[S].北京:中国计划出版社,2018: 93.
- [3] 薛克仲."城市轨道交通车辆车体材料选择."城市轨道交通研究 6.1(2003): 6.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑防烟排烟系统技术标准:GB 51251-2017[S].北京:中国计划出版社,2017: 26.

Research on Dynamic Adjustment Mechanism of High-speed EPC Cost under Digital Measurement

Chunmei Shen

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

High-speed EPC projects are characterized by extended construction timelines, technical complexity, and volatile external environments. Traditional static cost control methods struggle to adapt to dynamic changes during construction, often leading to cost overruns and resource waste. Digital measurement technology, with its real-time, precise, and collaborative advantages, provides technical support for dynamic cost adjustments. This paper examines the application logic of digital measurement in cost control from a full lifecycle perspective of high-speed EPC projects. It identifies key factors influencing dynamic cost adjustments and establishes a closed-loop dynamic adjustment system encompassing "data collection, deviation analysis, strategy generation, and execution feedback." The paper proposes safeguard measures in three areas: technical adaptation, organizational coordination, and risk prevention. These efforts aim to enhance cost control accuracy and maximize project investment returns, offering both theoretical references and practical implementation pathways.

Keywords

digital measurement; high-speed EPC project; dynamic cost adjustment; full life cycle; closed-loop mechanism

数字化计量下高速 EPC 造价动态调整机制研究

沈春梅

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 中国 · 云南 昆明 650000

摘 要

高速EPC项目具有建设周期长、技术复杂、外部环境变化大等特点,传统静态造价控制方式很难适应施工过程中各种动态变化,容易造成造价超支、资源浪费等问题。数字化计量技术具有实时性、精确性和协同性优势,可为造价动态调整提供技术支持。本文从高速EPC项目全生命周期角度出发,分析数字化计量在造价管控中应用逻辑,找出造价动态调整主要影响因素,构建“数据采集-偏差分析-策略生成-执行反馈”闭环动态调整体系,从技术适配、组织协同、风险防控三个方面提出保障举措,希望为提高高速EPC项目造价管控精度,实现项目投资效益最大化,提供理论参照和操作途径。

关键词

数字化计量; 高速EPC项目; 造价动态调整; 全生命周期; 闭环机制

1 引言

高速 EPC 工程是基础设施建设的重要一环,造价控制直接决定投资效益及基建资金利用率。EPC 模式下,总承包商权责集中,但受设计优化、价格波动、工艺变更等动态因素影响,分段核算存在数据滞后、偏差发现不及时等问题,难以适应以工程实体质量检验、计量支付同时进行的合同计量要求,由于计量依据滞后、数据传递不畅会造成计量审核效率低下,不能匹配现场施工进度与合同约定计量支付节点。以 BIM、物联网等为依托的数字化计量技术可实时采集施工数据,实现造价动态更新,但目前研究缺少全生命周期造价动态调整机制的系统构建。因此本文基于数字化计量

优势,结合高速 EPC 项目造价控制痛点建立动态调整机制,具有理论与实践价值。

2 数字化计量在高速 EPC 项目造价管控中的应用逻辑

2.1 数字化计量的技术特征与造价管控需求的适配性

高速 EPC 项目造价控制主要需求就是“实时性”和“精准性”。实时性即要及时发现施工过程中造价偏差,防止偏差积累;精准性即根据具体工程数据来制定调整措施,而不是凭经验进行大致估计。数字化计量技术用三个特征同这一需求实现深度匹配:

【作者简介】沈春梅(1977-),女,中国四川泸县人,本科,工程师,从事工程造价研究。

表1 数据处理功能及作用表

数据处理方式	实现途径	作用
数据实时采集	采用计量软件系统和合同清单参数化关联等方式	对监理核验合格的工程量、合规材料进场量、见证备案设备租赁时长等数据进行实时采集,解决传统人工计量滞后且与合同计量脱节的问题
数据集成共享	依靠云平台构建起设计、采购、施工、造价等部门数据共享通道	避免因信息孤岛引发造价核算错误,设计方案调整能够立即传递至造价部分,自动评估变更为造价带来影响
数据精准分析	借助大数据算法,将历史造价数据同实时施工数据以及外部市场数据(材料价格波动等)整合加以分析	找到造价偏差出现原因,进而为调整策略提供数据支持

2.2 数字化计量对高速 EPC 项目造价管控流程的重构

传统高速 EPC 项目造价控制流程为“线性化”,即设计阶段完成造价估算,采购阶段制定采购预算,施工阶段进行进度款核算,竣工阶段完成结算,各个阶段数据是独立的,不能应对动态变化。数字化计量技术将此流程重新构建为闭环化控制:即在设计阶段依据 BIM 模型做造价模拟,提前评判设计方案经济性,防止后期由于设计不合理造成造价超支;在采购阶段借助数字化平台及时跟进材料价格起伏,依照施工进度来调配采购计划,降低材料成本风险;在施工期间实时对比实际工程量同计划工程量、实际成本与预算成本差异,利用算法剖析差异缘由(材料浪费,工期滞后,工艺改变等),并自动生成初步调整建议;在竣工时,依靠全生命周期数字化数据展开结算审核,从而提升结算速度和精确度。闭环流程将传统“事后核算”模式转变为“事前预判、事中控制、事后优化”动态管控模式^[1]。

3 高速 EPC 项目造价动态调整的关键影响因素识别

3.1 内部工程因素

内部工程因素是引起造价动态变化主要变量,且数据可由数字化计量直接获取,主要有以下几种情况:一是工程量偏差,由于施工工艺精度、地质条件变化、设计方案调整等因素影响,实际完成工程量与清单工程量会出现差异,高速公路路基施工时因地质勘察误差造成土方开挖量增加或减少,需实测核验土方量,结合合同计量规则完成造价动态调整;二是材料、设备成本变动,高速项目对钢材、水泥、沥青等大宗材料需求量大,设备租赁(如摊铺机、压路机)成本占比高,材料价格和设备租赁价格实时变化直接影响造价,数字化计量可以对接市场价格数据库,实时获取价格波

动并计算成本变化幅度;三是工期偏差,工期延误或提前会带来人工成本、设备租赁成本、管理成本变化,工期延误可能会增加设备闲置费用、人工窝工费用,数字化计量通过 BIM 模型与进度计划关联,实时跟踪工期进度,计算工期偏差对造价影响^[2]。

3.2 外部环境因素

外部环境因素不直接作用于工程施工过程,而是通过影响内部工程因素间接作用于造价,其数据须经数字化平台同外部系统对接才能获得,主要有三方面:一是政策法规变动,包含税收政策调节、环保标准提升等,会增添工程成本,比如环保标准升级促使扬尘治理设备投入增多,须通过数字化平台即时获取政策信息并测算成本增量;二是市场供需波动,除材料和设备价格之外,劳动力市场供需变化会引起人工成本上下浮动,高速公路多数处在偏远地区,当地劳动力短缺就可能造成人工成本攀升,数字化计量能够同劳动力市场数据库对接,进而动态修正人工成本预算;三是自然环境变迁,暴雨、台风等自然灾害致使施工中断,工程受损,修复成本以及工期延误成本就会增多,数字化计量可借助气象数据平台,提前预估自然灾害风险,为应急造价调整预留调整空间。

4 数字化计量下高速 EPC 项目造价动态调整机制构建

4.1 数据采集环节:构建多源数据融合的数字化采集体系

数据采集是造价动态调整机制的基础,要形成内外部数据的多源融合体系:首先,从内部工程数据采集角度来讲,利用计量所须的核验工程量,合规材料消耗等数据实施实时采集工作量,材料仓库用关联核验的智能设备记载合规材料进出量;其次,外部数据输入平台取得影响计量的税收政策,材料基准价等信息;最后为数据标准化处理,根据合同计量规范建立统一的数据编码标准,将不同来源、不同格式的计量相关数据转换成统一格式的数据,避免数据格式不兼容造成计量审核偏差,例如按照《公路工程工程量清单计量规范》对工程量数据进行编码,按照材料类型和规格对材料价格数据进行分类编码。

4.2 偏差分析环节:基于大数据算法的造价偏差识别与归因

偏差分析环节要对实际造价和计划造价差别展开对比,找出偏差大小和原因,从而为策略生成提供依据:①偏差计算,借助数字化平台提取采集到实时数据,计算实际工程量和计划工程量偏差率、实际成本和预算成本偏差率,比如实际土方开挖量比计划开挖量多出 5% 时,平台就会将这标注成“中度偏差”;②偏差归因,用大数据算法对偏差原因展开分析,将历史数据和实时数据联系起来,找到偏差主要影响因素,比如通过关联分析发现材料成本超支原因是“沥青

价格上涨3%”和“沥青损耗率超出标准1.5%”，而不是单一因素造成的；③偏差预警，设置不同偏差预警阈值（轻度偏差 $\pm 3\%$ 含以内，中度偏差 $\pm 3\%$ 至 $\pm 5\%$ ，重度偏差 $> \pm 5\%$ ），当偏差达到预警阈值时，平台会自动为项目管理团队发出预警信息，确保及时介入^[3]。

4.3 策略生成环节：基于数据驱动的差异化调整策略制定

策略生成环节要按照偏差原因和偏差等级来制订不同造价调整策略，不能“一刀切”：通过工程量偏差调整策略，由于设计方案优化导致工程量偏差，要结合 BIM 模型重新计算工程量，调整造价预算；由于施工浪费（比如材料损耗率过高）导致工程量偏差，要改进施工工艺，制定材料节约措施，调整后续阶段材料采购预算；同时，通过成本波动调整策略，由于材料价格上涨导致成本超支，可采用批量采购、长期协议采购等方式降低价格风险，或者在确保工程质量前提下更换性价比更高材料；由于人工成本上涨导致成本超支，可优化施工流程，增加机械化作业比例来降低人工需求；此外，外部因素调整策略，由于政策法规变化导致偏差，要重新核算合规成本，申请造价追加或者调整项目资金计划，由于自然灾害导致偏差，要启动应急预案，调整施工计划，核算修复成本，纳入造价调整范围。所有调整策略需通过数字化平台进行模拟测算，分析策略实施后造价变化，确保策略可行性。

4.4 执行反馈环节：构建动态跟踪与效果评估的闭环体系

执行反馈环节是确保调整策略落地见效重要环节，需对策略执行过程进行实时监控，并且要评价执行效果：在策略执行跟踪方面，利用数字化平台将调整策略拆分成具体任务，分发到相应部门和责任人，实时跟进任务完成进度，比如将“改进沥青采购计划”这个任务分为采购部门，跟进采购合同签订情况以及材料进场时间；在效果评定方面，在策略执行后，再次收集有关数据，将执行前后造价差异变化进行比较，以此来评估策略有效性，实行沥青采购改善策略后，若沥青成本偏差由原来+4%降低到+1%，那么就可以认为该策略是有效的；在机制改进方面，如果策略执行效果达不到预期（偏差仍然没有减小），就需重新分析偏差原因，对策略进行调整或优化数据采集、偏差分析环节参数（偏差预警阈值、归因算法等），形成闭环优化，确保机制适应性和科学性^[4]。此外，需要建立多部门协同反馈渠道，定期召开跨部门复盘会议，共享执行数据、经验教训。经由案例库搜集典型问题的解决办法，给后续类似策略改良给予参照，不断改善路面抗滑检测及改良工作的一般水平。

5 机制运行的保障措施

5.1 技术保障：加强数字化计量技术的集成与适配

一方面，需增加大数据技术集成投资，提高其与合同计量场景的适配性，保证模块精准交互核验、合同清单数据，满足计量审核需求；另一方面，开发高速 EPC 专用数字平台，改变数据采集频率和算法，根据计量关键点位优化，覆盖计量核心环节和施工全过程；此外，加强技术培训，提高项目团队数字化操作水平，发挥好技术工具的作用。

5.2 组织保障：建立跨部门协同的造价管控组织架构

通过成立设计、采购、施工、造价、技术等部门成员组成造价动态控制小组，确定各部门在数据采集、偏差分析、策略执行等方面职能分工，防止重复和遗漏；同时，建立定期联合会议制度，使用数字化平台开展线上会谈，即时共享造价偏差情况和对策方案，确保信息一致性；此外，健全绩效考核机制，将造价控制成效列入部门以及个人绩效考核指标中，促使团队参与动态调整。

5.3 风险保障：构建数字化造价风险防控体系

首先，创建造价风险数据库，利用数字化平台收集高速 EPC 项目历史造价风险案例（材料价格大幅波动、地质条件突然变化等），为风险预估提供参照；其次，利用数字化平台开展风险模拟，在项目开始前模拟各种风险因素对造价产生影响，制定相应风险应对措施；最后，加强数据安全管理工作，采用区块链技术对造价数据进行加密，防止数据泄露或者被篡改，确保数据真实性、完整性和安全性。

6 结语

本文以数字化计量技术优势为基础，针对高速 EPC 项目造价控制中痛点，构建数据采集、偏差分析、策略生成、执行反馈造价动态调整闭环，确定各个阶段主要内容和相应技术支持，并提出技术、组织、风险三个方面保障措施。将造价控制由静态核算变成动态调节，使控制更加及时准确。后续就人工智能算法在偏差归因以及策略生成应用展开研究，利用机器学习来改进模型；结合具体实践来验证机制可行性有效性，完善细节，形成可以复制推广经验。

参考文献

- [1] 马一格.公路工程造价动态调整机制及优化方法研究[J].汽车周刊,2025,(12):214-216.
- [2] 黄晓梅.建筑工程造价管理中数字化技术的应用[J].重庆建筑,2025,24(09):36-39.
- [3] 孙鲁楠,董通,任泽俭.建筑工程造价审核中材料价格动态调整机制探讨[J].建筑与预算,2025,(07):37-39.
- [4] 黎文琴.数字化转型的建筑工程造价精细化管理策略[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(02):139-141.

Comparison and Optimization of Anti-skid Test Methods for High-speed Asphalt Pavement

Yan Sun

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

The anti-skid performance of highway asphalt pavements directly determines traffic safety, and the scientific accuracy of testing methods critically impacts pavement quality. This study systematically compares core anti-skid performance indicators, evaluating mainstream testing methods—including pendulum friction coefficient measurement, dynamic friction testing, and construction depth determination (manual sand-laying method and laser construction depth meter method)—in terms of their operational mechanisms, technical features, and application scenarios. A comprehensive analysis is conducted on each method's advantages and limitations regarding detection precision, operational efficiency, and environmental adaptability. Considering the complex service environments and diverse traffic loads of highway asphalt pavements, the paper proposes optimization strategies focusing on method combination, equipment upgrades, and standardized testing procedures. These recommendations provide theoretical support and practical references for enhancing the reliability and engineering applicability of anti-skid performance testing in asphalt pavement systems.

Keywords

highway; asphalt pavement; slip resistance; test and detection method; comparative analysis

沥青路面抗滑性能试验检测方法对比和优化

孙艳

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 中国·云南昆明 650000

摘要

高速公路沥青路面抗滑性直接决定行车安全, 试验检测方法是否科学、准确直接影响到路面的使用质量。本文从路面抗滑性能核心指标入手, 对摆式摩擦系数测定法、动态摩擦测试法、构造深度测定法(手工铺砂法、激光构造深度仪法)等主流检测方法的原理机制、技术特点、适用场合进行系统比较, 对各种方法在检测精度、操作效率、环境适应性等方面的优缺点进行深入分析。根据高速公路沥青路面服役环境复杂、行车荷载多样的实际情况, 从检测方法组合优化、设备技术升级、检测流程规范化三个方面提出优化路径, 为提高沥青路面抗滑性能检测的可靠性、工程应用价值提供理论支持和实践参考。

关键词

高速公路; 沥青路面; 抗滑性能; 试验检测方法; 对比分析

1 引言

高速公路是交通运输的重要枢纽, 沥青路面由于平整度高、施工速度快等优点成为高速公路的主要结构形式, 但由于长期受到行车荷载和环境因素的影响, 抗滑性能会逐渐下降, 造成雨天侧滑等安全问题, 据估计超过 30% 的雨天交通事故是由这些原因导致的。路面抗滑性能取决于宏观构造与微观纹理, 现有的检测方法由于原理、技术存在差异, 因此表现出的相关性、适用性也不一样, 有些还存在操作复杂的弊端。因此, 系统比较各种主流检测方法的特性, 确定适用边界和局限性并提出优化方案, 对于提高检测精度、确保行车安全有着重大意义。本文通过系统对比与优化研究,

为路面抗滑检测实践提供更科学的技术指引。

2 高速公路沥青路面抗滑性能核心指标

沥青路面抗滑性能的评价要依靠量化指标来完成, 主要指标有摩擦系数和构造深度, 二者从不同角度体现路面抗滑能力, 一起形成抗滑性能评价体系。

摩擦系数是轮胎与路面接触时产生的切向摩擦力与法向压力之比, 直接体现路面抵抗轮胎滑动的能力, 是评价路面抗滑性能最重要的指标。根据测试条件的不同分为静态摩擦系数和动态摩擦系数, 动态摩擦系数更接近于车辆行驶过程中实际的工况, 更能真实的反映车速、路面湿度等对防滑性能的影响, 在高速公路路面检测中应用较多。

构造深度是路面表层凹凸不平的宏观纹理深度, 能体现路面对水分的截留作用, 间接影响摩擦系数的有效发挥。路面构造深度不够时, 雨天行驶容易产生水膜, 造成轮胎和

【作者简介】孙艳(1990-), 女, 中国云南普洱人, 本科, 工程师, 从事公路工程试验检测研究。

路面脱离,产生水漂现象,大大降低抗滑性能;合理的构造深度可以迅速排出接触面的雨水,确保轮胎和路面的有效接触,保持良好的抗滑效果。因此构造深度和摩擦系数一起决定沥青路面抗滑服役性能。

3 主流抗滑性能试验检测方法对比分析

3.1 摩擦系数检测方法

3.1.1 摆式摩擦系数测定法

摆式摩擦系数测定法是根据摆锤的摆动原理来测定的静态检测方法,模拟轮胎与路面的滑动摩擦过程,测量摆锤底部橡胶片在路面上滑动时的摩擦阻力,从而换算出路面的摩擦系数(BPN值)。该法的优点主要是设备结构简单,操作方便,成本低,既可进行室内试验又可用于现场局部检测,适合对路面局部破损、抗滑性能异常区等进行定位。

摆式摩擦系数测定法存在明显缺陷:第一,测试过程是静态的,不能反映车辆行驶时的动态摩擦特性,测试速度只有2.5km/h,和高速公路实际行车速度(60~120km/h)相差较大,检测结果与实际抗滑性能偏差大;第二,橡胶片的材质、硬度、磨损情况都会对测试结果产生很大影响,需要经常更换校准,否则容易造成系统误差;第三,受环境因素影响大,雨天、路面有积水或者灰尘时都会导致检测结果的差异性,且路面的表面温度不同也会使检测结果出现差异;第四,人为影响因素大,试验操作人员在仪器的调平、洒水量的大小、释放摆锤的力度和方式等都会对检测结果产生影响,且不同的操作人员之间存在系统系的偏差,而且检测范围有限,不能反映路面抗滑性能的整体分布特征。

3.1.2 动态摩擦测试法(DFT)

动态摩擦测试法是以动态摩擦原理为基础的一种新的检测方法,以20km/h到80km/h的速度驱动测试轮在路面上滚动,同时施加一定大小的法向力来测量轮胎和路面之间动态摩擦系数。该方法可以模拟不同的行车速度,获得更贴近实际行车工况的路面抗滑性能测试数据,检测效率高,可以实现连续式检测,能反映整个路段路面抗滑性能的空间变化规律。

动态摩擦试验法的优点主要有三点:第一,试速可调,可以观测车速变化对摩擦系数的影响,给不同的路段抗滑性能的评价提供更为准确的数据参数;第二,采用真胎或模拟轮胎材料进行实验,试验结果相关度高;第三,较强的环境适应性,在路面轻微积水、潮湿等条件下都能正常工作,适合各种天气下现场检测。但是该方法也存在不足之处,设备购置成本高,操作复杂,对操作人员的技术要求高;测试过程中受路面平整度影响较大,路面存在明显的起伏或者坑槽时,容易造成法向压力不稳定,影响检测精度。

3.2 构造深度检测方法

3.2.1 手工铺砂法

手工铺砂法是传统的构造深度检测方法,将一定体积

的标准砂均匀铺在路面上指定区域,测量砂粒覆盖的面积,用体积和面积的比值来计算构造深度(TD)。操作简单、设备成本低,不需要复杂的仪器,在基层养护、低等级公路检测中应用较多。

手工铺砂法存在明显的不足之处:首先,受人为因素影响很大,砂粒的铺洒均匀度、面积测量的准确程度显著影响检测结果的精度,不同操作人员的检测结果偏差可达15%以上,检测结果重复性较差;其次,检测效率低,每次检测需要单独划定区域、铺砂、测量,不能实现连续检测,不能反映路面构造深度的整体分布;再者,受路面杂物、积水的影响较大,检测前必须先清理路面,否则会导致检测结果失真。

3.2.2 激光构造深度仪法

激光构造深度仪法属于一种基于激光测距原理的新型检测方法,借助激光传感器对路面表面进行快速扫描,得到路面微观纹理的三维坐标数据,再通过图像处理技术来算出构造深度。该方法主要优点有:第一,检测效率高,可以实现连续性快速检测,在交通不受影响的情况下完成全路段检测;第二,检测精度高,激光传感器的测距精度可达0.01mm,能够准确捕捉到路面微观纹理特征,而且避免了人为操作误差;第三,数据处理自动化程度高,可以实时生成构造深度分布图谱,方便以后的分析评价。

激光构造深度仪法也存在一些局限性:一是设备购置和维护成本高,对基层检测单位的资金实力要求较高;二是受路面污染物影响较大,当路面存在油污、浮尘等覆盖物时,会遮挡激光信号,造成检测结果偏差;三是对检测环境的光照条件有一定要求,强光或者逆光环境下会影响传感器的信号接收精度。

3.3 各方法综合对比

从上面可知,传统的检测方法(摆式摩擦系数测定法、手工铺砂法)虽然检测成本低,操作简单,但是检测精度低,检测效率低,检测受人为因素和环境因素影响大,适合局部排查、基层养护和低等级公路检测;新型检测方法(动态摩擦测试法、激光构造深度仪法)检测精度高、检测效率高、检测数据代表性高,更适合高速公路全路段、精细化检测,但是设备成本高、技术门槛高。各方法的核心特性比较见表1。

4 抗滑性能试验检测方法优化策略

4.1 检测方法组合优化

为了克服单一检测方法的不足,应该用传统方法和新型方法相结合的方式来进行检测,达到优势互补。高速公路日常养护检测主要采用动态摩擦测试法、激光构造深度仪法,对全路段实施连续式检测,迅速取得路面抗滑性能的整体散布数据;对于检测过程中发现的抗滑性能异常地段,比如摩擦系数或者构造深度低于规范阈值的路段,使用摆式摩擦系数测定法和手工铺砂法开展局部精细复核,准确找到破

损的位置和程度。

同时,根据检测目的、场景选择合适的检测方法:新建高速公路竣工验收时,采用动态摩擦测试法(多速度梯度)、激光构造深度仪法,对整个路面抗滑性能的均匀性、稳定性进行评价;雨天事故多发路段专项检测时采用动态摩擦测试法,模拟不同车速、湿度条件下抗滑性能,为养护改造提供针对性数据;资金较紧张的基层养护单位采用“摆式

摩擦系数测定法+手工铺砂法”组合方式满足基本检测需求。此外,可以将人工智能算法嵌入到组合检测模式里,用以前的检测数据进行机器学习,建立路面抗滑性能预测模型,提前预知风险路段。同时,加强不同的检测方法数据的相互校对,创建多维度的评价体系,将动态检测得到的宏观数据同静态检测的微观数据融合起来,从而产生可视化抗滑性能热力图,为养护决策赋予更加直观的参照。

表1 主流抗滑性能检测方法综合对比

检测方法	核心优势	主要局限	适用场景
摆式摩擦系数测定法	操作简单、成本低廉、设备便携	静态检测、精度低、效率低、人为误差大	局部排查、室内试验、无需刻槽的水泥路面、低速交通区
动态摩擦测试法	动态模拟、精度高、效率高、连续检测	设备成本高、技术门槛高、受平整度影响	高速公路全路段检测、精细化评价
手工铺砂法	操作简单、成本极低、无需复杂设备	精度低、效率低、人为误差大、无法连续检测	局部检测、基层养护、应急排查
激光构造深度仪法	精度高、效率高、连续检测、自动化程度高	设备成本高、受污染物影响、光照敏感	高速公路全路段检测、大数据分析

4.2 检测设备技术升级

改善设备核心部件的性能:就动态摩擦测试法来说,改进测试轮的悬挂系统,采取自适应减震技术,确保法向压力稳定;针对激光构造深度仪,改良激光传感器的信号处理算法,加强抗干扰性能,削减光照、污染物对检测精确度的影响;对摆式摩擦系数测定仪的橡胶片材质加以改进,运用更接近实际轮胎的耐磨、抗老化材料,从而增长使用寿命并改善测试结果的相关性。通过这些优化措施,能够显著提升检测设备在复杂环境下的适应性与准确性。

推进设备集成化、智能化:研发可同时检测摩擦系数、构造深度、平整度等多个指标的集成检测设备,一次检测得到多个数据;采用GPS定位技术、无线传输技术,实现检测数据实时上传;利用云端大数据分析平台,对路面抗滑性能实施动态监测、预警;增添设备自动校准功能,减小人为操作造成的误差,确保检测结果精准。最终构建起智能化、高效化的路面抗滑性能检测体系,为高速公路安全运营提供有力保障。

4.3 检测流程规范化

制定统一的检测标准:对每一个检测方法的操作流程、设备参数、环境要求、数据处理方式等进行规定,以消除由于操作不规范导致的检测偏差。例如规定动态摩擦测试法的测试速度梯度为20km/h、40km/h、60km/h,法向压力为 $200N \pm 10N$;明确激光构造深度仪检测间距不大于5m、路面清理要求无明显污染物、积水等。

加强检测人员培训:建立专业的检测人员培训体系,包含设备操作、数据处理、误差分析等内容,使检测人员掌握好各个方法的要点和注意事项;定期开展技能考核、比对试验,提升检测人员的综合素质以及规范性操作能力,降低

人为因素给检测结果造成的影响。

完善质量控制体系:检测之前对设备进行全面校准,确保仪器性能满足检测要求;检测过程中设置平行样检测(每公里不少于3个平行样),检验数据的重复性;检测之后对数据进行异常值剔除和合理性分析,结合路面实际状况(破损、积水等)修正检测结果,确保数据的真实性、有效性。

5 结语

高速公路沥青路面抗滑性能检测关系到行车安全,不同的检测方法各有优劣:摆式摩擦系数测定法、手工铺砂法适用于局部排查和基层养护,精度和效率较低;动态摩擦测试法、激光构造深度仪法虽然符合全路段精细化检测的要求,但是设备成本较高、技术门槛较高。采用检测方法组合优化、设备技术优化、检测流程标准化的三维策略,提高检测的精度、效率和可靠性。未来可利用人工智能、大数据等技术推进智能化发展,建设动态评价与预测模型,为养护决策提供科学依据。

参考文献

- [1] 宋丽萍.高速公路沥青路面抗滑性能分析[J].交通企业管理,2025,40(04):107-109.
- [2] 韩凯.高速公路路面抗滑表层施工技术及其施工质量管理[J].四川建材,2024,50(07):65-67.
- [3] 郝文斌.高速公路沥青路面使用性能指标相关性分析[J].山西交通科技,2024,(05):86-90.
- [4] 樊向阳,曹林辉,陶斯和,等.高速公路沥青路面运营早期抗滑性复测指标竣工评定标准[J].公路,2024,69(10):29-36.
- [5] 蒋建飞,赵跃,郭阳阳,等.高强韧抗滑磨耗层在高速公路沥青路面养护中的应用[J].交通节能与环保,2025,21(01):180-184.

Safety Management and Risk Control of Aircraft Maintenance Operations

Danpeng Zhu

Maintenance Engineering Department of Beijing Airlines Co., Ltd., Beijing, 100076, China

Abstract

In response to the challenges of maintenance safety in the context of the rapid increase in global air transportation volume, this article will combine the characteristics of aviation maintenance accidents and the practical application of AI technology to construct a safety management system with intelligent prevention, resilience guarantee, and closed-loop control. By relying on innovative measures such as integrated AI fault diagnosis, regional supply chain, and digital twin training, the proactive interception rate of faults has been significantly improved, and the occurrence rate of human errors has been reduced. And rely on actual cases to verify the feasibility and effectiveness of relevant security management measures and risk control paths. According to research results, the integrated strategy of integrating digital technology and resilience management can break through the bottleneck of traditional maintenance safety and provide reference for the aviation industry to achieve the goal of “zero deaths”.

Keywords

aircraft maintenance operations; Safety management; digital twin risk control

航空器维修作业的安全管理与风险控制

朱丹鹏

北京航空有限责任公司机务工程部, 中国·北京 100076

摘要

为应对全球航空运输量激增背景下的维修安全挑战, 文章将结合航空维修事故特征以及AI技术应用实践, 构建智能预防、韧性保障、闭环控制的安全管理体系。依靠集成AI故障诊断、区域化供应链、数字孪生培训等创新措施, 大幅提升故障主动拦截率, 降低人为差错发生率。并依靠实际案例, 验证相关安全管理措施与风险控制路径的可行性与有效性。根据研究结果显示, 融合数字化技术、韧性管理的一体化策略, 可破解传统维修安全瓶颈, 为航空业实现“零死亡”目标提供参考依据。

关键词

航空器维修作业; 安全管理; 数字孪生; 风险控制

1 引言

航空器是集成航空电子、动力系统等多领域技术的运载工具, 具有人员运输、物流配送等功能, 是全球交通网络的关键枢纽。但由于航空器的精密化程度较高、系统关联性强, 随着新型技术的高度普及, 传统经验型维修策略已逐渐无法适配。而维修安全关乎飞行安全, 一旦因操作疏漏、故障误判引发事故, 不仅会造成重大生命财产损失, 还会破坏航空业公信力。为此, 文章将全面梳理维修难点、构建高效的的安全管理与风险控制体系。

2 航空器维修作业的安全管理与风险控制必要性分析

航空器的安全运行离不开各系统的协同工作, 它对可靠性与安全性有极致要求。而航空器维修作业则是依据“航空器维修单位合格审定规定”, 对航空器及部件开展的维护、检修、检测与故障修复工作, 核心内容包括: 航线维修, 包括航班间隙的快速检查与小故障排除; 基地维修, 定期深度检修, 进行机身腐蚀处理、发动机拆换; 部件维修, 是指对航电设备、起落架等关键部件的专业修复。

之所以要开展航空器维修的安全管理与风险控制工作, 根源在于若维修中存在疏漏, 比如部件安装偏差、故障误判, 很可能引发发动机失效、起落架故障等致命问题, 严重危及机上人员生命, 并造成巨额财产损失。且航空器技术复杂度高、维修场景多样, 本身存在多重风险点, 唯有通过系统的安全管理与风险控制, 才能筑牢飞行安全防线。

【作者简介】朱丹鹏(1986-), 男, 中国北京人, 本科, 助理工程师, 从事民用航空器维修维护与定检放行研究。

3 航空器维修作业安全管理创新措施

3.1 构建智能预防型维修体系

3.1.1 AI 驱动的故障诊断与预警系统

航空企业可引入重复故障自动化识别系统,设计智能故障筛查程序,基于 BERT 预训练模型与余弦相似度算法,优先整合过去几年维修记录,将其集中存储在数据库以及云服务器,形成故障语料库。之后对新故障报文进行分词、词性标注,提取故障现象、部件、处置方案等特征。通过系统自动计算与语料库中历史故障的相似度,从专家库中匹配最优解决方案。

同时,航空企业还可积极参考其他企业的成功案例,比如借鉴苏南瑞丽航空经验,在飞机状态监控系统中嵌入 Deep Seek 维修知识库,实现告警、解读、方案闭环。当系统发出告警,比如液压系统压力低时,系统可在 10 秒内解析告警代码对应的故障部位,比如液压泵 A,调取该部件的历史故障频率,再推送标准化处置流程,含工具清单、操作视频,以此缩短故障响应时间,降低紧急故障处置延误率。

3.1.2 数字孪生维修模拟与验证

为更好地应对极端环境下的维修挑战,航空企业可搭建覆盖主流机型的数字孪生平台,通过 Unity3D 引擎还原高温(50℃)、高海拔(4500 米)等极端场景,维修人员通过佩戴 VR 设备进行沉浸式操作训练,比如高原机场发动机拆装等。并进一步结合 Graph RAG 技术构建安全信息知识图谱,将故障数据转化为关联图谱,比如起落架轴承磨损→液压系统压力下降→刹车失效,通过图神经网络挖掘隐含关联,提前预判连锁风险。最后,还要在数字孪生平台中模拟维修方案的执行效果,比如针对发动机燃烧室积碳问题,可在虚拟环境中测试高压气吹+化学清洗或是激光除碳两种方案的实际效果,对比积碳清除率、部件损伤风险等指标,选择最优方案落地。

3.1.3 量子传感实时监测网络

航空企业可提前部署量子传感网络,旨在针对发动机叶片、机身结构等关键部位,实现毫米级精度监测。量子传感器可通过检测量子态变化,捕捉部件振动频率、应力分布的微小异常,将检测结果经 5G 专网实时传输至地面中心,系统能提前 140 小时预警失效风险。

3.2 打造韧性供应链安全保障

3.2.1 区域化供应链重构与布局

航空企业要尽快推行关键部件的本地化生产,参考波音、空客“三地 3D 打印中心”模式,创建关键部件 3D 打印基地,聚焦发动机核心机匣、起落架轴承等易断供部件,采用钛合金粉末床熔融技术,实现 72 小时快速生产与供应。结合备件储备库,由航司总部储备高频更换部件,比如密封圈、滤芯,区域中心储备关键部件,比如发动机模块、起落架。并搭配 SAP 库存管理系统,动态监控库存,自动触发补货,

以此降低航空企业的备件短缺率。

3.2.2 区块链溯源与备件共享机制

在做好区域化供应链布局的基础上,航空企业还要设置全生命周期区块链溯源机制,积极开发区块链平台,将维修备件的生产、运输、维修全流程数据上链,保证数据不可篡改且实时可查。乘客可依靠航空公司 APP 输入航班号,查询该飞机发动机、起落架等关键部件的检测记录,提升安全信任度,而监管部门可通过平台追溯问题备件流向,避免因安全问题引发的飞机停场^[1]。

3.3 强化人员能力与安全文化建设

一方面,航空企业要致力于开发覆盖核心维修场景的 VR 培训系统,包括发动机拆装、液压系统调试等,借助触觉反馈设备,模拟螺栓拧紧力矩、部件重量触感,还原真实维修环境中的物理阻力,以此提高人员专业能力的培训效果。并将维修手册拆解成海量知识点,关联故障案例、操作视频。使维修人员在现场作业时,可直接通过 AR 眼镜扫描部件,系统会自动推送该部件的维修要点,比如润滑脂型号、安装间隙标准。

另一方面要保证安全责任与激励机制落地,企业应建立维修人员电子诚信档案,记录关键部件维修的操作时间、使用工具、签字确认记录,与个人资质等级、晋升通道直接挂钩。若某部件在设计寿命内发生非意外故障,可追溯至初始维修人员,对违规操作实行“资质降级+专项培训”处罚,对连续 5 年无差错人员,则提供薪资上浮、优先参与新技术研发等激励。鼓励维修人员上报隐性风险与改进建议,对被采纳的建议,按经济效益给予 500-50000 元奖励。

3.4 完善全流程应急响应机制

航空企业需设计分级应急处置体系,按故障影响范围与严重程度,将维修应急事件划分:一般事件,单一部件故障,比如客舱照明失效,此类事件不影响飞行安全,处置时限 24 小时内;重大事件,表现为关键系统故障,比如液压系统泄漏,需停场维修,处置时限 6 小时内;特别重大事件,核心部件失效,比如发动机叶片断裂,可能引发事故,处置时限 1 小时内。

4 航空器维修作业风险控制闭环路径

4.1 风险识别

航空企业可基于人为因素分析与分类系统、故障模式与影响分析机制,构建风险清单,并建立季度更新机制。之后依靠空-地-人三位一体数据采集网络,通过飞机快速存取记录器系统,采集飞行参数,包括发动机 EGT 温度、起落架收放压力等,并将采集结果传输告警报文。结合维修场地部署的智能监测传感器、环境传感器,确保数据可通过边缘计算节点实时上传。由维修人员通过 AR 眼镜记录操作过程,配备智能手环采集心率、步数等生理数据,分析工作负荷与疲劳程度,以此识别人为操作风险^[2]。

4.2 风险评估

航空企业可通过设计可能性 - 影响程度二维矩阵, 划分风险等级, 基于 XG Boost 算法, 设计风险评估模型, 输入特征变量, 包括: 部件属性(寿命剩余率、历史故障次数); 操作因素(维修人员资质等级、近期工时); 环境因素(维修场地温湿度、航班周转压力)。该模型可根据历史故障数据训练, 保证风险等级预测准确率超过 80%。应用时, 系统会自动输入实时数据, 并在 10 秒内输出风险值与等级, 辅助管理人员决策。

4.3 风险处置

对于重度风险来说, 应在接到预警后, 10 分钟内启动应急小组, 通过视频会议制定处置方案。并在 30 分钟内完成关键部件调拨、协调机场提供专用维修机位、安排备用飞机保障旅客; 之后, 采用“双人复核”制度, 关键步骤, 比如部件安装、压力测试, 需 2 名持证工程师签字确认, 维修过程全程录像, 实时传输至监管部门。待完成维修后, 先进行地面测试, 比如发动机冷转, 再执行 2 小时本场试飞, 确认无故障后申请复航。

对于中度风险来说, 要在 24 小时内出具整改方案, 方案需同步抄送质量控制部与监管机构, 接受全程监督。以某航司针对“A320 液压系统泄漏”风险为例, 该企业在 24 小时内制定方案, 明确由液压组牵头, 48 小时内完成密封件更换与压力测试, 验证标准细化至“静态压力衰减低于 0.2MPa/小时”。同时在整改期间, 可采用“替代技术 + 负荷控制”的保障机制, 比如液压系统故障未修复前, 可启用备用液压泵, 限制航班执飞高原等特殊航线。或是在起落架异响整改期间, 减少飞机最大起飞重量 10%, 降低部件负荷。

对于轻度风险, 则可将其纳入日常巡检 + 定期复查管理体系, 由维修人员每日航班间隙检查, 比如确认客舱灯光亮度、供水压力, 每周提交监测报告。同时, 还要定期组织照明线路绝缘测试、供水管道密封性检查, 避免低风险累积升级。

4.4 技术迭代与标准更新

针对 AI、量子传感等新技术应用中的问题, 每半年更新一次智能维修技术操作手册, 比如对于量子传感器在高温环境数据漂移问题, 可补充温度补偿算法参数。对于 AI 故障诊断对新型电动飞机电池故障识别率低的问题, 可新增电池故障样本训练模型。同时, 企业也要紧跟新型航空器研发进度, 建立维修标准同步制定机制, 在飞机研发阶段, 派维修工程师参与技术研讨, 提前梳理维修难点^[3]。

5 案例验证

5.1 案例背景

为验证上述方法的可靠性与有效性, 文章以某航工程技术公司作为研究对象, 根据调查显示, 该公司承担 54 架

飞机的维修保障任务, 并面临三大维修痛点: 一是安全信息人工分析效率低, 风险预警滞后; 二是人为差错占比高; 三是供应链响应慢。为解决上述问题, 该企业决定引入本文提出的智能预防 - 韧性保障 - 闭环控制体系, 实现安全管理全面升级。

5.2 核心实施措施

首先该企业搭建基于 BERT 模型的故障筛查平台, 接入近 5 年维修记录, 覆盖发动机、起落架等系统。保证日均处理数据时间缩短至 0.5 小时, 重复故障识别准确率超过 96%。结合数字孪生模型, 开发高风险维修场景的 VR 培训模块, 将新员工培训周期缩短至 1.5 个月, 实操失误率降至 11%。依靠虚拟测试发现潜在隐患, 提前调整维修方案。

其次该公司在工程基地建设中部航空备件枢纽, 储备发动机模块、起落架等关键备件, 用以压缩关键备件调拨时间。并将相关数据信息接入航旅安全链平台, 实现备件全生命周期溯源, 在精准拦截不合格产品的同时, 也能让乘客通过 APP 查询备件信息, 从而提高对航空公司的信任度与满意度。

最后, 该公司部署数据实时传输系统、维修场地智能监测传感器, 并为维修人员智能手环, 形成空 - 地 - 人数据链, 以此动态完成风险识别, 将风险响应时间从以往的 1 小时缩短至 10 分钟。通过严格落实三级风险处置流程, 缩短风险处置时间, 保证整改一次通过率达到 94%。

5.3 实施效果

根据研究结果显示, 在采用安全管理策略与风险控制路径的 6 个月, 项目基地实现维修差错率大幅度降低, 航班延误率降至 2.8%, 备件短缺率不足 3%, 故障主动拦截率升至 99%, 证明文章本文提出的安全管理体系具有一定的推广价值。

6 结语

综上所述, 通过对航空器维修作业的安全管理策略与风险控制路径开展分析讨论, 利用 AI 诊断、数字孪生重构技术预防维度, 解决隐性故障漏检难题。凭借区域化供应链与区块链溯源强化外部韧性, 破解备件短缺瓶颈。结合识别、评估、处置、迭代的闭环机制, 实现风险全周期管控。根据实践案例验证结果显示, 该体系可将故障主动拦截率提升至 99%, 并从以往的事后补救转变为事前预防, 以此为航空维修安全提供极具实践可操作性的解决方案。

参考文献

- [1] 张婧.民用航空器维修质量管理探讨[J].中国设备工程,2024,(20):45-47.
- [2] 李伟,胡腾飞,刘鹏飞,等.预防性维修在航空维修中的应用[J].中国军转民,2024,(19):48-49.
- [3] 姜汇洋.航空器仪表电子设备维修管理分析[J].飞机设计,2023,43(05):77-80.

Application and Research of the Double-Station Method Linked Triangle Measurement Technology

Jianmin Gao

China Railway No.11 Engineering Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract

In recent years, the construction progress of urban subways has been accelerating continuously, and the length of interval tunnels has been extending. The accuracy of the underground control network in long-distance construction directly affects the quality of shield tunneling construction. The traditional single-shaft orientation survey method can no longer meet the requirements for high precision and high efficiency. Therefore, this paper obtains sufficient redundant observation data by reasonably increasing the number of ground and underground near-well point layouts to offset the accidental errors in the survey process and improve data reliability. Subsequently, a rigorous adjustment calculation is carried out to solve the coordinates and azimuth angles of the underground near-well points. This method is simple to operate and efficient in calculation, and its precision meets the control requirements of subway construction. It provides reliable technical support for long tunnel construction and greatly facilitates the control survey work of subway construction.

Keywords

Subway construction survey; Single-shaft orientation; Connecting triangle

双测站法联系三角形测量技术的运用与研究

高健民

中铁十一局集团有限公司, 中国·湖北 武汉 430074

摘 要

近年来, 城市地铁建设进程持续加快, 区间隧道长度不断延伸, 长距离施工中地下控制网的精度直接影响盾构施工质量, 传统一井定向测量方法已难以满足高精度、高效率的需求。为此, 本文通过合理增加地面及地下近井点布设数量, 获取充足的多余观测数据, 抵消测量过程中的偶然误差, 提升数据可靠性; 随后进行严密平差计算, 解算地下近井点的坐标与方位角。该方法操作简便、计算高效, 且精度满足地铁施工控制要求, 为长隧道施工提供了可靠技术支撑, 极大便利了地铁施工控制测量工作。

关键词

地铁施工测量; 一井定向; 联系三角形

1 引言

随着我国城市化进程的深度推进, 地铁建设规模不断扩大, 隧道施工逐渐向长距离、大埋深方向发展。地下控制网作为盾构掘进、线路铺设的基准保障, 其精度直接决定了隧道贯通误差是否在允许范围内, 进而影响地铁运营后的行车安全与舒适度。传统一井定向测量仅依赖单个地面近井点与竖井内两根悬挂钢丝构成单一联系三角形, 由于观测数据冗余度不足, 难以有效抵消测量过程中仪器误差、环境干扰(如竖井内气流扰动、温度波动)等带来的偶然误差, 且解算过程中缺乏独立检核条件, 一旦出现数据偏差易导致后续施工偏差。若要提升传统方法的精度, 需反复增加观测次数, 不仅延长了作业周期(单次额外观测需增加 2-3 小时作业时

间), 还增加了人力与设备成本, 已无法适配现代地铁长隧道施工对高效高精度测量的迫切需求。

2 测量步骤

在实施联系测量作业前, 需先依据《城市轨道交通工程测量规范》(GB 50308-2017)中精密导线测量的精度标准, 完成地面控制点坐标向竖井的引测工作。具体操作是在井口附近地势平坦、视野开阔且远离振动源(如施工机械、车辆通行道路)的区域, 布设并埋设 JJ1、JJ2 两个近井点(点位分布详见图 1), 近井点采用混凝土浇筑固定, 埋深不小于 0.8m, 顶部安装强制对中装置, 再通过 I 级全站仪按精密导线测量流程测定这两个近井点的精确坐标, 坐标中误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。

首先在竖井内悬挂两根测量钢丝(记为 GS1 与 GS2), 为提升后续计算精度, 需尽可能增大两根钢丝之间的间距(最大可至竖井断面宽度的 80%), 并在每根钢丝的上部(距

【作者简介】高健民(1989-), 男, 中国湖北荆州人, 本科, 工程师, 从事地铁盾构施工研究。

井口 1.5m 处)与下部(距井底 0.5m 处)位置粘贴圆形高反射率反射片(直径 50mm,反射率 ≥ 90%),反射片粘贴时需确保表面平整且与钢丝轴线垂直,避免因反射信号偏移导致测距误差超过 1mm。

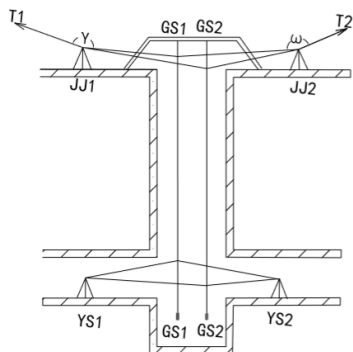


图 1 两点法—井定向示意图

第二步,分别将全站仪安置于近井点 DJ1 和 DJ2 上,完成仪器对中(对中误差 ≤ 0.5mm)与整平(整平误差 ≤ 2")后,参照城市轨道交通工程精密导线测量流程开展观测:一方面测量后视方向(选取地面已知高精度控制点 T 作为后视点)与 GS1、GS2 连线之间的水平角,另一方面直接测量测站点到 GS1、GS2 反射片的直线距离。观测过程中需实时关注环境因素,避开强风(风速超过 5m/s 时暂停观测)、强光(正午阳光直射时需搭建遮光棚)时段,若遇温度骤变(1 小时内温差超过 5℃)需暂停观测,待仪器与环境温度稳定后再继续,减少环境干扰对测量数据的影响。

第三步,完成双测站(DJ1、DJ2)的角度与距离数据采集后,运用双测站极坐标测量原理,结合地面已知控制点的坐标与方位角,对两根钢丝 GS1、GS2 在地面坐标系中的三维坐标(x、y、z)进行解算,最终得到其精确坐标值,坐标解算误差需控制在 ± 1mm 以内。

(1)布网要求:在布设联系三角形时,需遵循以下规范:①竖井中沿线路方向布置悬挂的钢丝 GS1-GS2 的距离应尽可能长,最长可达竖井断面允许的极限间距,以提升三角形图形强度,减少角度观测误差对坐标解算的影响;②联系三角形的连接角(即近井点与钢丝连线形成的夹角)宜小于 1°,呈直伸三角形,确保观测角度的敏感性与解算精度;③近井点 DJ1、DJ2 到钢丝间最短的距离与最长距离的比值宜小于 1.5,避免因距离差异过大导致误差放大;④悬挂钢丝的直径宜为 0.3mm,选用高强度碳素钢丝(抗拉强度 ≥ 1800MPa),兼具强度与柔韧性,可减少自重下垂带来的误差;悬挂 10kg 锤球(锤球材质为铸铁,表面光滑无锈蚀),锤球应浸泡在阻尼液中,阻尼液可选用机油或专用阻尼剂,有效抑制钢丝因气流扰动产生的摆动,保证钢丝处于稳定铅垂状态。

(2)作业限差:为确保测量数据精度,作业过程中需严格控制以下限差:①角度测量采用 I 级全站仪(测角精度 ≤ ± 1",测距精度 ≤ ± (1mm+2ppm × D))方向观测法观

测六测回,每测回之间需重新对中整平,测角中误差应小于 ± 1";②距离观测应独立观测三个测回,每测回读数三次,各测回较差应小于 1mm,三次读数平均值作为该测回的距离观测值;③地上、地下丈量钢丝 GS1-GS2 间距的较差应小于 1mm,确保上下观测数据的一致性;④若采用钢尺量距,应采用检定时的标准拉力,并进行倾斜改正、温度改正、尺长改正,确保距离测量的准确性。

(3)内业计算:钢丝 GS1、GS2 的坐标计算公式为:

$$\begin{aligned} x_{GS1} &= x_{DJ1} + S_{DJ1-GS1} \cos \alpha_{DJ1-GS1} \\ y_{GS1} &= y_{DJ1} + S_{DJ1-GS1} \sin \alpha_{DJ1-GS1} \end{aligned}$$

式中:SDJ1-GS1 为 DJ1-GS1 边的平均观测值(取三个测回距离观测值的平均值);

$\alpha_{DJ1-GS1}$ 为 DJ1-GS1 边的坐标方位角,其中 $\alpha_{DJ1-GS1} = \alpha_{DJ1-T} + \omega$ (α_{DJ1-T} 为 DJ1-T 边的已知坐标方位角, β 为 DJ1-T 边与 DJ1-GS1 边的夹角观测值,取六测回角度观测值的平均值)。

同理,以 JJ2 为测站点进行观测计算,可获取钢丝 GS1 的另一组坐标(x'GS1、y'GS1)。采用相同方法,分别以 JJ1、JJ2 为测站完成观测与计算,还能得到钢丝 GS2 对应的两组地面坐标(xGS2、yGS2)与(x'GS2、y'GS2)。每根测量钢丝均对应两套独立计算的坐标数据,通过对同一条钢丝的两组坐标进行比对与检核,可有效验证钢丝地面坐标测量结果的准确性,保障数据精度符合要求。确定两测站对 GS1、GS2 的最终坐标测量值(取两组合格坐标的平均值)后,即可实现地面控制点的坐标与方位角向两根钢丝(GS1、GS2)的传递,为后续井下测量搭建起坐标基准。

在获取钢丝 GS1、GS2 的地面坐标后,将测量仪器(同地面观测所用 I 级全站仪)分别安置于井下预先布设的导线点 YS1 与 YS2 上,井下导线点同样采用混凝土固定并安装强制对中装置。参照地面测量的精度标准,开展井下观测:一方面测量测站点到 GS1、GS2 连线的水平角 θ ,另一方面通过全站仪对钢丝上的反射片直接测距,得到测站点到 GS1、GS2 的距离 S1 与 S2。井下观测需提前通风降尘(确保能见度 ≥ 10m),避免仪器受到井下潮湿环境(相对湿度超过 85% 时需配备除湿设备)的影响,可在仪器外部套防潮湿罩保护设备。

基于已求得的 GS1、GS2 坐标,通过两点间距离公式反算出两点间的水平距离 S3 ($S_3 = \sqrt{(x_{GS2} - x_{GS1})^2 + (y_{GS2} - y_{GS1})^2}$)。结合观测得到的水平角 θ 、距离 S1、S2 以及反算的平距 S3,依据三角形正弦定理 $\frac{S_2}{\sin \alpha} = \frac{S_3}{\sin \theta}$ (其中 γ 、 δ 为三角形其他两个内角)计算出图 B 中的角度 α ,最终通过坐标推算得到 YS1、YS2 两点在地面坐标系中的精确坐标。

根据三角形正弦定理,再通过钢丝 GS1 的坐标,可计算出 YS1 点的近似坐标:

$$x_{Ys1} = x_{Gs1} + S_1 \cos \alpha_{Gs1 - Ys1}$$

$$y_{Ys1} = y_{Gs1} + S_1 \sin \alpha_{Gs1 - Ys1}$$

式中： $\alpha_{Gs1 - Ys1}$ 为边 GS1-YS1 的坐标方位角， $\alpha_{Gs1 - Ys1} = \alpha_{Gs1 - Gs2} + \theta$ ($\alpha_{Gs1 - Gs2}$ 为 GS1-GS2 边的已知坐标方位角， α 为通过正弦定理计算的角度值)。

同理，通过钢丝 GS1、GS2 坐标，同样可求得 YS2 点的地面坐标系下的近似坐标。四边形 GS1-YS1-GS2-YS2 中，GS1、GS2 点的坐标是已知的，S1、S2、S3、S4 (S4 为 YS2 到 GS2 的距离) 和 α 、 β (β 为 YS2 处观测的角度) 为已知观测值。计算时将两个独立的联系三角形延伸扩展为直伸四边形，因此采用严密平差的方法 (基于最小二乘法原理)，增加了图形强度和校核条件，能够通过多组数据的相互约束减少误差累积，使严密平差的方法计算评定 YS1、YS2 点的坐标和精度。

这样就将钢丝 GS1、GS2 的坐标和方位角传递到地下 YS1、YS2 点和边 YS1-YS2 上了，也就是将地面控制网中的坐标、方位角经由竖井传递到地下了，为井下后续的施工测量提供了统一的坐标基准。

3 实例运用

武汉地铁 8 号线三期某竖井工程，该竖井所在隧道区间长度达 3.2km，埋深约 28m，竖井内湿度较大且存在轻微气流扰动，对测量环境存在一定干扰。施工中需通过精准的联系测量保障盾构机掘进方向的准确性，避免因隧道偏差导致工期延误或工程返工。本次测量采用双测站法联系测量 (图 A)，先通过 DJ1 和 DJ2 两个地面近井点测量钢丝 GS1-GS2 坐标和方位角，再用精密导线测量方法进行角度和边长测量，将坐标和方位角信息传递至 YS1-YS2、ZS1-ZS2 (ZS1、ZS2 为井下另一组导线点)。

本次外业测量数据 (表 1 联系测量外业数据汇总表) 和计算结果如下：

表 1 联系测量外业数据汇总表

测站	观测方向	角度值 / (° ' ")	距离 / (m)
DJ1	JC64	0	650.4625
	JC27	21.08482	107.5181
	GS1	326.19343	53.8447
	GS2	326.55025	26.0825
DJ2	JC64	0	650.547
	JC27	21.11528	107.6568
	GS1	326.30292	53.8228
	GS2	327.18098	26.0605
YS1	GS1	0	61.1774
	ZS2	0.16047	196.5014
	YS2	0.19336	196.4968
	GS2	0.2041	33.4152
ZS1	GS1	0	61.1795
	ZS2	0.08079	196.5041
	YS2	0.11385	196.4996
	GS2	0.30138	33.4182

(注：JC64、JC27 为地面已知控制点)

根据观测数据文件进行平差处理，平差过程中对角度、距离观测值进行加权分配 (角度观测值权重按测回数确定，距离观测值权重按测距精度确定)。

采用 DJ1 作为单测站法联系测量计算：底板控制边 YS1-YS2 的方位角为 17°16'57"、ZS1-ZS2 的方位角为 17°09'54"；采用 DJ2 作为单测站法联系测量计算：底板控制边 YS1-YS2 的方位角为 17°17'03"、ZS1-ZS2 的方位角为 17°09'56"；采用双测站法联系测量计算：最终底板控制边 YS1-YS2 的方位角为 17°17'00"、ZS1-ZS2 的方位角为 17°09'55"。

从计算成果上分析，双测站法通过两组独立观测数据的相互验证与融合，使得方位角结果更趋精准：单测站法两次计算的 YS1-YS2 方位角差值为 6"，ZS1-ZS2 方位角差值为 2"；而双测站法最终结果与 DJ1 单测站结果的差值分别为 3" (YS1-YS2)、1" (ZS1-ZS2)，与 DJ2 单测站结果的差值分别为 3" (YS1-YS2)、1" (ZS1-ZS2)，均控制在 ±3" 以内，有效提升了数据可靠性。同时，该方法将测量和检核同步开展，无需额外增加观测轮次，相比传统一并定向测量节省了约 30% 的作业时间，大幅提升了施工效率。

4 结语

双测站联系三角形较传统的联系三角形进行竖井联系测量，不仅在精度上有一定的提高 (方位角中误差从传统方法的 ±5" 降至 ±2" 以内，坐标中误差从 ±5mm 降至 ±3mm 以内)，而且在数据平差计算中能起到相互的检核作用，通过两组独立数据的比对可及时发现观测误差或计算错误，有效地减少了错误的发生。

测量过程中，双测站法联系测量布点过程中要严格按照规范要求的直伸型方式进行布网埋设，尤其是近井点的选址与钢丝间距的控制，直接影响测量精度与后续解算效果。

该方法通过合理布设双测站获取多余观测数据，借助严密平差计算实现了误差的有效抵消，其测量精度完全满足《城市轨道交通工程测量规范》(GB 50308-2017) 中对地下控制网的精度要求，已在武汉地铁 8 号线三期工程中得到成功应用，隧道贯通误差最终控制在 ±35mm，远优于规范允许的 ±50mm，为长隧道施工提供了稳定可靠的测量技术支撑。

参考文献

- [1] 秦长利. 城市轨道交通工程测量. 中国建筑工业出版社, 2008 (7): 148-183.
- [2] 姬晓旭;刘成龙;何波. 竖井联系测量的新方法及其应用. 铁道勘察. 2019 (10): 23-27.
- [3] 王华强. 引水隧道竖井的联系控制测量. 山西建筑. 2011 (3): 198-199.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 信息与文献 参考文献著录规则: GB/T 50308—2017. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 51-57.

Construction of the Index System of the Graded Supervision of Highway Engineering Safety and Environmental Protection

Min Chen

China Highway Engineering Consulting Group Co., Ltd. Wuhan Branch, Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

The sustained expansion in scale and volume of highway construction projects has heightened demands for safety and environmental oversight. Establishing a scientifically grounded and rational hierarchical supervision framework for highway engineering safety and environmental protection is pivotal to achieving precise and efficient regulation. This study conducts an in-depth analysis of current supervision practices, employing analytical methods such as the Analytic Hierarchy Process (AHP) and expert consultation to identify indicators across personnel, equipment, environmental, and management dimensions. A comprehensive and targeted hierarchical supervision system is developed, with detailed elaboration on key aspects including indicator weighting and classification criteria. The research aims to provide robust support for enhancing the regulatory standards of highway engineering safety and environmental protection.

Keywords

highway engineering; safety and environmental protection; hierarchical supervision; index system

公路工程安全环保分级监管指标体系构建

陈敏

中国公路工程咨询集团有限公司武汉分公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

公路工程建设规模与数量的持续增长, 对安全环保监管提出了更高要求。构建科学合理的公路工程安全环保分级监管指标体系, 是实现精准化、高效化监管的关键。本文通过深入剖析公路工程安全环保监管现状, 采用层次分析法、专家咨询法等, 从人员、设备、环境、管理等多维度选取指标, 构建了一套全面且具有针对性的分级监管指标体系, 并对指标权重确定、分级标准划分等关键环节进行了详细阐述, 旨在为提升公路工程安全环保监管水平提供有力支撑。

关键词

公路工程; 安全环保; 分级监管; 指标体系

1 引言

公路作为交通运输的关键基础设施, 在推动经济发展、促进区域交流等方面发挥着不可替代的作用。然而, 公路工程建设与运营过程涉及大量复杂作业, 易引发安全事故与环境污染问题。传统统一监管模式难以满足不同规模、类型公路工程的差异化监管需求, 导致监管资源配置不合理, 监管效果参差不齐。构建科学的分级监管指标体系, 依据工程风险程度与环保要求实施分级监管, 能优化资源配置, 提升监管效能, 保障公路工程安全有序推进, 实现经济效益与环境效益的双赢。

2 分级监管指标体系构建原则

2.1 科学性原则

指标选取的科学性原则要求所选指标能准确反映公路

工程安全环保状况及其影响因素的内在联系。为了确保这一点, 指标的定义必须清晰, 计算方法要科学合理, 且数据来源应可靠。例如, 安全管理指标应能全面反映施工现场的安全措施落实情况, 环保指标应能真实反映施工过程中的污染物排放情况。选取的每个指标都要有明确的量化标准, 避免模糊定义导致执行中的误差。此外, 必须通过行业标准、国家规范以及前期实践经验, 结合实际工程的特点, 选定适用的评价标准。科学性原则的核心在于使指标体系具备客观评估工程风险与环保水平的能力, 从而确保公路工程在建设 and 运营过程中, 安全环保状况能够得到准确、真实的反映。这样不仅能够确保监管的公正性与科学性, 也能够帮助有关部门根据这些数据制定相应的政策和管理措施, 从而实现精准、高效的监管目标。

2.2 系统性原则

系统性原则要求从人员、设备、环境、管理等多维度进行综合考量, 全面反映公路工程建设与运营过程中的各个方面。在选择具体的安全环保指标时, 应涵盖从项目初期设

【作者简介】陈敏(1990-), 女, 中国湖北宜城人, 本科, 工程师, 从事安全环保工作管理研究。

计、施工阶段到后期运营维护等各个环节。各项指标之间相互关联、相互补充，形成一个完整的系统。比如，安全管理不仅包括人员的安全培训情况，还涉及设备的维护保养、施工现场的安全设施配置等多个方面；环保方面则涉及污染源控制、环境监测、废水废气处理等多个维度。通过这种系统性的指标设置，可以确保每个环节的安全与环保得到有效监督，避免因局部指标的疏漏或片面性而导致整体监管的缺失。此外，系统性原则强调指标体系要能够适应公路工程的不同规模与复杂度，做到因地制宜、因时制宜，确保在各种情况下都能发挥有效的监管作用。

2.3 可操作性原则

可操作性原则要求所选的安全环保指标能够方便地获取、量化和评价。首先，指标必须能够通过现场检查、监测数据、文件记录等途径直接获取，避免使用难以验证或量化的抽象概念。比如，人员持证上岗率和设备定期检查率等指标，均可以通过现场检查和档案记录来确认，具有较高的可操作性。对于那些较为复杂或不易直接量化的指标，可以采用定性描述与定量评分相结合的方法。通过制定评分标准，监管人员可以依据实际情况进行合理的评估。例如，施工现场的扬尘控制措施是否到位，可以根据现场环境状况，结合规定标准，进行打分评定。可操作性原则的核心在于使监管人员能够在实际工作中方便地收集数据、执行评估，并做出及时的调整与响应，从而确保监管工作的高效开展。这样不仅提高了监管的效率，也确保了在实际操作中能够切实发挥指标的作用。^[2]

3 公路工程安全环保监管现状及问题

3.1 监管模式缺乏针对性

目前，公路工程的安全环保监管普遍采取统一的监管标准和流程，缺乏对不同规模、类型及风险等级工程的针对性监管。这种“一刀切”的监管模式，使得不同性质的工程都按照相同的标准进行监管，导致资源的浪费和监管效果的不平衡。例如，小型工程和大型复杂工程采用相同的监管要求，可能会造成小型工程的监管资源过度投入，而大型工程的关键风险点和环保措施可能被忽视。不同规模和性质的公路工程面临的风险和环保要求差异较大，采用统一模式无法充分体现差异化监管的需求。具体来说，小型公路工程的施工环境和风险相对较低，可能不需要过多的复杂程序和频繁的检查，但对于大规模、高风险的工程而言，可能需要更多的现场监管与风险评估。为了优化监管效果，应根据工程的风险等级、规模、技术复杂性等因素，采用差异化的监管措施，实现精准化、个性化的监管模式。

3.2 监管指标不完善

当前公路工程安全环保监管体系中的指标体系主要关注一些结果性指标，如事故发生率、污染物排放是否达标等，然而对于施工过程中的安全管理行为、环保措施落实情况等

过程性指标的关注较少。例如，尽管存在一些关于施工现场扬尘控制、污水排放标准等的指标，但在执行层面，缺乏对施工人员安全培训质量、设备定期检查与维护及时性等过程性指标的量化和细化。很多监管人员对于具体的管理行为、环保措施落实情况难以做出定量评估，导致整体监管的效果受到限制。过程性指标的缺失，使得监管仅停留在结果层面，无法深入施工全过程，对潜在的安全隐患和环保问题提供早期预警。为解决这一问题，需要引入更多的过程性指标，如对施工现场的安全文化建设、环保设施的实时监测、施工人员的安全行为规范等进行量化评估，确保监管工作更为全面、细致，能够及时发现问题并采取有效措施。

3.3 资源配置不合理

由于缺乏科学的分级依据，当前公路工程安全环保监管的资源配置存在一定的盲目性。在一些低风险项目中，过多的监管资源被投入，造成了资源的浪费。而在一些高风险、环境敏感的项目中，由于资源不足，监管力度不够，未能充分覆盖到所有关键环节，造成了潜在安全隐患和环保风险未能及时发现和解决。例如，在一些施工进度较慢的小型项目中，监管人员和设备的投入可能远远超出了实际需要，而一些大型、复杂的工程项目，往往由于缺乏足够的监管力量，可能导致事故隐患和污染问题未能得到有效管控。此外，资源配置不合理还表现在突发安全事故或环保事件应对不及时，监管人员无法迅速调配资源进行应急处置，延误了问题的解决时机。针对这一问题，应根据工程项目的规模、风险等级、环境敏感程度等因素，合理配置监管资源，确保高风险项目得到充分监管，同时避免低风险项目资源的过度投入，从而提高整体监管效能和应急响应能力。

4 分级监管指标体系构建

4.1 指标选取

从安全和环保两个大的方面进行指标选取。安全方面，涵盖人员安全管理、设备安全性能、施工安全措施、安全管理体系等维度。人员安全管理指标包括施工人员持证上岗率、安全培训参与率等；设备安全性能指标有特种设备定期检验率、机械设备完好率等；施工安全措施指标涉及安全警示标志设置覆盖率、临时用电安全达标率等；安全管理体系指标包含安全管理制度完善度、安全事故应急预案有效性等^[3]。

环保方面，涉及生态环境保护、污染防治措施、环境管理体系等维度。生态环境保护指标如生态恢复措施落实率、取弃土场植被覆盖率等；污染防治措施指标涵盖扬尘控制达标率、污水达标排放率等；环境管理体系指标包括环境管理机构健全度、环境监测计划执行率等。

4.2 指标权重确定

层次分析法（AHP）在确定公路工程安全环保分级监管指标权重时发挥着关键作用。构建递阶层次结构模型是首要步骤，将公路工程安全环保分级监管设定为目标层，它如

同灯塔，为整个指标权重确定过程指明方向。准则层划分为安全和环保两大方面，这种分类方式清晰地将复杂的监管内容归为两个核心领域，便于后续分析。而指标层则是具体选取的各项指标，如安全方面的施工人员持证上岗率、特种设备定期检验率等，环保方面的扬尘控制达标率、生态恢复措施落实率等，它们是实现目标的具体衡量要素。

构建判断矩阵是确定权重的核心环节，借助专家打分来完成。专家们凭借丰富的行业经验和专业知识，对同一层次各因素在上一层次因素中的相对重要性进行比较打分。比如在安全准则层下，比较人员安全管理指标与设备安全性能指标的重要程度。打分采用 1 - 9 标度法，这种方法能够将专家们相对模糊的主观判断转化为具体数值，为后续计算提供数据基础。

得到判断矩阵后，利用专业软件（如 MATLAB、Yaahp 等）或数学方法（如方根法、和积法）计算其特征向量与最大特征根，由此得出各指标的相对权重。不过，为保证权重分配科学合理，一致性检验必不可少。因为专家打分过程中可能存在一定的主观性偏差，通过一致性检验能评估判断矩阵的合理性。计算一致性指标 CI 和随机一致性指标 RI，进而得出一致性比率 CR ($CR = CI / RI$)。当 $CR < 0.1$ 时，表明判断矩阵的一致性良好，权重分配可靠；若 $CR \geq 0.1$ ，就需要重新调整判断矩阵，重复上述计算和检验步骤，直至满足一致性要求。

4.3 分级标准划分

合理划分公路工程安全环保状况的分级标准，是实现精准监管的重要前提。根据指标综合得分，将其划分为三个等级。

一级为低风险等级，综合得分在 90 分及以上。处于这一等级的公路工程，在安全环保方面表现卓越，各项安全措施严格落实，环保工作近乎完美。施工人员全部持证上岗且安全培训到位，设备运行稳定，污染防治效果显著，生态保护措施全面且有效，发生安全事故和环境污染事件的概率极低，只需进行常规的监督检查^[4]。

二级为中风险等级，得分在 70 - 89 分之间。这类工程基本符合安全环保要求，但仍存在一些潜在风险点。可能是部分安全管理制度执行不够严格，或者个别环保措施落实不

到位，如施工现场偶尔出现扬尘超标现象。对此，需要加强监管力度，督促相关单位及时整改，降低风险。

三级为高风险等级，综合得分低于 70 分。此类工程安全环保问题突出，存在重大安全隐患或环境污染风险，比如安全事故应急预案形同虚设，大量污水未经处理直接排放等。一旦发现，必须立即责令整改，要求施工单位全面停工整顿，直至达到安全环保标准，并依法追究相关责任。

具体分级标准的确定，不能一概而论，需结合实际工程情况，综合运用专家论证、历史数据统计分析等方法。通过收集大量不同类型公路工程的安全环保数据，分析事故发生概率、污染程度与各项指标之间的关系，再结合专家的专业判断，科学合理地确定各等级的得分区间，确保分级标准既符合行业实际，又能有效指导监管工作。

5 结语

构建公路工程安全环保分级监管指标体系，是解决当前公路工程监管困境的有效途径。通过科学选取指标、合理确定权重、明确分级标准，并建立相应保障措施，实现了对公路工程的精准化、差异化监管，优化了监管资源配置，提升了监管效能。在实际应用中，该体系有助于及时发现并解决工程安全环保问题，保障公路工程建设与运营的安全、绿色发展。随着公路工程技术的不断进步与环保要求的日益提高，分级监管指标体系应持续优化完善，以适应新的监管需求，为公路交通事业的可持续发展保驾护航。未来研究可进一步探索将人工智能、区块链等前沿技术融入分级监管体系，提高监管的智能化、精准化水平，同时加强对不同地区、不同类型公路工程的适应性研究，使指标体系更加贴合实际工程情况。

参考文献

- [1] 董一平.高速公路桥梁施工安全管理对策及环保措施[J].中华建设,2020,(11):112-114.
- [2] 陈鹏.高速公路桥梁施工安全管理及环保对策[J].黑龙江交通科技,2020,43(04):249+251.
- [3] 李建民.公路工程施工的安全环保监理措施[J].中国公路,2017,(20):117-118.
- [4] 姜超.谈公路工程施工中的安全与环保管理及相应对策见解[J].山东工业技术,2017,(13):126.

Research on the Integrated Method of Engine Electronic Control System Calibration and OBD Fault Diagnosis

Na Wei Zhan Shen Haichao Pan

Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

With the advancement of automotive electrification and intelligentization, engine management system (EMS) calibration and OBD diagnostics have become pivotal for performance optimization and emission control. Traditional standalone development approaches suffer from data fragmentation and model inconsistencies. This study proposes an integrated calibration and OBD diagnostic methodology for engine electronic control systems. By establishing a unified control model, it achieves dynamic coupling between calibration parameters and diagnostic logic. Leveraging multi-source sensor fusion and real-time cloud analytics, the method enhances fault detection accuracy and system robustness. Results demonstrate that this approach shortens development cycles, reduces calibration costs, and provides an efficient technical pathway for intelligent development of new energy vehicles and smart connected powertrain systems.

Keywords

engine electronic control system; calibration; OBD diagnosis; integration; intelligent control

发动机电控系统标定与 OBD 故障诊断一体化方法研究

魏娜 申展 潘海朝

长城汽车股份有限公司, 中国 · 河北 保定 071000

摘要

随着汽车电子化与智能化发展, 发动机控制系统 (EMS) 的标定与 OBD 诊断已成为性能优化与排放控制的关键环节。传统独立开发模式存在数据割裂与模型不一致等问题。本文提出发动机电控系统标定与 OBD 诊断一体化方法, 通过建立统一控制模型, 实现标定参数与诊断逻辑的动态耦合; 基于多源传感器融合与云端实时分析, 提升故障检测精度与系统鲁棒性。研究表明, 该方法可缩短开发周期、降低标定成本, 并为新能源汽车与智能网联动力系统的智能化开发提供高效技术路径。

关键词

发动机电控系统; 标定; OBD 诊断; 一体化; 智能控制

1 引言

现代汽车发动机控制系统通过精密的电子控制单元 (ECU) 实现燃油喷射、点火正时、增压压力与排放后处理的实时调节。随着国六排放标准的实施与智能网联技术的普及, 发动机控制策略的复杂度显著提高, 标定与故障诊断的协同开发成为行业焦点。传统的标定过程主要依靠人工经验和离线测试, OBD 系统则独立运行于 ECU 之上, 两者缺乏参数与逻辑层面的耦合, 导致校准过程繁琐、故障定位精度不足、系统一致性难以保证。一体化标定与诊断方法通过模型化、智能化手段, 将发动机性能标定与 OBD 逻辑设计统一于同一系统架构, 实现数据、算法、模型的融合。此方法不仅可提升故障检测灵敏度, 还能在标定阶段预防控制策略

异常, 提高开发效率与产品稳定性。本文系统分析发动机电控系统标定与 OBD 故障诊断的协同机制, 从模型设计、算法优化与数据融合三个方面构建一体化技术体系, 旨在为智能动力系统的高精度控制提供新思路。

2 发动机电控系统标定与 OBD 诊断的基础框架

2.1 发动机电控系统的结构与功能层次

发动机电控系统 (EMS) 是实现动力性能、燃油经济性与排放控制协同优化的核心平台。其结构由传感器、执行器、控制器及通信网络构成, 形成闭环控制体系。传感器实时采集转速、进气流量、进排气温度、氧含量等信号, 控制器依据热力学与控制算法计算喷油量、点火时刻、EGR 率及增压压力等控制量, 执行器据此完成相应动作。随着系统复杂度提升, EMS 逐步形成模块化功能结构, 包括燃油喷射、空气路径、排放控制与自诊断等子系统。标定环节旨在确定关键参数与控制边界, 实现各模块间的性能均衡; 而 OBD

【作者简介】魏娜 (1986-), 女, 本科, 工程师, 从事发动机及整车标定方向研究。

系统负责实时监控控制逻辑运行状态，识别潜在故障并生成诊断码。两者共同构成发动机智能控制的核心支撑，为车辆稳定运行与排放达标提供技术保障。

2.2 传统标定与 OBD 系统的独立性问题

在传统研发体系中，标定与 OBD 诊断通常由不同团队分别开发。标定工程师关注燃烧效率、扭矩响应与排放平衡，而诊断工程师则侧重监控逻辑、故障阈值设定及系统容错性。由于二者采用的测试环境、数据接口及算法模型不同，造成参数耦合度不足与模型一致性偏差。例如，标定中为优化 EGR 控制所做的微调，可能导致 OBD 监控阈值失真，引发误报警或故障漏检。尤其在涡轮增压、可变气门与混合动力系统中，传统模式难以捕捉动态响应特性与跨模块关联，使系统在复杂工况下难以实现精准控制与高效诊断。这种开发割裂不仅延长调试周期，也制约了系统性能潜力的发挥。

2.3 一体化思想的提出与技术意义

标定与 OBD 诊断一体化思想的提出，旨在解决控制与监测逻辑割裂带来的系统不一致问题。其核心在于“共模型、共数据、共验证”，即在同一控制模型架构下同步完成性能标定与诊断逻辑开发。通过模型、算法与数据的统一管理，实现控制策略与监测阈值的动态关联。以空气路径控制为例，标定确定的 EGR 率与增压压力曲线可直接为 OBD 系统提供判定基准，从而保持控制与诊断边界一致。该方法显著提升系统容错性与响应精度，减少重复测试与调校成本，实现性能优化与可靠性保障的同步推进，对发动机电控系统智能化与高效化发展具有重要的技术意义。

3 一体化标定与 OBD 诊断模型的构建

3.1 基于机理模型的系统耦合设计

一体化方法的核心是构建统一的发动机机理模型，以实现控制与诊断逻辑的深度耦合。通过对燃烧、进排气流动及三元催化反应过程的热力学建模，建立控制变量与诊断变量之间的物理映射关系，使标定参数与故障监测阈值具备一致性。例如，在空气路径模型中，EGR 率与增压压力曲线可作为控制与监测的共享参数，标定结果直接反馈至 OBD 系统用于实时阈值判断。机理模型的参数化设计确保其在不同环境条件与工况下具备快速重构能力，提高算法的通用性与实时响应性能，从而实现标定与诊断过程的同步优化与动态适配。

3.2 基于数据驱动的自学习标定与诊断方法

数据驱动技术为发动机标定与 OBD 诊断的智能化提供了新路径。通过引入 BP 神经网络、随机森林与 LSTM 时序模型等算法，系统可在运行过程中持续学习车辆实际工况特征，自动修正模型参数，实现自适应标定与动态诊断。相比传统机理模型，数据驱动模型在捕捉复杂非线性与多维交互关系方面具有显著优势，能够弥补机理模型在高动态工况下的精度不足。通过在线学习机制，系统可实时更新预测阈值

与控制策略，显著提升故障识别准确率与控制稳定性，形成从数据采集到智能判断的闭环学习体系。

3.3 模型联合验证与多维参数优化

联合验证是确保标定与 OBD 一体化模型稳定可靠的关键环节。通过建立多目标优化函数，综合考虑排放达标性、燃油经济性、动力性能与诊断误差率等指标，采用遗传算法、粒子群算法等智能优化工具实现全局最优参数匹配。系统验证阶段通过硬件在环 (HiL) 仿真与整车道路测试双重验证，实现策略的在线校正与动态评估。虚拟标定平台可对控制逻辑与诊断模型进行并行验证，提前发现系统潜在缺陷，从而显著缩短物理测试周期并降低开发成本，保证标定一致性与诊断准确性，为发动机控制系统的高可靠性运行提供坚实支撑。

4 数据融合与智能诊断算法设计

4.1 多源传感器数据融合机制

现代发动机电控系统包含数十至上百个传感器，用于采集温度、压力、气流、氧含量等多维数据，但由于测量误差、信号延迟及环境干扰，单一传感器输出往往存在随机噪声与漂移现象。为保证标定与 OBD 诊断精度，必须通过多源数据融合实现信息的冗余校正与可靠估计。卡尔曼滤波算法在动态系统状态估计中应用广泛，可通过递推优化降低测量误差；贝叶斯融合机制则可根据各传感器置信度实现权重分配，提高数据一致性；主成分分析 (PCA) 用于多维信号降噪与特征提取，有助于减少无关变量干扰。数据融合技术不仅提升故障检测的稳定性与鲁棒性，还能为标定参数的动态调整提供高精度参考，使系统在复杂工况下保持控制稳定。融合后的高维特征数据能够实时反馈给控制算法，实现标定与诊断的一体化闭环优化，从而在确保可靠性的同时提升响应速度与故障灵敏度。

4.2 基于模型残差的智能故障检测方法

在发动机电控系统一体化框架中，基于模型残差的智能诊断方法成为核心技术路径。其原理是利用控制模型预测值与实际测量值之间的偏差作为故障判定依据，当残差超出阈值范围时，系统自动识别潜在异常并触发诊断逻辑。该方法通过建立发动机空气路径、燃油系统与排放后处理的数学模型，可实现复杂系统的精确监测。结合模糊逻辑推理与神经网络分类算法，系统能够在不同工况下自适应调整判定阈值，从而避免传统 OBD 规则式算法的刚性限制。以氧传感器老化和燃油喷射偏差为例，系统可通过残差趋势分析识别出性能退化过程，并提前发出预警。相比传统诊断算法，该方法在动态工况下的准确率提升约 15%，误报率下降近 30%。智能残差诊断不仅提升了故障检测的实时性与敏感性，也为发动机健康管理提供了数据驱动的新手段。

4.3 云计算与边缘协同的在线诊断平台

随着智能网联汽车的发展，OBD 系统正从车载本地诊断向云端协同诊断演进。通过 5G 通信与云计算平台的融合，

可实现车辆运行数据的高速上传与实时分析。系统架构中,边缘计算单元部署在车辆控制器附近,负责数据预处理与初级筛查,能够在本地识别一般性故障,减少通信负载;云端平台则承担复杂模型运算与趋势分析任务,基于大数据算法实现跨车型、跨车队的模式识别与预测性维护。云端与边缘的双向协同机制,使得标定参数、模型阈值可在线动态更新,形成“本地响应—云端优化—系统再学习”的闭环结构。该平台还可集成OTA(Over-The-Air)远程更新功能,实现控制策略与诊断逻辑的远程标定。通过大规模样本学习,系统能够建立发动机健康数据库与寿命模型,为车队运维提供数据决策支持,推动汽车从“被动诊断”向“主动感知”和“智能预测”方向转型,实现动力系统全生命周期的智能化管理。

5 一体化方法的工程实现与应用验证

5.1 系统架构设计与功能模块划分

发动机电控系统标定与OBD故障诊断一体化体系的核心在于建立层次清晰、协同高效的系统架构。整体结构可分为控制算法层、数据采集层、诊断分析层与云服务层四个功能模块。控制算法层是系统核心,负责执行燃油喷射、点火正时、增压控制等实时策略,并通过模型预测算法实现动态优化;数据采集层对传感器数据进行高频采样与融合,确保各子系统信息同步与时效一致;诊断分析层承担故障检测、参数修正及标定验证等功能,实现基于模型残差与数据驱动算法的双通道诊断;云服务层作为远程智能支撑平台,负责数据上传、模型更新与算法远程优化。通过模块化与接口标准化设计,该架构具备良好的可扩展性与移植性,可在不同排量、燃料类型及控制平台之间灵活部署,满足乘用车与商用车的多场景应用需求。

5.2 实车测试与性能对比分析

为验证一体化方法的工程可行性与性能优势,选取1.5T涡轮增压发动机进行实车标定与诊断实验。试验结果表明,该系统在中高负荷工况下燃油经济性平均提升约2.8%,排放一致性改善显著;基于模型融合的OBD诊断逻辑可实现更高的检测灵敏度,故障识别准确率较传统独立系统提高约15%,误报率下降40%。同时,实验数据显示,在台架验证与整车调试阶段,系统参数收敛速度加快,标定周期缩短约25%,开发效率与验证稳定性均显著提升。通过HiL仿真平台验证,系统在模拟传感器退化与信号噪声干扰条件下

仍保持较高的鲁棒性,证明其具备良好的工程适应性与环境抗扰性能,为大规模产业化应用提供了技术依据。

5.3 应用前景与技术延展

一体化标定与OBD诊断方法具有广泛的推广潜力与战略意义。其理论与架构不仅适用于传统内燃机系统,也能平滑扩展至混合动力、纯电及氢燃料动力系统。在新能源动力架构中,该方法可实现动力域控制单元与能量管理系统的协同标定,进一步提升能效与可靠性。未来,随着车载计算能力和人工智能算法的快速发展,一体化系统将实现自主学习与自适应功能,具备实时优化控制策略与智能健康管理的能力。此外,结合V2X车联网通信与云计算平台,可构建车群级标定与预测性维护体系,实现车辆在全生命周期内的性能优化与远程运维。该方法的技术延展不仅将推动发动机控制系统的智能化升级,也为“软件定义汽车”时代下整车开发的数字化与网络化转型提供了关键支撑。

6 结语

发动机电控系统标定与OBD故障诊断的一体化方法,是现代汽车动力系统智能化发展的必然趋势。通过统一模型、共享数据与协同算法,实现了性能优化与故障诊断的深度融合,不仅提升了系统的稳定性与准确性,也大幅缩短了开发周期与测试成本。研究表明,该方法在复杂工况下表现出良好的鲁棒性与实时性,为传统动力与新能源汽车的控制策略开发提供了有效路径。未来,随着人工智能与云计算技术的进一步发展,一体化标定与智能诊断体系将向自主学习、自我修正方向演进,推动汽车动力系统从“被动控制”迈向“智能决策”,实现真正意义上的智能化动力管理。

参考文献

- [1] 李增玉.基于大众汽车汽油发动机OBD灯亮故障的原理分析及修复[J].内燃机与配件,2023,(20):53-55.
- [2] 胡建功.发动机失火诊断中OBD功能开发[J].太原学院学报(自然科学版),2016,34(02):1-6.
- [3] 王博,崔凯,刘方,等.发动机冷却系统国六OBD诊断策略的研究[J].小型内燃机与车辆技术,2022,51(04):25-29.
- [4] 欧子讯.OBD-II车型发动机失火监控过程及LEXUS LS400间歇性失火解决方法[J].汽车维修与保养,2000,(07):17.
- [5] 张良,马光伟,刘通,等.引导式整车OBD自动核查系统的研究与应用[J].机电工程技术,2024,53(03):121-124.

Thermal Management and Energy Saving Co-control of New Energy Vehicle Battery in Low Temperature Environment

Fuqiang Tang

Xiaomi Automotive Technology Co., Ltd., Xiangyang, Hubei, 441002, China

Abstract

The impact of low-temperature environments on new energy vehicle (NEV) battery performance remains a critical challenge in EV technology development. Subzero temperatures not only reduce energy density and cause capacity degradation but also impair charging efficiency, potentially triggering safety hazards like thermal runaway. Addressing this issue requires coordinated optimization of thermal management systems and energy-saving control strategies. This study investigates the mechanisms of low-temperature effects on battery performance, examines the operational principles of thermal management systems, and reviews current technological advancements. Through practical NEV applications, we propose an integrated thermal management and energy-saving control scheme, with particular emphasis on the synergistic interaction between thermal management systems and powertrains. Experimental and simulation validation confirms that this approach significantly enhances battery performance, reduces energy consumption, and prolongs service life in cold environments. The research provides theoretical foundations and technical support for improving NEV performance in low-temperature conditions, demonstrating substantial engineering value.

Keywords

new energy vehicles; battery thermal management; energy-saving control; low-temperature environment; collaborative optimization

低温环境下新能源汽车电池热管理与节能协同控制

汤富强

小米汽车科技有限公司, 中国 · 湖北 襄阳 441002

摘要

低温环境对新能源汽车电池性能的影响是电动汽车技术面临的主要挑战之一。低温会降低电池的能量密度, 并导致电池容量衰退、充电效率下降, 甚至引发电池热失控等安全问题。为解决这一问题, 电池热管理技术和节能控制策略的协同优化变得至关重要。本文分析了低温环境对电池性能的影响机理, 并探讨了电池热管理系统的工作原理及技术发展现状。结合新能源汽车的实际应用, 提出了一种基于热管理与节能协同控制的优化方案, 重点研究了热管理系统与动力系统的协同作用。通过实验与模拟验证, 该方案在低温环境下能够有效提高电池性能, 降低能耗, 延长电池使用寿命。本研究为新能源汽车在低温环境下的性能提升提供了理论依据和技术支持, 具有重要的工程应用价值。

关键词

新能源汽车; 电池热管理; 节能控制; 低温环境; 协同优化

1 引言

随着全球能源结构的转型, 新能源汽车逐渐成为替代传统燃油汽车的重要选择。电池作为新能源汽车的核心组件, 其性能直接影响整车的续航能力与安全性。特别是在低温环境下, 电池的电化学反应速度减缓, 能量释放效率降低, 导致续航里程显著下降, 这对寒冷地区的车辆使用构成了严峻挑战。当前, 针对低温环境下电池性能衰退的问题, 主要的解决途径是通过电池热管理系统来维持电池的温度在适宜范围内。然而, 现有的电池热管理系统多侧重于热平衡调

控, 往往忽视了热管理与整体节能控制的协同优化。为提高新能源汽车在低温环境下的综合性能, 本研究旨在提出一种基于热管理与节能控制的协同优化策略, 通过精准控制电池的工作温度, 减少不必要的能耗, 并确保电池在低温下依然能够稳定、高效地工作。

2 低温环境对新能源汽车电池性能的影响

2.1 电池容量衰退与充电效率降低

低温环境对电池性能的影响主要体现在容量衰退与充电效率的降低。电池在低温条件下的电化学反应速率显著减缓, 导致电池放电时无法完全释放其容量。这是因为低温下, 电池内部的离子迁移变得更加困难, 造成电池放电时的电压下降, 进而影响续航表现。同时, 低温环境还会使得充电过

【作者简介】汤富强 (1986-), 男, 硕士, 从事车辆工程研究。

程中锂离子的迁移受到阻碍,导致电池充电效率显著下降,充电时间延长。此外,低温充电还可能导致锂离子电池内产生锂枝晶,这些枝晶会刺穿电池隔膜,导致电池短路、容量丧失等问题,从而大幅度缩短电池的使用寿命。因此,低温环境对电池的充电效率和长期性能构成了严重威胁,亟需优化电池的热管理技术来缓解这一问题。

2.2 电池安全性问题

低温环境不仅影响电池的性能,还可能引发严重的安全性问题。低温会使电池的内阻增大,导致电池内部产生的热量难以有效散发,进而导致局部过热现象。若电池在过热条件下运行,可能会引发电池内部化学反应失控,进而发生热失控或短路等安全事故。此外,低温还可能导致电池的结构和材料特性发生变化,增加电池爆炸或起火的风险。因此,电池在低温环境下的安全性尤为重要。有效的电池热管理系统可以调节电池的温度,避免温度过低或过高,从而确保电池处于安全的工作范围内。通过合理的温控设计,可以有效地防止因温度变化引发的安全隐患,提升电池的安全性和可靠性。

2.3 低温环境下电池热管理的挑战

在低温环境下,电池的温度波动较大,尤其是在寒冷天气中,新能源汽车常面临启动困难和续航衰退的问题。传统的电池热管理系统通常依赖电池内部加热器来提升电池温度,但这种方法存在能效低、能源消耗大的问题。尤其在寒冷环境中,电池的启动和工作过程中的能量损失更加严重。此外,现有的热管理系统往往结构复杂,成本较高,且在极端低温下效果有限。因此,如何在低温环境下实现高效的热管理,减少电池的能量损失,成为当前研究的关键问题。未来的电池热管理系统需要更加智能化、集成化,并结合节能控制策略,以提高热管理效率,保障电池在低温下的性能和安全。

3 电池热管理系统的工作原理与发展现状

3.1 电池热管理技术的基本原理

电池热管理系统通过多种方法来调节电池的工作温度,确保其在理想的温度范围内运行。常见的热管理方法包括空气冷却、水冷却和相变材料(PCM)等。空气冷却系统由于结构简单且成本较低,广泛应用于一些低功率需求的场合,但在低温环境下,空气流动性差,散热效果有限,不能满足高效热管理的需求。相比之下,水冷却系统具有较好的热传导性能,能够实现较为精准的温度调节,适合在高能量密度的电池系统中使用。相变材料作为一种新型热管理技术,在温度变化时通过吸热或释放热量来维持热平衡,尤其在低温环境下,可以有效缓解电池温度波动,保持电池处于稳定的工作温度范围,避免因过低或过高的温度造成性能损失。

3.2 电池热管理系统的技术发展现状

随着新能源汽车技术的不断进步,电池热管理系统的

设计也经历了从传统的被动散热到智能化控制的演变。现代电池热管理系统已不再局限于简单的散热方式,许多新能源汽车开始采用集成化的热管理系统。这些系统结合了温度传感器、控制算法和智能硬件,通过实时监测与反馈调整电池的温度,确保电池在最佳工作条件下运行。智能化控制使得电池能够根据外界温度变化和电池自身状态自适应调节热管理模式。与此同时,集成热回收系统和热电材料的应用逐步成为热管理技术的发展趋势,这些先进技术不仅提高了电池的低温性能,还能在能量回收和能源利用上发挥重要作用,从而进一步提升了新能源汽车的整体性能和续航能力。

3.3 热管理与节能协同控制的研究现状

电池热管理与节能控制的协同优化是当前新能源汽车技术研究的重要方向。然而,现阶段大部分研究仍集中于电池热管理系统的单独优化,缺乏与整车动力系统的协同考虑。电池与动力系统之间的能量流动和热量传导密切相关,因此,通过精准的控制策略实现电池热管理与节能控制的协同优化,能够有效减少能源浪费,提升整车系统的整体能效。近年来,随着节能控制技术的不断发展,越来越多的研究开始关注两者的协同作用。通过多目标优化模型和智能化控制系统,不仅可以优化电池温度调控,还能动态调整整车的能量分配和消耗,提高电池在低温环境下的运行效率,减少启动和运行过程中的能源损失,进一步提升新能源汽车的综合性能和续航能力。

4 低温环境下新能源汽车电池热管理与节能协同控制策略

4.1 电池热管理系统优化

在低温环境下,电池热管理系统的优化对于提升电池性能至关重要。首先,采用智能水冷系统与相变材料(PCM)技术的结合,可以更精确地调节电池的工作温度。水冷系统具有良好的热传导性能,能够迅速将电池运行过程中产生的热量带走,从而避免电池过热;而相变材料在温度变化过程中能够稳定热量,缓解温度波动,确保电池温度维持在理想的工作范围内。这种结合能够有效提升低温环境下电池的温控效率。其次,通过优化加热器的设计,提升其能效,减少不必要的能源浪费。加热器的效率提升不仅降低了能耗,还能加速电池温度的提升,减少低温对电池的负面影响。再者,引入智能控制算法,能根据外部环境温度与电池状态动态调整热管理系统的运行模式,合理分配能量,确保电池始终处于最佳工作温度,从而延长电池的使用寿命并提高工作效率。

4.2 动力系统与热管理系统的协同控制

新能源汽车的动力系统与电池热管理系统的协同工作对于提高整体能效至关重要。低温环境下,电池的能量输出与热管理系统的能耗之间存在相互影响,因此,通过协同控制可以最大化地提升系统效率。为了减少能源浪费,必须建立一个多目标优化模型,合理分配电池与动力系统的负荷,

并优化系统的运行模式。具体而言,在启动阶段,首先通过热管理系统提升电池温度,以确保电池处于最佳工作状态,从而减少启动时电池的负荷,避免低温对电池性能的负面影响。通过协调电池与动力系统的工作方式,系统可以避免过度消耗能源,同时保证电池的温度维持在合理范围内。这种协同控制不仅可以提高低温环境下电池的能效,还能提升电池的启动性能和续航能力。通过这一方式,可以最大限度地减少能量损失,增强整个系统在低温条件下的稳定性与可靠性。

4.3 智能化节能控制与热回收技术

智能化节能控制策略在低温环境下的应用,能够显著提高新能源汽车的能源利用效率。通过实时监控电池的温度、功率输出与外部环境温度,系统能够根据电池状态变化自动调整热管理系统的运行模式,以确保系统的高效运行并保持电池在最佳工作状态。自适应控制算法能够灵活调整加热与冷却策略,以应对低温环境下电池性能波动,确保电池高效稳定地工作。此外,热回收技术的引入为新能源汽车提供了进一步的节能优势。热回收系统通过收集电池和动力系统运行过程中产生的废热,将其转化为可利用的热能,显著提高了系统整体热效率。利用这些废热可以进行电池预热或供电,从而减少外部能源的消耗,并显著提高系统的能效。通过智能化节能控制与热回收技术的结合,新能源汽车在低温环境下的续航能力和系统稳定性得到了显著提升,进一步增强了车辆的能源利用效率,推动了低温条件下电动汽车技术的发展。

5 低温环境下电池性能提升的关键技术

5.1 相变材料在电池热管理中的应用

相变材料(PCM)因其在相变过程中具有较高的热容和较强的热储存能力,在电池热管理中得到了广泛应用。相变材料可以在电池温度波动时吸收或释放大热量,起到缓冲温度变化的作用。特别是在低温环境下,电池的温度容易下降至不适宜的范围,而相变材料能够通过相变过程有效地避免电池温度过低,减少电池性能衰退和能量损失。相变材料不仅在低温时提供热储存,还能在高温环境下通过释放热量来帮助电池散热,保持电池在适宜的工作温度范围内。因此,合理选择并集成相变材料于电池模块中,能够显著提升电池的低温性能,提高电池的能量利用效率和安全性。

5.2 热电材料与集成热回收技术

热电材料能够利用温差产生电能,应用于新能源汽车的热管理系统中,有效提高系统的能效。通过将热电材料与

废热回收系统集成,能够将电池及动力系统产生的废热转化为电能,不仅提高了热管理系统的效率,还能为车辆提供额外的电能,从而减少能源消耗和延长续航里程。热电材料的应用可以优化电池在低温环境下的运行表现,增强电池的热稳定性,避免过度加热或过度冷却带来的不利影响。热电回收技术与热管理系统的结合,能够有效提升新能源汽车的整体能效,降低温度波动对电池的负面影响,提升电池寿命和安全性。

5.3 优化电池加热系统与低温启动技术

在低温环境下,电池的启动性能往往受到显著影响,传统的电池加热方式不仅能耗大,而且加热速度慢,难以迅速提升电池温度以保证正常启动。通过采用高效的电池加热膜和智能加热控制技术,可以在较短的时间内提高电池温度,确保电池在低温环境下能够顺利启动。优化加热系统设计,能够减少启动时的能量损失,提高整体能源利用效率。此外,结合低温启动策略,借助预热控制算法,提前为电池加热,有助于减少电池温度下降对能量输出的影响,提升低温条件下的启动可靠性和续航能力。通过高效的加热和预热策略,可以有效提升电池的低温性能,确保电池在寒冷天气下的正常运行。

6 结语

低温环境对新能源汽车电池性能的影响是当前电动汽车技术发展中的一重要挑战。本文从电池热管理与节能协同控制的角度出发,提出了一种优化的热管理策略,通过智能化水冷系统、相变材料、节能控制算法和废热回收技术等手段,提升了电池在低温环境下的性能表现。研究表明,优化的热管理系统不仅能够提高电池的低温性能,降低能耗,还能延长电池的使用寿命。未来的研究可进一步探索智能化控制策略与新能源技术的结合,推动新能源汽车在低温环境下的广泛应用。

参考文献

- [1] 戴锋.新能源汽车低温智能电池管理关键技术研究与应用.四川省,四川新能源汽车创新中心有限公司,2024-11-21.
- [2] 陈露,张彩虹,叶智林,等.新能源汽车动力电池低温加热方式探究[J].小型内燃机与车辆技术,2025,54(04):59-62.
- [3] 赵磊,杨苗苗.低温环境下新能源汽车动力电池预热策略研究[J].汽车测试报告,2024,(02):43-45.
- [4] 王新刚,刘勤华.新能源汽车温控系统对电池性能的影响[J].汽车知识,2025,25(07):25-27.
- [5] 霍云龙.纯电动汽车能耗模型与节能路径规划研究[D].吉林大学,2022.

Research on Identification and Evaluation of Road and Bridge Structures Based on Nondestructive Testing Technology

Mao Wang

Anhui Construction Engineering Testing Technology Group Co., Ltd., Bengbu, Anhui, 233000, China

Abstract

China's ongoing transportation infrastructure development has led to frequent structural failures in bridges and roads under prolonged environmental and load conditions. Conventional inspection methods, however, suffer from drawbacks including high destructiveness, low efficiency, and limited accuracy. Non-destructive testing (NDT) technology, with its advantages of high precision, rapidity, and non-destructiveness, has become a crucial tool for structural defect identification. This paper systematically examines the application mechanisms of ultrasonic testing, geophysical radar (GPR), infrared thermal imaging, acoustic emission, and laser scanning. Through case studies, it analyzes the role of multi-source fusion and intelligent algorithms in quantitative defect assessment. The research demonstrates that integrated multi-technology detection enables precise defect identification, visual evaluation, and risk classification, providing scientific evidence and intelligent decision support for bridge and road structure operation and maintenance management.

Keywords

nondestructive testing; bridge and road structures; damage identification; structural assessment; intelligent monitoring

基于无损检测技术的路桥结构病害识别与评估研究

王茂

安徽建工检测科技集团有限公司, 中国·安徽 蚌埠 233000

摘 要

中国交通基础设施建设持续推进, 路桥结构在长期荷载与环境作用下病害频发。传统检测方式存在破坏性强、效率低、精度有限等不足。无损检测技术 (NDT) 以高精度、快速性和非破坏性优势, 成为结构病害识别的重要手段。本文系统探讨超声波、地质雷达 (GPR)、红外热成像、声发射与激光扫描等技术的应用机制, 结合典型案例分析多源融合与智能算法在病害定量评估中的作用。研究表明, 多技术协同检测可实现病害精准识别、可视化评估与风险分级, 为路桥结构运维管理提供科学依据与智能化决策支持。

关键词

无损检测; 路桥结构; 病害识别; 结构评估; 智能监测

1 引言

路桥工程是交通基础设施体系中的关键组成部分, 其结构安全与耐久性直接关系到交通运输安全与社会经济运行效率。长期以来, 路桥结构在荷载疲劳、环境侵蚀、材料老化与施工缺陷等因素作用下, 容易出现裂缝、脱空、钢筋锈蚀、疲劳损伤等多种病害, 若不能及时检测与评估, 将造成结构性能退化甚至引发安全事故。传统检测方法多依赖人工巡检与局部开挖式检测, 存在检测范围有限、主观性强及破坏性操作等缺陷。随着检测需求的精细化与信息化, 基于无损检测技术的结构病害识别方法应运而生。无损检测技术利用声、光、电、磁等物理信号对结构内部状况进行探测, 不破坏结构完整性即可实现病害识别与性能评估。该技术不

仅提高了检测精度和时效性, 还能为结构健康监测提供长期数据支撑。本文旨在探讨无损检测技术在路桥结构病害识别中的应用机制、融合方法与发展趋势, 为道路桥梁的安全管理和养护决策提供理论参考与工程实践指导。

2 无损检测技术的理论基础与应用体系

2.1 无损检测技术的基本原理

无损检测 (Nondestructive Testing, NDT) 以不破坏结构实体为前提, 通过分析外部施加物理信号的传播、反射与衰减特征, 判断材料内部的损伤状态与结构完整性。其核心原理在于不同介质与缺陷区域对信号的传播路径与能量分布产生差异, 从而实现对病害类型和位置的识别。检测流程通常包括激励信号的输入、响应信号的采集、特征参数分析与可视化成像四个阶段。超声波检测利用声波的反射与透射特性识别裂缝、蜂窝与空洞; 电磁检测通过电导率与磁导率变化判断钢筋锈蚀及界面分离; 红外热成像基于温度场分布

【作者简介】王茂 (1990-), 男, 中国安徽蚌埠人, 本科, 工程师, 从事路桥试验检测研究。

异常揭示脱层与空鼓；声发射技术通过实时监测微裂纹形成的应力波信号，捕捉结构早期破坏过程。多种检测手段的集成与互补，结合信号反演与数据融合算法，可实现结构内部损伤的量化分析与可视化表达，从而为路桥健康状态评估与维护决策提供科学依据。

2.2 路桥结构病害的主要类型与成因

路桥结构病害是多因素耦合作用的结果，具有隐蔽性、复杂性与累积性。常见病害包括混凝土裂缝、钢筋锈蚀、空鼓脱层、支座错位、接缝损伤及桥面沉降等。荷载疲劳与交通冲击是导致结构微裂纹发展的主因，环境侵蚀（如氯盐腐蚀、冻融循环、高温老化）进一步加速结构退化。施工材料差异、设计缺陷及维护不足也会引发早期损伤。不同病害在检测信号中具有特征性响应：裂缝区域的声波反射幅值增大、波速下降；空鼓与脱层引起电磁波信号衰减与相位延迟；锈蚀区则表现为磁场异常与电阻率变化。掌握病害的形成机理与信号响应规律是建立高精度识别模型与开展定量评估的基础。通过病害特征数据库与信号模板比对，可提高识别精度，实现从经验判断向数据驱动的科学诊断转变。

2.3 无损检测在路桥结构检测体系中的定位

在现代基础设施管理体系中，无损检测技术已成为结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)的核心组成。与传统的静载试验、取芯分析等破坏性方法相比，无损检测具有快速性、经济性与可重复性等优势，可实现结构服役状态下的安全诊断与性能评估。其应用模式主要包括三类：一是定期巡检型，用于宏观掌握结构运行状态与劣化趋势；二是专项评估型，在结构出现异常或计划维修前进行重点检测与病害量化分析；三是实时监测型，通过在关键节点布设传感器阵列与无线采集系统，实现对应力、振动、温度等指标的实时监测与数据回传。近年来，智能检测车载系统、无人机搭载传感设备以及远程监控平台的应用，使无损检测从静态采样发展为动态监控，实现了从“事后评估”向“预测预警”的转变。无损检测技术的体系化建设，不仅提高了路桥病害识别的精准度与时效性，也为结构全寿命周期管理提供了科学支撑与决策依据。

3 典型无损检测技术的应用与优势分析

3.1 超声波检测技术

超声波检测技术是混凝土结构内部损伤识别中应用最成熟的无损检测手段之一，其原理基于声波在介质中传播时受缺陷影响产生的反射、衰减与时延变化。声波在不同材料界面传播时，其传播速度、能量与波形均会发生可测变化，裂缝、空洞或蜂窝等缺陷会导致波速降低与信号能量衰减。通过声时差与能量变化分析，可精确判断病害的深度、范围与性质。传统脉冲反射法已广泛应用于桥梁主梁、桥面板和支座等关键部位检测，而近年来兴起的相控阵超声检测(Phased Array Ultrasonic Testing, PAUT)技术可实现多角度

声束聚焦与三维成像，显著提升了对复杂病害的分辨能力与成像清晰度。在桥梁早期裂缝识别及混凝土蜂窝空洞检测中，该方法的深度分辨率可达毫米级。超声检测具备精度高、响应灵敏、可量化等优势，但其信号传播受混凝土密实度、钢筋干扰与含水率影响较大，因此需结合声学参数修正模型或多频复合波检测策略，以提高检测结果的稳定性与可重复性。

3.2 地质雷达(GPR)检测技术

地质雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)技术基于电磁波在不同介质中的反射与透射规律，是桥梁与道路结构内部层间剥离、空鼓及脱空检测的重要手段。其基本原理为向结构体内部发射高频电磁波，接收由介电常数变化引起的反射信号，并通过波形特征分析判断结构内部异常。GPR检测具有检测深度大、分辨率高、施工影响小的优点，能够快速实现非破坏性评估。在桥面与路基检测中，GPR可精确识别钢筋分布、空鼓边界及脱空深度，并评估结构层厚度及材料均匀性。随着人工智能技术的引入，卷积神经网络(CNN)与支持向量机(SVM)等算法被用于GPR图像识别与自动分类，可实现波形特征的自主提取与病害类型的快速识别，使检测结果由经验判读向数据驱动转变。结合三维激光扫描与红外热成像等多技术数据融合，GPR检测可实现结构内外层病害的同步识别，形成多尺度、全空间的病害检测体系，为路桥结构的精细化评估与养护管理提供数据支持。

3.3 红外热成像检测技术

红外热成像检测利用热传导特性差异识别结构内部隐蔽缺陷，是桥梁与隧道表层结构无损检测的重要手段之一。其检测原理基于材料在受热后不同区域的温度分布差异：当结构内部存在裂缝、脱层、空鼓等缺陷时，热流传导受阻，表面温度场随之产生异常变化。红外摄像机通过捕捉目标表面的红外辐射能量，形成热图像反映结构热分布状态。经热图像序列分析与反演算法计算，可实现病害区域的定量定位与深度估算。该技术具有非接触、高效率、可视化等特点，特别适用于桥面防护层、隧道衬砌与混凝土表层快速检测。近年来，无人机(UAV)搭载红外热成像设备的应用，使高空、难接近区域的检测更加便捷与安全，可在短时间内完成大范围的热像数据采集与自动化分析。为提高检测准确性，需综合考虑环境温度、日照条件与风速等外界因素的影响，采用多时段观测与温差校正技术进行数据修正。红外检测在结构健康监测、预防性养护与应急评估中正展现出广阔的工程应用前景。

4 无损检测数据融合与智能识别方法

4.1 多源数据融合技术

无损检测在复杂路桥结构中面临介质多样、环境噪声复杂与病害特征差异显著等挑战，单一检测方法难以全面反

映结构损伤特征。多源数据融合技术通过整合超声波、地质雷达 (GPR)、红外热成像、声发射等多种检测信号,实现病害信息的多维度综合表征。其核心在于数据层、特征层与决策层的融合:在数据层面,通过时间同步与空间配准实现不同检测结果的对齐;在特征层面,采用加权平均、主成分分析 (PCA) 及深度学习特征提取方法,消除冗余信息;在决策层面,引入贝叶斯推理、模糊逻辑与神经网络模型对不同检测结果进行概率加权,实现病害识别的最优决策。实践研究表明,多源融合技术在复杂桥梁节点、钢筋混凝土界面及多层路面结构检测中能显著提升信号判读的准确性与稳定性,使裂缝、脱空、剥落与腐蚀等病害的识别误差率降低约 25%,检测可靠度提升至 90% 以上。这一融合体系不仅增强了无损检测结果的互补性与鲁棒性,也为结构病害评估与养护策略提供了高精度的多维信息支持。

4.2 基于机器学习的病害识别算法

机器学习的引入推动了无损检测向智能识别与自动诊断转型。通过对大规模检测数据集的特征训练,算法可建立多类别病害的判别模型,实现从信号采集到病害分类的全自动处理流程。支持向量机 (SVM) 在小样本条件下具备较强的泛化能力,适用于裂缝与空鼓识别;随机森林 (RF) 算法可在高维非线性数据环境中稳定工作,有效应对多种材料耦合效应;卷积神经网络 (CNN) 结合图像识别优势,能在红外热成像与雷达图像中自动提取病害特征,实现精细分类与目标定位。通过引入特征选择、数据增强与迁移学习策略,算法可适应不同结构与环境条件,提升识别的鲁棒性与自适应性。实测结果表明,基于深度学习的综合识别系统在桥梁混凝土剥落识别中准确率达 93%,在钢筋锈蚀与空洞检测中平均误差小于 5%。此外,算法在实时性方面具有显著优势,数据分析速度比人工判读快近两倍。该智能化识别体系为实现检测自动化与风险预警提供了技术支撑。

4.3 病害定量评估与可视化表达

病害识别的最终目标不仅是定位与分类,更在于实现损伤程度的量化评估与风险可视化表达。基于反演计算与有限元分析 (FEA) 方法,检测信号可转化为物理量,如应变、应力及损伤参数,进而建立结构性能退化模型。例如,超声波波速衰减可量化裂缝深度,电磁波反射系数变化可反映混凝土密度与钢筋锈蚀程度。结合结构健康监测数据与历史检测记录,可通过时序分析预测病害演化趋势。BIM (建筑信息模型) 与三维激光扫描技术的引入,使检测数据实现空间化与可交互化。通过构建三维病害信息模型,管理者可直观查看病害分布、损伤等级与演化过程。可视化系统还能与大数据平台联动,支持病害统计分析、趋势预测与维修方案模拟。部分工程实践中,利用 BIM 与 GIS (地理信息系统) 集成的可视化平台,结构健康评估效率提高 40%,决策响应时间缩短近 30%。病害定量评估与可视化表达的结合,使路桥结构养护从经验判断迈向科学决策,推动无损检测成

果向智能管理与全生命周期监测转化。

5 无损检测技术在路桥工程中的应用实践

5.1 桥梁结构安全监测与评估

在现代桥梁结构维护体系中,无损检测技术已成为实现健康监测与安全评估的核心手段。通过声发射、红外热成像和地质雷达 (GPR) 等多种技术的协同应用,可全面识别桥梁结构中的隐性损伤。声发射监测利用应力波信号捕捉裂纹萌生与扩展过程,实现早期损伤的动态定位;红外热成像基于热流传导异常识别表层剥落、空鼓与防护层脱粘;地质雷达则通过电磁波反射特征精准识别钢筋分布及内部空洞。以长江大桥为例,采用超声波、红外与雷达融合检测后,裂缝检出率提升至 95%,病害定位误差小于 2 厘米,检测结果与实测载荷试验吻合度超过 90%。该多技术融合体系使桥梁监测从周期性人工检测转向实时动态感知,构建了“采集—分析—评估—预警”一体化的监测框架。智慧检测平台的引入还实现了病害数据的可视化管理,为桥梁结构健康评估与全生命周期养护提供了科学依据与技术支撑。

5.2 道路结构层病害识别

道路结构层的疲劳损伤、剥离及脱空是影响道路使用寿命与安全性能的主要隐患。无损检测技术在道路病害识别中具有不可替代的作用。地质雷达 (GPR) 可通过电磁波传播特征识别层间脱空、反射异常与材料分层;落锤式弯沉仪 (FWD) 则测量道路结构的受力响应,反映路面承载能力与结构完整性。通过 GPR 与 FWD 联合检测,可实现结构性病害与力学性病害的同步识别,形成从表层到基层的全断面检测体系。实际工程研究显示,该组合技术使病害识别精度提升约 30%,检测效率提高 50% 以上。融合人工智能算法后,可通过对弯沉曲线与雷达图像的多维特征提取,建立自动识别与风险分级模型,对不同病害类型进行精准分类与严重度判定。该智能化识别体系为道路养护提供了科学决策依据,并结合时序数据实现道路结构寿命预测与维修优先级排序,为公路资产管理的数字化与智能化转型提供支撑。

5.3 隧道与高架结构检测

隧道与高架桥等复杂空间结构由于其环境封闭、结构多样与施工复杂,对检测技术提出了更高要求。无损检测技术的集成化应用在此类工程中展现出显著优势。超声检测结合红外热成像可精准识别衬砌脱空、裂缝及渗漏区域,通过温度场分布与反射波特征实现多维信息互补;三维激光扫描技术能够实现隧道内壁形变与位移的毫米级精度测量,为结构变形监控提供量化依据。在地铁隧道检测中,利用机器人平台搭载多传感器系统进行自动化巡检,可在短时间内完成全断面数据采集与智能分析,极大提升检测效率与安全性。无人机检测技术在高架桥维护中也发挥了关键作用,其搭载高清摄像与红外成像系统,可快速生成结构表面与内部缺陷的三维模型,实现病害的空间定位与可视化表达。研究表明,

自动化、智能化检测体系的建立,使隧道与高架结构的隐蔽病害识别率提升40%以上,为城市交通基础设施的精准维护与安全运营提供了新路径。

6 结语

无损检测技术的持续发展正引领路桥结构病害识别与健康评估向智能化、系统化方向演进。多源数据融合与人工智能算法的深度应用,使检测结果实现从“经验判断”到“数据决策”的转变,显著提升了病害识别的准确度与评估的科学性。未来,检测技术应与数字孪生、BIM和物联网系统深度融合,构建标准化数据平台与智能评估模型,实现结构状态的可视化监测与动态风险预警。同时,应加快检测设备的国产化与自动化创新,推动传感器集成、移动检测平台及无人化作业技术的普及,提升检测效率与经济可行性。通过形成“检测—分析—决策—反馈”的闭环管理体系,无损检

测将在交通基础设施全寿命周期管理中发挥核心作用,为路桥工程的安全运维、科学养护与高质量发展提供坚实的技术支撑与战略保障。

参考文献

- [1] 陈卫.基于超声波技术的公路桥梁结构病害检测方法[J].自动化应用,2023,64(07):176-178.
- [2] 龚志军.无损检测技术在公路桥梁中的应用[J].交通世界,2019,(27):119-121.
- [3] 张帅.无损检测技术在道路桥梁检测中的应用研究[J].交通世界,2021,(18):134-135+151.
- [4] 陈雪芬.无损检测技术在公路桥梁中的应用[J].广东建材,2015,31(02):29-31.
- [5] 李红伟.无损检测技术在道路桥梁试验检测中的应用[J].运输经理世界,2024,(14):72-74.

Exploration and Application of Digital Management of Expressway Mechanical and Electrical Systems

Guoping Shu Bingzhao Zhang

Zhejiang Quzhou Yongjin Qushang Expressway Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324000, China

Abstract

The construction and operation of highways cannot be separated from the function of many mechanical and electrical equipment. To ensure the transformation of highways towards intelligence and fully meet current operational needs, it is necessary to replace traditional management models with digital management. The implementation of digital management refers to the use of modern technologies such as big data and AI to digitally control various types of mechanical and electrical equipment, including monitoring, charging, and other facilities, from a full lifecycle perspective. It can monitor mechanical and electrical equipment in real time, ensure more efficient management, promote the improvement of equipment utilization efficiency, and ensure the maximum play of equipment functions. The article focuses on the electromechanical system of highways, mainly exploring digital management and its applications for reference.

Keywords

expressway; Mechanical and electrical systems; digital management

高速公路机电系统数字化管理探索与应用

舒国平 张丙照

浙江衢州甬金衢上高速公路有限公司, 中国 · 浙江 衢州 324000

摘 要

高速公路的建设和运营离不开诸多机电设备功用的发挥。为保障高速公路向智慧化的转型,使当前运营需求得到充分满足,有必要借助数字化管理取代传统管理模式。数字化管理的实施,指的是以大数据、AI等现代化技术手段为依靠,从全生命周期角度,以数字化方式来管控各种类型的机电设备,包括监控、收费等设施,其能够对机电设备进行实时监控,也能保障管理更具高效化,促进设备使用效率的提升,确保设备作用的最大化发挥。文章聚焦高速公路机电系统,主要探索数字化管理及其应用,以供参考。

关键词

高速公路; 机电系统; 数字化管理

1 引言

高速公路机电系统属于整个项目的核心所在,其涉及的系统多种多样,包括收费、监控和通信等系统,系统的主要特征表现为庞大、复杂,在交通运行方面发挥着关键保障性作用。在全国高速公路“一张网”运营模式纵深发展的背景下,不仅通车里程日益增加,同时交通量也呈现出了骤增趋势。此种情况下,相关单位机电管理部门必须要考虑的一个现实问题就是怎样实现高效维修,如何养护和管理机电设备,继而为机电系统整体的安稳运行保驾护航。文章以此为切入点,在概述高速公路机电设备特征、数字化管理关键

技术的基础上,探讨了数字化管理模式的实施,希望能够支撑高速公路运营的安全性、稳定性,同时推动其向数智化的全面转型。

2 高速公路机电设备特征分析

2.1 数量多,分布广

高速公路运行面临的现实要求就是安全、稳定,要想实现该方面目标,不容忽视的就是机电设备功能的发挥。从这方面看,高速公路机电设备的一个典型特征就体现在数量较多、分布相对广泛这一方面。

2.2 故障率高

高速公路往往面临复杂的运况与环境,这导致机电设备的运行也常处于复杂状态,而受暴雪、暴雨等不良天气的影响,加之设备运行时间过长,难免会出现较高的故障几率,所以定期或不定期的维护十分必要,这是其安稳运行的保障。

【作者简介】舒国平(1989-),男,中国浙江龙游人,本科,工程师,从事高速公路机电管理、数字化应用、机电营运管理等研究。

2.3 系统性强

立足机电系统角度进行分析,其兼顾复杂和统一的特征。从该方面看,各类机电设备间的关系也十分紧密,若一台设备存在问题,其他设备的故障也可能会由此引发。这意味着管理要兼顾整体、系统两个维度,为机电系统整体的可靠运行保驾护航。

2.4 管理较难

管理机电设备时往往会面临较大的难度,造成这一问题的关键原因就是机电设备存在数量大、种类多的情况,而由于各设备管理方式、维修技巧等存在明显差异,所以造成了低效化的管理局面。

3 高速公路机电系统数字化管理关键技术

3.1 物联网技术

此技术主要是依靠信息传感设备来联结物体、网络,以便对物体位置、一系列参数的确定。数字化管理模式下的机电设备管理工作开展中,作用不可替代的一个技术手段就是物联网,具体可依靠传感器设施来全天候监控设备运况,并保障类型多样设备之间互联互通目标的实现。该方面涉及的传感器装置主要有温湿度、振动等,可依靠此类传感器就运行过程中机电设备的一系列数据进行采集,之后向管理系统方面进行传输,以达到对设备运况的有效判定目的。而针对运行数据进行分析的过程中,若发现存在系统故障问题,可依靠物联网功用的发挥,实现对故障主要部位的快速锁定,也能第一时间进行预警,方便运维人员处理工作的及时开展。物联网在高速公路机电系统管理中的应用,能够依靠精准数据来支持、辅助设备管护工作的开展,还能使故障检测与评估造成的误差有效规避。而随着此技术的引进,管理人员工作压力、负担可明显降低,也能实现高效工作目标。

3.2 云计算技术

当前,云计算的应用已越发广泛,其之所以实现了普及,最关键的原因是其具备的数据存储能力十分强大。数字化管理高速公路机电系统时,引进该技术能够依靠云计算平台实现对各类型设备信息数据的综合、全面存储,还能够达成分类管理目标,保障高速公路存储海量数据的需求得到充分满足^[1]。不仅如此,云平台还具有弹性扩展特性,能够精准适配机电系统业务潮汐需求,最明显的表现就是节假日车流量高峰期,云平台能够快速进行扩容计算和存储资源,使系统卡顿问题得到规避;而到了平峰期,则能够自动缩容,使运维成本有效降低。当前,云计算技术支持下的高速公路机电系统数字化管理中,核心模式就是云边协同架构,其中的路段边缘节点,主要承担对监控视频、设备运行参数等即时数据的实时处理职责,而云端平台则负责汇总整体的数据,并进行深度分析,以指导后续的业务调度。该模式能够保障高

速公路运维、通行效率的大大提高,也可依靠强有力的技术来支撑数字化管理的高效性、稳定性。

3.3 大数据技术

前文阐述了机电设备在高速公路项目中的显著特征就是数量大,这也意味着其运行中所产生的数据信息也十分庞大,此类数据既包括运行方面的数据,还涉及到维修数据。此种情况下,在推动管理向数字化转型的过程中,不容忽视的技术手段之一就是大数据,要依靠该技术构建数字化管理平台,实现对设备参数的综合采集,保障数据分析和共享的智能化,使设备管理更高效。技术应用中,一方面要以移动端APP为载体,全方位管控设备各参数,要在发挥APP功用的基础上,观察设备参数病就运行中设备的异常信息进行分析,之后以该方面信息为依据就设备运行状态进行分析,指导远程调控工作的开展,为设备稳定运行提供技术支持。另一方面,借助个人计算机端管理设备各参数,主要涉及登记、启停和调用等方面的信息。考虑到设备管理方面的重点内容就是维修,也会涉及海量的数据,就需要个人计算机端以大数据技术为载体,就设备维修方面的一系列数据进行收集,包括时间、故障类型、修复方式及具体效果等,同时进行数据统计和管理工作。对于其中故障较频繁的机电设备来说,要注重对故障诱因的分析,保障调控工作更具针对性,使故障几率大大降低。

3.4 智能化协同管理技术

此技术的显著功效体现在可实现高效化管理方面,还能够彻底解决传统管理模式下存在的信息孤岛问题。其中在发现设备故障、异常参数的情况下,以数字化管理平台为基础来共享资源,有助于各部门、各人员对设备运况的及时了解,保障维修方案的制定更具针对性、时效性,促进设备运行质量的提升。智能化协同管理技术应用中,主要指的是对智能传感器、定位系统等的综合应用,以便实时采集设备运行信息,进而以信息技术为载体,向管理平台方面传送数据,之后聚焦设备运行数据,保障管理工作能够透明化、规范化开展,图1是智能化协同管理流程示意图。结合该图看,高速公路涉及的消防、门架和PLC等机电设施,主要是依靠智能传感器进行运行数据的实时、动态采集,之后会通过通信模块向云端平台进行上传。云端在分析、挖掘和共享数据的基础上,可解决信息孤岛的问题。对于设备故障、参数异常的情况,云端也会向各管理终端及时同步相应数据,为各部门、各人员的协同响应提供促进作用,保障设备维修、调控方案的精准性、高效化。可见,此技术作为数字化管理中的一个核心技术支撑,可保障设备状态管理的全流程透明化,能促进设备运维时效性的提高,而在共享资源的前提下,也可强化管理协同性。

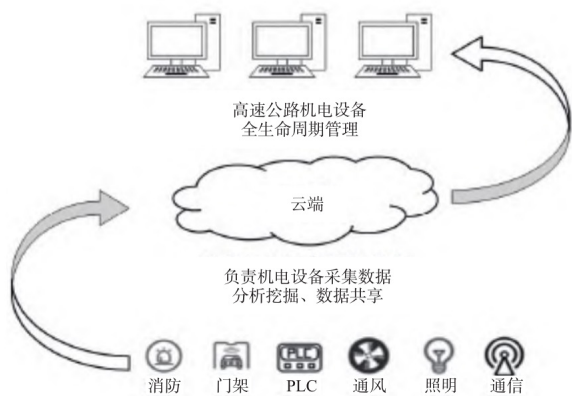


图 1. 智能化协同管理流程

4 高速公路机电系统数字化管理的实施

4.1 积极构建数字化管理平台

高速公路机电系统的数字化管理实施中，要想实现全面且精细的管理目标，就应跟随全寿命周期管理理念的指引，基于对大数据、物联网等技术的综合利用，保障多方协同的数字化管理平台得到有效构建，同时平台要能够与机电前端智能感知设备实现联动，确保以智能化的方式来采集设备数据，进而在与厂商、互联网等多维度数据相融合的情况下，达到自动检测、及时报警和快速处置设备故障的目的，如此一来，机电设备全生命周期精细化、透明化管理目标也能实现^[2]。

4.2 以流程再造重构组织协同范式

从传统的高速公路机电系统管理工作开展情况看，一般是依据设备出现问题 - 一线人员上报 - 部门逐层审批 - 安排维修这一流程来进行，其中涉及大量的环节，也会耗费较长的时间。而数字化管理模式下的流程再造，指的是推动这一串联式流程向并联式发展，即将设备运行数据向数字化平台方面进行实时传送，而平台预警可自动触发，并向运维、调度等有关部门进行推送，改变过去人工逐层传递的情况。如在门架设备出现故障的情况下，平台会向运维组、物资组同步传送故障信息、设备部位以及历史维修记录，此时运维组可直接带着适配备件前往故障点位进行维修，而物资组也可实现对耗材的提前储备，这种情况下，无需等运维申请再准备相应耗材^[3]。不仅如此，流程中也可增设跨部门同步反馈的环节，即到达现场的维修人员，依靠平台就维修进度进行实时更新，而其他部门则依靠平台来随时查看，使互相之

间的重复沟通问题得到规避。以上重构并不是完全推翻了旧的流程，而是从实际工作出发进行优化和改进，既使得一线人员现场判断权得到了保留，同时也依靠平台实现了各部门、人员之间“信息堵点”问题的解决，能促进各部门的协同配合与及时响应，确保设备停机时长有效减少。

4.3 完善复合型人才培养体系

数字化机电系统管理对管理人才也提出了更高要求，此种情况下，相关单位在实施数字化管理模式时，也不应忽视对复合型人才的培养。这一培养工作的开展，离不开相应体系的支持与指导。一方面，在岗实操，具体可安排维修人员跟随平台运维员共同参与对设备预警的处理，由平台运维员现场讲解如何借助平台观察设备实时参数、故障代码等信息，进而与现场设备拆解相结合，帮助维修人员意识到平台数据、设备具体故障之间的关联性。另一方面，定期练兵，可定期组织实操考核，通过对故障场景的模拟，使相关人员操作利用平台调出对应设备历史数据，并阐述现场排查的步骤和流程，在操作和阐述合格且达标的情况下，方可正式进行对应设备的维护与维修。需注意，有关单位针对现有人才进行培养的同时，也应引入高端技术人才，该方面高速公路机电管理部门、组织等可以与本地学校建立合作关系，实施协同化育人举措，通过“机电+数字化”课程的开设，面向学生群体讲授有关高速公路机电设备、智能化管理平台的一些基础操作。而针对毕业学生，高速公路相关单位可直接引进，并将其安排在运维辅助岗，这既有助于人才培养成本的大幅降低，也能使人才缺口问题得到良好解决。

5 结语

高速公路机电系统管理面临诸多的难点问题，主要表现为存在较高故障率、较强系统性等，为实现对此类难点问题的有效应对，尤为必要的就是推动管理向数字化的转型。而要想保障数字化管理效能的最大化发挥，既要引入数字化管理的诸多关键技术手段，也要系统化进行数字化管理体系的构建，促进数字化管理水平的根本上提升。

参考文献

- [1] 王秋,王强,胡永恺,等. 高速公路机电系统智能化运维管理探讨[J]. 公路交通技术,2025,41(3):197-204.
- [2] 孟斌. 高速公路机电系统智能化管理与维护研究[J]. 运输经理世界,2025(2):142-144.
- [3] 岳葵. 高速公路机电设备数字化管理关键技术分析[J]. 交通企业管理,2025,40(3):79-81.

Research on Dam Curtain Grouting Construction in Reservoir Reinforcement Project

Lihong Deng

SINOHYDRO BUREAU 7 CO., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

As a commonly used method for dam foundation seepage prevention and compaction treatment in reservoir reinforcement, curtain grouting construction directly affects the seepage resistance efficiency and long-term operational safety of the dam. Based on the engineering practice of China's reinforcement projects, this paper systematically discusses five aspects: the layout of the curtain grouting borehole network, drilling and sealing, slurry mix design and grouting techniques, pressure and grouting control, as well as post-grouting consolidation and volume stabilization. The study not only summarizes operational construction details but also proposes implementation points that can be easily promoted under complex geological and hydrological conditions, providing engineering and practical references for the construction organization and technical management of similar projects.

Keywords

reservoir; reinforcement project; dam; curtain grouting; construction

水库除险加固工程中大坝帷幕灌浆施工探究

邓丽红

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国 · 四川 成都 611130

摘要

作为水库除险加固中常用的坝基防渗与密实处治手段,帷幕灌浆施工直接关系到坝体抗渗效能与长期运行安全。本文立足中国除险加固工程实践,基于工程勘察资料、设计规范与施工试验成果,围绕帷幕灌浆的孔网布置、钻孔与封口、浆液配比与注浆工艺、压力与注浆控制,以及灌浆后固结与体积稳定化五个方面展开系统探讨。本研究既总结可操作的施工细则,也提出便于在复杂地质与水文条件下推广的实施要点,以便为类似工程的施工组织与技术管理提供工程化、可落地的参考。

关键词

水库; 除险加固工程; 大坝; 帷幕灌浆; 施工

1 引言

水库作为江河防洪体系的关键部分,其不仅是洪涝、台风、旱灾防御的重要工程,与人民生命财产安全息息相关,同时更在灌溉、供水、防洪等方面发挥着重要作用。但水库大坝在投入使用后受到包括局部地区强台风、强降雨等极端气候频发等诸多因素影响严重威胁其安全。一旦出现大坝病险、垮坝失事、支流水位提升情况,将会淹没农田,损害下游地区,因此在水库除险加固工程中大坝帷幕灌浆施工就显得尤为重要^[1]。有鉴于此,下文通过查阅相关数据库文献资料、工程实例以及结合自身实践情况下针对水库除险加固工程中大坝帷幕灌浆施工展开探究,以供参考。

2 水库除险加固工程概述

水库除险加固工程是针对已建水库在安全鉴定或现场核查发现的病险隐患,按照“查明病因、消除险情、恢复功能”的原则实施的工程措施,其涵盖对现有水利枢纽在结构、坝基与配套设施方面的风险识别、隐患治理与工程性加固措施实施^[2]。而在除险加固工程中,大坝帷幕灌浆作为常用的防渗透与固结技术,旨在通过在坝基或坝体下部布设连续或分排灌浆孔网,采用充填灌浆、压水试验引导和分层分序注浆,封堵岩体裂隙与孔隙,恢复或提高坝基渗透系数与承载性能。施工关键包括钻孔贯通主裂隙并冲洗清孔、分段压水试验确定渗流响应与注浆压力、选用水泥基或超细水泥及必要时掺入化学灌浆料以改善渗透填充效果、严格控制注浆注入量与压升速率以防胀裂或短路,及通过生产性试验验证设计参数。质量控制要求贯穿钻进、冲洗、灌浆与封孔全过程,基于回浆量、注浆压力与浆液配比及时调整施工参数,同时应做好施工期废水收集沉淀与现场环境治理,确保工程技术

【作者简介】邓丽红(1983-),女,中国四川眉山人,本科,工程师,从事水利工程基础处理研究。

措施与环境保护协同实施。

3 水库除险加固工程中大坝帷幕灌浆施工探究

3.1 孔网布置与分序原则

大坝帷幕孔网布置方面,应以详查的地质剖面、裂隙走向与地下水水位恢复曲线为依据划定功能区,针对断层、风化带与高渗脆弱段实施分级布孔,边缘带须三向密集并布置校核孔以保证平面与深度的封闭,中部孔列采取错排并在主要透水层增设贯通或回灌孔,孔径与套管形式由钻机能力、孔深和注浆材料适应性决定,布孔设计需经地质工程师与设计单位会审并形成施工图。分序注浆原则细化为深部先行形成初期堵塞、随后分段由下而上加密填充;首序采用低黏度示踪浆探通裂隙并以回浆量与注浆压曲线判定连通性,二序采用中稠度砂浆完成桥接封堵,终序采用高强度水泥基填充浆实现孔段固结与抗渗补强,注浆终止以在规定压力下停止吸浆并延时观测十分钟为判定依据。针对单排与多排帷幕施工,应实施排内由稀到稠、由小压到大压的梯度注浆策略,边排先行后中排补强,并在必要时先下游后上游顺序施作以降低浆液窜流风险,每一序次设置固定压时判定节点,异常时及时扫孔或增设旁孔^[3]。施工组织与质量控制要求将孔网布置与钻进偏差控制、套管定位、孔口密封、注浆设备与计量回浆系统一体化管理,现场配备大量程压力表与计量装置并按试验室校验的配比调整浆液性状,灌浆后按规范布置检查孔或取芯验收,注浆曲线、压力曲线、扫孔记录与取芯报告应归档存证以供监理与设计单位审查并用于后期维护与二次加固决策。施工人员应严格执行操作规程并由监理工程师逐段签认,并按规范要求进行验收记录与长期观测安排。

3.2 钻孔、孔口封闭与套管

在大坝帷幕灌浆钻孔作业中,应实施严格的分层钻进与同步清孔制度,分层深度依地层物性与设计帷幕厚度确定,每层钻进后即时采用高压水冲或气举进行孔底泥砂清除并实施终孔验收,清孔液须达透明标准且回流量、含砂率与浊度有记录,若指标超限应复钻或增设清孔循环以确保起始注浆条件。针对软弱、塌孔或高水头地段,应采用跟进套管护孔并在下入套管前以泥浆护壁结合低速置换法置换孔内液体,同时对套管外壁实施预灌水泥浆或低压固结注浆以恢复承载能力,套管材质、壁厚与接头形式按设计压差与施工振动选型,套管与地层间宜留 3 至 10 毫米可控通道以利注浆嘴定位与回浆观测。孔口封闭宜采用预埋孔口管配合可拆卸止浆帽,并根据现场渗流特征选用孔口砂封、改性快凝水泥浆或单组分速凝注浆料分段成圈封堵,封口前必须核验清水回流且进行短时充压试验以确认孔底连通性与封口工况,封口构件应便于施工中分段拔管、补浆与更换操作且能抵抗振动与冲刷影响。套管锚固与抗浮控制在施工方案中需明确锚固深度与机械连接方式,应采用卡箍、焊接或化学锚栓等

复合锚固措施,并按分段拔套、逐层补浆原则实施,拔套时保持注浆嘴距孔底 200 至 500 毫米以避免形成空洞,钻孔质量检验包括孔位坐标复测、孔径与净深核实、套管垂直度与密封性试验并留设检测孔以开展压水与回灌试验,水下或高水头区还应采用浮筒支撑防水平台与潜孔钻机,并在孔口设置护帽与防冲刷裙体以抵抗波浪扰动,所有施工参数、套管出厂证明与试验记录应归档以便质量追溯。

3.3 浆液配方与注浆工艺控制

水库除险加固工程大坝帷幕施工中浆液配方与注浆工艺控制要点在于以下几个方面:浆液配方必须以现场钻孔岩性描述、颗粒级配与室内渗透系数试验为依据,先制定多套候选配方并通过标准化小试确定水灰比与掺合料比例,裂隙性基岩宜采用水泥-粉煤灰-膨润土复配体系,推荐粉煤灰掺量占水泥质量的 50% 至 80% 以调节可泵性并用膨润土改善触变与密封性,同时编制速凝剂与减水剂添加量表并在施工环境温度下做凝结与强度时效小试以明确现场调整区间与换算系数,并提供配方转换表以适配制浆设备。注浆工序采用由稀及稠、由细及粗的分级换浆体系,起始以高水灰比探测浆穿透未知裂隙以测定吸浆曲线、回浆率与压力响应,依据回浆清晰度、吸浆突增及压升速率逐级转入中稠度桥接浆与低流动性膏体封堵浆,换浆以定量置换法实施并以泵压突变、回浆成分与耗浆量作为换浆和停注的现场判据,换浆操作需双人复核并采用标准化记录表单。注浆工艺控制细化为单孔最大注浆量、分段长度与稳压维持时长,现场以实时压升曲线、孔内水位与回浆比重设定可操作阈值,必要时采用闭式孔内循环以减少地层水扰动,采用脉动或低压多次注浆提高裂隙占据率并采取限流与减压措施以防止地层冲刷与井内空洞形成,对关键孔位实施人工核查并结合回压试验确认封堵效果。另外,质量保障由到场材料检验、配比计量与稠度测试、凝结与泵送性能现场小试以及批次化回浆化学分析构成,建立浆液批次登记、注浆参数曲线与回浆数据库,规定每孔必录项包括称量明细、换浆时间戳、压升曲线及回浆样品化验结果,现场试验不合格按阈值复配或停工处理,所有数据定期由专业试验室复核并记录处置^[4]。

3.4 压力控制、注浆参数与现场判据

针对大坝帷幕灌浆施工中压力控制、注浆参数与现场判据,核心在于:注浆压力确立与动态规控,根据压水试验、孔隙渗压响应与地质报告初定稳压上限,并以灌浆管孔口表压为控制基准,同时在首孔试注中采用逐步加载法验证地层承载界限,若压升速率超出预定阈值即实施回退并改用低频脉动注浆以降低冲击,施工记录需逐段登记峰值与稳压曲线以便汇总分析,必要时依据现场变形监测调整设计压力。注浆参数细化与段段管理,将灌浆工作细化为独立段落管理,段长按岩体完整性与规范建议取 5~6 米为常规值,遇完整岩体可适当延长但不宜超过 10 米,单孔单段最大注浆量及最大允许压力应由工程地质与注浆专业复核并书面下达,浆

液配比由稀到浓逐级变换并规定改浓条件与量程。现场判据与回浆判读上,明确多类停注判据,包括回浆清水量长期低于设定阈值判定穿透并启用邻孔补注,回浆量急剧下降且伴随注浆压力陡增判定局部封堵并保持稳压观测直到压降平稳,连续在岗人工与在线压力流量记录对比涌浆特征曲线以决定是否增设旁孔或反复灌注,且所有判定均须同步拍照录像与电子签认。应急处置与质量闭环方面,制定应急处置清单,包含立即降低注浆速率、缩短段长、采用高稠度或膏体浆液、临时封堵邻孔及启用导管封孔等措施,封孔与结束标准应按设计最大压力下的持续注入率判定并留取试验与取芯资料作为质量评定依据,同时要求施工单位在每个工区设立专职资料员负责施工数据的整理汇总以供后期回溯。

3.5 帷幕灌浆的后固结与体积稳定化工艺

为保证大坝帷幕灌浆施工中灌浆体在注入后达到既定密度与长期稳定性,应在注浆完成后实施系统化的后固结工艺。分层阶梯回注与沉积置换,依据地质剖面和试验孔观测结果,将已注满段划分为若干厚度可控的回注层次,先以微压($\leq 0.05\text{MPa}$)低速循环置换残留毛细水,随后按由胶结相向颗粒相转移的注入序列输注微细填料,填料粒径与孔隙谱匹配并控制比容变化,单层注入后设定滞留稳压期以利颗粒重排与孔隙排水,稳压期以孔隙比和渗透系数确定并以现场回浆与孔压曲线验证。真空辅助脱水与外加静压结合,主要对高含水或胶结速率慢的注浆体,上覆布置可调负压管幕并配合分区静压荷载,负压抽吸速率与静压幅值按渗透率与可压缩性分级控制,抽吸阶段采用间歇一等压复合工序以防快速抽干造成二次坍塌,排水口与真空管路设监测阀以记录排水量与孔隙水压变化并据此调整工艺参数。机械振动与局部液压力同步施加,针对局部大孔隙或盲腔,采用套管外振动器或喷嘴振动装置在受控频率带内诱导颗粒重组,同时配合短时增压注浆以补注盲区,振动频率和幅值以现场粒

径分布及近场地层响应为依据并通过孔内声发射与回浆率判据限制振动时长,振动—增压周期循环直至注入量、回浆和孔压趋于稳定^[5]。化学交联与固化调控方面,施工企业对需耐久性处置段落,采用微量交联剂或缓释型固化剂进行定点或网格注入,控制交联速率与扩散半径以形成强度梯度平滑过渡区,注入配方以现场渗透半径和胶体相容性为主导并配合温湿控养护措施以保障交联反应完整,所有工序均纳入贯穿的试验—监测—反馈体系以便评估体积稳定性与力学性能。

4 结语

综上所述,本文基于中国水库除险加固工程实践,围绕帷幕灌浆的孔网布置、钻孔与封口、浆液与注浆工艺、压力控制以及灌浆后控制五个方面提出系统性施工要点与工程化实施建议。上述要点强调由地质特征驱动的布置原则、分序施工与现场动态判据的重要性,并主张以完整的施工记录和第三方监测作为质量保证手段。期望所给出的可操作技术细则有助于在中国复杂地质条件下提升帷幕灌浆的施工效果与工程可控性,为除险加固工程的组织管理提供参考。

参考文献

- [1] 廖晚秋.水库除险加固工程大坝帷幕灌浆施工技术探究[J].建筑技术与创新, 2024, 1(6).
- [2] 鲁绍杰.帷幕灌浆施工技术在 reservoir 大坝除险加固工程中的应用[J].工程技术研究, 2025(9).
- [3] 胡其华.水库除险加固工程大坝帷幕灌浆施工分析[J].现代工程技术, 2023, 2(3):30-33.
- [4] 李强.帷幕灌浆技术在水库除险加固工程的施工方案构建研究[J].产业科技创新, 2024, 6(3):40-43.
- [5] 覃壮明.水库除险加固工程大坝帷幕灌浆施工与质量控制[J].数字化用户, 2024(20).

Research on Key Points of Connection between Estimation and Budget Estimate of Construction Projects and Collaborative Control Mechanism

Kaiyue Liu

China Railway Design Corporation Limited, Tianjin, 300000, China

Abstract

Estimation and budget estimate of construction projects are key components of project investment decision-making and cost control. The smooth connection and coordinated management level of the two have a direct impact on the realization of project economic benefits and the overall implementation effect. In view of the prominent problems existing in the current industry practice, such as the separation of estimation and budgeting, deviations in data transmission, and fragmented management and control, this paper deeply explores the intrinsic correlation logic and key points of connection between these two stages in terms of compilation basis, accuracy standards, method selection, and data interface adaptation. The research proposed a closed-loop collaborative control mechanism with the core orientation of “goal coordination, process linkage, and information sharing”, and established a comprehensive control framework covering organizational structure optimization, process standard formulation, technical platform support, and dynamic adjustment mechanisms. This paper demonstrates the practical value of this mechanism in strengthening the continuity of cost compilation and ensuring the effectiveness of investment control, striving to provide theoretical reference and operational practical paths for the refined promotion and integrated implementation of cost management in the early stage of construction projects.

Keywords

Construction engineering Estimation and budget estimate; Key points of connection Collaborative control and management

建筑工程估算与概算衔接要点及协同管控机制研究

刘凯月

中国铁路设计集团有限公司, 中国 · 天津 300000

摘 要

建筑工程估算与概算是项目投资决策及成本控制的关键组成部分, 二者的顺畅衔接与协同管控水平, 对项目经济效益的实现及整体实施成效有着直接影响。针对当前行业实践中存在的估算与概算相互割裂、数据传输存在偏差、管控呈现碎片化等突出问题, 本文深入探析了这两个阶段在编制依据、精度标准、方法选用及数据接口适配等方面的内在关联逻辑与衔接核心要点。研究提出了以“目标协同、过程联动、信息共享”为核心导向的闭环协同管控机制, 搭建了涵盖组织架构优化、流程规范制定、技术平台支撑及动态调整机制的综合性管控框架。本文通过论证该机制在强化造价编制连续性、保障投资控制有效性方面的实践价值, 力求为建设项目前期造价管理的精细化推进与一体化实施提供理论借鉴和可操作的实践路径。

关键词

建筑工程; 估算与概算; 衔接要点; 协同管控

1 引言

建筑工程项目的投资控制贯穿于项目全生命周期, 是一个动态推进的过程。其中, 投资估算与设计概算作为前期决策和设计阶段的核心造价文件, 发挥着不可替代的作用。投资估算主要应用于项目建议书和可行性研究阶段, 是对拟建项目总投资额的初步测算, 直接为项目立项和融资决策提供关键依据; 而设计概算编制于初步设计阶段, 依据设计图

纸、概算定额及相关费用标准制定, 属于精度更高的投资限额, 是后续控制施工图预算和工程总投资的核心基准。从理论层面来看, 估算与概算本应形成逐级深化、前后相互约束的有机整体。但在实际工程实践中, 二者脱节的问题十分普遍: 一方面估算的指导性不强, 另一方面概算突破估算时缺乏有效的约束机制和合理分析, 这就导致“估算虚设、概算超估算、预算超概算”的“三超”问题频繁出现^[1]。造成这一问题的核心原因, 在于估算和概算两个阶段的工作由不同主体在不同时期分别负责, 且缺乏统一的衔接规则和有效的协同管控机制。因此, 系统梳理估算与概算的衔接关键要点, 构建一套切实可行的协同管控机制, 已经成为实现建设项目

【作者简介】刘凯月(1993-), 男, 中国河北沧州人, 硕士, 工程师, 从事建筑与土木工程研究。

前期造价精准管控、保障项目投资效益的迫切要求。本文的研究目的，就是深入剖析估算与概算两阶段衔接背后的技术逻辑和管理逻辑，提出一套系统化的协同管控框架，并结合理论模型构建与实际案例分析对其进行验证，希望能为我国建筑工程造价管理水平的提升提供有益参考。

2 估算与概算的理论内涵及衔接逻辑关系

2.1 投资估算与设计概算的理论内涵

投资估算更偏向于宏观把控与前期预判。由于项目前期信息往往不够明确，存在较高的不确定性，所以编制投资估算时，大多依靠类似项目的历史数据、单位生产能力指标，再结合工程师的实践经验判断以及相关政策性文件来完成。

它的核心作用是为项目可行性分析提供经济层面的评价依据，进而初步划定投资范围、判断投资实施的可能性。设计概算则更突出精确性和确定性。编制时以已成型的初步设计图纸为基础，结合明确的设备及材料清单、官方颁布的概算定额与取费标准开展工作。相比投资估算，设计概算的精度有了明显提高，一般要求将误差控制在 $\pm 10\%$ 范围之内。

2.2 两阶段衔接的内在逻辑关系

估算与概算的衔接，本质上就是项目投资概念从模糊逐步变得清晰、从宏观不断细化为具体的深化与固化过程。二者的逻辑关系主要体现在三个方面：指导与约束关系、深化与验证关系、反馈与调整关系^[2]。估算和概算这两个阶段的理论衔接关系，可通过图 1 所示的动态过程模型来概括。

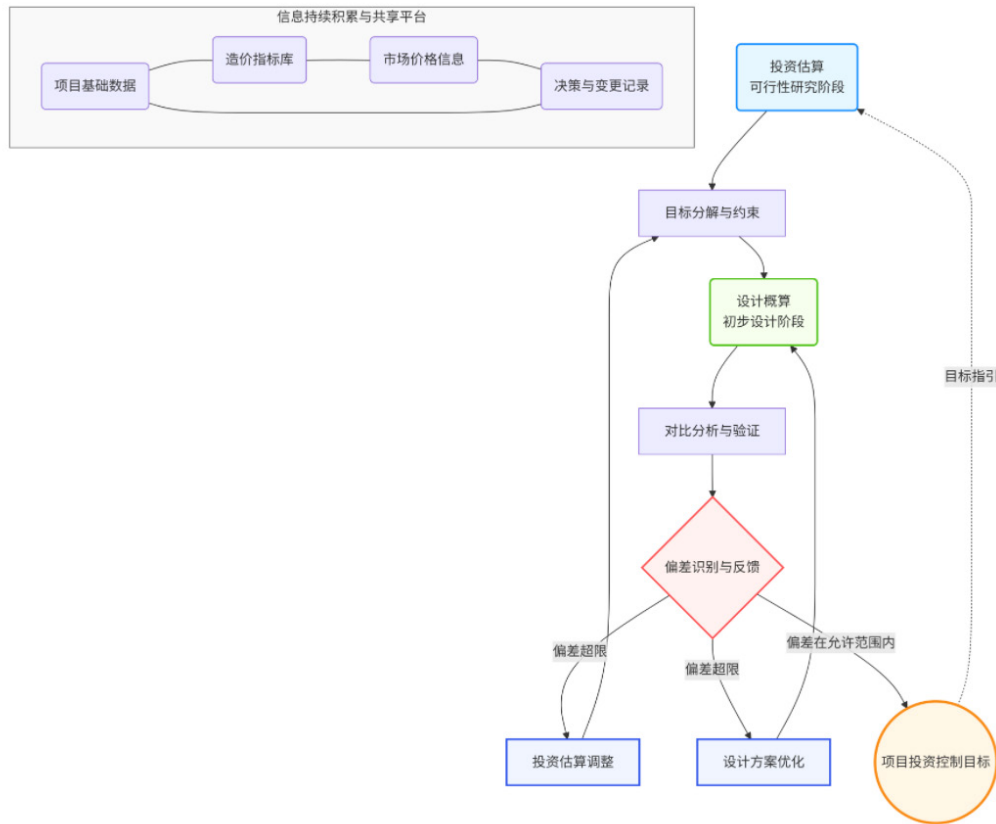


图 1：投资估算与设计概算动态衔接过程模型

3 估算与概算衔接的关键要点剖析

要实现估算与概算的有效衔接，关键得抓好以下四个核心要点：3.1 编制依据与数据 3.1 口径的衔接

编制依据不一样，是造成两阶段结果脱节的首要技术问题。估算大多用综合性指标，而概算采用的是分解性定额。要实现二者衔接，核心是搭建“指标-定额”的映射关系库，让数据口径保持一致。

3.2 精度演进与误差控制的衔接

虽然估算和概算允许的误差范围不同，但精度的提升得有合理的过渡过程。估算本身比较粗放，所以必须预留足够的风险预备费；进入概算阶段后，随着设计不断深化，不

确定性逐渐降低，预备费的计提就要更精准，之前估算中一部分风险准备金，也应转化成明确的工程费用^[3]。

3.3 编制方法协同应用的衔接

估算常用的方法，比如：生产能力指数法、比例估算法和概算采用的方法，比如：概算定额法、概算指标法。虽然不同，但内在要形成协同，不能各自独立。

3.4 关键经济参数与假设条件的衔接

项目选址、建设标准、主要材料设备的选型等级、工期等关键经济参数和假设条件，要在估算阶段先初步明确，到了概算阶段再正式确认或者合理调整。只要有重大变更，都应在概算文件中单独列出，和原估算的假设做对比说明，

分析它对投资的影响。

4 估算与概算协同管控机制构建

要解决衔接过程中出现的管理脱节问题，需从组织、流程、技术和动态调整四个维度入手，搭建一套系统化的协同管控机制。

4.1 组织与责任协同机制

组建跨阶段的“投资控制联合小组”，以建设单位为核心主导，整合负责估算的咨询单位、负责概算的设计单位的核心技术人员。同时明确各方在衔接工作中的具体责任：建设单位作为最终责任主体，需提供统一的项目基础数据和明确的决策要求；咨询单位要确保估算结果的合理性与实际指导性，并向设计单位做好技术交底；设计单位则需在估算划定的框架内优化设计方案，同时对概算编制的准确性承担相应责任。

4.2 流程与信息协同机制

设计一套标准化的衔接工作流程（详见图2），核心节点包括三项关键工作：一是估算成果的正式移交及专项交底会；二是概算编制前的“估算符合性审查”；三是概算与估算的强制性对比分析报告编制及评审。

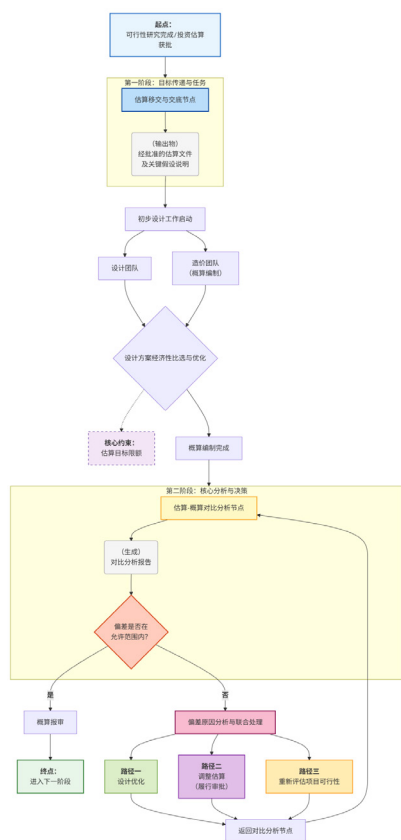


图2：估算与概算协同管控工作流程图

4.3 技术与平台支撑机制

借助建筑信息模型与工程造价管理的融合应用技术，在方案设计阶段，即便使用的是低细节度的BIM模型，也能在模型中关联估算级的工程量和造价信息。当模型推进到初步设计阶段时，这些已关联的信息可部分直接继承，还能自动转换为符合概算要求的更精细构件分类及工程量数据，这样既能大幅减少重复算量的工作量，又能降低数据转换过程中的误差^[4]。

4.4 动态反馈与调整机制

设立制度化的动态反馈渠道，一旦概算与估算出现重大偏差，就会触发预警机制。此时联合小组要及时召开专题会议，不能简单粗暴地压减概算，而是要系统分析偏差产生的根本原因。如果是合理的设计优化升级，就按规定程序申请调整估算；要是估算存在疏漏，就修正估算的基础数据；如果是设计过于冗余，就对设计方案进行优化精简。这套机制能保证投资控制不再是僵化的“一刀切”模式，而是基于实际情况和数据支撑的科学、动态化管理。

5 结论与建议

本研究围绕建筑工程估算与概算的衔接要点及协同管控机制展开了系统探讨。研究发现，估算与概算这两个阶段的有效衔接，是项目投资控制取得成效的基础，核心在于做到编制依据的相互对应、精度演进的可控可追溯、方法应用的协同配合，以及关键参数的显性化传递。而要让这些技术层面的要点真正落地，还需要有强有力的管理机制作为支撑。本文构建的协同管控机制，核心围绕“组织协同、流程规范、技术支撑、动态反馈”四个方面。通过明确各方责任主体、固化关键衔接节点、借助信息技术手段、建立科学的动态调整路径，这套机制能够有效打破不同阶段之间的管理壁垒，既让估算能对概算起到有效的引导和约束作用，也让概算能对估算进行合理深化并反馈调整，最终形成完整的管理闭环。实践表明，该机制能够明显增强项目前期造价管理工作的系统性，同时提升其抗风险能力。

参考文献

- [1] 王广月,韩勃,刘健.工程概预算[M].中国水利水电出版社:202209:299.
- [2] 安磊,国网冀北电力有限公司经济技术研究院.冀北地区输变电工程初步设计概算评审要点手册[M].中国水利水电出版社:202107:256.
- [3] 吴青.工程估算概算与工程设计的关系及作用[J].住宅与房地产,2019,(33):30.
- [4] 王广月,王善举.工程概预算[M].中国水利水电出版社:201009:276.

Analysis of Risk Management in Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction Projects

Chao Li Jiagan Li Taihong Li

Lianyungang Mingyu Water Conservancy Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222100, China

Abstract

The construction of water conservancy and hydropower engineering projects is related to the overall development of society and affects the quality of life and experience of the people. In recent years, the development of water conservancy and hydropower engineering construction projects in China has made rapid progress, with the scale of construction increasing day by day and the construction situation becoming increasingly complex. The construction project risks they face are also increasing day by day. The research on risk management of water conservancy and hydropower engineering construction projects aims to create an efficient and scientific risk management system, assist in promoting the progress of water conservancy and hydropower engineering construction, and ensure that the economic and social benefits of water conservancy and hydropower engineering construction projects meet expectations. This article elaborates on the overview of water conservancy and hydropower engineering, analyzes the common construction project risks of water conservancy and hydropower engineering, and then proposes four risk management strategies: precise identification of risks, scientific evaluation of risks, flexible response to risks, and improvement of risk management guarantee mechanisms. Together, they form a hierarchical and progressive scientific risk management system for reference.

Keywords

water conservancy and hydropower engineering; Construction project risks; risk management

水利水电工程施工项目风险管理探析

李超 李加干 李太洪

连云港铭禹水利建筑安装工程有限公司, 中国·江苏·连云港 222100

摘要

水利水电工程施工项目建设关系着社会整体发展,影响着人民群众的生活质量与体验。近些年,中国水利水电工程施工项目发展突飞猛进,工程施工规模日益增加、施工情况愈发复杂,其所面临的施工项目风险与日俱增。研究水利水电工程施工项目风险管理,旨在打造高效科学的风险管理体系,辅助推动水利水电工程施工进展,确保水利水电工程施工项目经济效益与社会效益符合预期。本文阐述了水利水电工程概况,分析了水利水电工程的常见施工项目风险,之后分别从精准识别风险、科学评价风险、灵活应对风险、完善风险管理保障机制这四点风险管理策略,共同构成了层层递进的科学风险管理体系,以供参考。

关键词

水利水电工程; 施工项目风险; 风险管理

1 引言

社会经济发展促进了中国水利水电工程的发展,目前水利水电工程已经成为中国社会经济发展的基础性工程,是社会经济发展、社会和谐建设的重要保障。中国是世界上水利水电工程数量最多的国家之一,其中有水库约 8.6 万座,堤防 16.8 万多 km,万亩以上的灌溉区 5200 多个,以及水闸 2.5 万多座。这些水利水电工程成果,在抵御水旱灾害发生、保障农业生产、维护城乡用水用电安全方面发挥着重要

作用。面对规模愈大、情况愈复杂的水利水电工程,应加强施工期间的项目风险管理,精准识别多样化的施工风险,灵活应对施工现场管理环节、施工作业风险、作业环境风险,并且制定完善的风险管理保障制度,确保各项风险管理措施得以落实。

2 水利水电工程案例概况

为了更直观地探讨水利水电工程施工项目风险管理,本文引用金沙江下游水电站项目为例。这一项目中四座水电站与长江干流上的三峡、葛洲坝水电站相连,形成了一条跨越 1800 多公里、水位落差超过 900 米的世界最大清洁能源走廊。其不仅对展示风险管理策略具有支持作用,更对于未

【作者简介】李超(1993-),男,中国江苏连云港人,本科,工程师,从事水利水电工程研究。

来水利水电工程施工发展具有重要促进作用。

金沙江下游水电站（以下简称“JSJ工程”），是中国“西电东送”战略的核心骨干工程，其由四座梯级水电站组成（如表1），装机容量分别是1020万千瓦、1600万千瓦、1386万千瓦、640万千瓦。四座巨型水电站共同构成了目前中国最大清洁能源走廊的关键构成部分，成为国家能源结构调整的重要引擎。

该项目建设中，乌东德水电站的大坝坝高270米，薄壁设计突破经验局限，且大胆采用新材料，集中体现了高拱坝技术的进步；白鹤滩水电站采用了全球单机容量最大的百万千瓦水轮发电机组，从设计、制造到安装实现了100%国产化，同时全坝采用低热水泥混凝土，打造“无缝大坝”；

溪洛渡水电站的施工过程中，搭建了“大坝智能化建设管理系统平台”，形成了全新的施工风险管理模式；在向家坝水电站工程施工过程中陆续开展了超过100项的科研实践，其中，重力坝曾荣获高混凝土坝国际里程碑工程奖。

可见，这一水利水电工程的施工过程十分复杂、施工要求极高，且施工环境、施工工序呈现复杂化、多样化特征，这些都为水利水电工程施工项目风险管理增加难度。因此，本文根据这一项目角度出发，论述水利水电工程施工项目风险，探究水利水电工程施工项目的风险管理。向中国经典水利水电工程致敬，同时提出可适用于大规模、复杂化的水利水电工程的施工项目风险管理策略。

表1 金沙江下游水电站构造及其综合情况

名称	总装机容量	特征	功能与效益
乌东德水电站	1020 万千瓦	世界最薄的 300 米级特高拱坝（厚高比 0.19），全坝应用低热水泥混凝土	发电、防洪，是金沙江下游梯级开发的第一级
白鹤滩水电站	1600 万千瓦	世界单机容量最大的百万千瓦水轮发电机组，多项技术指标世界第一	发电，是实施“西电东送”的国家重大工程
溪洛渡水电站	1386 万千瓦	开创中国高拱坝智能化建设先河，浇筑混凝土未出现温度裂缝	发电、防洪、拦沙，改善下游电站航运条件
向家坝水电站	640 万千瓦	金沙江下游唯一修建通航建筑物的电站，升船机规模巨大	发电、防洪、灌溉、通航，兼具对溪洛渡水电站的反调节功能

3 水利水电工程的常见施工项目风险

根据“JSJ工程”概况，可知这一工程施工规模大、施工技术要求高、施工环境复杂，且技术标准极高。在该水利水电工程施工推进的过程中，受到诸多因素影响存在多样的施工项目风险，具体可归纳如下。

第一，施工现场管理风险。对于“JSJ工程”而言，其综合性的单项较多，且每个单项均具有一定规模，涉及较多的机械设备、施工人员与作业场地。实际施工中，这些都需要工作人员根据实际情况统筹管理。但是，由于分项较多、工序交叉频繁，容易出现现场的设备、材料调度问题，一旦发生，不仅会耽误工期，更会导致各单项的协同施工流程被打乱，从而造成严重的施工现场管理风险^[1]。

第二，施工作业风险。“JSJ工程”包含四大水电站，在每个水电站分项目的施工中，都需要在复杂的施工环境中作业，且确保施工成果符合预期技术标准。这一过程中，各项工序的推进都是产生作业风险的源头。比如，土方开挖风险。“JSJ工程”的四大水电站及相关附属子工程均在临近水域的岸边开展，土壤含水量较高，若施工作业人员开挖槽、坑、沟深度超过1.5m，很容易引发塌方，造成安全事故。但是，若开挖深度不符合要求，也会导致整个工程项目的基础安全得不到保障。再比如，砌筑作业风险。白鹤滩水电站首次打造了全坝采用低热水泥混凝土，以“无缝大坝”闻名于水利水电行业，其砌筑工序要求较高，无论是模板、支撑等构件安装不够严谨，还是混凝土振捣器漏电等均会严重阻碍工序

推进，产生施工作业风险，影响最终的大坝质量。除此之外，临边防护、石方爆破风险、钢筋加工风险、机械操作使用风险等都是常见的工程施工项目风险。

4 水利水电工程的施工项目风险管理策略

借“JSJ工程”案例来说，其工程施工规模大、施工过程复杂、工序要求严谨、技术标准较高，若直接采用传统风险管理的事后管理手段，难以满足其需要。因此，本文认为，以预防为主的风险管理，应成为现代水利水电工程施工项目风险管理的核心。精准识别风险因素、科学评价施工项目风险、灵活应对多样化的风险、完善的风险管理保障制度，这四项策略共同构成水利水电工程的施工项目风险管理体系，可大幅提升风险管理水平，为顺利推进水利水电工程夯实基础。

4.1 定性与定量相结合，精准识别风险

水利水电工程施工项目风险管理的最初环节是风险识别，目前工程施工阶段的风险识别方法有很多，如：专家调查法、层次分析法、模糊综合分析法等、德尔菲法、头脑风暴法、现场考察法、风险核对表等。在水利水电工程施工阶段的项目风险管理实施中，工作人员应巧妙利用定性与定量相结合的方法，精准识别工程中所隐藏的风险。以“JSJ工程”为例，该项目的各单项施工过程中，均邀请了科研院所、设计单位及施工企业等多方专家进行调查分析，由专家进行独立判断，共同采取现场考察、风险核对表等方法进行识别。

经过一系列的调查、识别与考核，最终确定了该工程主要风险为：施工管理风险、施工技术风险、施工作业风险、施工法律风险，并且将这些作为一级指标构建风险识别体系。其中，白鹤滩水电站应用了世界单机容量最大的百万千瓦机组，技术风险最为突出。在风险识别环节，继续识别出了其设备制造风险、安装风险、材料供应稳定性风险、特殊工种作业安全风险、超大型构件吊装风险等二级指标。通过一系列操作，精准识别水利水电工程施工中隐藏的风险因素，为后续评估风险，加强风险的应对提供了有力支持。

4.2 使用合适方法，科学评价风险

在水利水电工程施工项目风险管理中，工作人员要根据风险识别结果进一步科学评估工程施工风险，评估各风险的相对重要性，从而为进一步加强施工风险管理提供支持。风险评估，关键在于根据工程实际情况分析风险事件发生会给你的可能性，预期风险事件发生之后可能造成的影响及其程度。风险评估方法较多，如：主观评分法、层次分析法、故障树分析法等。工作人员应根据水利水电工程的实际施工情况选择合适的评价分析方法。本文认为，层次分析法（AHP）通过构建层次结构模型，将复杂的风险问题分解为目标、准则和方案，不仅让风险可能一目了然，更为加强风险控制提供准确支持^[2]。比如，在“JSJ工程”的四座水电站中，工作人员利用层次分析法确定各风险可能，具体为：

（1）安全风险属于“较大风险”，需重点管控；（2）质量风险、自然风险等被评定为“一般风险”。同时，该工程工作人员使用故障树分析法（FTA）进一步进行复杂的风险隐患分析，深入分析了溪洛渡水电站的高拱坝混凝土温度裂缝产生的原因，聚焦关键控制点。通过科学开展评价，聚焦水利水电工程施工项目风险的主要矛盾，将有限精力投入到更高风险部分，从而确保工程施工的顺利推进。

4.3 针对制定措施，灵活应对风险

在风险评估基础上，工作人员应制定针对各类风险事件的实施方案，从而降低风险事件发生概率，弱化风险事件发生的不良影响。一般，针对不同可能性的风险事件，采取的应对措施有回避、减轻、分担和转移。以JSJ工程为例，其工程施工技术挑战极高，风险应对须具备较强的灵活性和针对性。其中，乌东德水电站工程中，有“最薄300米级特高拱坝”的工序施工，一旦发生大体积混凝土温度裂缝，发生施工质量与技术风险，不仅严重耽误工序，更影响整个项目的施工效果。因此，工作人员针对这种可预见严重后果的风险，优先采用技术手段回避该风险。具体方法为：创新应

用低热水泥混凝土。与此同时，在常规的水利水电工程单项施工中，也聚焦高压线下作业、深基坑开挖等高风险活动，灵活调整“减轻策略”“分担策略”与“转移策略”，制定针对性较强的施工专项方案，加强施工现场监督，从而有效减轻风险。比如，向家坝工程中，在重型机械中安装GPS定位和倾角传感器，控制临近高压线作业，有效减轻这方面的风险^[3]。

4.4 制定具体风险管理制度，完善风险管理保障机制

健全完善的风险管理制度，是确保水利水电工程施工项目风险管理落实的重要保障性条件。本文认为，应建立覆盖水利水电工程全生命周期的风险管理制度，分别设计契合工程实际情况的风险识别制度、风险评估制度、风险监控制度、风险应对制度等。在各项制度中，要清晰罗列风险识别、评估、监控与应对的操作流程、控制标准等，确保各岗位人员遵循制度协同配合，共同完成高质量的风险控制。比如，设立直属于项目经理部的风险管理组，从制度层面界定专职安全工程师、地质工程师和设备监理师的工作范围、职责、参与环节、配合要求。再比如，在施工现场落实风险交底“三不放行”原则，贯彻执行未交底不放行、交底不清不放行、措施未验不放行的制度。

5 结语

综上所述，风险管理是水利水电工程施工顺利推进的重要环节，直接关系到工程建设社会效益与经济效益。通过研究探讨发现，水利水电工程施工的项目风险影响因素较多，单一的风险应对措施并不足以满足风险管理需求，而是要从识别环节入手，加强风险识别与评估，科学开展有效的风险管理应对，同时以完善的保障制度确保有序开展各项风险管理工作，将风险隐患扼杀在源头，切实提升水利水电工程施工项目风险管控水平。未来，将继续深入研究水利水电工程施工项目风险管理的深入开展，制定更全面的风险管理制度体系与应对机制，通过风险管理提升工程综合效益，促进水利水电工程的持续发展。

参考文献

- [1] 张建林. 基于风险管理的水利施工项目管理策略优化分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (30): 190-192.
- [2] 孙鹏, 张玮, 许言超. 水利水电工程施工项目风险管理探讨[J]. 山东水利, 2025, (04): 28-30.
- [3] 郑泽棉. 水工建筑物类水利工程项目施工风险影响因素评价与管理研究[J]. 水利科技与经济, 2024, 30(12): 103-107.

Application of High Strength Prestressed Concrete in Water Conveying Tunnel

Yan Hao

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

As critical infrastructure for inter-regional water resource allocation and urban water supply, water conveyance tunnels endure prolonged exposure to internal water pressure, surrounding rock loads, and hydrological cycles. Traditional concrete is prone to cracking-induced leakage, compromising both structural safety and water delivery efficiency. High-strength prestressed concrete (PSC), engineered with pre-applied compressive stress, effectively counteracts tensile stresses during service life, thereby enhancing crack resistance, load-bearing capacity, and durability. This study examines the application advantages of PSC in water conveyance tunnels, detailing its implementation in critical components including tunnel linings, branch pipe sections, and maintenance wells. Through case studies, the research validates PSC's effectiveness, providing actionable insights for structural optimization and long-term stability in water conveyance tunnel projects.

Keywords

high strength prestressed concrete; water conveyance tunnel; lining structure; crack resistance; durability

高强度预应力混凝土在输水隧洞内的应用

郝艳

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川 成都 611130

摘要

输水隧洞作为跨区域水资源调配、城市供水的核心基础设施, 需长期承受内水压力、围岩荷载及干湿循环作用, 传统混凝土易出现裂缝导致渗漏, 影响工程安全与输水效率。高强度预应力混凝土通过预先施加压应力, 可有效抵消服役期拉应力, 提升结构抗裂性、承载能力与耐久性。本文结合输水隧洞的工程特性, 分析高强度预应力混凝土的应用优势, 阐述其在隧洞衬砌、岔管段、检修井等关键部位的具体应用形式与技术要点, 并结合工程案例验证其应用效果, 为输水隧洞工程的结构优化与长期稳定提供参考。

关键词

高强度预应力混凝土; 输水隧洞; 衬砌结构; 抗裂性; 耐久性

1 引言

随着水资源供需矛盾加剧, 长距离、大口径输水隧洞工程建设规模不断扩大(如我国南水北调中线穿黄隧洞、引汉济渭秦岭输水隧洞)。此类隧洞多穿越复杂地质环境, 服役期间需承受内水压力(通常 0.5-2.0MPa)、围岩不均匀变形荷载, 且水流长期冲刷易导致混凝土碳化、钢筋锈蚀, 传统 C30-C40 普通混凝土衬砌因抗裂性能不足, 常出现贯穿性裂缝, 引发渗漏问题——某输水隧洞工程统计显示, 普通混凝土衬砌投运 5 年内渗漏率高达 15%-20%, 需频繁维修, 增加工程运维成本。

高强度预应力混凝土(通常采用 C50-C80 混凝土, 配合后张法或先张法施加预应力)通过在结构内部建立预压应

力, 可使混凝土在承受内水压力等拉应力时, 始终处于压应力状态, 从根源上抑制裂缝产生。近年来, 该技术在输水隧洞关键部位的应用逐步推广, 其技术优势与工程适配性已成为行业研究重点。

2 高强度预应力混凝土在输水隧洞内的应用优势

相较于普通混凝土, 高强度预应力混凝土在输水隧洞场景下的优势集中体现在抗裂性、承载效率与耐久性三方面, 具体如下:

2.1 显著提升抗裂性能, 解决渗漏难题

输水隧洞衬砌的裂缝主要由内水压力产生的环向拉应力诱发。普通混凝土的抗拉强度仅为抗压强度的 1/8-1/10(如 C40 混凝土抗拉强度约 3.5MPa), 当内水压力较大时, 衬砌易出现环向裂缝; 而高强度预应力混凝土通过施加环向预应力(通常控制预压应力值 2-4MPa), 可完全抵消内水压

【作者简介】郝艳(1990-), 女, 中国甘肃白银人, 本科, 工程师, 从事水利水电施工技术及管理研究。

力产生的拉应力，使混凝土始终处于压应力状态，抗裂系数提升 3-5 倍。某试验数据显示，C50 预应力混凝土衬砌在 1.2MPa 内水压力下无可见裂缝，而同等条件下 C40 普通混凝土衬砌已出现宽度 0.2mm 的贯穿裂缝^[1]。

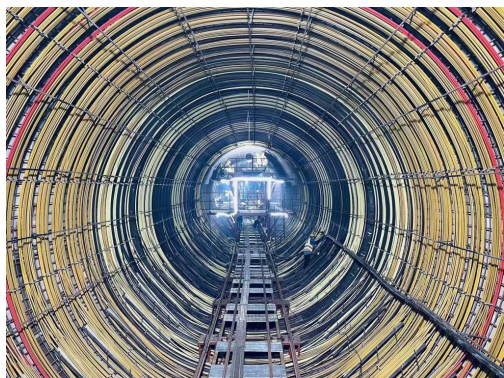


图 2-1 高强度预应力混凝土钢绞线安装

2.2 降低结构厚度，优化隧洞断面

高强度混凝土的抗压强度可达 C50-C80（抗压强度 50-80MPa），配合预应力作用，可大幅提升结构承载效率。在相同内水压力与围岩荷载下，高强度预应力混凝土衬砌厚度可较普通混凝土减少 30%-40%——以直径 8m 的输水隧洞为例，普通混凝土衬砌厚度需 800-1000mm，而 C50 预应力混凝土衬砌厚度仅需 500-600mm，不仅减少混凝土用量（降低工程成本 15% 左右），还可增大隧洞过流断面，提升输水能力。

2.3 增强耐久性，延长服役寿命

输水隧洞中的水流可能含氯离子、硫酸盐等腐蚀性介质，普通混凝土裂缝会加速介质渗透，导致钢筋锈蚀、混凝土劣化；高强度预应力混凝土因无裂缝或微裂缝闭合，可阻断介质渗透路径。同时，高强度混凝土本身密实度高（孔隙率较普通混凝土降低 20%-30%），抗碳化能力、抗冻融能力更强。工程监测表明，高强度预应力混凝土衬砌在干湿循环、冻融循环环境下，50 年耐久性指标衰减率仅为普通混凝土的 1/4，预期服役寿命可延长至 100 年以上。

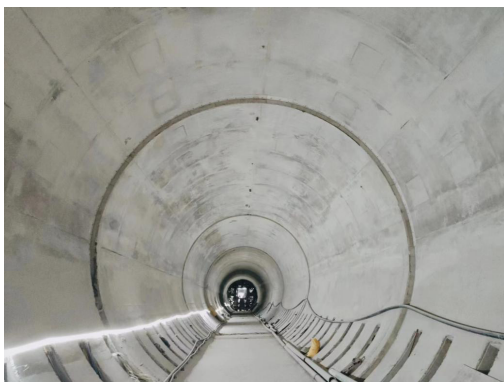


图 2-2 高强度预应力混凝土浇筑成型

3 高强度预应力混凝土在输水隧洞的关键应用部位与技术要点

根据输水隧洞的结构功能与受力特点，高强度预应力混凝土主要应用于衬砌结构、岔管段、检修井三大关键部位，不同部位的预应力施加方式与技术要求存在差异。

3.1 隧洞衬砌结构：环向预应力为主，分段施工控制

衬砌是输水隧洞的核心受力结构，需承受环向内水压力与径向围岩荷载，采用后张法环向预应力体系，技术要点如下：

1. 混凝土强度与配合比：选用 C50 高强度混凝土，胶凝材料用量控制在 450-550kg/m³，掺入硅灰、超细矿粉改善密实度；粗骨料采用 5-25mm 连续级配花岗岩，确保抗压强度与弹性模量匹配（弹性模量 ≥ 3.6 × 10⁴MPa）。

2. 预应力筋布置：采用 Φs15.2 钢绞线（抗拉强度 1860MPa），沿衬砌环向布置，间距 150-200mm；为避免预应力损失，采用“两端张拉+分级张拉”工艺，张拉控制应力取 0.75f_{ptk}（f_{ptk} 为钢绞线抗拉强度标准值），分级顺序为 20%σ_{con} → 50%σ_{con} → 100%σ_{con}，每级张拉后持荷 5min，确保应力稳定^[2]。

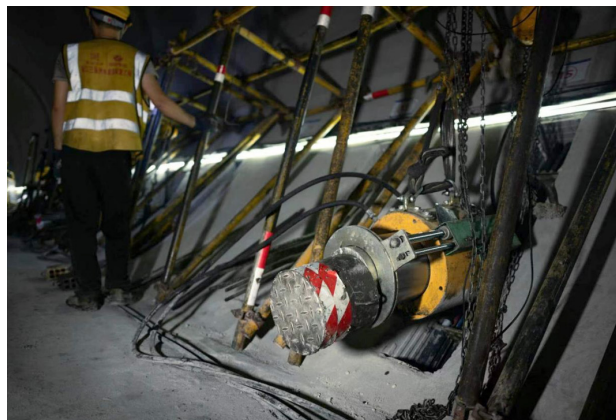


图 3-1 预应力钢绞线分级张拉

3. 施工缝处理：隧洞衬砌按 11.84m 分段浇筑，施工缝处设置环向止水带与预应力筋衔接装置，避免分段处出现应力集中导致裂缝；浇筑时采用滑膜施工工艺，控制混凝土坍落度 180-200mm，振捣密实度（密实度 ≥ 98%），减少内部孔隙。

3.2 岔管段：双向预应力体系，应对复杂应力

输水隧洞岔管段（如分岔、汇流部位）因断面突变，承受双向（环向+径向）复杂应力，易出现应力集中，需采用双向预应力混凝土体系，技术要点如下：

1. 预应力体系设计：环向采用钢绞线束（同衬砌结构），径向采用精轧螺纹钢（直径 32mm，抗拉强度 930MPa），形成“环向+径向”交叉预应力网，预压应力值根据有限元应力分析确定（环向 3-4MPa，径向 2-3MPa）。



图 3-2 钢筋安装

2. 混凝土浇筑与养护：采用 C50 高强度混凝土，掺入聚丙烯纤维（掺量 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ ）抑制早期收缩裂缝；浇筑时采用分层浇筑（分层厚度 $\leq 300\text{mm}$ ），振捣时间控制在 20-30s/点，养护采用“蒸汽养护+洒水养护”结合，确保 7d 抗压强度达到设计值的 80% 以上。

3. 应力监测：在岔管段关键部位（如分岔角处、断面突变处）埋设应力传感器，实时监测预应力施加后的应力分布，若发现局部应力集中（超过设计值 10%），及时调整张拉顺序或补充预应力筋^[3]。

3.3 检修井与进出口段：先张法预应力，提升整体刚度

检修井（如隧洞中间检修平台）、进出口段需承受竖向荷载与水平土压力，且需与隧洞衬砌衔接，采用先张法预应力混凝土结构，技术要点如下：

1. 预应力筋布置：采用 $\Phi 12\text{mm}$ 预应力钢丝（抗拉强度 1570MPa ），沿检修井竖向、水平向双向布置，间距 200-250mm；在预制厂完成先张法张拉，张拉控制应力取 $0.7f_{\text{ptk}}$ ，持荷 2h 后浇筑 C50 混凝土，确保预应力均匀传递。

2. 与隧洞衬砌衔接：检修井与衬砌连接处设置预埋钢板与剪力钉，混凝土浇筑时采用微膨胀混凝土（膨胀率 0.02%-0.03%），避免衔接处出现缝隙；浇筑后养护 28d，确保衔接部位抗压强度与衬砌一致^[4]。

4 工程应用案例

以“珠江三角洲水资源配置工程中的输水隧洞”为例，

该隧洞总长 113km，直径 6.4m，设计内水压力 1.2MPa，穿越花岗岩地层，预应力隧洞段长采用 C50 高强度预应力混凝土衬砌，具体应用效果如下：

1. 抗裂性能：通过环向预应力（ $\sigma_{\text{con}}=1395\text{MPa}$ ，预压应力 3.2MPa ），衬砌在 1.2MPa 内水压力下无可见裂缝，渗水率 $< 0.1\text{L}/(\text{m} \cdot \text{d})$ ，远低于规范要求的 $0.5\text{L}/(\text{m} \cdot \text{d})$ 。

2. 结构效率：衬砌厚度从普通混凝土的 100mm 减至 500mm，减少混凝土用量约 35 万 m^3 ，降低工程成本约 2800 万元；隧洞过流能力提升 12%，满足设计输水流量 $35\text{m}^3/\text{s}$ 的要求。

3. 耐久性监测：投运 5 年后，衬砌混凝土碳化深度 $< 5\text{mm}$ ，钢筋锈蚀电位 $> -200\text{mV}$ （无锈蚀风险），耐久性指标符合设计预期，无需维修养护^[5]。

5 结论

高强度预应力混凝土凭借抗裂性强、承载效率高、耐久性优的特点，在输水隧洞关键部位的应用效果显著，可有效解决传统混凝土衬砌的渗漏、结构厚重、寿命短等问题，尤其适用于高内水压力、复杂地质条件下的长距离输水隧洞工程。未来研究与应用可聚焦三方面：

1. 开发“超高强度混凝土(C100)+无粘结预应力体系”，进一步降低结构厚度，提升施工效率；

2. 结合 BIM 技术与智能监测系统，实现预应力施加过程的数字化控制与服役期应力实时预警；

3. 研究低温、高腐蚀等极端环境下的预应力损失规律，优化预应力补偿工艺，扩大技术应用范围。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部. SL 191-2020 水利水电工程混凝土结构设计规范[S]. 北京：中国水利水电出版社，2020.
- [2] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2018：156-178.
- [3] 李建林，刘有志. 南水北调中线穿黄隧洞预应力混凝土衬砌设计与施工[J]. 水利学报，2021，52(8)：987-996.
- [4] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范（2015年版）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
- [5] 张勇，王鹏. 高强度预应力混凝土在输水隧洞岔管段的应用[J]. 水利水电技术，2022，53(11)：145-153.

Precision Control and Practice of 3D Laser Scanning in Construction Surveying of Rail Transit

Xiaoming Wang¹ Yulong Yang²

1. PowerChina Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing, 100070, China

2. Powerchina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shanxi, 710000, China

Abstract

As rail transit projects evolve toward greater complexity and scale, the demand for construction surveying precision has become increasingly stringent. Traditional surveying techniques can no longer meet the requirements for efficient and accurate measurements. 3D laser scanning technology, as an innovative spatial data acquisition method, has gained widespread adoption in rail transit construction surveying due to its advantages of speed, high precision, and non-contact operation. This paper focuses on precision control in 3D laser scanning applications for rail transit construction, detailing its implementation and significance. It analyzes key precision control steps and practical measures, with concrete engineering cases demonstrating the technology's effectiveness. The study provides reliable technical support for quality control, offering substantial engineering value.

Keywords

3D laser scanning; construction surveying of rail transit; precision control strategy

三维激光扫描在轨道交通施工测量中的精度控制与实践

王晓明¹ 杨玉龙²

1. 中电建铁路建设投资集团有限公司, 中国·北京 100070

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

伴随着轨道交通工程朝着复杂化、大型化方向发展, 对施工测量精度的要求越来越高, 传统的施工测量技术已经不能满足高效、精准的施工测量需求。三维激光扫描技术作为一种新的空间数据采集技术, 因为具有快速、高精度、非接触等优点, 在轨道交通施工测量领域得到了广泛的应用。本文以三维激光扫描技术在轨道交通施工测量中的精度控制为核心, 介绍三维激光扫描技术的应用及意义, 重点分析精度控制的关键步骤和实际措施, 用具体的工程案例验证技术应用效果, 为工程质量控制提供可靠的技术支撑, 有很重要的工程应用价值。

关键词

三维激光扫描; 轨道交通施工测量; 精度控制策略

1 引言

轨道交通工程属于城市基础设施建设的重要组成部分, 施工质量直接影响运营安全及使用寿命, 施工测量作为工程质量控制的重要环节, 对于工程轴线、高程和结构尺寸的精确把控起着决定性的作用。传统施工测量技术, 全站仪、水准仪等存在着工作效率低、劳动强度大、数据整体性差的缺点, 在复杂的施工环境中出现精度误差的情况比较多。近些年来, 由于三维激光扫描技术具备着“快速扫描、海量数据、精确建模”的特性, 所以冲破了传统测量技术的局限性。本文根据轨道交通施工测量的精度要求, 系统分析三维激光扫描技术的应用价值, 梳理精度控制要点, 给出相应的实践策

略, 为该技术在轨道交通施工测量中的规范化应用提供理论和实践依据。

2 三维激光扫描技术在轨道交通施工测量中的核心概述

2.1 三维激光扫描技术的基本原理

三维激光扫描技术又叫“实景复制技术”, 其实质是用激光发射器向被测物体发出高频激光束, 用接收器接收物体表面反射回来的激光束, 然后根据激光测距原理(如脉冲法、相位法)来测定激光发射点到目标点的距离。同时设备内装的陀螺仪、倾角仪等姿态传感器以及 GPS、北斗等定位系统可以实时得到扫描设备的空间位置及姿态参数, 利用空间坐标转换算法, 把大量的离散激光点坐标转换成三维点云数据, 最终得到目标物体的三维实景模型。在轨道交通施工测量中可以对施工区域的地形地貌、结构构件、施工场景

【作者简介】王晓明(1984-), 男, 中国吉林长春人, 本科, 高级, 从事轨道交通施工管理研究。

进行全方位的数据采集,给后续的测量分析提供完整的数据基础^[1]。

2.2 轨道交通施工测量的技术特性

轨道交通施工测量具有很强的行业特点,其一,精度要求极高,轨道线路的轴线偏差、高程误差必须控制在毫米级,否则会直接影响到列车的平稳、安全运行;其二,作业环境复杂,施工地点大多处于城市核心区,周围建筑多、地下管线纵横交错,传统的测量方法很容易受到遮挡的影响;其三,动态特征明显,在施工期间,结构构件不断安装,地形地貌不断变化,需要进行跟踪测量。

2.3 三维激光扫描技术的核心设备构成

三维激光扫描系统主要由核心扫描设备、数据处理软件、辅助设备三大部分组成。核心扫描设备分为地面式、车载式和机载式,轨道交通施工测量中以地面式为主,如 Faro Focus S 系列、Leica ScanStation P 系列,扫描距离可达 100 米到 1000 米,点云精度最高可达到 0.1 毫米,满足不同的施工场景;数据处理软件是精度控制的关键,主流软件包括 Cyclone、CloudCompare、Trimble RealWorks 等,具备点云去噪、拼接、建模、对比分析等功能;辅助设备有标靶、棱镜、三脚架、笔记本电脑等,标靶用于扫描站间拼接定位,棱镜用于传统测量数据的校准,三脚架保证扫描设备的稳定性。设备的性能参数以及适配性会直接影响到测量的精度,需要根据施工的场景来合理的选择^[2]。

2.4 三维激光扫描技术的作业流程

轨道交通施工测量中,三维激光扫描技术的标准作业流程为,前期准备、数据采集、数据处理、成果输出。前期准备阶段要确定测量范围和精度指标,搜集设计图纸,现场勘察资料,规划扫描站点和标靶布设地点;数据采集阶段通过架设设备,设置扫描参数(分辨率,扫描速度,距离模式),逐个扫描各站点,并记录现场环境参数(温度,湿度,气压);数据处理阶段是精度控制的关键环节,包含点云去噪(去除噪声点,重复点),拼接(按照标靶或者特征点的多站数据融合),配准(同设计模型或者传统测量数据校准),建模(创建三维实景模型或者结构化模型);成果输出阶段按照施工需求,产出点云数据报告,三维模型,偏差分析图表等成果,给施工决策给予支撑。

3 三维激光扫描技术应用于轨道交通施工测量的重要意义

3.1 提升施工测量效率,保障施工进度

传统测量需要逐点测量,在复杂的结构或者大面积区域内要几天甚至几周才能完成数据采集,三维激光扫描技术可以一键式快速扫描,单站扫描时间只需 5 到 10 分钟,在地铁车站、隧道等典型的场景下,一天之内可以完成全区域的数据采集。数据处理软件自动化功能大大缩短了数据处理的时间,如 Cyclone 软件可以实现点云拼接建模的自动化操

作,与手工绘制相比,效率提高了 80% 以上。高效的测量作业可以及时给施工提供数据支撑,减少因测量滞后造成的停工时间,在轨道交通工程中,由于工期紧张、任务繁重,高效测量作业更有利于保证施工进度按计划进行^[3]。

3.2 提高测量精度,降低工程质量风险

轨道交通施工测量的精度直接决定工程质量,传统的测量受人为操作误差、环境干扰等因素的影响,精度很难稳定控制,而三维激光扫描技术采用非接触式的测量方式,不会受到人为操作对测量结果的影响,其点云数据的精度可以达到 0.1mm 级,远远高于传统全站仪的毫米级精度。采用多站数据拼接、交叉验证的方式能够很好地消除单点测量误差,保证测量成果的一致性、可靠性。如地铁隧道施工时,用三维激光扫描技术对隧道断面实施监测,可以准确捕捉隧道沉降,位移等变形数据,及时发出质量风险警报,同传统的断面仪测量办法比,偏差检测精确度改善超过 50%,很大程度削减了由于检测不准引发的工程返工危险。

3.3 优化施工管理模式,实现动态管控

三维激光扫描技术得到的三维点云数据,可以创建出和施工现场完全一致的实景模型,这个模型可以与设计 BIM 模型进行准确对比,快速找出施工偏差,比如结构尺寸不符、管线碰撞等,实现施工质量的可视化检测。除了在施工各个阶段定期获取点云数据之后,在动态数据库之中会产生动态模型,可以方便地对结构的变形趋势、施工进度落后等重要数据展开剖析,并为施工管理提供数字化的决策建议。轨道交通桥梁施工当中,针对不同的工期对点云模型展开比较,可以对桥梁墩柱的垂直度以及标高变化展开实时监测,及时对施工工艺做出调整,实现施工过程的动态控制。以数据为驱动的管理模式比传统的以经验为驱动的模式更加科学、具有前瞻性,从而提高了施工管理的水平^[4]。

3.4 降低作业风险,保障施工安全

轨道交通施工环境比较复杂,比如地下隧道、高空作业区域等,传统的测量人员必须到危险区域去进行作业,存在着高空坠落、坍塌等安全风险。三维激光扫描技术用远距离非接触的方式测量,测量人员在安全的地方就能进行数据采集,不需要到危险的工作面去工作,大大降低了工作安全风险。地铁暗挖隧道施工中,隧道内部地质条件复杂,容易发生坍塌事故,利用三维激光扫描技术从隧道口向内部扫描,可以得到隧道内部完整的地形地质数据,不需要人员进入隧道内部作业,有效地规避了安全风险。同时利用点云数据对施工区域开展安全隐患排查,识别出管线裸露、结构裂缝等隐患,给安全管理提供准确的依据,保障施工安全。

4 轨道交通施工测量中三维激光扫描的精度控制与实践策略

4.1 前期准备阶段的精度控制策略

前期准备阶段为精度控制打基础,关键在方案设计、

设备校准。首先需要结合轨道交通施工场景的特点,制定专项测量方案,明确测量范围、精度指标(点云密度、拼接精度)、扫描站点布设原则,站点布设要保证相邻站点之间有30%以上的重叠区域,避免出现数据盲区;其次,要进行设备校准,包括激光测距精度校准、姿态传感器校准、标靶精度校验,校准周期要严格按照设备说明书的要求,一般每月校准一次,保证设备处于最佳的工作状态;最后要收集设计图纸、BIM模型等基础资料,对设计坐标系统进行复核,保证扫描数据 and 设计数据的坐标一致性,为后续数据配准精度提供保障^[5]。

4.2 数据处理阶段的精度优化方法

数据处理阶段为提高测量精度打下了重要的基础,经过一连串的处理后可进一步提高测量的精度。首先进行点云去噪处理,用统计滤波法剔除噪声点(距离平均值超过3倍标准差的点),用半径滤波法剔除孤立点,保证点云数据的纯净;其次为点云拼接优化,采用标靶拼接和特征点拼接相结合的方式,标靶拼接控制整体精度,特征点拼接优化局部精度,拼接完成后要对拼接误差进行检测,误差超过允许范围(≤ 2 毫米)时需要重新拼接;再次为数据配准校准,将扫描点云数据与设计BIM模型进行配准,采用ICP(迭代最近点)算法优化配准精度,配准误差要控制在1毫米以内;最后为模型构建精度控制,根据施工需求选择合适的建模方法,结构化构件采用参数化建模,复杂地形采用面片建模,保证模型与实际结构的一致性,建模完成后通过现场抽样测量来验证模型精度。

4.3 典型施工场景的实践应用案例

以某地铁15号线一期工程为例,该工程有10座车站、12公里隧道,施工测量精度要求轴线偏差 ≤ 3 mm、高程偏差 ≤ 2 mm。采用三维激光扫描技术进行施工测量,具体如下:在车站主体结构施工中,使用Faro Focus S70扫描仪布置20个扫描点,采集车站主体结构点云数据,数据处理后生成三维实景模型,与设计BIM模型比对后快速识别出3

处结构尺寸偏差(最大偏差5毫米),及时指导施工整改,整改后偏差控制在2毫米以内;在隧道施工中,用Leica ScanStation P50扫描仪对隧道断面每周进行一次动态监测,通过对比不同周期点云数据,精准捕捉到隧道沉降数据(最大沉降3毫米),提前预警风险,采取加固措施后沉降得到有效控制。此工程用上了三维激光扫描技术,施工测量精确率达到99.5%,工期缩减了15天,返工成本少了60万元,证明该技术实际可行。

5 结语

综上所述,三维激光扫描技术凭借快速、高精度、非接触式的特点,为轨道交通施工测量提供全新的技术手段,突破了传统测量技术的局限。本文研究表明,经过前期准备阶段方案设计、设备校准、数据采集阶段环境控制、参数优化、数据处理阶段去噪拼接、配准校准等一系列步骤之后,可以达到轨道交通施工测量高精度控制的目的。通过实践案例的验证可知,此技术可以提高测量效率,保证施工进度,降低质量风险,改善管理模式,有较好的工程应用价值。随着技术的发展,三维激光扫描技术同BIM、大数据、人工智能相结合将成为未来的发展方向,可以实现施工测量的智能化、自动化管控,为轨道交通工程高质量建设提供更加有力的技术支持。

参考文献

- [1] 杨雪.城市轨道交通工程精密施工测量技术的应用与研究[J].运输经理世界,2024,(19):16-18.
- [2] 涂小毅,刘迎,朱江枫.城市轨道交通工程铺轨施工测量技术及设备管理[J].大众标准化,2023,(16):42-44.
- [3] 苏涛.城市轨道交通连续箱梁悬浇法施工测量控制要点[J].科学技术创新,2023,(14):183-186.
- [4] 郭岩.轨道交通工程轨道施工技术与质量管控措施研究[J].运输经理世界,2023,(10):7-9.
- [5] 兰新乐.轨道交通地下连续墙施工技术研究[J].运输经理世界,2023,(03):10-12.

Optimization of Engineering Technology Methods and Quality Control of Surveying and Mapping Results Oriented by Innovation in Real-Scene 3D Construction

Weilin Ou

Hunan Provincial First Surveying and Mapping Institute, Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract

The construction of real-scene 3D is the spatial foundation support for the digitalization of Hunan Province. Its engineering technology level and result quality affect the effectiveness of digital transformation. This paper takes the real-scene 3D project in Hunan Province as the research object, combines its terrain characteristics of "seven mountains, two waters and one field" and the "provincial and municipal collaboration" construction mode, and focuses on the optimization of engineering technology methods oriented by innovation and the construction of a quality control system for surveying and mapping results. It analyzes the problems such as low efficiency of multi-source data fusion, insufficient modeling accuracy in complex terrain, and poor coordination of quality control processes in the current real-scene 3D construction in Hunan Province. It builds an intelligent multi-source data fusion model, innovates adaptive modeling technology for complex terrain, and develops a provincial and municipal collaborative production management platform. At the same time, a full-process quality control system is established, including closed-loop management of "two-level inspection, first-piece verification, and provincial verification", application of intelligent quality inspection systems, and "embedded" quality inspection service models. Practice shows that the optimized technology methods improve modeling efficiency, increase quality inspection coverage, and improve the quality of results.

Keywords

Real-scene 3D; Optimization of engineering technology methods; Quality control of surveying and mapping results; Provincial and municipal collaboration; Hunan Province

实景三维创新导向工程技术方法优化与测绘成果质控

欧为林

湖南省第一测绘院, 中国·湖南长沙 410000

摘要

实景三维建设是数字湖南构建的空间基底支撑, 其工程技术水平与成果质量影响数字化转型成效。本文以湖南省实景三维项目为研究对象, 结合其“七山二水一分田”的地形特征与“省市协同”建设模式, 聚焦创新导向的工程技术方法优化与测绘成果质控体系构建。分析当前湖南实景三维建设中多源数据融合效率低、复杂地形建模精度不足、质控流程协同性差等问题, 构建多源数据智能融合模型, 创新复杂地形自适应建模技术, 研发省市协同生产管理平台; 同时建立全流程质控体系, 包括“两级检查、首件验证、省级核查”闭环管理、智能质检系统应用及“嵌入式”质检服务模式。实践表明, 优化后的技术方法使建模效率提升, 提高质检覆盖率和成果优良率。

关键词

实景三维; 技术方法优化; 测绘成果质控; 省市协同; 湖南省

1 引言

数字经济加速发展推动实景三维成为新型基础测绘的核心成果, 作为数字政府、智慧社会建设的时空基底, 其在国土空间规划、智慧文旅、灾害防治等领域的应用价值日益凸显。湖南省紧跟国家实景三维建设部署, 以“全省一盘棋”

思路推进项目实施, 省第一测绘院牵头完成的“省市协同的实景三维智能化建模与服务关键技术及应用”项目已获自然资源科技进步二等奖, 为全省建设奠定技术基础。然而, 湖南省复杂的地形地貌给实景三维建设带来诸多挑战: 湘西北武陵山区地形切割强烈, 湘中丘陵沟壑纵横, 湘南喀斯特地貌发育, 传统技术方法难以兼顾建模精度与效率; 同时, 全省数十家生产单位参与建设, 技术标准不统一、质控流程脱节导致成果质量参差不齐。当前, 湖南实景三维建设仍面临多源数据融合碎片化、复杂地形建模自动化程度低、质控手段滞后等问题, 制约了成果的权威性与应用深度。

【作者简介】欧为林(1972-), 男, 中国湖南望城人, 本科, 副高, 从事基础测绘、实景三维、低空无人机遥感等研究。

2 湖南省实景三维建设现状与核心挑战

2.1 建设基础与发展需求

湖南省已形成“标准引领、平台支撑、应用驱动”的实景三维建设格局：编制完成系列地方标准规范，明确基础地理实体数据与三维模型生产要求；研发省市协同生产管理平台，实现省、市、县三级数据资源统筹；成果已在智慧选址、空间规划、林草调查等领域初步应用。随着数字湖南建设深入，对实景三维提出更高要求，需实现 1:2000 比例尺全域覆盖，LOD2.0 级城市模型精度达 0.1 米，同时满足地灾防治、智慧农业等多场景动态应用需求^[1]。

2.2 核心技术与质控挑战

技术层面，当前湖南实景三维建设主要采用“航飞摄影+倾斜建模”技术路线，但在复杂场景中存在明显短板：多源数据融合方面，无人机航飞数据、激光点云、历史矢量数据难以高效衔接，数据预处理耗时占比超 60%；复杂地形建模中，山区植被遮挡导致点云空洞，丘陵地区房屋密集造成模型拓扑错误，自动化建模合格率仅 65% 左右。质控层面，面临“规模大、类型多、标准杂”的困境：全省年建模面积超 1 万平方公里，涵盖城市、山区、水域等多种类型，传统人工质检效率低下，二维质检软件无法适配三维成果特性；部分生产单位“两级检查”流于形式，质量问题整改不及时，首批成果优良率仅 72%，低于全国先进省份水平^[2]。

3 创新导向的工程技术方法优化路径

3.1 多源数据智能融合技术优化

针对湖南省实景三维建设中多源数据融合碎片化的核心问题，依托省市协同平台架构，构建“数据预处理—智能配准—动态更新”三级融合模型，实现数据高效整合与利用。在数据预处理阶段，重点攻克无人机航飞数据云雾干扰、激光点云植被杂点等影响数据质量的问题，研发适配湖南地形特征的自适应降噪算法：算法可根据湘西北山区、湘中丘陵、湘南喀斯特等不同区域的影像特性，自动调整滤波参数，精准剔除云雾造成的模糊像素点与植被覆盖产生的杂散点云，相比传统人工预处理方式，数据处理效率提升 50%，为后续建模提供洁净、规整的基础数据。智能配准环节，突破传统人工配准精度低、耗时久的瓶颈，引入深度学习算法构建地形特征提取模型：通过训练湖南典型地形样本数据，算法能自动识别山脊线、河流边界、建筑角点等关键特征点，实现航飞影像与激光点云的全自动配准，将配准误差严格控制在 0.05 米以内，满足 LOD2.0 级三维模型的精度要求，彻底解决多源数据衔接不精准的问题。动态更新层面，结合湖南省实景三维规模化建设与动态应用需求，建立“基期数据+增量更新”机制：通过时序航飞影像比对技术，自动识别地形地貌变化区域（如城市新建区域、山区地质变化区、农田改造区），仅对变化部分开展数据采集与融合处理，无需对全域进行重复作业，大幅降低重复劳动成本，同时保障数

据时效性，为实景三维成果动态更新提供技术支撑^[3]。

3.2 复杂地形自适应建模技术创新

结合湖南省武陵山区、湘中丘陵、湘南喀斯特等差异化地形特点，分类创新复杂地形自适应建模技术方案，实现不同区域建模精度与效率的双重提升^[4]。

3.3 省市协同建模管理平台升级

依托湖南省现有生产管理平台，重点迭代升级“智能调度+在线协同+成果管理”三大功能模块，强化平台对全省实景三维建设的统筹与支撑能力。智能调度模块基于全省项目进度大数据，构建任务与资源匹配模型，可根据各市县生产单位的设备配置、技术专长、人员规模等信息，自动分配适配的建模任务，确保技术资源与任务需求精准对接，提升全省建模资源利用效率。在线协同模块突破传统分散式建模的局限，支持多单位实时共享建模成果，通过云端标注工具实现跨区域建模协作，方便不同单位共同修正模型边界衔接问题，有效解决传统“各自建模、边界脱节”的难题，保障全域实景三维成果的连续性与一致性。成果管理模块融入模型质量预检测功能，在建模过程中自动运行质量检测算子，实时筛查模型拓扑错误、纹理失真等常见问题，并向生产单位推送针对性整改建议，将质量管控提前至建模环节，减少后期返工成本。平台升级后，进一步强化了省市县三级协同能力，大幅提升建模任务响应效率与成果质量，为湖南省实景三维规模化、标准化建设提供关键平台支撑^[5]。

4 适配湖南特点的测绘成果质控体系构建

4.1 全流程闭环质控管理机制

在适配湖南特点的测绘成果质控体系构建中，全流程闭环质控管理机制是核心抓手。该机制借鉴外地成熟经验并结合湖南实际，构建“首件验证—过程检查—一级验收—省级核查”的“四步闭环”模式，形成从生产源头到成果入库的全链条质量管控。首件验证环节聚焦技术标准统一，要求每个参与实景三维建设的生产单位在承接任务后，先完成规定范围的试点建模工作，由省级质检站对试点成果开展全面检测，重点核验建模精度、数据规范性等是否符合湖南地方标准，只有通过验证的单位方可开展批量生产，从源头避免因技术标准理解偏差导致的质量问题。过程检查阶段注重实时质量把控，明确生产单位需采用“智能自检+人工复检”的双重模式，每日将建模成果上传至省级管理平台，平台通过内置检测算法自动筛查精度、拓扑、纹理等关键指标问题，同时生产单位安排专业人员对智能检测标注的疑似问题区域进行人工复检，确保问题早发现、早整改。一级验收环节强化差异化质量核查，针对湖南不同区域的应用需求实行“重点区域 100% 详查+全域概查”，对城市建成区、灾害隐患点等对成果质量要求高的重点区域，逐模型开展精细化检测，对山区、农村等一般区域按比例抽样核查，在保障质量的同时兼顾效率。省级核查阶段聚焦成果最终把关，建立动态问题清单，对一级验收中发现的质量问题进行汇总梳

理,跟踪生产单位的整改过程,只有整改合格的成果才能纳入全省实景三维成果库,形成完整的质量管控闭环。

4.2 智能化质检技术体系研发

针对湖南省实景三维质检中传统人工效率低、二维软件适配差、不同地形成果检测标准不统一的短板,以技术创新为核心构建“智能算子库+专用系统+云端平台”三位一体的智能化质检技术体系,实现质检全流程的自动化、精准化与协同化。作为体系基础的智能算子库,深度适配湖南城市、山区、水域等多元成果类型,精心研发12类基础算子与8类专项算子,覆盖模型精度、拓扑关系、纹理一致性等20项核心检测指标,能精准识别从建筑轮廓偏移、地形拟合偏差到纹理拉伸失真等各类质量问题,为不同场景的质检需求提供标准化技术支撑;基于算子库搭建的三大专用质检系统,聚焦湖南典型地形特征实现检测功能精准细分:城市三维模型质检系统重点强化建筑细节检测能力,可精准校验门窗位置匹配度、建筑高度误差等细微问题;山区模型质检系统针对地形切割强烈、植被遮挡多的特点,专项优化地形拟合精度校验算法,有效识别点云空洞导致的地形失真;水域模型质检系统则聚焦河湖边界等关键要素,专项检测边界平滑度与水位线匹配性,确保不同地形成果检测的专业性;作为体系中枢的云端质检平台,打破地域与单位壁垒,全面整合全省各生产单位的质检数据,通过大数据分析技术挖掘不同区域、不同类型成果的共性质量问题,如丘陵区建筑拓扑错误高发原因、山区纹理映射偏差规律等,并定期向生产单位推送针对性技术改进方案,推动全省质检水平整体提升。

4.3 “嵌入式”质检服务与精准帮扶

创新推出“移动质检工作站”服务模式,省级质检专家携带设备深入郴州、邵阳等偏远地区生产一线,现场检测航飞数据与初步建模成果,将问题整改提前至生产环节,使传统送检周期压缩50%以上。建立“一企一策”质量档案,

为全省23家生产单位分别记录典型问题、整改措施及验收情况,针对技术薄弱单位开展定制化培训,如为湘西州团队专项培训山区建模质检技巧。同时定期举办全省质检技术交流会,分享长沙、株洲等先进单位的质检经验,推广智能质检工具应用。

5 结论

湖南省实景三维建设面临复杂地形建模难、多源数据融合散、质检效率低等突出问题,通过创新导向的工程技术方法优化与测绘成果质检体系构建,可实现技术效能与成果质量的双重提升。多源数据智能融合、复杂地形自适应建模等技术创新,破解了湖南多样化地形的建模难题;全流程闭环质检、智能化质检、精准帮扶等机制构建,筑牢了成果质量防线。实践表明,相关技术与方法可显著提升建模效率与成果优良率,为数字湖南建设提供可靠空间基底。未来应进一步深化技术创新,探索AI生成式建模在城市更新中的应用,研究区块链技术在成果溯源中的实践;同时扩大质检体系覆盖面,将其延伸至实景三维应用服务环节,形成“技术优化—质量管控—应用赋能”的完整链条,为南方丘陵山区实景三维发展提供可复制、可推广的“湖南经验”。

参考文献

- [1] 李汝言.基于改进RobustPCA模型的地形测量工程三维测绘图像分类方法[J].工程勘察,2025,53(8):70-74.
- [2] 单长城.测绘工程中三维城市测量技术的应用探究[J].智能建筑与智慧城市,2024(9):52-54.
- [3] 刘欣悦,向玉,楚水滔.工程测量中三维测绘技术的应用现状及发展前景[J].世界有色金属,2024(9):142-144.
- [4] 李凯.贴近摄影测量与点云扫描在建设工程测绘成果审核中的应用[J].城市勘测,2025(5):164-168.
- [5] 唐宏宇.基于三维激光的地质工程遥感测绘技术研究[J].科学与信息化,2025(5):67-69.

Research on Building an Industrial Equipment Sales System Centered on “Value Trust”

Zhiqiang Lu

Bengbu Yiai Fire Electronics Co., Ltd., Bengbu, Anhui, 233006, China

Abstract

Against the backdrop of intensified homogeneous competition and widespread credibility crises in the current Chinese industrial equipment market, the effectiveness of the traditional “relationship-based” sales model is increasingly declining. Based on senior sales practice, this article systematically proposes and expounds for the first time a new sales system centered on “value trust”. This system emphasizes adhering to the contractual spirit of “keeping one’s word”, following the principle of absolute honesty in communication, providing perception services that exceed expectations, playing the role of a truly altruistic value advisor, and building long-term and stable strategic partnerships with customers. Research shows that under this system, what is sold is no longer a single product, but comprehensive solutions based on equipment and reliable partnerships. This can effectively break through market competition barriers, achieve a win-win situation for both customer and enterprise value, and provide important theoretical and practical references for the paradigm transformation in the field of industrial equipment sales.

Keywords

Value trust Sales of industrial equipment Reputation building Customer Relationship management

构建以“价值信任”为核心的工业设备销售体系研究

卢志强

蚌埠依爱消防电子有限责任公司，中国·安徽 蚌埠 233006

摘要

在当前中国工业设备市场同质化竞争加剧、信誉危机普遍存在的背景下，传统的“关系型”销售模式效能日益衰减。本文基于资深销售实践，首次系统性地提出并阐述了以“价值信任”为核心的新型销售体系。该体系强调秉持“说到做到”的契约精神、遵循绝对诚实的沟通原则、提供超越预期的感知服务、扮演真正利他的价值顾问角色，与客户构建长期、稳固的战略合作伙伴关系。研究表明，在这一体系下，销售的不再是单一产品，而是以设备为载体的综合解决方案与可信赖的合作伙伴关系，从而能够有效突破市场竞争壁垒，实现客户与企业价值的双赢，为工业设备销售领域的范式转型提供了重要的理论与实践参考。

关键词

价值信任；工业设备销售；信誉构建；客户关系管理

1 引言

工业设备作为生产资料，其采购决策具有金额大、技术性强、决策链复杂、使用周期长等特点。客户在选择供应商时，除关注产品性能与价格外，更深层次的需求是规避风险与获得长期稳定保障。然而，当前市场中存在的过度承诺、信息不透明、售后推诿等现象，造成了显著的“信誉危机”，极大地提升了交易成本与客户决策的谨慎度。在此背景下，探索一种能够有效建立深度信任、打破市场僵局的销售方法论，具有极强的现实紧迫性与理论价值。

本文旨在突破传统销售技巧的窠臼，将零散的实践经

验升华为一套完整的“价值信任”销售理论，旨在为生产企业和营销人员在与客户共生共赢维度提供战略性的思考框架与实践指南。

2 “价值信任”销售体系的核心内涵与理论构建

“价值信任”体系并非简单的诚信倡导，而是一个由内而外、由理念到行动的系统工程。其核心内涵可解构为以下三个相互关联的维度：

2.1 信任基石：恪守“契约精神”与“绝对诚实”

这是构建一切合作的基础，也是应对“信誉危机”最直接的武器。

1) “说到做到”的契约精神：在工业设备销售中，任何承诺，无论是合同条款内的交货期、技术参数，还是口头

【作者简介】卢志强（1973-），男，中国内蒙古呼和浩特人，本科，高工，从事电子技术研究。

约定的服务响应时间,都必须被视为严肃的契约。“做不到的不承诺”是原则底线。这意味着销售与技术支持团队必须具备严谨的专业能力,对设备性能、企业产能、服务能力有精准的评估。每一次承诺的兑现,都是在客户心中累积的信用资产;而一次无心的失信,不仅可能破坏企业与合作伙伴之间的信任,影响企业的声誉和市场份额,还可能引发监管部门的关注和处罚,严重时甚至导致整个信用体系的崩塌。

2) 不打无把握之仗:提前谋划,多了解。以前一个公司要设备,明知马上要验收,也选定我们设备,让采购尽快签订合同,他们拖延了一周没定,但我从现场已经了解到设备数量与型号,让单位已经生产并准备好,结果一定设备,让第二天就到货,我说让你们提前定设备不定,一签合同马上让到货,怎么能实现,他说他们公司大,走程序慢,我说那生产就快了等等,因工期的确紧,经过交流第二天货就到了,当然是提前准备的结果,但交流时说不能再有类似情况发生,后经过这件事,客户很感激我们,也奠定了后期的合作加强,也避免了他们的拖拉,增强和合作的基础;

3) “不说假话”的绝对诚实:在信息高度透明的时代,试图隐瞒产品缺陷或夸大性能最终都会暴露。绝对诚实要求销售人员主动披露全方位信息,涵盖设备局限、极端工况下的潜在风险,以及竞品产品的合理优势。这种“不欺瞒”的态度,虽或致短期订单流失,却能铸就专业、可靠的长期品牌,吸引追求稳定与合作品质的优质客户。正如实践所证:“信誉在,产品销路自开”,这里的“信誉”恰是无数次诚实互动铸就的品牌丰碑。例如前些年有一家合作公司,有个项目需要防爆设备,我们自己厂里又不生产,且生产防爆设备的厂家客户也认识,就告知他自己采购,我们采购厂里务必要加入一些必要的人工税费等成本造成采购价格要贵不少,但是客户嫌单独采购麻烦,让我们代购。这样避免将来发现我们卖给他贵而产生不必要的猜疑,加强了信赖与更加紧密的合作;

4) 绝对诚实还体现在对客户需求的深度理解与精准回应上。销售人员需通过细致沟通,准确把握客户真实诉求,而非仅停留在表面需求。例如,当客户提出某项技术参数要求时,销售人员应进一步探究其应用场景与潜在痛点,判断该参数是否真正契合需求,或是否存在更优解决方案。这种基于专业判断的诚实建议,既能避免客户因信息不对称而做出错误决策,也能展现销售团队的专业素养与诚信态度。长期来看,这种“以客户为中心”的诚实服务,将显著提升客户满意度与忠诚度,为合作关系的深化奠定坚实基础。

2.2 价值感知:打造“超越预期”的服务体验

工业设备的“服务”并非孤立环节,而是产品价值的有机延伸。其成败关键在于客户的主观“感觉”。

1) 让服务“有感觉”:服务不能停留在合同条款的被动响应,而应致力于创造可被客户清晰感知的价值。这包括:售后工程师的专业性与亲和力、故障处理的及时性与彻底

性、定期巡检的主动性等。当客户感觉到被重视、被保障,而不仅仅是买了一台冷冰冰的机器时,服务的价值才真正得以体现。

2) 要成为专家:在行业中要多传授行业动向以及发展方向等。销售人员需主动披露三类信息:① 设备使用局限(如普通探测器在厨房高温高湿的环境下容易误报,需推荐使用专用感温探测器);② 规范适配风险(如老旧建筑加装报警系统,可推荐使用无线报警系统,避免穿线带来的二次破坏及施工的不便);③ 经营产品与竞品的优劣分析,是否影响使用,不能一味地推销自己的产品不顾客户的实际使用环境。经营产品可以存在一定的劣势但不能影响客户正常使用,否则必须提前向客户坦诚讲明,避免后期出现纠纷,否则后就不可能在合作了。即使综合利弊考虑丢失短期订单,但可以长期积累“安全可靠”的口碑。

3) 提供增值服务:这是实现服务价值倍增的关键所在。高水平的销售与服务团队应基于对客户工艺与生产流程的深度理解,进行前瞻性预判。例如,在设备寿命周期即将结束时及时提醒备件更换,依据生产计划提前规划维护工作,分享行业先进案例以助力客户工艺升级。这种“顾问式”的介入模式,使销售方从被动的供应商角色转变为主动的价值创造伙伴,极大地提升了客户黏性。

4) 用“资源助力”:从“业务合作”到“资源对接”非设备层面的,销售人员可构建“消防领域人脉网络”(如消防检测机构、消防工程公司、地方消防支队的技术顾问等)在客户有需求时提供对接:① 帮客户推荐合规的消防工程总包(避免因施工不规范导致报警系统验收失败);② 协助对接消防检测机构,了解验收前的自查重点;③ 为客户消防演练提供支持。

5) 持续学习提升自己:销售人员需持续沉淀行业知识,主动追踪前沿技术、市场格局演变及政策法规动态,构建深厚的专业储备。这要求其不仅精通自身产品,更需深入理解所处行业的核心痛点、未来挑战与发展机遇。通过定期撰写行业洞察报告、在专业论坛发表见解、组织小型技术研讨会或为客户管理层提供定制化的行业趋势简报等形式,向客户传递具有前瞻性和实用性的信息。这种知识输出应超越简单的产品推广,旨在帮助客户提升战略决策能力、优化生产流程或规避潜在风险。例如,分析六氟丙烯(HFE)和氟化氢等原材料的价格波动对后续七氟丙烷灭火药剂价格的影响预判,或分享同行业标杆企业采纳新工艺的成功案例。当销售人员被客户视为值得信赖的行业信息源与思想引领者时,其专业权威性得以确立,无形中大幅增强了客户对其专业判断与解决方案的信任度。此外,构建跨领域的人脉网络(如高校科研院所、行业协会专家、政府产业部门等)亦至关重要。这不仅能为客户提供更广泛的信息渠道和潜在资源对接(如协助客户对接产学研合作、了解最新扶持政策、解决人才招聘或技术培训需求),更能展现销售人员致力于为客户

创造全方位价值的“利他”姿态。这种超越单纯商业往来的深层次互动，是“价值信任”体系中关系升华的关键一步。

2.3 关系升华：扮演“利他主义”的价值顾问

这是“价值信任”体系的最高境界，旨在实现从交易对手到战略伙伴的根本性转变。

1) 真正“为客户着想”：这要求销售人员必须具备高度的职业素养和长远眼光，彻底超越对短期佣金收入的片面追求，始终站在客户的整体价值最大化的立场去思考与决策。在利润追求上应当保持合理适度，绝不能过度推销或引导客户选择不必要的高价产品，而是应当以专业能力为基础，为客户甄选出技术先进、成本可控、维护便捷，并且最契合其实际业务需求的解决方案。这意味着需要通过深入的需求分析、多维度的方案对比以及持续的服务跟进，真正帮助客户提升效率、降低成本，实现可持续的价值创造。

2) 坚决杜绝“蒙骗”心态：销售人员必须坚守诚信底线，绝不能利用信息不对称的优势去“蒙骗”客户。客户可能在某一时点对某些技术或产品了解有限，但他们绝不会永远处于信息劣势。一旦客户在实际使用中发现问题，或在与其他供应商、同行交流时意识到自己被误导，此前所建立的信任关系将在瞬间崩塌，不仅对个人信誉造成毁灭性打击，更会对企业品牌带来深远且不可逆的损害。相反，即便因为在某一订单中坚持推荐更专业、更匹配但利润较低的配置而暂时未能成交，这种对客户负责、坚持原则的做法，也将逐步积累成信誉资产和行业口碑，成为一种珍贵的无形资产，最终吸引更多认同这一价值观的客户和合作伙伴，形成长期健康的商业生态。

3) 构建“利他型”服务模式：扮演价值顾问角色，需要销售人员从传统的产品推销者转变为客户的战略合作伙伴。这种转变要求销售人员不仅具备扎实的专业知识，更要拥有全局视野和资源整合能力。在实际服务过程中，销售人员应当主动协助客户分析行业趋势、优化业务流程、预判潜在风险，甚至在必要时引入第三方优质资源为客户赋能。通过这种深度服务模式，销售人员能够真正成为客户决策链中的关键环节，帮助客户在激烈的市场竞争中建立差异化优

势。这种服务模式的成功实践，将推动客户关系从单次交易向长期合作演进，最终形成基于价值认同的深度绑定关系。

3 结论

在消防报警设备销售领域中，依赖“人情关系”的销售模式往往随着项目的完结而逐渐失去效力，其影响力难以持久；“低价”策略虽然短期内可能吸引客户，却极易被竞争对手模仿甚至超越，无法形成可持续的竞争优势。相比之下，唯有建立在良好信誉和强大综合能力基础上的核心竞争力，才能真正支撑企业与个人在激烈的市场竞争中立于不败之地。本文所提出的“价值信任”销售体系，正是对传统以关系和价格为导向的销售模式的深刻反思与全面革新。该体系重新定位销售的本质，将焦点从单纯的“物”的交易和短期利益争夺，转向更深层次的“人”的连接与长期价值共创。对于有志于成为行业标杆的企业以及追求卓越的销售从业者而言，采纳并践行这一体系不仅体现了一种高超的商业策略与市场智慧，更代表了一种崇高的职业境界和工程伦理追求。此外，该体系为实现行业的高质量增长和可持续发展提供了系统而根本的路径指引，对于提升全行业的诚信水平、优化资源配置以及增强产业链协同效率具有显著的实践意义和广泛的推广价值。

参考文献

- [1] 张国斌.浅析工业设备支撑体系方案优化的思路[J].中小企业管理与科技(上旬刊),2021,(04):120-121.
- [2] 马骏.企业市场营销特点探讨——以深圳工业设备为例[J].中国商论,2018,(11):72-73.DOI:10.19699/j.cnki.issn2096-0298.2018.11.034.
- [3] 孙家和,何凡.预测方法研究.工业设备的市场预测方法探索——介绍一种销售趋势、周期、与振幅呈时序变化的复合模式[J].预测,1986,(03):28-31.
- [4] 蔡红.客户关系管理在销售管理中的实施策略[J].活力,2025,43(21):73-75.
- [5] 曾惠玲,钟晶灵.人工智能在工商管理客户关系管理信息化中的实践与效果提升研究[J].中国信息界,2025,(10):59-63.

New Path for Collaborative Quality Management and Control under the Whole Process Engineering Consulting Model

Lianhuan Guo¹ Teng Ma²

1. Engineering Agency Management Office, Air Force Logistics Department, Beijing, 100016, China

2. Military Facilities Construction Bureau, Air Force Logistics Department, Dongcheng District, Beijing, 100009, China

Abstract

Based on the theoretical foundation of the collaborative control of the whole-process engineering consultation and quality management, this paper analyzes the internal logic of their common goals, synchronized processes, and shared responsibilities. By combining the practical work of organizing the construction of resettlement housing, apartment housing, and steel structure projects, it reveals the core issues of collaborative control such as weak collaborative awareness, insufficient information sharing, and ambiguous responsibility interfaces, as well as the root causes of these problems at the levels of ideology, system, organization, technology, and personnel. Based on the principles of systematicness, collaboration, practicality, and dynamics, a new path for collaborative control of quality management under the whole-process engineering consultation model is constructed from three aspects: organizational structure optimization, full-process collaborative mechanism design, and technical support system construction, providing practical guidance for improving project quality.

Keywords

Whole-process engineering consultation; Quality management; Resettlement housing; Apartment housing

全过程工程咨询模式下质量管理协同管控新路径

郭联欢¹ 马腾²

1. 空军后勤部工程代建管理办公室, 中国·北京 100016

2. 空军后勤部军事设施建设局, 中国·北京 100009

摘要

本文立足全过程工程咨询与质量管理协同管控的理论基础, 剖析了二者目标同向、过程同频、责任同担的内在逻辑。结合组织建设安置住房、公寓住房及钢结构工程的工作实践, 揭示了协同意识薄弱、信息共享不充分、责任界面划分模糊等协同管控核心问题, 以及思想、制度、组织、技术、人员等层面的问题根源所在。基于系统性、协同性、实操性、动态性原则, 从组织架构优化、全流程协同机制设计、技术支撑体系建设三方面, 构建了全过程工程咨询模式下质量管理协同管控新路径, 为工程质量提升提供实践指导。

关键词

全过程工程咨询; 质量管理; 安置住房; 公寓住房

1 引言

建设工程质量管理是确保工程交付品质的关键因素, 其涉及工程建设全寿命周期的各个环节。传统建设模式下, 主要依靠监理单位在施工阶段监管质量, 产生问题较多, 质量问题治理不够彻底, 影响质量目标的实现。在全咨模式下, 管理的维度可以涉及项目前期设计与招标阶段, 且全咨的项目管理团队对各参建方进行统筹管理, 而思想统一是确保质量目标实现的关键因素。

【作者简介】郭联欢(1986-), 男, 博士, 工程师, 从事油气储运工程, 工程管理研究。

2 全过程工程咨询与质量管理协同管控的理论基础

2.1 全过程工程咨询的核心内涵与特征

全过程工程咨询将工程建设的整个生命周期作为服务范畴, 把投资决策、勘察设计、招标采购、施工建造、竣工验收以及运营维护等各个阶段的专业咨询资源给予整合, 提供一体化且综合性的技术与管理服务, 它的核心内涵呈现为全流程统筹、多专业协同以及全要素管控这三者的有机融合, 打破传统分段咨询所形成的壁垒, 实现各阶段工作的无缝对接。其主要特征包含系统性(即从项目的整体目标着手来优化资源配置)和专业性(依靠多领域的专业技术团队来

提供精准服务)^[1]。

2.2 质量管理协同管控的理论框架

质量管理协同管控将系统论、协同论以及控制论当作核心理论支撑,构建起一套管控体系,该体系具有目标统一、责任清晰、流程连贯、信息共享以及风险共防等特点,框架的核心层级涉及目标层、组织层、流程层以及保障层,目标层主要关注工程质量要符合规范标准以及使用需求,明确各个阶段的质量控制指标。组织层构建起跨主体协同机制,以此整合咨询、设计、施工、监理等多方面的资源,流程层梳理全生命周期质量管控的关键节点,同时规范验收标准与整改流程,保障层借助制度建设、技术支撑以及人员培训等手段来保证管控可落实,此框架着重强调各方主体打破信息孤岛的状况,形成事前预防、事中控制以及事后改进这样的闭环管理,以适应工程建设复杂多样的质量管控需求。

2.3 全过程工程咨询与质量管理协同的内在逻辑

全过程工程咨询所有的一体化服务模式,为质量管理协同管控搭建起了天然的载体,二者之间的内在逻辑呈现出目标同向、过程同频以及责任同担的特点:目标同向意味着二者均将实现工程优质高效建设当作核心内容,希望能够追求质量、进度以及投资之间的动态平衡,过程同频指的是全过程工程咨询的全流程服务与质量管理的各个阶段管控可深度融合,咨询机构借助统筹协调的方式推动各方严格落实质量责任,责任同担即咨询机构作为协同的核心,承担起质量统筹管理的责任,与设计、施工等单位联动形成责任共同体^[2]。

3 全过程工程咨询模式下质量管理协同管控的现状与问题

3.1 质量管理协同管控的实践现状

在当前全过程工程咨询模式环境下,质量管理协同管控在众多安置住房、公寓住房工程以及钢结构工程项目中逐渐得以落实,形成了初步的协同机制以及实施路径。在组织层面,多数项目组建起以咨询机构为牵头单位,设计、施工、监理等多方面参与的协同管理小组,明确了各方在安置住房居住适配性、公寓住房功能达标性、钢结构节点连接可靠性等核心质量管控环节的基本职责以及沟通渠道^[3]。在流程层面,借助全过程咨询全周期服务的优势,达成了从勘察设计阶段的钢结构受力验算、住房户型与结构安全预控,到施工阶段的钢结构焊接质量监督、住房施工工艺规范把控,再到竣工验收阶段的住房功能核验、钢结构工程质量检测的全链条衔接,部分项目引入 BIM 技术对钢结构构件安装进行模拟,并借助智慧工地系统监控住房施工质量,提高了钢结构焊缝检测数据、住房隐蔽工程质量信息的传递效率以及管控精准度。

3.2 协同管控存在的核心问题

协同管控在实际操作过程中碰到了许多关键问题,使得质量管理的效能无法得到充分呈现,协同意识较为薄弱,

部分参与的一方依旧秉持传统的分段管理思路,欠缺整体观念,各自行事,对于协同管控的要求反应迟钝、配合不佳,如安置住房墙体砌筑和钢结构支撑安装的衔接出现了脱节情况,公寓住房装修质量与主体结构管控相互分离,使得质量管控环节产生了断层;信息共享不够充分,虽然构建了基本的沟通途径,但各方存在信息障碍,质量数据的传递不及时且不完整,比如钢结构材料规格发生变更的信息没有及时同步给施工单位与监理单位,公寓住房防水工程存在的隐患没有在第一时间反馈给咨询单位与设计单位,安置住房钢筋绑扎的质量问题没有有效流转,这严重影响了管控决策的及时性与准确性^[4];责任划分不够清晰,尽管明确了基本的职责,但在跨阶段、跨专业质量问题的处理中容易出现相互推诿的现象,如设计阶段钢结构节点设计存在缺陷所导致的施工质量问题、施工阶段公寓住房管线铺设不当引发的后续隐患、安置住房结构施工与装修衔接处的质量纠纷等交叉领域,缺少清晰的责任界定标准。

3.3 问题产生的根源分析

上述这些问题之出现,其根源在于多种因素相互交织共同产生影响。从思想层面来看,传统工程管理模式的路径依赖表现得极为顽固,部分参与方并没有充分认识到安置住房、公寓住房以及钢结构工程在全过程协同管控方面所有的核心价值,而是将自身利益置于项目居住安全、结构稳定等关乎整体质量的目标之上,严重缺乏协同共赢的理念。在制度层面,针对安置住房的民生属性、公寓住房的功能需求以及钢结构工程的技术特性,缺少协同管控的法律法规与行业标准体系,现有的制度对于各方在钢结构焊接协同、住房施工衔接等环节的权利义务界定不够精细,对于协同不力的惩戒措施缺乏刚性约束,使得协同管理缺乏明确的依据以及有力的保障。组织层面上,协同管理的组织架构并不完善,多数项目的协同小组仅仅停留在形式上,缺乏常态化的沟通机制与决策流程,咨询机构在统筹钢结构构件生产与安装、协调安置住房质量整改等权限不足,很难有效地整合各方资源、化解管控过程中出现的矛盾^[5]。技术层面,数字化协同平台的建设与应用并不成熟,部分项目仍然依赖传统的纸质文件、即时通讯工具来传递钢结构检测报告、住房质量验收记录等信息,缺少统一的质量数据管理系统,导致钢结构工程数据与住房施工信息的整合难度较大、共享效率较低。人员层面,同时有全过程工程咨询能力与协同管理素养,并且熟悉安置住房、公寓住房特性以及钢结构工程技术的复合型人才培养数量不足,部分管理人员专业能力较为单一,缺少钢结构工程协同管控、住房全周期质量监管的经验,难以契合实际需求状况。

4 全过程工程咨询模式下质量管理协同管控新路径

4.1 路径构建的原则

路径构建需坚守四个核心原则,为协同管控提供方向

指引。系统性原则要求从安置住房、公寓住房以及钢结构工程的全生命周期考量,全面统筹勘察设计、构件生产、安装施工、竣工验收等各个阶段,以及设计、施工、监理、供应商等各参与方对于建筑物质量管理的需求,实现钢结构节点连接、住房功能适配等核心要素的全面覆盖以及流程的无缝对接。协同性原则注重强化各方主体之间的联动协作,打破部门界限与信息壁垒。针对安置住房的民生属性、公寓住房的功能多样性、钢结构工程的技术特殊性形成上下贯通、左右协同的管控合力。实操性原则关注路径设计要符合两类住房及钢结构工程建设实际,聚焦钢结构焊接质量、住房防水防渗等关键管控要点,各项措施清晰明了且简便易行,可直接转化为实际落地行动。动态性原则倡导依据项目类型、钢结构施工难度、建设阶段以及外部环境的变化,及时调整管控策略与方法,保证路径对不同住房工程和钢结构技术有适应性与灵活性。

4.2 协同管控组织架构优化

组织架构的优化工作围绕着“统筹有力、权责清晰、高效协同”这几个方面来开展,需要打造出一种新型架构,这种架构呈现出“核心引领、分层负责、多方联动”的特点。在此过程中,确定全过程工程咨询机构作为协同管控的核心主体,赋予其住房质量统筹、钢结构资源协调以及关键工序责任监督等一系列关键权限,并牵头成立跨主体的协同管控委员会,(该委员会的成员包括设计、施工、监理以及住房验收等各个方面的代表)。架构总共分为三层来设置:决策层由项目负责人以及咨询机构核心专家共同构成,主要负责制定安置住房民生质量、公寓住房功能质量以及钢结构安全质量等总体管控策略。此外,建立层级间的快速响应机制,明确各层级针对钢结构质量隐患、住房质量问题的沟通流程以及决策时限,避免出现推诿扯皮的现象,提高组织运行效率,保证架构可适应两类住房及钢结构工程复杂的质量管控要求。

4.3 全流程协同管控机制设计

全流程协同管控机制围绕“事前、事中、事后”三个关键阶段构建闭环管控体系。事前预防机制聚焦源头管控,设立针对安置住房、公寓住房以及钢结构工程的设计方案联合评审制度,咨询、设计、施工三方共同参与方案论证,着重核查住房户型适配性、钢结构节点设计可行性以及质量保障措施,推行钢构件及住房建材联合验收机制,保证进场材料符合质量要求,制定质量风险预控清单,针对钢结构焊接、住房防水防渗、管线铺设等关键环节预先制定防控措施。事中控制机制强化过程监管,建立常态化联合巡检制度,由咨询机构牵头,联合监理、施工单位定期开展质量巡查,重点检查钢结构安装精度、住房主体结构稳定性等,及时发现并整改隐患,实行质量问题快速处置机制,明确钢结构焊缝缺

陷、住房墙面渗漏等问题的上报、分析、处置、反馈全流程时限,保证问题能尽早发现、尽早解决,建立跨专业技术交底机制,重点针对钢结构与住房土建衔接、设备安装与住房功能适配等环节开展交底,防止因技术衔接不当引发质量问题。事后改进机制注重复盘提升,搭建质量问题复盘平台,对钢结构变形、住房渗水等质量问题进行详细分析。

4.4 技术支撑体系建设

技术支撑体系建设正朝着数字化以及智能化的方向不断发展,逐步构建起一种具有“数据驱动、智能赋能、高效协同”特点的技术保障网络,搭建起一个统一的数字化协同管控平台,该平台专门整合安置住房、公寓住房以及钢结构工程的质量数据采集、分析、共享以及追溯等功能,实现钢结构构件加工数据、住房设计图纸、变更指令、检测报告以及验收记录等信息的集中管理与实时共享,借此打破信息孤岛。引入 BIM 技术和物联网技术,针对钢结构安装过程以及住房施工过程展开可视化监控,实时采集钢结构焊缝质量、住房混凝土强度等关键部位的质量数据,达成质量风险的精准预警,运用大数据分析技术,对两类住房及钢结构工程全生命周期的质量数据进行深度挖掘,识别钢结构焊接管控、住房防水管控等薄弱环节,为优化管控策略提供数据方面的支持。建立标准化的质量数据库,整合钢结构行业规范、住房建设技术标准、典型质量问题案例等资源,为各方提供统一的技术参考依据。

5 结语

全过程工程咨询与质量管理的协同管控对于破解工程质量管控难题、实现工程建设高质量发展而言是极为关键的举措,本文借助理论梳理以及实践分析,明晰了二者协同的内在逻辑,找出了当前管控中存在的核心问题以及深层根源,并且构建了包含组织、机制、技术的协同管控全新路径。这条路径以全生命周期作为着眼点,加强了各方协同联动以及全流程闭环管控,为安置住房、公寓住房以及钢结构工程等项目的质量管理给出了切实可行的办法。

参考文献

- [1] 李宏伟. 建筑全过程工程质量管理与控制要点研究 [J]. 中国品牌与防伪, 2025, (05): 54-56.
- [2] 孙猛. 基于全方位全过程房屋建筑工程质量监督内容的研究 [J]. 工程与建设, 2025, 39 (02): 486-488.
- [3] 方小六. 建筑工程质量管理: 全过程造价控制及合同管理创新策略 [J]. 房地产世界, 2024, (07): 100-102.
- [4] 史鑫. 建筑全过程工程质量管理与控制要点浅析 [J]. 四川建筑, 2023, 43 (04): 314-315.
- [5] 诸建友, 武玉帅, 张艺源. 全过程工程咨询质量管理评价指标研究 [J]. 建设监理, 2023, (07): 84-87+101.

Research and Application of Optimization Strategy of Automation Control for Thermal Power Plant under Deep Peak Shaving Target

Gang Wang

Qinhuangdao Power Generation Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066003, China

Abstract

With the increasing peak regulation demands in China's power system and the advancement of flexibility retrofitting for thermal power units, the traditional small turbine steam supply method has shown limitations under frequent start-stop and deep peak regulation conditions. Taking the 2×300MW units at Qinhuangdao Power Plant as a case study, this paper systematically analyzes pre-retrofit operational issues of small turbine steam sources, including pressure fluctuations, temperature instability, prolonged vacuum establishment time, and abnormal steam seal operation. Based on these findings, a comprehensive retrofitting solution is proposed, focusing on optimizing the main steam temperature and pressure reduction branch, adding buffer sections and backup steam sources, and improving automatic control and protection logic. After implementation of major overhauls and field commissioning, significant improvements were achieved: post-retrofit pressure stabilized at 0.98-1.12MPa with ±0.08MPa fluctuation range, temperature maintained at 350-370°C, superheat remained within 25-45K, vacuum establishment time reduced to 37 minutes (an 18% improvement), steam seals and injectors operated smoothly with 60% reduction in thermal shock occurrences. This study provides a technical pathway for optimizing similar unit configurations.

Keywords

Qinhuangdao Power Plant; 300MW Unit; Small Generator Steam Source Conversion; Start-Stop Efficiency; Operational Performance

深度调峰目标下火电厂自动化控制优化策略的研究与应用

王刚

秦皇岛发电有限责任公司, 中国·河北 秦皇岛 066003

摘要

随着中国电力系统调峰需求增加、火电机组灵活性改造推进,传统小机汽源供汽方式在频繁启停与深度调峰工况下显局限性。本文以秦皇岛电厂 2×300MW 机组为研究对象,系统剖析改造前小机汽源运行问题,如压力波动、温度不稳、真空建立时间长、汽封运行异常等。据此提出以优化主汽减温减压支路、增设缓冲段与备用汽源、完善自动控制与保护逻辑为核心的改造方案。经大修实施与现场调试,改造效果显著:改造后小机汽源压力稳定在 0.98 - 1.12MPa,波动幅度 ±0.08MPa,温度 350 - 370°C,过热度 25 - 45K,真空建立时间缩短至 37 分钟,提升约 18%,汽封与喷射器运行平稳,热冲击次数减少 60%,为同类型机组优化提供技术路径。

关键词

秦皇岛电厂; 300MW 机组; 小机汽源改造; 启停效率; 运行性能

1 引言

在“碳达峰、碳中和”及新能源大规模并网背景下,火电机组承担电网频繁启停和深度调峰任务,小机汽源稳定性关乎机组启停效率与运行安全。秦皇岛电厂 2×300MW 机组运行良好,但原有小机汽源依赖主汽母管或高压抽汽供给,启机阶段汽源压力波动达 ±0.25MPa,温度在 330-420°C 间,过热度波动从不足 10K 到近 70K,导致真空建立时间长达 45 分钟,汽封系统每小时平均波动 3 - 4 次,

制约了机组启停效率和深调能力。为此,电厂在机组大修时实施小机汽源改造,通过优化供汽路径和完善控制逻辑,改善供汽品质,提升机组灵活性。

2 小机汽源改造背景与设备现状

2.1 原系统运行问题

在秦皇岛电厂 2×300MW 机组长期运行过程中,原有的小机汽源主要依赖主汽减温减压支路和部分高压缸抽汽,在额定负荷下尚能满足小机及相关辅机的用汽需求,但在启机、低负荷和深调阶段表现出明显不足。尤其是在冷态启机和频繁启停的工况下,主汽母管压力和温度波动直接传递至小机汽源,造成供汽品质不稳定。具体表现为压力波动频

【作者简介】王刚(1975-),男,中国河北秦皇岛人,工程师,从事热工自动化研究。

繁、温度控制不均匀,导致汽封系统和喷射器无法保持平稳运行,真空建立时间过长,机组启机效率受到制约。同时,频繁的汽封切换与不稳定的喷射器吸力还加大了运行风险,增加了管道和设备的热冲击次数,对长期运行的安全性与经济性均带来不利影响。

2.2 设备运行特征

结合运行监测数据可以发现,在启机过程中小机汽源压力瞬态波动可达 $\pm 0.25\text{MPa}$,供汽温度处于 $330\sim 420^\circ\text{C}$ 的宽幅区间,难以满足小机稳定所需的过热度要求。真空建立平均需时 45 分钟,不仅延长了启机周期,也对电网调度响应形成制约。与此同时,汽封切换频率高达 $3\sim 4$ 次/h,增加了运行人员干预频率和设备的机械疲劳。在深度调峰阶段,小机汽源稳定性进一步下降,凝结水温度随之波动,加热器热平衡被破坏,导致机组热耗上升。长期以来,这种运行特征使机组在适应新能源高比例接入、电网调峰频繁化的环境中缺乏足够灵活性,凸显出改造的紧迫性。

2.3 改造目标

针对上述问题,改造目标明确提出通过小机汽源优化提升系统的稳定性与适应性。首先,压力控制在 $0.95\sim 1.15\text{MPa}$ 的合理区间,避免低压导致喷射器失效或高压造成管道应力异常。其次,将温度稳定在 $350\sim 370^\circ\text{C}$,并将过热度控制在 $25\sim 45\text{K}$ 范围,以保障汽封和小机运行的热力需求。再次,缩短真空建立时间约 20%,目标控制在 37 分钟左右,显著提升启机效率。最终,通过减少汽封切换次数和运行波动,确保喷射器吸力稳定,从而改善机组在启机、低负荷和深调等多工况下的运行表现。改造完成后,机组不仅能够满足当前的电网调节要求,还能为未来高比例新能源并网下的灵活性运行提供保障。

小机汽源改造核心是优化供汽路径、科学配置备用方案,保障不同工况下小机供汽的连续稳定。秦皇岛电厂 $2\times 300\text{MW}$ 机组原系统依赖主汽母管减温减压供汽,启停阶段易产生瞬态扰动,使汽源压力和温度大幅波动。改造中,在主汽减温减压支路增设小容量缓冲段,有效容积约 $0.8\sim 1.2\text{m}^3$,可大幅削减瞬时压力与流量波动,为小机和汽封系统提供稳定蒸汽。同时,考虑到极端低负荷或主汽母管波动剧烈时单一路径可能不足,引入中压再热抽汽作备用汽源,经二级减温减压阀组调节,压力和温度异常时数秒内可切换,避免小机汽源中断。系统还配套自动控制逻辑和快速旁路通道,保证切换平滑无冲击。这种混合供汽设计强化了系统冗余度,提升了机组对复杂工况的适应性 with 运行安全水平。

2.4 热力与安全性校核

在供汽路径确定后,对系统进行热力与安全性校核是确保改造可行性的关键环节。本次校核综合考虑了小机汽源在最大并发需求条件下的流量、压力、温度等关键参数。计算结果表明,小机汽源流量需稳定在 $9\sim 14\text{t/h}$ 范围内,才能

满足汽动给水泵、汽封系统和凝汽器抽真空装置的全部负荷需求。压力方面,控制区间应保持在 $0.95\sim 1.15\text{MPa}$ 之间,避免过低导致汽封失效或喷射器效率下降,也防止过高引起阀门及管道异常受力。温度要求不低于 320°C ,以确保足够的过热度,避免水击和凝结风险。通过对新增管段、阀门及缓冲装置进行热力学与力学计算,校核显示各部件的压降均在合理范围内,噪声水平符合行业标准,管道和阀门的应力值远低于材料许用应力,具备较大的安全裕度。此外,动态工况模拟表明,在启机和深调过程中,汽源压力与温度变化曲线平滑,无剧烈波动点,保障了系统在全工况下的稳定性。综合评估结果显示,本次小机汽源改造在满足热力学合理性的同时,具备可靠的结构安全性和长期运行稳定性,为后续的现场施工与投运提供了坚实的技术依据。

3 施工与测试

3.1 施工实施

小机汽源改造的施工环节充分利用机组大修窗口期进行,以减少对电厂正常发电任务的影响。施工主要包括 PRDS 阀组的更换与精确校准、缓冲段与疏水系统的增设、关键测点和自动化仪表的升级,以及控制逻辑的重新完善与组态。所有新增管道均采用耐高温高压材料,施工过程中严格执行焊接规范,关键焊缝 100% 进行射线探伤,确保结构完整性与安全性。施工还同步进行了阀门、电动执行器和传感器的综合检定,确保改造后的控制回路具有足够的灵敏度和响应速度。为了避免系统复杂化带来的潜在风险,施工团队在设计 and 施工过程中强调“模块化与标准化”,使得新增部件与原有系统能够无缝衔接。整个改造过程工期仅占大修周期的 12 天,工程投入相较常规改造项目显著降低,体现了投资小、效率高、风险低的特点。通过严格的施工组织与全过程质量监控,本次改造为后续调试和长期运行的安全性与可靠性奠定了坚实的工程基础。

3.2 现场调试

施工完成后进入冷态与热态联合调试阶段,这是验证改造有效性和系统协调性的关键步骤。冷态测试主要针对阀门动作、执行机构行程、压力与温度测点准确性以及联锁保护逻辑进行逐项检验,结果显示各设备均能按设定要求动作。热态测试则在启机、低负荷与深调等多工况下进行,逐步升负荷至额定条件,重点考察汽源供汽品质及系统动态响应。实测数据显示,改造后小机汽源压力波动由原先的 $\pm 0.25\text{MPa}$ 缩小至 $\pm 0.08\text{MPa}$,温度由原先 $330\sim 420^\circ\text{C}$ 的宽幅区间集中至 $350\sim 370^\circ\text{C}$,过热度稳定在 $25\sim 45\text{K}$,显著改善了供汽品质。喷射器吸力与汽封系统运行稳定性均得到提升,启机过程中的热冲击次数大幅减少。整个调试过程不仅验证了系统的稳定性与安全性,还确保了多级联锁逻辑在异常情况下动作准确,为后续年度运行积累了数据依据和参数修正基础。

3.3 年度运行验证

在投入运行的一年时间内,小机汽源系统在多个启停周期和深度调峰工况下表现出良好的稳定性与可靠性。真空建立时间由改造前的45分钟缩短至37分钟,效率提升约18%,汽封切换次数减少约60%,显著改善了启机过程的顺畅性。运行数据表明,小机汽源流量稳定维持在9~14t/h的需求区间内,未出现供汽不足或过载现象。深调至180MW负荷以下时,汽源仍保持平稳供给,有效降低了主汽母管扰动,主汽参数峰值波动下降约30%。与此同时,凝结水温度波动幅度降低约30%,启停过程中非计划疏放汽量明显减少,节能效果突出。年度运行还显示,整个改造系统无因汽源异常引发的非计划停机,可靠性显著提升。结合启停效率、能耗下降与安全性的改善,本次小机汽源改造在实际运行中达到了预期目标,不仅提升了机组的灵活性和经济性,也为类似机组的改造推广提供了强有力的数据支持和工程经验。

4 运行效果与评估

4.1 运行稳定性

小机汽源改造完成后,运行数据充分显示供汽品质和系统稳定性得到了显著提升。改造前,启机与深度调峰阶段小机汽源压力波动幅度大,常出现 $\pm 0.25\text{MPa}$ 的瞬态扰动,温度波动范围高达 80°C ,导致汽封系统频繁切换和喷射器抽吸能力不足。改造后,通过缓冲段和备用汽源的引入以及多级控制逻辑的实施,汽源压力稳定在 $0.98\sim 1.12\text{MPa}$,温度维持在 $350\sim 370^\circ\text{C}$,过热度稳定在 $25\sim 45\text{K}$,有效抑制了参数大幅波动。实测表明,真空建立时间从改造前的45分钟缩短至37分钟,效率提高18%。与此同时,汽封切换次数减少了60%以上,喷射器抽吸裕度明显提升。年度运行数据还显示,改造后的机组全年未发生因小机汽源波动导致的非计划停机,运行可靠性大幅提高。总体来看,系统在启机、低负荷与深调等多种运行工况下均能保持平稳状态,显著增强了机组运行的安全性与稳定性。

4.2 经济性与灵活性

改造不仅提升了运行稳定性,还带来了明显的经济性与灵活性收益。改造前,汽源不稳造成启机过程中的非计划疏放汽量偏大,增加了能耗与启停热耗。改造后,压力和温度的稳定性使得启机效率显著提升,冷态启机时间缩短,深调阶段加热器热平衡波动减弱,凝结水温度波动幅度降低约30%,有效减少了附加能耗。统计数据显示,启机过程中非计划疏放汽量较改造前下降约20%,对应的热耗水平得到优化。深调运行中,机组在160~200MW负荷段保持稳定,主汽扰动峰值下降28%~35%,显著提高了电网调度下的运行适应性。此外,本次改造施工周期短、投资小,仅为机组

大修费用的7%左右,经济性突出。对于当前电力市场中频繁启停和深度调峰的运行模式而言,小机汽源的改造有效降低了运行成本,同时增强了机组对外部调度的快速响应能力,具有显著的灵活性优势。

4.3 应用价值

从工程实践角度看,本次小机汽源改造不仅解决了秦皇岛电厂机组在启停与深调运行中长期存在的汽源波动问题,还形成了一套具有可复制性的技术路径。改造方案以“主汽减温减压优化+缓冲段+备用汽源”为核心,结合分级联锁保护与智能控制逻辑,体现了投资低、周期短、风险小的特点,适用于同类型300MW级机组的推广应用。实际运行数据验证了改造的可行性和有效性,为行业提供了可靠的案例参考。特别是在新能源大规模并网、电网调节能力不足的背景下,该类改造可显著增强火电机组的启停效率与深调能力,从而提高其在电网中的支撑作用。更为重要的是,本次改造通过减少启停过程的热冲击和能耗损失,兼顾了经济性与安全性,契合当前火电机组灵活性改造与节能降耗的政策导向。因此,该实践不仅在技术层面具备推广价值,在行业发展与能源转型背景下也具有重要的战略意义。

5 结语

秦皇岛电厂 $2\times 300\text{MW}$ 机组小机汽源改造有效解决了启停与深调工况下供汽不稳的问题,实现了汽源压力和温度的稳定供给,真空建立时间明显缩短,汽封运行平稳可靠。改造不仅提高了启停效率和深调能力,还改善了机组的经济性和安全性。实践表明,该方案具备投资低、周期短、风险小的特点,为国内同类型机组的小机汽源优化提供了有力的工程参考。未来应结合数字化监测与智能控制,进一步优化小机汽源动态调节策略,确保机组在高比例新能源电网环境下保持长期安全、稳定、高效运行。

参考文献

- [1] 吴朋.火电厂自动化控制系统应用与研究[D].重庆大学,2002.
- [2] 郭达飞.新型电力市场下火电厂经济运行分析及策略研究[C]//钢铁职业教育教学指导委员会,中国钢铁工业协会.“2024职业教育活动周——钢铁行业大工匠进校园”论文集(中册)。华电内蒙古能源有限公司包头发电分公司;2024:129-131.
- [3] 史宏俊.DCS控制系统在火电厂燃煤锅炉应用中的优化改造[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(七)。新疆天富能源股份有限公司;2024:301-303.
- [4] 陈阿小,冉真真,马双忱,等.火电厂碳捕集技术:现状、应用与发展[J].洁净煤技术,2024,30(S1):52-64.
- [5] 柳栓,贾向虎,刘江.火电厂集控运行关键技术[J].中国科技信息,2024,(15):78-80.

Research on Construction Method and Quality Control Countermeasure of Mixed Tower Lifting in Wind Power Project

Sheng Yi

Wuling Power Co., Ltd., State Power Investment Corporation, Changsha, Hunan, 410029, China

Abstract

Wind power generation serves as a pivotal component in the clean energy ecosystem, with technological advancements and large-scale deployment progressing steadily. As wind turbines grow larger, traditional all-steel towers face challenges in cost-effectiveness and structural stability at elevated heights, leading to the emergence of hybrid tower structures combining concrete and steel. These structures feature a concrete base connected to an upper steel tower section, effectively leveraging the complementary strengths of both materials. This innovative design provides an ideal solution for achieving greater hub heights and better wind resource capture. Therefore, conducting in-depth research and standardizing installation methods for hybrid towers, while establishing a comprehensive quality control system throughout the process, holds critical practical significance for ensuring the overall safety of wind power projects and promoting the sustainable development of the industry.

Keywords

mixed tower crane lifting; construction method; quality control

风电工程项目混塔吊装施工方法与质量控制对策研究

易生

国家电力投资集团五凌电力有限公司, 中国·湖南长沙 410029

摘要

风力发电是清洁能源体系里的关键构成部分,其技术的进步以及规模化建设正变得越发深入。在风电机组大型化的行业趋势下,传统的全钢塔筒在达到一定高度后,其经济性与结构稳定性面临挑战,混凝土与钢材结合的混塔结构应运而生。这种结构的下部采用混凝土段,上部连接钢制塔段,充分呈现出了两种材料的性能优势,为达成更高轮毂高度、捕获更优质风资源给出了理想的解决办法。因此,深入研究和规范混塔的吊装施工方法,同时建立与之相匹配且贯穿始终的质量控制体系,对于保障风电工程整体安全、推动行业持续健康发展有着极其关键的现实意义。

关键词

混塔吊装; 施工方法; 质量控制

1 引言

随着风电行业朝着更高轮毂高度以及更大单机容量的方向发展,混塔渐渐变成支撑风电装备的关键结构。混塔吊装作业因为构件重量大、安装精度要求高、现场组对情况复杂,成为整个风电工程项目中技术难度与安全风险集中的核心环节。本研究关注混塔结构的吊装施工整个过程,包括从基础环校验、首段吊装定位到后续塔段逐节组对、预应力张拉等一系列关键技术流程。论文着重探讨在这个复杂作业过程中,怎样借助精细化的工序控制、严格的质量检验方法以及全过程的安全监测措施,来切实保障塔筒的垂直度、连接

质量与结构整体性,为同类工程提供一套有效的施工管理与质量控制参考模式。

2 风电工程项目混塔吊装施工方法

2.1 分段吊装工艺

分段吊装工艺是整个混塔安装工程的起始环节,其关键之处在于应对超大型构件吊装带来的难题。因为混凝土塔段单件重量以及尺寸远远超出常规运输和吊装的限度,施工方不得不采用分阶段吊装的办法^[1]。现场一般会安排大吨位履带吊或者全地面起重机,依照从下往上的严谨次序,把预制的混凝土环形段或者平板片逐个提升到设计的标高位置。在这个过程中,吊装方案的周全性十分关键,这其中包括吊点的精准计算、吊索具的恰当选配以及构件在空中姿态的稳定把控。起重机操作团队要和地面信号指挥人员保持紧密协

【作者简介】易生(1984-),男,本科,工程师,国家注册一级建造师,从事风电、水电、光伏研究。

作,借助精细操作,保证重达数百吨的大型物体在起升、回转以及下落过程中一直处于平稳状态,达成与已安装结构的毫米级精确对接,为后续工序筑牢坚实根基。



图 1 分段吊装工艺

2.2 高空组对技术

高空组对技术对于保障塔筒结构的整体性以及垂直度而言,是极为关键的一步,其操作的精准程度直接关系到结构在长期使用过程中的安全性。当起重机把待安装的塔段悬吊在预定的位置之后,作业人员就要马上着手进行对中以及调平方面的工作。他们一般会借助事先设置好的导向销、千斤顶或者专用的调平工装,针对构件展开微米级别的精细调整操作,以此来消除因为制造公差以及吊装变形而产生的微小偏差。组对质量的核心评判依据是环缝间隙的均匀程度,一种理想的组对状态指的是结合面各个地方的间隙相同、受力均匀,这样的状态为后续的预应力张拉以及高强度灌浆提供了良好的结构条件。

2.3 预应力张拉工艺

预应力张拉工艺对于混合塔筒其混凝土部分的结构性能起着关键作用,该工序借助张拉预埋于混凝土塔壁内的钢绞线,在结构中主动构建起强大的压应力,以此来抵御风机运行时所产生的巨大倾覆弯矩^[2]。张拉作业并非单纯的“拉紧”,而是一个依照严格技术规程的动态过程,施工人员运用大吨位千斤顶,依据设计规定的顺序,开展分级、同步、对称张拉。这般严谨的程序是为了保证数以千吨计的预压应力可均匀分布于整个混凝土塔身截面,防止局部应力集中致使结构受损。成功完成张拉后的钢绞线体系,好似给塔筒披上了一件无形的“预应力铠甲”,让其混凝土部分始终处于受压的有利状况,较大提升了结构的抗裂性、刚度以及疲劳寿命。

2.4 螺栓连接施工

螺栓连接施工针对混塔结构,上部钢塔段以及连接节点,给予了可靠的机械连接保障。所采用的高强度螺栓连接副,其安装质量对动态荷载在钢结构之间的有效传递起着决定性作用。施工作业需严格依照“初拧”和“终拧”的两步法原则,借助扭矩控制法或者转角法等方式,保证每颗螺栓

可达到设计预紧力。工人们运用经过定期校准的专用扭矩扳手,依照从中心向四周、对称施拧的顺序开展操作,这样能使法兰结合面压力分布均匀,所有螺栓共同协作,一起形成一个刚劲且耐久的连接节点。严谨执行这一道工序,是保证塔筒在风机持续运行振动时,连接节点始终维持紧固、不出现松脱的技术关键。

2.5 测量定位控制

测量定位控制犹如工程的“视觉神经”,为每一步高空作业提供着不可或缺的空间数据支持。从首段混凝土塔筒开始安装就位,直至最顶端机舱完成最终吊装,测量工程师需持续运用高精度全站仪、激光铅垂仪以及 GNSS 接收机等设备,对塔筒的中心坐标、垂直度、扭转角以及顶面标高进行全过程、多测回的实时监测与反馈^[3]。任何微小的安装偏差都要在后续段节吊装前及时被识别、分析并加以纠正,这是一个动态的“测量-反馈-调整”闭环控制过程,其根本以便有效抑制误差的累积效应,保证百米高塔的顶部法兰中心最终可精确地对准设计位置,其偏差被严格限制在毫米级的容许范围内。这项贯穿始终的测量保障工作,是实现风机传动链最终精准对中、保障整机平稳高效运行必不可少的前提条件。

3 风电工程项目混塔吊装施工质量控制对策

3.1 建立全过程监控体系

构建覆盖整个过程的监控体系是实施质量控制的基础,该体系要求把质量管理工作从传统的结果验收往前延伸到源头管控。在混凝土塔段预制阶段,质量监控要同步介入,对原材料配比、模具精度、预应力管道定位以及养护条件进行驻厂监督,保证出厂构件的内在品质和几何尺寸都达到标准。随着构件运到现场,监控重点马上转向吊装作业,依靠对起重机工况、吊索具配置以及吊装路径的全程监督,保证数百吨重物在高空移动时绝对安全。当施工进入高空组对与预应力张拉等关键工序时,监控体系更要发挥其“眼睛”的作用,利用数字化采集设备实时记录组对精度、张拉力和伸长量等核心参数,形成完整的数据链条。这种贯穿始终的监督方式就像一张密不透风的质量防护网,可及时捕捉并纠正各个环节的细微偏差,有效防止质量缺陷的累积与传导。

3.2 完善质量检验标准

完善的质量检验标准给全过程监控提供了清晰的技术依据以及判定准则,此类标准要兼顾行业规范和项目特殊性。鉴于混塔结构的特点,质量检验标准要针对混凝土塔筒的几何尺寸、表面裂缝宽度、法兰平面度等指标给出具体规定,同时也要明确钢绞线张拉控制值、高强螺栓扭矩系数等关键工艺参数。而且标准体系要细化至每个施工环节的操作规程与验收要求,像规定环缝组对的最大允许间隙、预应力张拉的分级加载程序等^[4]。这些详细的技术规定为施工人员和检验人员提供了统一的工作标尺,极大程度减少了因个人

理解差异造成的质量波动，让质量判断基于客观、量化的基础之上。

3.3 强化施工人员培训

即便再完善的标准体系，也得依靠专业人员去执行，强化施工人员培训是提升质量软实力的根本办法。混塔施工有特殊性，这要求作业人员要掌握常规的吊装技能，又要精通预应力张拉、高强螺栓紧固等专项技术。培训内容应囊括设备操作原理、工艺标准理解、质量控制要点以及常见问题处置等多个方面，借助理论讲授、模拟操作和现场实训相结合的多种方式，让每个岗位人员可以明白自身工作对最终质量的影响。张拉工、扭矩扳手操作人员等关键岗位，要实行严格的考核认证制度，保证其与岗位要求相符的专业技能。一支训练有素的施工团队是工程质量最可靠的保障，他们的专业素养直接影响各项质量措施在现场的最终落实效果。



图2 施工人员培训现场

3.4 严格设备材料验收

所有上层质量管理举措均是以合格的设备以及材料作为基础而构建起来的，严格把控进场验收这一关卡乃是保证工程质量的物质方面的前提条件。在这一环节当中要坚守“零缺陷”入场的原则，构建起分级分类的检验机制。对于混凝土塔段而言，除了要核查其出厂合格证明之外，还需要

开展现场尺寸的复核以及外观质量的检查工作，重点留意预应力锚垫板的定位精度以及表面裂缝状况。对于高强螺栓连接副来说，要依照规定的批次进行扭矩系数或者紧固轴力的见证取样复验，以此保证其力学性能契合设计要求^[9]。预应力体系的关键材料，涉及钢绞线、锚具以及夹片，同样需要实施严格的第三方检测。这一坚固的质量屏障可切实有效地阻止不合格品进入施工环节之中，从根源上杜绝因材料设备存在缺陷而引发的系统性质量风险。

4 结语

总之，混塔吊装施工是一项集大型设备操作、精密测量控制与复杂结构工程于一体的综合性技术，应注意施工要点。施工方法的可靠性体现在对每一道工序的精细化管理上，从基础的水平度复核，到每一段塔筒的精准就位与临时固定，直至预应力体系的精准建立，每一个环节都直接关系到最终产品的质量。质量控制的成效则依赖于健全的管理体系，这包括严格的原材料与构件入场检验、实时的安装精度监测以及规范完整的张拉过程记录。展望未来，随着模块化施工、数字化监控等新技术的进一步应用，混塔吊装技术与质量管理水平有望得到持续提升，从而为构建更高效、更安全的风电基础设施奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 马海鹏, 梁会森, 徐景阳, 陈吟颖, 赵斌. 兆瓦级风电项目基于轮毂高度方案的限电率差异性研究[J]. 节能技术, 2025, 43 (04): 354-358.
- [2] 黄赐荣, 张栋梁, 付坤, 李天昊, 何澜, 章家炜. 装配式风电混塔胶黏拼缝的内聚力本构模型及塔筒承载力研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44 (04): 71-81.
- [3] 张宇豪, 吴香国, 张明熠, 高朝利, 周瑞权, 李博洋. 横向拼接缝胶结缺陷对混塔极限状态受力特性的影响分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2024, (10): 27-33.
- [4] 喻文超, 罗国甘, 黄声富, 冯成. 基于光纤传感的混塔结构风机安全监测系统的应用[J]. 中国设备工程, 2024, (S1): 60-67.
- [5] 韦洁, 彭莎, 韦妮采. 超高风电塔筒竖向体外预应力施工难题及解决方案研究[J]. 企业科技与发展, 2024, (01): 102-105.