

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 3 · Issue 4 · April 2026 3060-9054(Print) 3060-9062(Online)

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 3 · Issue 4 · April 2026 3060-9054(Print) 3060-9062(online)

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
Tel.: +65 62233839

E-mail: contact@nassg.org
Add.: 12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819

中文刊名：工程研究前沿	Serial Title: Frontiers of Engineering Research
ISSN：3060-9054（纸质）3060-9062（网络）	ISSN: 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)
出版语言：华文	Language: Chinese
期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn	URL: http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn
出版社名称：新加坡南洋科学院	Publisher: Nan Yang Academy of Sciences Pte. Ltd.

Database Inclusion



Google Scholar



Crossref



China National Knowledge Infrastructure

版权声明/Copyright

南洋科学院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南洋科学院所有。

All articles and any accompanying materials published by NASS 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). NASS Publishing reserves the final interpretation of the copyright of the article(s) in this journal.

Nanyang Academy of Sciences Pte. Ltd.
12 Eu Tong Sen Street #07-169 Singapore 059819
Email: info@nassg.org
Tel: +65-65881289
Website: http://www.nassg.org



《工程研究前沿》征稿函

期刊概况：

中文刊名：工程研究前沿

ISSN：3060—9054（Print） 3060—9062（Online）

出版语言：华文刊

期刊网址：http://journals.nassg.org/index.php/foer-cn

出版社名称：新加坡南洋科学院

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
- 谷歌学术（Google Scholar）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。

工程研究前沿

Frontiers of Engineering Research

Volume 3 Issue 4 April 2026
ISSN 3060-9054 (Print) 3060-9062 (Online)

主 编

虞 斌

Bin Yu

编 委

王振波 zhenbo Wang

赵希强 Xiqiang Zhao

刘永军 Yongjun Liu

张新儒 Xinru Zhang

1	建筑工程招标中对合同风险的控制研究 / 何例		
4	岩土工程勘察设计与施工中地质问题探索 / 边鹏	54	矿产资源勘查中成矿预测模型构建与精度提升研究 / 孟兆涛
7	软土地基在水利水电工程中的处理技术及应用效果 / 胡笑凯 赵超 胡玉宝	57	滑坡地质灾害成因机制及稳定性评价研究 / 李翔
10	煤矿机电设备智能化改造与升级实践 / 李娜	60	机械化自动化技术在采矿工程中的应用探讨 / 杨林平
13	土建施工现场安全风险识别与防控机制研究 / 杨建龙	63	市政给排水施工中常见的质量缺陷及对策研究 / 魏长玉 费海岩
16	建筑工程测绘中激光雷达测绘技术的优势与运用方法 / 贾江宁	66	核电厂次级测量控制网平面精度提升研究 / 刘乾坤
19	基于无人机倾斜摄影技术的建筑工程测绘要点研究 / 刘志航	69	基于分布式并行计算架构的电力工程三维地理信息产 品高效生产应用研究 / 陈小祥
22	试析数字化地图测绘技术在建筑工程项目测量中的应 用策略 / 林彭卿	73	集装箱门式起重机电气控制技术分析 / 曹睿 周伟
25	装配式技术在轨道交通地下管线安装中的应用 / 张豪强 谭幸芸	76	探讨港口门座式起重机电气故障与防控对策 / 刘洋 鲁康
28	综合物探法在地下管线探测中的应用分析 / 李帅为	79	矿山机电设备全生命周期管理与精细化运维研究 / 刘俊迁
31	燃气机组 FCB 逻辑与机组继电保护的配合原则分析 / 陈晓峰	82	水文工程与环境地质勘察技术的应用探究 / 刘启玉 刘江波 胡冲 任卓楠
35	绿色建筑理念在建筑工程施工管理中的应用研究 / 王艳兵	85	化工企业生产现场职业危害因素检测与防控措施研究 / 胡飞 李玉娜 杨丰 阮国成
38	薄煤层综采工作面高效开采装备适应性分析与改进 / 王宇宵 薛志文	88	建筑工程物资采购成本控制与供应链管理优化路径 研究 / 高飞
41	山区公路项目预制梁施工成本控制与优化策略研究 / 陈晓燕	91	混凝土表面裂缝修复材料的耐久性试验 / 薛源
45	绞吸式挖泥船水下清淤精准定位技术探究 / 赵贤	94	煤矿采矿工程全过程安全风险识别与动态管控研究 / 刘亚民
48	煤矿老空水害治理中定向钻进与分段注浆协同技术 研究 / 于洋	97	瓦斯治理与煤矿安全开采协同机制研究 / 王汉斌
51	电力工程建设中的安全风险管控与优化策略研究	100	数字化时代下建筑供热系统的节能管理对策分析 / 张瑞明

- 1 Research on Contract Risk Control in Construction Project Bidding
/ Li He
- 4 Exploring Geological Challenges in Geotechnical Engineering Survey, Design, and Construction
/ Peng Bian
- 7 Treatment Technologies and Application Effects of Soft Soil Foundations in Water Conservancy and Hydropower Projects
/ Xiaokai Hu Chao Zhao Yubao Hu
- 10 Energy Saving and Emission Reduction Technology Transformation and Application of Coal Mine Electromechanical Equipment
/ Na Li
- 13 Research on Safety Risk Identification and Prevention Mechanism in Civil Engineering Construction Sites
/ Jianlong Yang
- 16 Advantages and Application Methods of Lidar Surveying and Mapping Technology in Construction Engineering Surveying and Mapping
/ Jiangning Jia
- 19 Research on Key Points of Construction Engineering Surveying and Mapping Based on UAV Oblique Photography Technology
/ Zhihang Liu
- 22 Analysis of the Application Strategy of Digital Map Surveying and Mapping Technology in Construction Engineering Project Surveying
/ Pengqing Lin
- 25 Application of Prefabricated Technology in the Installation of Underground Pipelines for Rail Transit Systems
/ Haoqiang Zhang Xingyun Tan
- 28 Application Analysis of Integrated Geophysical Method in Underground Pipeline Detection
/ Shuaiwei Li
- 31 Analysis of the Principle of the Coordination between FCB Logic and Unit Relay Protection in Gas Turbine Unit
/ Xiaofeng Chen
- 35 Application of Green Building Concept in Construction Management
/ Yanbing Wang
- 38 Adaptability Analysis and Improvement of High Efficiency Mining Equipment for Thin Coal Seam Comprehensive Mining Face
/ YuxiaoWang Zhiwen Xuen
- 41 Research on Cost Control and Optimization Strategies for Prefabricated Beam Construction in Mountainous Highway Projects
/ Xiaoyan Chen
- 45 Exploration of Precise Positioning Technology for Underwater Dredging of Cutter Suction Dredgers
/ Xian Zhao
- 48 Research on the Coordinated Technology of Directional Drilling and Segmented Grouting in the Treatment of Water Hazards in Old Coal Mine Voids
/ Yang Yu
- 51 Research on Safety Risk Control and Optimization Strategy in Power Engineering Construction
/ Weiqi Lu
- 54 Research on the Construction and Accuracy Improvement of Mineralization Prediction Models in Mineral Resource Exploration
/ Zhaotao Meng
- 57 Research on the Causes and Stability Evaluation of Landslide Geological Disasters
/ Xiang Li
- 60 Application of Mechanization and Automation Technology in Mining Engineering
/ Linping Yang
- 63 Research on Common Quality Defects and Countermeasures in Municipal Water Supply and Drainage Construction
/ Changyu Wei Haiyan Fei
- 66 Research on Improving the Plane Precision of Secondary Survey Control Network in Nuclear Power Plants
/ Qiankun Liu
- 69 Research on Efficient Production Application of Three-dimensional Geographic Information Products for Power Engineering Based on Distributed Parallel Computing Architecture
/ Xiaoxiang Chen
- 73 Analysis of Electrical Control Technology for Container Gantry Crane
/ Rui Cao Wei Zhou
- 76 Discussion on Electrical Faults and Prevention Strategies for Port Portal Cranes
/ Yang Liu kang Lu
- 79 Research on Full Life Cycle Management and Fine Operation and Maintenance of Mine Electromechanical

	Equipment	91	Durability Test of Repair Materials for Concrete Surface Cracks
	/ Junqian Liu		/ Yuan Xue
82	Application of Hydrological Engineering and Environmental Geological Survey Technology	94	Research on Safety Risk Identification and Dynamic Control of the Whole Process in Coal Mine Mining Engineering
	/ Qiyu Liu Jiangbo Liu Chong Hu Zhuonan Ren		/ Yamin Liu
85	Study on Occupational Hazard Factor Detection and Prevention Measures in Production Sites of Chemical Enterprises	97	Research on the Collaborative Mechanism between Gas Control and Coal Mine Safety Mining
	/ Fei Hu Yuna Li Feng Yang Guocheng Ruan		/ Hanbin Wang
88	Research on Cost Control of Construction Material Procurement and Optimization Path of Supply Chain Management	100	Analysis of Energy-saving Management Strategies for Building Heating Systems in the Digital Age
	/ Fei Gao		/ Ruiming Zhang

Research on Contract Risk Control in Construction Project Bidding

Li He

Sichuan Jinhe Sheng Investment Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

Contract risk management in construction project bidding processes is closely linked to project performance quality and market order. In today's complex construction market environment, stakeholders face multiple uncertainties. Inadequate contract terms and unreasonable risk allocation often lead to performance disputes. This study focuses on contract risk prevention mechanisms during the bidding phase, aiming to systematically identify risk sources, establish an evaluation system, and propose control methods covering the entire bidding process. It specifically addresses risk transmission issues in critical stages such as tender document preparation, bid evaluation, and contract signing, providing theoretical and practical support for standardizing bidding practices and promoting the scientific development of construction contract management.

Keywords

construction project bidding; contract risk management; risk identification and assessment; bidding document control

建筑工程招标中对合同风险的控制研究

何例

四川金禾盛投资有限公司, 中国 · 四川 成都 611130

摘 要

建筑工程招标过程中的合同风险管理与项目履行质量以及市场秩序关系紧密。当前建筑市场环境复杂, 招标相关主体面临多种不确定性, 合同条款存在不足以及风险分配不合理往往导致合同履行纠纷。本研究重点聚焦招标阶段的合同风险防范机制, 旨在系统识别风险来源, 建立评估体系, 并提出覆盖招标全流程的控制方法。主要针对招标文件编制、评标过程和合同签订等重要环节的风险传递问题, 为规范招投标行为提供理论与实践支持, 推动建设工程合同管理向科学化方向发展。

关键词

建筑工程招标; 合同风险管理; 风险识别评估; 招标文件控制

1 引言

建筑工程招标是项目开展的开端, 合同风险控制贯穿招投标活动始终。招标文件条款是否严密、风险分配是否合理以及评标机制是否公平, 直接关系到后续合同履行是否稳定以及项目能否成功。行业中普遍存在因合同规定不清晰、对风险缺乏足够预见而引发的索赔争议, 亟需建立系统化的风险管理框架。

2 建筑工程招标合同风险相关概念界定

建筑工程招标作为工程项目启动的核心环节, 涉及公告发布、资格预审、投标评审直至合同订立的完整流程, 这一过程中潜藏各类合同风险敞口。合同风险特指因条款约定缺陷或履约环境变化导致经济损失及争议的可能性, 其特性

表现为隐蔽性、传导性与动态变化性。依据风险成因可划分为招标文件设计风险、经济波动风险、技术实现风险及法律合规风险四大维度 [1]。招标文件编制疏漏可能埋下条款歧义隐患, 价格调整机制缺失将放大市场波动冲击, 技术标准描述不清直接影响施工可行性评估, 法规政策更迭则可能颠覆原有合同基础。这些风险要素相互交织渗透, 在招标阶段形成复杂风险网络, 故而需构建结构化识别框架以精准定位风险源。

3 招标阶段合同风险的识别与评估

3.1 合同风险的主要来源

招标阶段合同风险的产生根源具有多因素相互作用的特点。业主方作为招标主要负责方, 其专业水平差异可能导致技术说明书表述不准确或风险分担方案不合理; 承包商资质造假或施工经验欠缺也是重要风险因素; 此外, 如材料供应商履约异常或政府审批延迟等第三方外部干扰同样不可忽视 (见图 1)。项目本身的复杂程度影响更大, 地质状况

【作者简介】何例 (1990–), 女, 中国四川南充人, 本科, 助理工程师, 从事建筑工程, 招标、合同成本管理研究。

突然变化或者技术工艺有创新要求等本身存在的属性难题，往往超出常规预测范围。业主编制招标文件时出现疏漏，可能会直接导致条款意思不明确而产生争议；承包商采用低价中标策略，背后可能隐藏偷工减料的风险；监理单位监督不到位会增加施工现场失控的可能性；特殊结构工程设计存在缺陷则可能引发一系列技术风险。各类风险来源在招投标过程中不断相互影响、累积，形成了一环扣一环的风险传递链条，因此必须建立全面排查机制以确定风险触发点。

3.2 关键风险类型的具体分析

3.2.1 招标文件缺陷风险

工程招标文件是合同的法律根基与技术依据，其表述准确性直接作用于后续合同履行效果。条款表述不清可能导致双方对权利义务理解产生分歧，例如工程范围说明不清晰易引发施工界限争议，技术参数缺少关键标准会导致设备选择失误。技术要求不明确将降低投标报价的精准性，承包方可能基于不同技术理解提出有差异的实施方案。招标文件若缺乏严密的风险分担条款，常常成为索赔纠纷的起因，因此需从法律效力与技术可操作性两方面进行综合审查。

3.2.2 经济与价格风险

价格机制设计不完善易引发成本失控。固定总价合同在工程量清单缺项时表现出局限性，单价合同则需承受价格波动失控压力。支付条款中进度款比例安排不合理可能削弱承包方资金流动性保障，质量保证金返还条件过于严苛则会加剧资金链压力 [2]。更重要的是，材料价格大幅波动时若缺乏调价机制，承包方将被迫承担成本风险，此类单方面风险转移常导致偷工减料行为。合同价格体系的抗风险能力须通过动态调价公式与分层支付节点予以增强。

3.2.3 技术与履约风险

技术实现难度与施工过程变动因素构成多维度风险领域。工期设定脱离工程实际可能迫使承包方采用非常规施工技术，进而威胁质量安全；质量验收标准描述笼统会降低过程管理控制的可操作性。安全生产责任划分不清可能减少现场风险防范投入，设计变更流程不规范则会导致签证费用失控。尤其在遇到特殊地质条件或新施工工艺应用时，技术预案缺失会增加工期延误可能性，因此需将技术可行性验证提前至招标评审阶段。

3.2.4 法律与外部环境风险

政策法规变动与不可抗力事件会形成系统性风险冲击。环保标准提高可能使原设计不符合新规范要求，劳动法规调整会直接影响人力成本结构。极端天气频发或突发公共卫生事件将打乱原有施工计划，而征地拆迁拖延等第三方因素常成为工期违约的客观原因。

4 招标过程中合同风险的控制策略

4.1 招标文件编制阶段的风险防范

4.1.1 工程范围与技术要求条款

工程范围的确定应采用正面列举与反面排除相结合的

方式划分责任界限，例如说明“绿化工程不包括苗木养护”即为典型的反面排除条款。技术要求应将抽象标准转化为可验证指标，如混凝土抗渗等级应标明具体试验压力数值，以有效防止验收争议。对特殊工艺或新材料，必须附加现场试验验证条款，并将其作为技术可行性的前提条件。若范围描述遗漏地下管线迁移等潜在作业内容，易引发变更与索赔，因此需借助 BIM 模型进行施工冲突模拟。技术参数引用过期行业规范可能导致设计返工，故应将规范版本更新机制嵌入文件审查流程。

4.1.2 合同价格形式与支付条款

单价合同需设置工程量偏差临界值以触发价格调整机制，例如当土方开挖量超过预算百分之十五时，启动重新组价程序。总价合同则应配备完善的变更估价规则，规定新增项目参照投标时的同类单价，而非现行市场价格 [3]。进度款支付比例应考虑材料采购周期，在主体结构施工阶段将支付比例提高到百分之八十，有助于缓解承包商资金压力。质保金分期返还条款应与分项工程验收节点绑定，而非机械等待整体质保期结束。价格波动风险可通过分层设防策略化解，对钢材、水泥等主要材料设定基准价格与浮动区间，当波动超幅时启动双方分担机制。

4.1.3 风险分担与保险条款

风险分配应遵循可预见性与可控性原则，例如根据风险分配的最优效率原则（由控制力更强的一方承担），地下文物发掘风险由业主承担，而降水方案风险由承包商承担，则因其具备技术控制能力，此类分配不仅基于公平，更源于交易成本最小化的逻辑。保险设计应覆盖责任盲区，业主方应投保第三者责任险以补充承包商险种不足；对巨灾风险可通过再保险分散。针对地质勘察资料准确性争议，可设置责任分级机制：初步勘察误差由业主负责，若详细勘察数据承包商未进行复核，则双方分担责任。专业工程鉴别（如安装工程一切险）必须明确起止时段，将试运行期纳入保障范围，避免保障真空。

4.1.4 变更、索赔与争端解决条款

变更指令须区分技术优化型与缺陷补救型两类，并设置不同计价规则：前者适用成本加酬金模式，后者执行违约扣款机制。索赔程序应设定双重时效管制，要求承包商在事件发生后二十日内提出意向、四十五日内提交详细证据链。争端解决采用阶梯式递进设计：监理工程师前置调解失败后，启动争议评审委员会程序；仲裁条款应明确排除项目所在地法院管辖权以确保中立性。工期索赔计算应采用影响路径分析法替代简单顺延日历天，准确区分关键线路延误与非关键作业浮时差异。

4.2 投标与评标阶段的风险筛选

技术标评审应重点检查施工方案与招标要求的符合程度，若特殊地基处理技术无本地工程实例支撑，可能存在实施风险。经济标分析需关注报价组成的逻辑合理性，如发现土建单价异常偏低而安装单价偏高，可能存在不平衡报价隐

患。履约能力评估不应仅查看资质证书，应通过银行信贷记录及在建项目实地考察检验承包商实际资金能力。对工期承诺过度压缩的投标文件，应启动答辩询问程序，要求投标人说明资源配置计划。风险评审环节须保留专业咨询机构的否决权，防止关键风险点因权重设置不当而被忽视[4]。

4.3 合同谈判与签订阶段的最终锁定

合同谈判主要针对招标文件未涵盖的剩余风险分配问题，例如极端天气导致停工的损失分担比例，需通过补充协议明确。技术方案优化引起的工程量变化应同步调整计价条款，避免施工阶段出现价款争议。合同用语经法律审核后需进行工程语义转换，如扩展“不可抗力”定义以涵盖流行病停工等现代风险事件。签订合同前的封闭审查应重点检查风险触发条款是否完整，若调价公式中的指数来源未指定发布机构，则会留下争议隐患。合同交底环节要求设计代表与造价工程师共同解读技术经济条款，确保项目部理解界面交接点、验收标准与价款支付条件的对应关系。最终文本应增加异常情况处理备忘录附件，记录双方高层对接渠道，避免基层决策陷入僵局。

4.4 典型案例分析与风险控制实证

为增强控制策略在住宅开发这一重要领域的针对性与说服力，本研究特别选取住宅项目招标中因“交付标准”约定不明所引发的典型纠纷案例进行深入剖析。此类风险虽在风险分类中可归于“招标文件缺陷风险”与“技术实现风险”的交叉领域，但因直接关系到最终产品品质、客户满意度及开发商品牌声誉，故具有极强的现实警示意义和深化分析价值。

案例：某精装修住宅项目——交付标准模糊引发的群体性投诉与大规模返工

风险事件：项目竣工验收后，业主陆续收房时发现，尽管所用材料在“品牌”上符合合同（如指定了某品牌瓷砖），但均为该品牌中的低端工程系列产品，色泽、质感与业主在售楼处样板间所见相去甚远。公共区域石材存在大量色差，拼接工艺粗糙。业主集体投诉，认为交付品质未达到“高端精品”承诺，拒绝收房，并要求赔偿或整体整改。

影响分析：本案例集中暴露了住宅项目招标中，因“交付标准”缺乏客观、可量化、可验证的定义而引发的多重风险：

成本与品质失控：承包商为谋求利润最大化，在实际施工中选用符合文字要求但品质最低的材料和工艺，导致最终产品品质与开发商预期及市场宣传严重不符。

履约与验收争议：“高端”、“精品”等主观描述在法律上难以作为有效的验收或索赔依据。业主方（开发商）

若想提升标准，将面临巨额的变更费用索赔；若接受现状，则需承担品牌信誉损失和潜在的大规模客户索赔。

风险传导与扩大：原本的技术标准风险，最终演变为大规模客户投诉、法律纠纷、媒体公关危机及财务损失等连锁反应，形成了从施工阶段到销售后端的完整风险传导链条。

控制策略应用与深化：

本案例验证了前文所述“招标文件编制阶段的风险防范”策略的极端重要性，并提示在住宅项目中需进一步深化：

技术要求的“可验证指标”转化：

（1）深化设计前置：招标前，开发商应完成至少达到扩初深度的装修设计，招标文件应包含详细的“材料设备技术规格书”，明确每一个部品（如地砖、户内门、洁具）的品牌、生产商、系列、型号、颜色代码、关键性能参数（如耐磨转数、甲醛释放等级）。

（2）推行“样板引路”制度：在招标文件中强制要求，中标后大面积施工前，承包商必须在现场制作“工艺样板层”或“交付标准样板间”，并经开发商、监理、设计方共同确认封样，作为后续大批量施工和竣工验收的唯一客观依据。此样板应涵盖所有关键界面、收口工艺和材料效果。

（3）引入客观的观感验收标准：对于石材色差、墙面平整度、瓷砖空鼓率等，应规定具体的、可测量的验收标准（如“每100平方米内色差明显的石材板块不得超过3处”、“墙面平整度偏差不大于3mm/2m”），取代“美观”、“无明显色差”等模糊表述。

5 结论与启示

住宅项目，特别是精装修住宅，其合同风险的焦点已从传统的工期、总价控制，日益转向对“最终交付品质”确定性的控制。招标阶段是锁定这种确定性的唯一最佳时机。本案例深刻表明，未能将营销语言和市场承诺转化为严谨、细致、可追溯的合同技术语言和客观标准，是招标工作的重大失败。因此，开发商必须将“交付标准精细化”提升到招标战略的核心位置，通过设计深度前置、样板实体化确认、合同附件强绑定的组合策略，保障项目成功与企业长远发展。

参考文献

- [1] 王劲松.建设工程招标中对合同风险的控制[J].中国招标,2012,(10):24-27.
- [2] 张淑珍.建筑工程招标造价预结算审核工作要点研究[J].中国招标,2025,(02):132-134.
- [3] 徐磊.建筑工程招标采购合同风险及管控措施[J].工程技术研究,2024,9(21):168-170.

Exploring Geological Challenges in Geotechnical Engineering Survey, Design, and Construction

Peng Bian

Southwest Nuclear Industry Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610061, China

Abstract

Hydrogeology, the discipline studying groundwater dynamics and flow patterns in nature, significantly impacts geological hazards in China with high occurrence frequency. Many disasters are caused by hydrogeological factors. Rock engineering construction is a complex task requiring not only solid foundations, stable structures, and proper slope management, but also consideration of groundwater movement patterns. These factors profoundly influence project design and implementation. Therefore, governments at all levels should prioritize development in this field. This paper explores challenges in geotechnical engineering survey, design, and construction, proposing practical solutions to support successful project execution.

Keywords

geotechnical engineering; survey and design; hydrogeology

岩土工程勘察设计与施工中地质问题探索

边鹏

核工业西南勘察设计研究院有限公司, 中国 · 四川 成都 610061

摘 要

水文地质学是一门研究自然界中地下水的变化和流动规律的学科, 它对我国的地质灾害有着重要的影响, 其发生频率也极高。许多灾害的发生都是由于水文地质因素造成的。岩体工程的施工是一项复杂的任务, 它不仅要求地基、基础、边坡等结构必须牢固稳定, 而且还要考虑到地下水的变化和运动, 这些都会对工程的设计和施工产生重大影响, 因此, 各级政府应该高度重视这一领域的发展。本文旨在深入探讨岩土工程勘察设计及施工中的挑战, 并给出了一些实用的解决方案, 以期对岩土工程的顺利实施提供有力的支持。

关键词

岩土工程; 勘察设计; 水文地质

1 引言

通过运用最新的科学技术、工程管理方法以及其他相关的工具, 岩土工程勘察、设计与施工可以更好评估施工区域的地质、环境特征及其相关的工程条件, 从而为工程的安全、可持续、高效实现奠定坚实的基础。随着时代的进步, 岩土工程的勘察、设计和施工已经成为当今社会不可或缺的一部分。然而, 由于地质问题的复杂性和多变性, 比如: 地下水位波动、岩石的种类和结构的多样性, 以及自然环境的多变性, 使得岩土工程的应用受到了限制。若岩土工程勘察、设计和施工未能充分考虑到地质因素, 将可能严重影响工程的安全性和可靠性, 甚至可能导致工程的失败和后期的损失。在岩土工程勘察、设计和施工过程中, 应当根据不同的地质环境, 采取有效的预防和控制措施, 以确保工程的安

全性和质量。本文就如何正确识别勘察任务和目标, 编写合理的勘察方案, 建立完善的地质环境评估机制, 并加强对地质环境的预防和控制, 提出相应的施工方案, 具有重要的现实意义。

2 水文地质勘察概述及价值

在开展工程地质勘察之前, 必须全面了解该区域的水文、岩石、地形和地貌等信息, 这些信息将有助于指导和控制勘察过程。此外, 勘察还能够为工程建设提供宝贵的数据支撑, 因此, 它是岩土工程的基础性环节。水文地质调查旨在深入了解地下水的流动状态、化学组成、物质组成等, 从而为工程建设提供有力的支撑。此外, 它还能够更好地评估地质条件, 从而更好地保护地表环境, 确保地质结构的安全与完整。因此, 在进行水文地质勘探时, 所使用的数据必须是准确可信的。

(1) 通过对水文地质条件的全面分析, 确定科学的施工方案, 以确保工艺的精确性、合理性和可行性, 避免因选

【作者简介】边鹏(1992-), 男, 中国河北张家口人, 硕士, 工程师, 从事水文地质、工程地质与环境地质研究。

择不当而导致的工程质量问题。(2)安全是工程建设的核心,特别是岩土工程,存在着诸多潜在风险。许多安全事故的根源都可以归结为水文地质因素,因此,必须采取有效的勘察技术,深入了解水文地质状况,并制定科学的安全防护措施,以确保施工过程中的安全性。(3)在岩土工程设计中,水文地质资料是至关重要的,它们不仅能够帮助设计人员更好地理解和分析相关数据,还能够为施工图提供有效的指导,从而使得设计方案更加完善。此外,勘察活动也能够有效地保障数据的准确性、可靠性和真实性。(4)控制地下水位对于施工来说至关重要,因为它会直接影响到地质环境、施工安全和质量。因此,通过对地下水的调查,可以根据相关数据采取有效的措施来控制地下水位,从而避免基坑流沙、管涌、突涌等问题,并确保施工质量达到预期的标准。

3 水文地质对岩土工程的影响因素

3.1 地下水压变化

在正常情况下,由于自然环境和工程建设的影响,地下水压力可能会发生剧烈的波动,从而对地下水空间造成巨大的压力,使得空间压力失衡。此外,这种变化还可能给地面工程施工带来不便,甚至可能引发严重的安全隐患。水压的波动可能会引发严重的后果,比如基坑管涌、工程坍塌等,若施工单位不能及时采取有效的措施,就可能会造成严重的安全事故和质量问题。

3.2 动水压力的影响

水的流动可以产生巨大的冲击力,它可以改变岩土的地质特征,使其发生变化,进而影响建筑物的稳定性、安全性。因此,动水压力(也称为渗透力)对于保证建筑物的可靠性至关重要。随着社会的发展,人类活动对岩土结构的破坏和崩解已经成为当今中国岩土工程建设的一大挑战。这种破坏和崩解可能会导致地下水动态平衡的破坏、基坑的倒塌以及地下水的流失,从而使得岩土工程的施工受到极大的影响,甚至可能导致工程的最终质量受到损害。

3.3 地质灾害

在岩土工程勘察过程中,地质问题尤其突出,其中包括岩土体松软、地质结构复杂,这些都会严重影响到施工的安全性。特别是在一些施工区域,由于岩土结构松软,一旦遇到下雨的情况,就有可能发生滑坡、泥石流等自然灾害。除了这些,在一些岩土工程勘察区,由于土体结构复杂且分布不均,存在许多孔洞。因此,如果在这些土层中进行施工,将很难确保工程结构的稳定性,并可能导致地质灾害。

4 岩土工程与水文地质的关系

4.1 地下水对岩土工程的影响

在设计和施工岩土工程过程中,地下水的存在至关重要,它可能会极大地影响工程的稳定性和可靠性。然而,由于一些设计和施工单位没有意识到这一点,导致了勘察设计和实际施工的质量受到了极大的破坏,从而使得整个工程的

最终效果未能达到预期的要求。然而,地下水位的上升和水压的变化也是导致岩土工程受到严重威胁的一个重要因素,它们不仅会显著改变岩土体的特性,还可能导致更严重的后果。当地下水位发生剧烈波动,其变化幅度之大,将会严重损害岩土工程的耐久性和稳定性,引发严重的岩土破坏,使建筑物受到严重的腐蚀,甚至可能出现粉土饱和液化和粉细砂沉积等问题。

4.2 水文地质情况的勘察情况

在岩体工程的建设施工过程中,勘察和设计至关重要。然而,由于水文地质条件的复杂性,勘察和设计可能存在缺陷,导致岩土工程出现沉降、开裂等问题,严重影响工程质量和效益。因此,必须加强对水文地质条件的全面考察和精细设计,以保证岩体工程的安全和可持续发展。在当前的情况下,必须认真对待水文地质勘察和设计工作,完善岩土工程的实际设计方案,并寻找合理和有效的预防措施,以最大限度地减少工程质量问题和安全风险。

5 岩土工程勘察设计与施工中的水文地质问题

5.1 地下水压

地下水的动态平衡状态是至关重要的,它可以确保周围环境的稳定性,从而减少对工程建设的不利影响。为了确保地下水的平衡,必须考虑其他各种因素,其中最主要的两个方面是地表压力的变化,即岩土工程施工所产生的压力,以及其他外部因素,如温度、湿度、风速、风向等,^[1]都可能导致地下水的流失和沉降,使得地下水的状态发生改变,从而影响到工程的进行和安全。随着时间的推移,降雨量的变化对地下水的水位产生了重要的影响,尤其是在短时间内,大量的降雨可能会对地下水的压力产生重要的影响。在建筑施工过程中,基坑突涌是一个非常棘手的问题,其成因可能源自于缺乏充分的水文地质知识,从而导致地基开挖时,未能及时清除不透水的土壤,从而引发基坑突涌。当前,由于在岩土工程勘察领域缺乏深入的研究和分析,以及缺乏有效的应对措施,使得在设计和施工过程中,无法充分考虑到地下水压的变化,严重影响到工程的整体质量。

5.2 地下水水位上升

不同的因素可能会导致地下水的水位发生改变,例如,气候条件、地形、植被等。气候条件可能会使降雨增加,使地下水的含量增加。此外,人类活动可能会造成地下水的流失,例如采矿活动或者采石活动。地下水的水位可能会受到各种因素的影响。随着地下水位的不断攀升,它所带来的环境变化也在不断加剧,这种变化不仅会影响到周围的土壤,还可能使得工程的地基承载能力大幅度减弱,从而给工程的总体质量带来极大的危害,甚至可能引发地面沉降、建筑物倾斜等一系列严重的安全隐患。随着地下水位的上升,地基结构发生了巨大变化,使得当前的工程无法满足新的土地结构要求。^[2]此外,由于地下水位的上升,地下水系统也受到严重的污染,导致水资源的严重浪费。

5.3 水位频繁变化

为了确保相关工程的长期稳定性,必须确保地下水位处于相对稳定的状态,否则,地面可能会出现塌陷、倾斜等问题,而且地基也可能受到腐蚀,导致建筑物整体强度大幅度降低。地下水位的变化会受到区域的限制,有些地方由于地质条件的限制,水位变化较为剧烈,这种情况下,岩土工程勘察就不太适宜。因此,在进行岩土工程勘察时,应该尽可能避开水位变化剧烈的区域,选择水平相对稳定,地下水流动保持良好的动态平衡,以此来提高工程建设的质量,减少水文地质问题对工程的不利影响。

6 解决岩土工程勘察设计与施工中水文地质问题的措施

6.1 不断提高勘察人员对水文地质工作的认识

水文地质勘察工作被视为工程地质勘察的核心组成部分,因此,勘察人员应当深刻理解其重要性,并且严格遵守国家有关规定,以便更好了解某一特定区域的水文地质状况,以便更有效地完成建筑工程的施工。随着近几年我国科技的飞速发展,勘察人员需要不断积累丰富的工作经验,以便更快更准确地识别水文地质状况。为此,许多新型的生产设备也被研发出来,以满足日益增长的需求。随着国家相关部门的不断努力,一套完善的工程地质勘察参考标准已经出台,它不仅可以记录和分析我国各地的水文地质灾害,而且还可以极大地提高勘察人员的工作效率。^[1]然而,目前我国的勘察人员的综合素质普遍较低,主要表现在他们对技术知识的掌握上。由于这种情况,许多勘察人员难以理解并应用国家相关部门制定的勘察参考标准。

6.2 制定详细的勘察计划

为更好收集岩土工程信息,需要制定一套详尽的勘察计划。这样才能够更好地为后续的施工活动打下坚实的基础。例如,一家公司在制定勘察计划时,会仔细研究项目设计中提供的相关资料,并了解作业区的基本情况。为了达到最佳的勘察效果,必须按照勘察目的进行分层采集,并且在初次调查之前就要确定调查对象,以便收集和分析数据,从而提升勘察结果的准确性和可靠性。

6.3 加大相关人员培训力度

为了提升参与者的综合能力,并降低人为失误的风险,

企业应该加强对相关人员的培训,以便他们掌握安全操作知识、责任意识、勘察操作要求和实践操作内容。^[4]例如,在派遣技术人员进行作业区环境勘察之前,应该组织全体参与者进行专业的培训,以确保他们掌握必要的技能,并且能够更准确地完成勘察工作。经过系统的培训和评估,企业将精心挑选出最符合要求的技术人员,以便更加准确地完成岩土工程勘察任务,以达到最佳的效果。

6.4 完善综合评价体系

建立一个全面的评估机制是提升水文地质数据分析精度的关键。在实际操作中,工作人员需要清楚了解当前的研究目标,并且根据实际情况调整后续的数据分析。如果发现了异常情况,工程师需要迅速分析原因,仔细观察地质和水文特征的变化,采取适当的措施,以便更好地提升水文地质分析的精度,同时也能够保证岩石施工的质量。

6.5 梳理水文勘察的具体要求

组织水文测绘的具体要求可以显著改善水文测绘的流程,从而发挥积极的作用。为了达到最佳的结果,公司应该根据实际情况不断调整任务和应用系统,以满足研究的要求。此外,在开展相关工作的过程中,公司还应该及时收集反馈意见,并结合这些信息,不断完善工作,以期达到更高的项目建设质量。

7 结语

水文地质学是一门研究岩石、地球过程以及重要工具,特别是地下水的学科。它不仅可以更好地理解地质结构,还能够提供有价值的信息。因此,工程单位应当对当前的水文地质条件进行全面的分析,以便更好地预测和控制岩土工程的施工质量,从而确保建筑结构的完整性和稳定性。

参考文献

- [1] 龙键鹏.岩土工程勘察设计与施工中地质问题探索[J].西部资源,2022(06):93-95.
- [2] 王兴树.岩土工程勘察设计与施工中水文地质问题研究[J].四川建材,2022,48(06):46-47+58.
- [3] 陈俊任.对岩土工程勘察设计与施工中水文地质问题分析[J].世界有色金属,2021(15):170-172.
- [4] 刘阳,陈帅强,郑亚娣.岩土工程勘察设计与施工中水文地质问题探讨[J].建材发展导向,2021,19(08):68-69.

Treatment Technologies and Application Effects of Soft Soil Foundations in Water Conservancy and Hydropower Projects

Xiaokai Hu Chao Zhao Yubao Hu

Zhongshui Huaihe Planning and Design Research Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230601, China

Abstract

Hydropower and water conservancy projects are the core infrastructure for national flood control safety, water resource allocation, and clean energy supply. Soft soil foundation is one of the most common engineering geological problems encountered in the construction of water conservancy projects along rivers, coasts, and lake plains in China. Soft soil has adverse engineering characteristics such as high water content, high compressibility, low shear strength, strong rheological properties, and thixotropy. If not handled properly, it can easily cause uneven foundation settlement, structural cracking, dam slope instability, seepage damage and other engineering accidents, seriously threatening the safety of construction and operation. Based on this, this paper systematically reviews the core technologies and application effects of soft soil foundation treatment in hydropower and water conservancy projects, clarifies the applicable boundaries and quality control points of different technologies, and has important engineering practical significance for ensuring the quality and long-term operation safety of hydropower and water conservancy projects.

Keywords

soft soil foundation; hydropower and water conservancy projects; foundation treatment technology; settlement control; application effect

软土地基在水利水电工程中的处理技术及应用效果

胡笑凯 赵超 胡玉宝

中水淮河规划设计研究有限公司, 中国·安徽 合肥 230601

摘 要

水利水电工程是国家防洪安全、水资源调配、清洁能源供给的核心基础设施,而软土地基是我国沿江、沿海、湖泊平原区水利工程建设中面临的最常见工程地质难题之一。软土具有高含水率、高压缩性、低抗剪强度、强流变性与触变性等不良工程特性,若处理不当,极易引发地基不均匀沉降、结构开裂、坝坡失稳、渗流破坏等工程事故,严重威胁工程建设与运行安全。基于此,本文系统梳理水利水电工程软土地基处理的核心技术与应用效果,明确不同技术的适用边界与质量控制要点,对保障水利水电工程建设质量与长期运行安全具有重要的工程实践意义。

关键词

软土地基; 水利水电工程; 地基处理技术; 沉降控制; 应用效果

1 引言

软土地基的变形与稳定控制,是水利水电工程建设的核心技术难点之一。与工业与民用建筑工程相比,水利水电工程对地基的要求具有显著特殊性:堤坝工程需控制大面积、大填方荷载下的长期工后沉降,保障坝体防渗体系完整性;水闸、泵站、电站厂房等水工建筑物,对地基不均匀沉降极为敏感,需严格控制沉降差避免结构开裂与止水失效;同时,水利工程长期处于临水、动水工况,地基需满足抗渗流、抗冲刷、抗液化等多重性能要求。

【作者简介】胡笑凯(1999-),男,中国安徽歙县人,本科,助理工程师,从事水利水电工程地质研究。

2 软土地基对水利水电工程的主要危害

2.1 沉降变形破坏

在坝体、堤身填方荷载作用下,软土地基产生大幅固结沉降,轻则导致堤顶高程不足、坝坡坡度超标,影响工程防洪标准;重则引发坝体防渗体(土工膜、混凝土防渗墙)拉裂,造成渗漏通道。对于水闸、电站厂房等刚性结构,不均匀沉降会导致底板开裂、闸墩倾斜、止水带失效、闸门启闭受阻,直接丧失工程功能^[1]。

2.2 整体失稳破坏

软土地基低抗剪强度的特性,会大幅降低水工结构的抗滑稳定安全系数。堤坝工程易因地基土体剪切破坏,引发坝坡整体滑移、堤身坍塌;水闸、泵房等建筑物易发生沿地

基面的深层滑移，导致结构整体倾覆。此类失稳事故往往具有突发性，极易造成重大工程损失与安全事故^[2]。

2.3 渗流破坏风险

水利工程长期处于水头差作用下，软土地基本身渗透性差，但若存在施工扰动形成的裂缝、软弱夹层，或与粉砂层交错分布，极易在渗流作用下引发管涌、流土、接触冲刷等渗流破坏，逐步扩大渗漏通道，最终导致地基渗透失稳，甚至引发坝体溃决^[3]。

3 水利水电工程软土地基主流处理技术及适用场景

3.1 排水固结法

排水固结法是处理大面积软土地基最常用的技术之一，其核心原理是：在软土层中设置竖向与水平排水通道，通过施加预压荷载，加速软土中孔隙水排出，促使土体固结压缩，孔隙比减小，抗剪强度与承载能力逐步提升，同时提前完成大部分沉降，有效控制工后沉降量。

根据预压方式的不同，排水固结法主要分为堆载预压法、真空预压法，以及真空 - 堆载联合预压法三类：

3.1.1 堆载预压法

该技术是通过在地基表面堆填土石方等荷载，模拟工程运行期的实际受力状态，分级施加预压荷载。竖向排水体通常采用塑料排水板、袋装砂井，水平排水体采用砂垫层，形成完整的排水体系。施工核心要点是严格控制加载速率，实时监测地基沉降、孔隙水压力与侧向位移，避免加载过快引发地基滑移失稳。该技术工艺成熟、施工简便、造价低廉，适用于堤坝、围堰、库区大面积填方等软基处理工程，尤其适合软土层厚度较大（3m 以上）、对工后沉降控制要求高的工程，是水利堤防工程中应用最广泛的软基处理技术。

3.1.2 真空预压法

该技术通过在排水垫层上铺设密封膜，利用真空设备抽气形成膜内外负压差，使软土中的孔隙水在负压作用下排出，实现土体固结。其核心优势是无需堆载大量土石方，预压荷载通过负压均匀施加，不会引发地基剪切破坏，加载速率远快于堆载预压，工期更短，同时对周边土体的扰动极小。适用于超软土地基、对加载速率敏感的软土层，以及临近已有建筑物、环保要求高的水利工程。在滨海滩涂围垦、河道堤防加固工程中应用广泛。

3.1.3 真空 - 堆载联合预压法

该技术结合了两类预压方式的优势，通过真空负压与堆载荷载叠加，大幅提高预压效果，可实现更高的地基强度提升幅度与更优的沉降控制效果，适用于荷载大、沉降控制要求严格的堤坝、围堰工程。

3.2 复合地基处理技术

复合地基技术的核心原理是：通过在软土层中设置桩体增强体，使桩体与桩间土共同承担荷载，形成复合地基，大幅提升地基承载能力，减小沉降变形，同时可通过桩体材料的选型，兼顾地基加固与防渗需求。该技术承载力提升幅

度大、沉降控制效果好，是水利水电工程中水工建筑物软基处理的核心技术，主流类型包括水泥土搅拌桩、碎石桩、CFG 桩三大类。

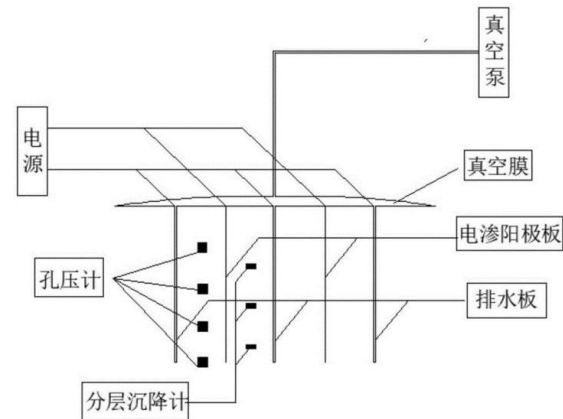


图 1：真空预压法

3.2.1 水泥土搅拌桩技术

该技术通过深层搅拌机械，将水泥固化剂与软土原位强制搅拌，利用水泥的水化反应、离子交换反应与硬凝反应，使软土硬结形成具有整体性、水稳性与足够强度的水泥土桩体，与桩间土形成复合地基。根据施工工艺的不同，分为湿法（水泥浆搅拌）与干法（粉体喷射搅拌）两类。施工核心要点是严格控制水泥掺量、搅拌提升速度与复搅次数，保障桩体的均匀性与连续性。该技术的核心优势是施工噪音小、无振动、对周边环境扰动小，桩体渗透系数可降至 1×10^{-7} cm/s 以下，兼具地基加固与防渗帷幕的双重功能，完美适配水利工程的安全需求。广泛适用于淤泥、淤泥质土、粉质黏土等软土层，是水闸、泵房、小型水库坝基、渠道防渗等工程软基处理的首选技术。

3.2.2 碎石桩技术

该技术通过振冲、沉管等工艺，在软土层中成孔，回填碎石并振捣密实，形成大直径碎石桩体。其加固原理包括三个方面：一是置换作用，用高强度的碎石桩替换软弱土体，承担主要荷载；二是排水作用，碎石桩是良好的竖向排水通道，可加速桩间土的排水固结；三是挤密作用，成桩过程中对周边土体产生挤密效应，提升桩间土强度。施工核心要点是控制成桩深度、填料量与振密电流，保障桩体密实度。该技术适用于松散砂土、粉土、可液化土层，以及软塑状态的黏性土地基，在堤坝工程抗滑稳定加固、可液化土层处理中应用广泛，可有效提升地基抗剪强度与抗液化能力。

3.2.3 CFG 桩（水泥粉煤灰碎石桩）技术

该技术以水泥、粉煤灰、碎石、石屑为原料，制成高粘结强度的刚性桩体，通过桩体、桩间土与褥垫层的协同作用，形成刚性桩复合地基。其核心优势是桩体强度高，承载能力提升幅度远大于水泥土搅拌桩与碎石桩，地基变形量小，沉降稳定快，可有效控制不均匀沉降。适用于对承载力与沉降控制要求极高的水工建筑物，如大型水闸、电站厂房、调压井、渡槽等重要结构的软基处理，尤其适合软土层厚度

大、上部结构荷载集中的工程场景。

3.3 换填垫层法

换填垫层法是最传统、最直接的浅层软基处理技术，其核心原理是：将基础底面下一定厚度的软弱土层全部挖除，换填强度高、压缩性低、水稳性好、性能稳定的材料，如级配砂石、灰土、水泥土、块石等，经分层碾压夯实后，形成满足设计要求的地基持力层。

施工核心要点是：严格控制换填厚度，水利工程中常用换填厚度为 1-3m，过厚会导致开挖与回填成本大幅增加；分层回填、分层压实，严格控制每层回填厚度与压实度，保障垫层的均匀性与整体性；同时做好基坑排水，避免软土基坑积水、边坡坍塌，防止基底土体受水浸泡软化。

该技术的优势是工艺简单、施工周期短、质量易控制、加固效果立竿见影，不存在后期沉降问题。其局限性是仅适用于浅层软土地基，对于深层软土，开挖难度大、成本高、易引发基坑失稳。

3.4 化学加固法

化学加固法，也称为注浆加固法，其核心原理是：通过压力注浆设备，将水泥浆液、水泥-水玻璃双液浆、化学浆液等固化材料，注入软土地基的孔隙与裂隙中，通过浆液的填充、胶结、固化作用，填充土体孔隙，胶结土颗粒，降低土体渗透性，提升土体强度与整体性。

根据注浆工艺的不同，可分为劈裂注浆、压密注浆、渗透注浆三类。施工核心要点是：根据软土的渗透性与孔隙特征，优化浆液配比与注浆压力，控制浆液扩散半径，避免注浆不足或浆液过度扩散，同时做好注浆效果的现场检测。

该技术的核心优势是施工灵活性强，无需大规模开挖，对原有结构扰动极小，可实现精细化、局部化加固。在水利水电工程中，主要用于三类场景：一是已有水利工程的软基补强与病害治理，如水库除险加固中坝基渗漏、堤身沉降的补强处理；二是复杂地质条件下的局部软土、裂隙夹层处理，弥补其他加固技术的盲区；三是水利工程抢险中的防渗堵漏、地基应急加固。

3.5 加筋土技术

加筋土技术是一种岩土增强型软基处理技术，其核心原理是：在软土地基表层或填方土体中，分层铺设高强度、低延伸率的土工合成材料，如土工格栅、土工布、土工加筋带等，利用筋材与土体之间的界面摩阻力与咬合力，约束土体的侧向变形与不均匀沉降，提升地基土体的整体刚度与抗滑稳定性，分散上部荷载，降低软土层的附加应力。

施工核心要点是：保证筋材铺设平整、搭接长度满足设计要求，避免筋材破损、弯折，同时控制回填土的压实度，保障筋土协同作用效果。该技术的优势是施工简便、工期短、造价低、适应变形能力强，无需大型施工设备，对软土地基的扰动极小。

在水利水电工程中，加筋土技术主要应用于软土地基上的堤坝、围堰、河道护岸、渠道边坡工程，常与排水固结

法联合使用，可有效抑制堤身的侧向位移，提升坝坡抗滑稳定安全系数，减小不均匀沉降，是堤坝软基处理中重要的辅助与补强技术^[4]。

4 典型工程应用与效果分析

4.1 港珠澳大桥香港口岸填海工程

港珠澳大桥香港口岸填海工程是世界上首个在深厚淤泥层上进行的大规模海上振冲碎石桩加固案例。工程区域软土层厚度大、含水量高、灵敏度高，传统处理方法难以奏效。项目采用底部出料振冲碎石桩技术，累计施工碎石桩 4 万余根、总长度 120 余万延米。该工程的成功实践具有多重意义。技术层面，验证了干法底部出料工艺在海上深厚淤泥层的适用性，解决了成孔困难、孔壁坍塌等技术难题。环保层面，采用干法作业替代传统湿法振冲，实现零泥浆排放，契合海洋环境保护要求。该工程为后续类似跨海交通枢纽软基处理提供了重要参照。

4.2 苏北灌溉总渠阜宁腰闸重建工程

阜宁腰闸重建工程是软土地基上水工建筑物拆除重建的典型范例。老闸因淤土地基沉降过大而报废，新闻建设中对地基处理给予了高度重视。工程采用 2000 余根水泥搅拌桩+预应力管桩复合桩，配合地下连续截渗墙，形成坚实的“底座+屏障”体系。施工过程中面临的挑战是工期紧张——主体工程仅 7 个月建设时间。建设单位通过“三联单”工作模式细化每日任务，在有限作业面上投入 3 台搅拌桩机、2 台静压桩机与 1 台成槽机，多点并行作业，最终按期完成基础施工。新闻建成后已累计通水 13.7 亿立方米，运行状态良好，证明复合桩基方案有效控制了软基沉降^[5]。

5 结论

软土地基的不良工程特性，是水利水电工程建设中必须解决的核心地质难题，其处理效果直接决定了工程的建设质量与长期运行安全。排水固结法、复合地基技术、换填垫层法、化学加固法、加筋土技术等主流处理技术，各有其加固原理、适用场景与技术优势，不存在绝对最优的技术，工程中需结合地质条件、建筑物功能、荷载特点、工期与造价要求，科学选型，必要时采用多技术组合方案，实现加固效果、工程安全与经济效益的平衡。

参考文献

- [1] 张帅乾. 旋挖桩加固在水利工程软土地基处理中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2026, 54(02): 147-150+161.
- [2] 郭道迁, 于志多. 水利工程中软土地基处理技术的比选与应用实例[J]. 水上安全, 2026, (01): 151-153.
- [3] 刘晓亚, 肖骏. 软土地基处理技术在水利工程施工中的应用研究[J]. 水上安全, 2026, (01): 163-165.
- [4] 简学兴. 水利工程中软土地基处理技术与要点管理[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (32): 190-192.
- [5] 尉阳阳. 水利水电工程基础处理施工技术[J]. 大众标准化, 2025, (20): 40-42.

Energy Saving and Emission Reduction Technology Transformation and Application of Coal Mine Electromechanical Equipment

Na Li

Shaanxi Zhongneng Coalfield Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

The intelligent transformation of electrical equipment in mining machinery serves as a critical approach to enhancing mine safety standards and operational efficiency. Taking Yuandatan Coal Mine as a case study, this research addresses challenges inherent in traditional manual monitoring systems—including coverage gaps, excessive maintenance workload, imprecise parameter tracking, and complex operational procedures. Guided by the safety-first principle, the study proposes intelligent upgrades for four core systems: transportation, ventilation, drainage, and power supply. Through technical solutions such as installing smart sensors, upgrading programmable logic controller systems, and establishing remote monitoring platforms, the initiative achieves real-time equipment status monitoring and remote single-button operation control. The implementation is projected to significantly reduce manual labor intensity, improve fault prediction accuracy, and provide actionable references for advancing intelligent mining infrastructure development.

Keywords

coal mine electromechanical equipment; intelligent transformation; Zhaoxian Mining; remote monitoring; fault warning

煤矿机电设备智能化改造与升级实践

李娜

陕西中能煤田有限公司，中国·陕西 榆林 719000

摘 要

矿山机械电气设备的智能化革新是提升矿井安全水平和运行效率的关键方式。本文将袁大滩煤矿作为研究对象，针对传统设备由人工监测存在监测空白区域、运维工作任务量巨大、参数监测不精准、操作流程复杂等问题，按照安全优先原则，从提升运输、通风系统、排水系统、供电系统四个主要系统提出智能化改造的设想。借助加装智能感应装置、更新可编程逻辑控制器控制体系、构建远程监控平台等技术途径，达成设备状况的实时察觉与远程单一按键操控运作。改造估计能够明显减轻人工劳动强度，提升故障预警的精确程度，给矿山智能化构建供应可实施的实践参照。

关键词

煤矿机电设备；智能化改造；招贤矿业；远程监控；故障预警

1 引言

伴随煤炭产业进行转型升级的需求日益迫切，对矿山机械电气设备开展智能化改造已经成为了提升矿井安全水平以及生产效率的一种关键方式。本文结合现场实际去做操作，从提升设备操作的安全、便捷性与实操细节角度出发，对智能化技术在设备改造过程中的具体应用情况进行探索，其目的是为了给矿山机械电气系统的智能化升级提供能够去执行的实践方面的设想。

2 煤矿机电设备智能化相关理论与技术基础

煤矿机电设备智能化的关键所在是通过现代信息工艺与物理设备的深度融合，重新构造传统的生产和运维模式。其内涵并非是单纯地叠加自动化设备，而是把物联网视作神经末梢，凭借智能感应器件及时采集电压、电流、振动、温度等设备运行的相关数据以及环境层面的资料，构建起全面感知的网络；采用 PLC 可编程控制设备作为执行的核心，依照预先设定的逻辑对提升、通风等关键设备实施精准的协同控制和远程的调控；在此同时，将海量的监测数据汇聚到大数据分析平台当中，通过趋势的分析判断和故障的提前诊断模型，挖掘数据背后所隐藏的设备健康状态和潜在的风险，最终实现从单个机械的人工操作向系统的智能联动的转变，从根本上减少人员干预的程度，提升作业流程的本质安全水平。

【作者简介】李娜（1984—），女，中国陕西米脂人，本科，工程师，从事机电设备安装与维修，机械制造及自动化研究。

3 煤矿机电设备现状及存在问题分析

3.1 典型矿井机电设备应用现状

把中能公司管控的袁大滩煤矿确定为研究对象,该矿山作为主要生产矿山,其机电装置配备在行业里具备典型代表特性。当下矿井里分布着十二个机电硐室,装配了十千伏高压开关柜三十六台、主排水泵八台、主通风机两台、主运输皮带四条以及压风体系一套。这些关键装置依旧以传统非智能化装置为主,控制体系相互独立造成数据孤立状态,运作完全依靠人员在现场巡查检验与当场操控,还没搭建集中远程监控平台,整体处于分散控制、人员值班的传统运作时期。

3.2 安全层面:人工监测存在盲区

矿井内环境特殊,人员巡查检验受到视野和时间间隔的限制,很难捕捉到突然发生的装置异常情况。中央变电所高压柜触头温度、局部放电等隐藏隐患无法用肉眼辨别,主运输皮带滚筒温度升高以及通风机振动异常仅仅依靠定时检查,两次巡查检验的间隔时间内无法对突发故障发出警报,这类空白区域直接对供电和通风安全产生影响,给现场管理人员带来较大的心理负担。

3.3 效率层面:人工运维工作量大

完全由人员值班的模式致使效率不高,矿井内十二处机电硐室每天进行三班巡查检验,单次花费时间约为四小时,总工作时间达到三十六小时。主排水泵的启动和停止需要人员下到矿井进行操作,雨季排水高峰时期往返次数频繁导致无效劳动急剧增加。压风机数据由人员记录整理占用大量工作时间,现场技术人员体力受到限制,频繁往返占用了装置维护和技术分析的精力。

3.4 精准度层面:关键参数监测不准

传统装置缺少在线监测方式,重要参量获取迟缓且精准程度不够。主通风机的气流量、负压力依靠机械类仪器读取,指针晃动导致误差较大。皮带的电流量仅能体现启动和停止状态,不能辨别负荷的轻重以及滚筒的磨损趋向。电量相关参量依赖每月人工抄录电表数据,难以了解负荷的波动情况,粗犷化的监测数据直接对工作状况判断的正确性产生影响。

3.5 便捷性层面:设备操作流程繁琐

现有的操作程序复杂并且依赖专业人员,高压开关柜的停电和送电需要两人配合进行唱票操作,来回花费时间较长。水泵启动前需要在现场检查阀门、盘车、合闸等多道工序,在紧急状况下响应缓慢。现场运维人员在面对机械式操作结构时操作难度较大,设备的状态不能通过远程方式看见、操作不能通过远程方式执行,既增加了操作风险又降低了应急处理的效率。

4 煤矿机电设备智能化改造与升级思路

4.1 改造升级的总体原则

袁大滩煤矿在机电设备智能改造方面,按照“安全为

首要、按需求改造、分阶段实施、节能且高效、操作便捷”的总原则来做。安全第一就是说,所有改造方案都要把提高系统基本安全水平当作前提,先解决人工监测有死角带来的安全隐患。按需改造是说,不盲目追求技术堆叠,针对中央变电所、主排水泵等关键设备存在的具体问题,采取合适的办法。分阶段进行是考虑到井下生产不能中断,把改造任务分成多个阶段,利用设备检修的时间逐步推进,尽量减少对生产的影响。节能又高效是指,改造后的系统要能自己找到最佳状态,根据需求运行,减少不必要的能源消耗。操作方便则是结合现场运维的实际需要,让人机交互界面更简单,降低操作难度,让技术真正为工作人员服务。

4.2 改造升级的核心目标

针对之前整理出来的四大难题,这次改造设定清晰的量化目标。在安全方面,去掉人工检查没覆盖到的地方,实现12个机电硐室、36台高压柜、8台主排水泵等重要设备的随时在线检查和有异常就报警,故障报警的准确程度提高到95%以上。在效率方面,建立集中远程监控的平台,把每天的检查用工时间从36工时减少到8工时以内,主排水泵、压风机等设备达到不用人盯着就能运行的状态。在准确程度方面,关键数据的检查准确程度提高到0.5级,振动、温度、电流等数据做到一毫秒内就采集到并能分析变化趋势。在方便程度方面,操作步骤从需要在现场分好几步做,改成在远处按一下按钮就能操作,紧急情况响应的时间缩短到5分钟以内,全面减少对人员专业经验和体力的依靠。

4.3 提升系统的智能化改造

副井提升系统承担着人员和物资的运送工作,它是不是安全稳定特别关键。改造的主要办法是加上智能监测和自动控制系统,照着梁家煤矿的做法,用ABB先进的电控技术来升级。在技术方面,首先在主轴、电机轴承和天轮这些重要地方装上振动和温度传感器,及时收集运行数据;接着对PLC控制系统进行升级,加上故障诊断模块,实现对容器位置、速度和载荷的准确控制;最后建一个远程监控平台,把绞车房的数据连到智能控制中心。改造时重点要看新旧系统能不能合得来,利用检修的短时间完成设备的安装和调试,保证在八小时内不间断地完成切换。改造以后,司机不用在现场值班了,操作流程从多人一起配合喊话确认,简化成一个人按一下键就能确认,让操作变得方便又安全多了。

4.4 通风系统的智能化改造

主通风设备是矿井“呼吸系统”的重要组成部分,改进的方向是实现一键启动和关闭、设备自动切换以及根据需要供应空气。参考南屯煤矿的做法,用TLT新型主通风设备替换老旧设备,并配套建立智能控制系统。在硬件方面,换上高效率的设备主体,安装风量、风压、震动和温度等多种感应装置,建立完整的感知网络;在控制方面,升级PLC控制系统,整合持续供风自动切换设备、一键反向供风以及故障自行诊断功能,让运行状态自动优化调整;在平台方面,接入矿井综合管理控制平台,根据井下的空气需求

自动调节叶片角度和转动速度。借鉴中煤集团的实践做法,将切换设备的时长从五分钟以上缩短至四十秒左右,消除转换过程中井下无空气的隐患。现场工作人员重点留意操作界面的友好化设计,确保切换设备、反向供风等繁杂操作都能通过触摸式屏幕一键完成,降低操作的难度。

4.5 排水系统的智能化改造

主排水系统革新的目标是从人工值守转变为无人值守。参考孟村矿与同富新煤业排水系统智能化经验,搭建“感知—决断—操控”全闭环智能排水架构。革新内容主要包括:为8台主排水泵加装高精度水位感应装置、流量计量装置、电机温度感应装置以及震动监测装置,及时感知水仓水位、涌水流量与设备运行状况;更新PLC控制系统,嵌入智能排水算法,系统依据水位变化速率动态预测涌水趋势,自动判断水泵启动关停数量与运行时长,实现避峰填谷节能运行;增加视频监控与远程控制模块,值守人员在中央控制室就能监控水泵房整体情况,在必要时刻进行远程干预。同富新煤业的实际情况说明,智能排水系统开始用起来后,紧急情况处理的时间从30分钟缩短到1分钟以内,提前判断故障准不准的程度达到了92%,人工检查的次数从每天6次减少到1次。在改革变化的过程中,重点关注感应设备安装的地方和防水保护的办法,保证长时间用起来很可靠;操作界面的设计结合现场使用的习惯考虑,用图画的方式清楚地显示水仓里的水位、设备的情况和运行的建议。

4.6 供电系统的智能化改造

中央的变电所进行改造这件事情,主要是聚焦在越级跳闸以及漏电选线这两个方面的问题。所采取的办法是,给36台高压的柜子去更换智能的综合保护的装置,并且构建一个以太网的通信的网络。当发生故障的时候,设备会通过网络来共享相关的信息,并且结合拓扑的结构图来准确地找出故障的位置,仅仅只有距离故障点最近的上级的开关会进行运作,从而彻底地避免越级跳闸这种情况的发生。更新精确的选漏的技术,在发生单相接地的时候,能够自动地辨别并且断开故障的线路。增加一键式的漏电试验的功能,能够远程地完成试验并且自动地生成报告,以此来替代人工

下井的程序。改造之后,现场管理人员能通过监控平台清晰查看供电拓扑构造与保护记录,供电安全管理控制能力显著提升。

4.7 改造升级的保障措施

智能化的改造进行落地是需要多个层面方面的保障的。在技术的这个层面要选用那种稳定并且可靠的智能的设备,要为每一台的设备去建立数字的档案文件,从而实现从采购一直到报废的全周期的跟踪。在人员的层面要对现场运维人员开展专项的培训,以此增强系统的操作以及应急的处置能力,要鼓励工作人员参与界面的优化设计。在资金的层面要按照分阶段实施的这样一个原则,把改造的资金投入纳入年度的财政规划,优先去保障核心的系统更新。在管理层面修订智能化设备运维规范,明确划分岗位责任,建立“监测—预警—处理—验收”全流程的闭环机制,并且定期进行系统运行自我评估,杜绝“建设后不使用”的现象,确保系统持续高效运行。

5 结语

煤矿的机电设备进行智能化改造这件事情,是提升矿井的本质安全水平以及运行效率的必然要做出的选择。本文以袁大滩煤矿当作范例,针对传统设备存在人工监测有盲区、运维方面压力比较大、参数精准度不够、操作流程很复杂等这些问题,从提升系统、通风系统、排水系统、供电系统这四个系统来提出具有针对性的改造的思路。通过进行传感器的布置、控制系统的升级以及远程平台的搭建,从而实现设备状态能够实时被感知以及远程一键控制的操作,明显地减轻现场工作人员的劳动强度,为煤矿智能化建设提供能够被复制的实践方面的路径。

参考文献

- [1] 张敏,李玉福.煤矿机电设备智能化改造与升级策略研究[J].工矿自动化,2024,50(S2):201-204.
- [2] 李洪杰.煤矿机电设备智能化升级与能效提升研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(23):157-159.
- [3] 冯佩华.浅析煤矿机电设备的智能化建设[J].能源与节能,2023,(3):206-208.

Research on Safety Risk Identification and Prevention Mechanism in Civil Engineering Construction Sites

Jianlong Yang

Beijing Xinghong Construction Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

The identification and prevention of safety risks on construction sites are crucial for ensuring the smooth progress of building projects and safeguarding the safety of construction workers. With the continuous expansion of civil engineering projects, the safety risks at construction sites are increasingly growing, and the types of risks are becoming more complex. An effective safety risk identification and prevention mechanism helps construction units to identify potential safety hazards in a timely manner and take scientific management measures to reduce accident rates. This paper analyzes the common safety risk factors on construction sites and explores the methods of risk identification and their effectiveness in practical applications. The research shows that combining modern technologies, such as big data and artificial intelligence, can enhance the accuracy and timeliness of risk identification. Meanwhile, establishing and improving a safety prevention mechanism and regulating construction site safety management are fundamental to preventing accidents and ensuring the safety of workers' lives.

Keywords

civil construction; safety risks; risk identification; prevention mechanism; construction management

土建施工现场安全风险识别与防控机制研究

杨建龙

北京兴宏建设有限公司, 中国 · 北京 100000

摘 要

土建施工现场安全风险识别与防控机制是确保建筑工程顺利进行和保障施工人员安全的关键。随着土建工程规模的不断扩大, 施工现场的安全风险日益增多, 涉及的风险类型也日趋复杂。有效的安全风险识别和防控机制能够帮助施工单位及时发现潜在安全隐患, 采取科学的管理措施, 以降低事故发生率。本文通过分析土建施工现场常见的安全风险因素, 探讨了风险识别的方法及其在实际应用中的有效性。研究表明, 结合现代技术手段, 如大数据、人工智能等, 可以提升风险识别的准确性与时效性。同时, 建立健全的安全防控机制, 规范施工现场安全管理, 是预防事故、保障人员生命安全的根本。

关键词

土建施工; 安全风险; 风险识别; 防控机制; 施工管理

1 引言

随着现代建筑行业的快速发展, 土建施工工程的规模和复杂性不断增加, 施工现场面临的安全风险也日益严峻。施工安全不仅关系到工人和周围环境的安全, 还直接影响到工程的顺利进展与质量控制。土建施工过程中, 由于高空作业、机械设备使用、材料运输等因素, 安全隐患层出不穷, 若管理不当, 极易导致重大的安全事故。因此, 构建一套科学的安全风险识别与防控机制显得尤为重要。近年来, 许多建筑企业开始借助先进的技术手段, 如物联网、人工智能、无人机等, 提高安全风险识别效率, 增强施工现场的安全防控能力。然而, 尽管如此, 依然存在着防控机制执行不到

位、应急预案不完善等问题。针对这些问题, 如何完善土建施工现场的安全管理体系, 进一步加强安全防控措施, 是当前亟待解决的课题。

2 土建施工现场安全风险的特点

2.1 施工现场的主要安全风险因素

土建施工现场的安全风险因素众多, 涉及多个方面的工作环节。首先, 施工现场的高空作业是风险来源之一, 吊装作业和架设作业中, 施工人员容易受到坠落伤害。其次, 施工中机械设备的使用不可避免地增加了风险, 设备故障、操作失误或未遵循安全操作规程都会引发严重事故。第三, 施工过程中涉及大量的材料运输和堆放, 不规范的材料堆放或运输中不安全的行为会导致伤人事故的发生。还有, 电气线路不规范、临时用电设备不合格, 也是常见的风险因素。土建施工还面临着围挡、临时设施等因素的不当设置, 容易

【作者简介】杨建龙(1990-), 男, 中国河北承德人, 助理工程师, 从事建筑工程施工管理研究。

导致工人不慎跌落或受到其它设备的伤害。

2.2 不同施工阶段的安全风险分析

土建施工中的安全风险随着施工阶段的不同而有所变化。在施工初期，主要风险来源于施工场地的准备、设备的调试和初期施工过程中人员的不适应。随着主体结构施工的展开，高空作业、起重设备的使用、模板的搭建和混凝土浇筑等环节成为安全事故的高发区。进入到装修阶段，虽然工序相对简单，但细节处理上的疏忽，特别是电气安装、管道施工等依旧带来较大的安全隐患。施工竣工时，清理工作、临时设施拆除也更容易发生事故，施工中的临时安全设施如护栏、脚手架等在使用过程中因管理不到位或结构不稳定也会增加安全隐患^[1]。

3 土建施工现场安全风险识别方法

3.1 传统安全风险识别方法

传统的安全风险识别方法主要依赖于人工检查、经验判断和现场观察。这种方法通常由安全员或项目经理根据过往经验和现场实际情况，进行全面的安全风险评估。风险识别往往通过现场巡查、定期检查和监控设备状态来实现。传统方法的一大特点是依赖人力资源，检查的全面性和及时性受到人员素质和工作负荷的影响，容易产生遗漏。同时，这种方式较为依赖管理者的经验，面对复杂多变的施工环境，无法提供精确、量化的数据支持，识别过程的主观性较强。尽管传统方法在某些情况下仍然有效，但其局限性已经逐渐显现，无法满足现代施工安全管理的需求。

3.2 风险评估模型与工具的选择

风险评估模型是进行安全风险识别的核心工具之一。常见的评估模型包括故障树分析(FTA)、事件树分析(ETA)和风险矩阵等。这些模型能够帮助识别风险源、评估风险的可能性与后果，并为制定防控措施提供理论依据。在选择风险评估工具时，项目管理人员需要根据施工项目的具体情况，考虑工具的适用性和可操作性。例如，风险矩阵是通过评估风险的发生概率和影响程度来量化风险，适用于大部分施工现场的风险评估。故障树分析则适合用于分析复杂系统中的安全问题，能够通过分解分析揭示安全隐患的根源。对于不同的施工项目，应根据项目的规模、复杂性以及技术需求，选择合适的风险评估模型和工具^[2]。

4 土建施工现场安全风险防控机制的构建

4.1 预防性安全管理措施

预防性安全管理措施是保障施工现场安全的核心。首先，施工前应进行全面的风险评估，识别潜在的安全风险，并制定相应的安全管理计划和预防措施。施工单位应建立完善的安全培训体系，对全体员工进行安全意识教育和操作技能培训，确保每个员工都能熟练掌握安全操作规程。在施工过程中，现场管理人员应定期检查施工设备和材料的安全性，确保符合相关安全标准，预防性管理还包括施工环境的

整洁、通道畅通等措施，以减少因环境因素引发的安全事故。

4.2 应急响应机制与应急预案

应急响应机制和应急预案是施工现场风险防控的另一重要环节。施工单位应根据不同类型的安全事故，制定具体的应急预案。应急预案应包括事故发生后的紧急处理流程、应急资源调配、人员撤离和事故报告等内容。此外，应急预案的有效性需要通过定期的应急演练来检验，确保在发生事故时能够迅速有效地响应，减少人员伤亡和财产损失。施工现场还应配备必要的应急设施和设备，如灭火器、急救包、应急照明等，确保在紧急情况下能够迅速投入使用。通过完善的应急响应机制，能够提高事故发生时的处理效率，降低安全风险的影响。

4.3 施工安全管理制度的完善

施工安全管理制度的完善是保障施工现场安全的制度性保障。首先，应根据国家法律法规和行业标准，制定符合项目实际的安全管理制度，明确安全管理责任和权利，形成自上而下的安全管理体系^[3]。安全管理制度应包括施工现场的安全检查制度、安全奖惩制度、事故报告制度等，并将这些制度落实到具体工作中，确保每个环节都有明确的安全要求和执行标准。此外，施工单位应定期进行安全管理制度的评审和修订，及时发现和解决存在的问题，确保安全管理体系的有效性和持续性。通过完善安全管理制度，能够在制度上保障施工现场的安全，形成长期稳定的安全管理模式，图1为土建施工现场安全风险分级管控安全策划体系。

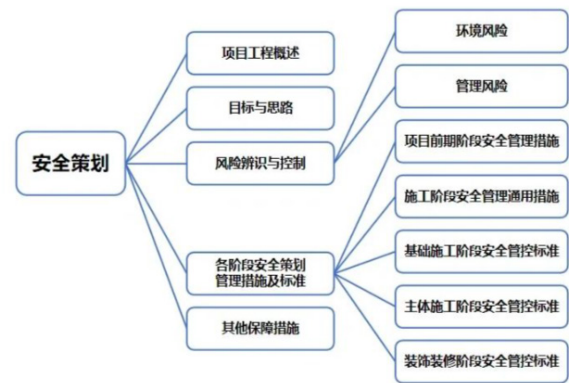


图1 土建施工现场安全风险分级管控安全策划体系

5 土建施工现场安全防控机制的执行与监督

5.1 施工现场安全防控体系的实施

施工现场的安全防控体系实施是确保安全管理有效性的关键环节。该体系的实施需要从组织结构、责任分配、工作流程等方面入手，确保各项安全措施落实到位。在施工现场，安全管理人员必须根据实际情况和项目需求，制定具体的安全操作规程，并确保每一名施工人员都能遵守这些规程。同时，施工单位应通过定期检查和隐患排查，及时发现潜在的安全风险，并采取措施加以消除或减轻。实施过程中，

还应对施工现场的安全设施进行全面评估,确保所有防护设施的完整性与有效性。通过严格的监督和管理,安全防控体系得以持续有效运作,从而减少施工过程中的安全事故。

5.2 安全培训与安全文化的建设

安全培训和安全文化建设是提高施工现场整体安全水平的重要组成部分。安全培训不仅要针对新入场工人的基本安全知识进行普及,还应通过定期的在职培训,提升工人们的应急处置能力和对安全隐患的识别能力。此外,施工单位应加强安全文化的建设,将安全生产理念贯穿于施工项目的各个阶段,从而在全员中树立“安全第一”的思想。通过组织安全文化活动、设立安全标识、制作安全宣传材料等方式,营造一个重视安全的工作氛围,使安全意识成为每位员工日常工作的一部分。安全文化的建设能够有效提升施工人员的安全责任感,从而减少事故的发生。

5.3 安全监督与检查机制的建立

安全监督与检查机制是土建施工现场安全管理的重要保障。为了确保施工现场的安全措施落到实处,必须建立起科学的监督与检查制度。施工单位应设立专门的安全监督机构,负责对施工过程中各类安全措施的执行情况进行实时监控。定期和不定期的安全检查应覆盖到施工的各个环节,确保每项操作都符合安全标准。同时,施工过程中要建立事故报告机制,一旦发生安全事故或发现隐患,应立即报告并采取有效措施进行处理^[4]。通过严格的监督和检查,可以有效识别安全隐患,避免潜在的安全风险转化为事故。

6 土建施工现场安全风险防控机制的优化路径

6.1 技术创新对安全风险防控的支持

技术创新为施工现场的安全风险防控提供了强大的支持。随着科技的不断发展,先进技术如物联网、大数据、人工智能等被广泛应用于施工安全管理中。通过实时数据采集与分析,物联网技术能够帮助安全管理人员在第一时间内了解施工现场的各项安全指标,及时发现安全隐患。人工智能技术则能够通过学习和预测历史数据,进行安全风险的自动化识别与预警,提升安全风险管理的准确性和效率。技术创新不仅使得风险识别更加智能化,也促进了安全防控机制的自动化和实时化,从而在最大程度上保障施工现场的安全。

6.2 信息化技术在防控机制中的应用

信息化技术在安全防控机制中的应用具有重要意义。随着信息技术的不断进步,信息化技术在土建施工现场的安全管理中逐渐发挥着越来越重要的作用。通过建立信息化管理平台,施工单位可以对施工现场进行全面的安全监控与数

据记录,确保每一项安全措施都能得到及时落实。信息化系统不仅能够自动化管理施工现场的安全数据,还能实时分析和处理大量的安全信息,从而为安全决策提供科学依据。此外,信息化技术还能够实现跨部门的信息共享与协作,提高整体管理效率,确保防控机制在施工过程中得到充分应用^[5]。

6.3 多方协作与合作机制的强化

在土建施工项目中,安全风险防控需要多方协作与合作机制的强化。施工单位、监理单位、分包商、设备供应商等各方应密切合作,共同为施工安全负责。通过建立跨部门协作机制,确保各方在施工过程中共享安全信息,协同解决安全问题。同时,政府、行业协会以及社会公众的参与也不可忽视,政府应加大对施工安全的监督力度,并出台相关政策法规促进安全管理的规范化。通过多方协作,可以有效提升安全防控机制的执行力与覆盖面,从而提高整体施工安全水平。

7 结语

土建施工现场的安全风险防控是确保项目顺利完成和保障人员安全的重要保障。通过对施工现场安全风险的识别与防控机制的研究,本文明确了施工过程中潜在的安全隐患,探讨了多种有效的风险识别方法和防控措施。技术创新、信息化技术的应用以及多方协作的强化,都为提升施工现场的安全管理水平提供了有力支持。随着建筑行业的不断发展,施工现场的安全管理也面临着新的挑战,持续优化防控机制、提高技术应用水平是未来安全管理的关键。总之,只有建立完善的安全防控体系,结合现代技术手段和多方合作,才能有效降低施工现场的安全风险,保障施工人员的生命安全,确保土建工程的顺利进行。

参考文献

- [1] 辛佩康,王鹏,许璟琳,陈芊茹,刘寅.基于视频监控的施工现场智慧化安全管理技术研究与应用[J].土木工程信息技术,2026,18(01):68-73.
- [2] 程利娜.建筑施工现场安全隐患识别与防控机制研究[J].城市建设理论研究(电子版),2026,(04):71-73.
- [3] 钱士兴.工程监理视角下建筑工程施工安全风险管控研究[A].2026中国城建经济研讨会论文集(上册)[C].河南省豫商经济文化交流协会:2026:68-70.
- [4] 张新.土建与装修工程施工中安全管理和风险防范策略[A].2025中国建筑经济研讨会科技与管理分论坛论文集[C].河南省豫商经济文化交流协会:2025:168-170.
- [5] 郝长洪.建筑工程土建施工中安全管理重点探究[J].城市建设理论研究(电子版),2020,(18):35-36.

Advantages and Application Methods of Lidar Surveying and Mapping Technology in Construction Engineering Surveying and Mapping

Jiangning Jia

Huizhou Road and Bridge Survey and Design Institute, Huizhou, Guangdong, 516000, China

Abstract

Construction surveying serves as the cornerstone of engineering projects, where precision and efficiency directly determine both construction quality and management standards. Conventional surveying technologies (e.g., total stations, GPS) increasingly face limitations in complex terrains, irregular structures, and large-scale projects, including restricted line-of-sight, low operational efficiency, and single-dimensional data acquisition. As an innovative spatial data acquisition method, LiDAR technology generates high-density, high-precision 3D point cloud data through active laser pulse emission and echo reception, enabling non-contact digitalization of architectural spaces. This paper systematically analyzes LiDAR's working principles, compares its performance with traditional technologies, establishes standardized operational workflows, and clarifies technical application methods for complex terrains, irregular structures, and construction monitoring. It further explores implementation challenges and optimization pathways, aiming to provide theoretical support and practical references for the digital transformation of construction surveying.

Keywords

construction engineering surveying; LiDAR; 3D point cloud; technical advantages

建筑工程测绘中激光雷达测绘技术的优势与运用方法

贾江宁

惠州市道路桥梁勘察设计院, 中国 · 广东 惠州 516000

摘 要

建筑工程测绘是工程建设的基础, 其精度与效率直接决定工程质量与管理水平。传统测绘技术(全站仪、GPS等)在复杂地形、异形结构及大型工程中, 受通视限制、作业效率低及数据维度单一等瓶颈日益凸显。激光雷达(LiDAR)技术作为新型空间数据获取手段, 通过主动发射激光脉冲并接收回波, 可快速、高密度、高精度生成三维点云数据, 实现建筑空间的非接触式全要素数字化采集。本文系统剖析其工作原理, 对比传统技术性能差异, 重点构建标准化作业流程, 明确在复杂地形、异形建筑及施工监测等场景的技术运用方法, 并探讨应用挑战与优化路径, 以期为建筑工程测绘领域的数字化转型提供理论支撑与实践参考。

关键词

建筑工程测绘; 激光雷达(LiDAR); 三维点云; 技术优势

1 引言

1.1 研究背景

随着中国建筑行业向“高质量、智能化、绿色化”转型, 超高层、异形建筑、地下空间综合体、历史建筑保护修缮等新型工程不断涌现, 对工程测绘的精度、效率及数据维度提出了更高要求。传统测绘技术多采用接触式逐点测量, 不仅作业周期长、人力成本高, 且难以完整获取复杂结构的空间细节信息, 无法满足现代工程 BIM 建模、施工监测、运维管理等全流程应用需求。激光雷达技术凭借其主动成像、全

天候作业、数据密度高、三维建模能力强等优势, 成为突破传统测绘技术瓶颈的关键方案。目前, 该技术已广泛应用于建筑规划设计、施工测量、竣工测绘、结构健康监测等环节, 成为建筑工程数字化建设的核心支撑技术。

1.2 研究意义

本文通过系统梳理激光雷达测绘技术的原理、优势与运用方法, 一方面明确其在建筑工程测绘中的适用场景与技术边界, 为工程技术人员提供标准化作业指导; 另一方面通过对比传统测绘技术, 凸显激光雷达技术的应用价值, 推动建筑工程测绘从“二维量测”向“三维数字化建模”转型, 助力建筑行业全生命周期管理的智能化升级, 对提升工程测绘质量、降低作业成本、保障工程安全具有重要的现实意义。

【作者简介】贾江宁(1997-), 男, 苗族, 中国广西柳州人, 本科, 助理工程师, 从事测绘工程测量研究。

1.3 国内外研究现状

国外对激光雷达技术的研究起步较早,20世纪90年代已实现机载激光雷达在地形测绘中的应用,近年来聚焦于多源激光点云融合、AI点云语义分割、无人机载激光雷达(UAV-LiDAR)自主导航等领域,技术成熟度较高。国内研究虽起步较晚,但发展迅速,目前已形成涵盖地面激光扫描(TLS)、机载激光扫描(ALS)、移动激光扫描(MLS)的全系列技术体系,在超高层施工监测、历史建筑三维建档、地下工程测绘等场景中形成了一批典型应用案例。现有研究多聚焦于单一技术应用或特定场景优化,缺乏对激光雷达技术在建筑工程测绘全流程的系统梳理,且针对技术运用的标准化流程、精度控制方法及与传统技术的适配性研究有待进一步深化。本文基于现有研究成果,结合工程实践需求,构建全面的技术应用体系^[1]。

2 激光雷达测绘技术核心原理

激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)是一种主动式光学遥感技术,核心原理为“激光发射—信号反射—数据接收—三维解算”,通过激光脉冲的飞行时间(ToF)、相位差或三角测距原理,获取目标物体的三维空间坐标(X、Y、Z),最终生成高密度点云数据。

2.1 技术基本构成

激光雷达系统主要由激光发射模块、激光接收模块、数据处理模块、定位定向模块(GNSS/IMU)四部分组成:

1. 激光发射模块:负责发射高频率、窄脉宽的激光脉冲,通过扫描机构(机械旋转、固态扫描)实现对目标区域的全覆盖扫描;
2. 激光接收模块:接收目标物体反射的激光回波信号,通过光电转换将光信号转化为电信号,同时记录回波强度、多回波信息(穿透植被、遮挡物时的多次反射信号);
3. 定位定向模块:通过GNSS提供高精度位置信息,IMU提供姿态信息(航向、俯仰、横滚),实现点云数据的空间配准;
4. 数据处理模块:对原始点云数据进行去噪、配准、滤波、分割等处理,生成三维模型、正射影像、数字高程模型等成果^[2]。

2.2 核心技术类型

根据搭载平台与应用场景的不同,建筑工程测绘中常用的激光雷达技术主要分为三类:

1. 地面激光雷达(TLS):固定安装于地面站点,测量精度最高(平面精度 $\pm 1\sim 3\text{mm}$,高程精度 $\pm 2\sim 5\text{mm}$),适用于建筑外立面、室内空间、异形结构的精细测绘,是历史建筑保护、竣工测绘的核心技术;
2. 机载激光雷达(ALS):搭载于无人机或飞机平台,作业范围广,适用于大型建筑群、地形复杂区域的整体测绘,可快速生成数字高程模型(DEM)和数字表面模型(DSM);
3. 移动激光雷达(MLS):搭载于车载、背包式或手持设备,适用于道路、隧道、地下管廊等线性工程及狭窄空

间的快速测绘,作业效率是传统测量的5~10倍。

2.3 点云数据核心特性

激光雷达测绘的核心成果为三维点云,其核心特性决定了技术应用价值:

- 高密度:点云密度可达每平方厘米数十个点,可完整还原建筑结构的细节特征(如门窗尺寸、墙体裂缝、装饰纹理);
2. 高精度:测量误差可控制在毫米级,满足建筑工程1:500~1:1000大比例尺测绘要求;
3. 多维度:除三维坐标外,还包含回波强度、颜色信息(融合影像),可实现结构属性的初步识别;
4. 非接触式:无需接触目标物体,避免对建筑结构或施工场地造成干扰,适用于危险、不便靠近的场景。

3 建筑工程测绘中激光雷达技术的核心优势

相较于传统测绘技术(全站仪、水准仪、GPS等),激光雷达技术在建筑工程测绘中展现出精度高、效率高、适应性强、数据维度全、成本可控五大核心优势,具体如下:

3.1 测量精度高,数据可靠性强

激光雷达技术采用主动测距原理,不受外界环境(光照、天气、通视条件)干扰,测量精度稳定可控。在建筑工程测绘中,其平面精度可达 $\pm(1\sim 3\text{mm})$,高程精度可达 $\pm(2\sim 5\text{mm})$,部分高精度设备可实现亚毫米级测量,完全满足超高层施工监测、异形结构安装、竣工测绘等高精度场景需求^[3]。

同时,激光雷达可通过多回波技术穿透植被、薄遮挡物,获取真实的地面及建筑结构数据,避免传统测量中因遮挡导致的误差累积。例如,在茂密植被覆盖的建筑场地测绘中,传统技术需人工清除遮挡物,而激光雷达可直接获取有效点云数据,保障测量精度的同时降低作业成本。

3.2 作业效率高,大幅缩短测绘周期

传统测绘技术需逐点测量,单个站点仅能获取有限的坐标点,且需多人协作完成大面积测绘,作业周期长。激光雷达技术可实现“一站扫描、全域覆盖”,单台设备每分钟可采集数十万至数百万个点云数据,单日可完成数十万平方米的建筑场地测绘,作业效率是传统技术的5~20倍。以某50公里高速公路改扩建项目为例,采用移动激光测量系统仅用3天即完成全路段测绘,而传统技术需30天以上;某高层办公楼室内测绘,采用SLAM手持激光雷达仅需1小时即可完成,而传统人工测量需3~5天。高效的作业能力可有效缩短工程前期测绘周期,为后续设计、施工环节预留更多时间,保障工程整体进度。

3.3 环境适应性强,突破场景限制

传统测绘技术对作业环境要求严苛,需满足通视条件,且受暴雨、大雾、强光等天气影响较大,在复杂地形(山区、峡谷)、狭窄空间(楼梯间、地下室、设备机房)、危险场景(高空、边坡)中作业难度大、风险高。激光雷达技术具有无需通视、全天候作业、非接触测量三大特点,可突破环

境限制:

1. 无需通视: 通过激光脉冲的主动发射与接收, 无需在测量点与目标点之间建立通视关系, 适用于建筑密集区、地下空间等通视条件差的场景;

2. 全天候作业: 不受光照、天气影响, 可在夜间、雨天、雾天等恶劣环境下稳定工作, 保障测绘工作的连续性;

3. 非接触测量: 无需靠近目标物体, 可在高空、边坡、危险建筑等场景中安全作业, 降低测量人员安全风险。

3.4 数据维度全, 支撑全流程应用

传统测绘技术以二维坐标数据为主, 数据维度单一, 难以满足现代建筑工程 BIM 建模、运维管理等需求。激光雷达技术可生成多维度、多类型成果, 包括三维点云模型、正射影像 (DOM)、数字高程模型 (DEM)、数字线划图 (DLG)、BIM 模型等, 实现从“数据采集”到“模型应用”的全链条覆盖。

这些成果可直接应用于工程全生命周期:

1. 设计阶段: 为建筑方案比选、土方量计算、结构优化提供精准的三维地形与建筑数据支撑;

2. 施工阶段: 用于施工放样、进度监测、质量控制, 通过对比点云模型与设计模型, 及时发现施工偏差;

3. 竣工阶段: 生成精准的竣工图与 BIM 模型, 为工程验收、设施管理、后续改造提供基础数据;

4. 运维阶段: 用于建筑结构健康监测、裂缝检测、设备检修, 实现建筑全生命周期的智能化管理。

4 激光雷达技术在建筑工程测绘中的运用方法

为保障激光雷达技术在建筑工程测绘中的应用效果, 需遵循“前期规划—数据采集—数据处理—成果应用—质量控制标准化流程, 结合不同工程场景制定差异化技术方案, 具体如下:

4.1 前期规划: 精准制定作业方案

前期规划是技术应用的基础, 核心任务是明确工程需求、选择适配设备、制定详细作业计划, 具体步骤如下:

1. 需求分析: 明确测绘范围、精度要求、数据成果类型 (点云、BIM 模型、正射影像等)、作业时间节点, 结合工程类型 (新建、改造、运维) 确定核心应用场景;

2. 设备选型: 根据工程场景与需求选择适配的激光雷达设备:

- 建筑外立面、室内精细测绘: 选用地面激光雷达 (如 FARO Focus Premium、Leica ScanStation P50), 优先选择精度高、点云密度大的设备;

- 大型建筑群、地形复杂区域: 选用机载激光雷达 (无人机载为主), 优先选择续航长、扫描范围广的设备;

- 线性工程、狭窄空间: 选用移动激光雷达 (背包式、手持型, 如 SLAM 技术设备), 优先选择轻便、自主导航能力强的设备;

3. 现场勘查: 对测绘区域进行实地勘查, 明确地形地貌、

建筑布局、遮挡物分布、通视条件、电源供应等情况, 规划扫描站点与作业路线, 避开危险区域与干扰源;

4. 方案制定: 结合需求分析与现场勘查结果, 制定详细作业方案, 明确扫描参数 (扫描距离、分辨率、重叠度)、控制点布设方案、数据处理流程、质量控制标准^[4]。

4.2 数据采集: 规范开展外业作业

数据采集是获取精准点云数据的核心环节, 需严格遵循设备操作规范, 控制采集参数, 保障数据质量, 具体步骤如下:

1. 控制点布设: 在测绘区域布设高精度控制点, 每平方公里不少于 4 个, 控制点需选择视野开阔、稳定易识别的位置, 采用全站仪或 GPS 进行测量, 获取控制点的三维坐标, 作为点云配准的基准;

2. 参数设置: 根据工程需求设置扫描参数:

- 扫描重叠度: 多站扫描时, 相邻站点的扫描重叠度不低于 30%, 复杂结构区域加密至 50% 以上, 保障点云配准精度;

- 扫描分辨率: 根据精度要求调整, 精细测绘场景 (如历史建筑、异形结构) 设置为高分辨率 (0.05~0.1mm), 大面积测绘场景设置为低分辨率 (0.5~1mm), 平衡数据精度与数据量;

- 扫描时间: 避开强风、暴雨、大雾等恶劣天气, 夜间作业时做好照明准备, 保障设备稳定运行;

3. 外业扫描: 按照作业方案开展扫描, 地面激光雷达需逐站布设, 确保覆盖全部测绘区域; 机载 / 移动激光雷达需按照规划路线飞行 / 移动, 确保无遗漏扫描;

4. 数据备份: 扫描过程中实时备份原始数据, 采用双重备份 (本地硬盘 + 云端存储) 避免数据丢失, 同时记录扫描参数、现场情况, 为后续数据处理提供依据。

5 结语

综上所述, 激光雷达测绘技术凭借高精度、高效率、强适应性及数字化数据输出等核心优势, 已成为破解传统建筑工程测绘技术瓶颈、推动行业数字化转型的关键技术支撑。其在复杂地形测绘、异形建筑建模、施工动态监测、历史建筑保护及竣工数字化交付等场景中的广泛应用, 不仅显著提升了测绘作业效率与数据精度, 更实现了从二维平面测绘向三维空间数字化建模的跨越, 为建筑工程全生命周期的规划、设计、施工、运维管理提供了精准的数据底座。

参考文献

- [1] 张正禄. 工程测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2019.
- [2] 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描测量技术及其在测绘中的应用[J]. 测绘学报, 2017,46(10):1289-1300.
- [3] 王晏民, 王国利. 地面激光雷达技术在建筑工程中的应用与展望[J]. 建筑科学, 2020,36(05):132-138.
- [4] 刘经南, 赵建虎. 激光雷达测绘技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.

Research on Key Points of Construction Engineering Surveying and Mapping Based on UAV Oblique Photography Technology

Zhihang Liu

Huizhou Road and Bridge Survey and Design Institute, Huizhou, Guangdong, 516000, China

Abstract

Drone oblique photography technology has become a crucial technical approach in modern construction engineering surveying, leveraging its advantages of multi-angle imaging, rapid 3D modeling, and high-precision measurement. This paper systematically elucidates the principles and application characteristics of drone oblique photography technology, addressing practical needs in construction engineering surveying. It outlines key technical aspects from field operations, data processing, precision control, to model optimization, analyzes common operational challenges and improvement strategies, and proposes standardized workflows tailored for construction scenarios. The study demonstrates that through rational flight path planning, precise image control deployment, rigorous aerial triangulation, and refined modeling processing, the accuracy and completeness of 3D models can be significantly enhanced to meet the requirements of 1:500 large-scale engineering surveying. This technology effectively improves surveying efficiency, reduces operational costs, ensures data comprehensiveness, and provides reliable support for construction project investigation and design, construction management, completion surveying, and digital operation and maintenance.

Keywords

UAV oblique photography; construction engineering surveying; 3D modeling; precision control; real-scene 3D model

基于无人机倾斜摄影技术的建筑工程测绘要点研究

刘志航

惠州市道路桥梁勘察设计院, 中国 · 广东 惠州 516000

摘 要

无人机倾斜摄影技术凭借多角度成像、快速三维建模与高精度量测等优势,已成为现代建筑工程测绘的重要技术手段。本文结合建筑工程测绘实际需求,系统阐述无人机倾斜摄影技术原理与应用特点,从外业作业、数据处理、精度控制、模型优化等环节梳理关键技术要点,分析作业过程中常见问题与改进对策,并提出适用于建筑工程场景的标准化作业流程。研究表明,通过合理航线规划、精准像控布设、严密空三解算与精细化建模处理,可有效提升三维模型精度与完整性,满足 1:500 大比例尺工程测绘要求。该技术能够显著提高测绘效率、降低作业成本、保障数据全面性,为建筑工程勘察设计、施工管控、竣工测绘与数字化运维提供可靠支撑。

关键词

无人机倾斜摄影; 建筑工程测绘; 三维建模; 精度控制; 实景三维模型

1 引言

建筑工程测绘贯穿项目规划、设计、施工、验收及运维全生命周期,是保障工程建设质量与进度的基础性工作。传统工程测绘主要依赖全站仪、GNSS-RTK、水准仪等设备,采用人工逐点采集方式开展作业,在复杂建筑结构、高层立面测量、大面积场地测绘中存在效率低、周期长、数据不完整、作业风险高等问题,难以满足数字化建造与智慧工地建设需求。

近年来,无人机倾斜摄影技术快速发展,通过多镜头

同步采集地物顶面与四向倾斜影像,结合空中三角测量、密集匹配与纹理映射技术,可快速生成高还原度实景三维模型,实现建筑立面、空间形态、地形地貌的完整表达。该技术具有覆盖范围广、数据采集快、成果直观、量测精度高等特点,能够有效弥补传统测绘手段的不足。当前,无人机倾斜摄影在建筑工程测绘应用中仍存在作业流程不规范、参数设置不合理、模型精度不稳定、复杂场景适配性不足等问题。基于此,本文从技术应用全流程出发,系统研究建筑工程测绘中的关键控制要点,提出优化方案与质量保障措施,为行业规范化应用提供理论参考与实践依据。

【作者简介】刘志航(1995-),男,本科,中国广东惠州人,助理工程师,从事建筑工程测量研究。

2 无人机倾斜摄影技术原理与应用优势

2.1 技术原理

无人机倾斜摄影技术以航空摄影测量与计算机视觉理论为基础，通过搭载多视角倾斜相机，在飞行过程中同步获取下视影像与前、后、左、右四个倾斜方向影像，实现对建筑顶面、立面及周边环境的全方位数据采集。系统搭载的 POS 定位定姿装置实时记录影像拍摄瞬间的空间坐标与姿态参数，经地面像控点联合平差完成空中三角测量解算，再通过密集点云匹配、三角网构建与真实纹理映射，最终生成带空间坐标的实景三维模型。模型可直接进行距离、面积、体积、高程等数字化量算，并兼容 CAD、BIM、GIS 等主流工程软件。

2.2 应用优势

1. 数据采集全面化：同时获取顶面与立面信息，解决传统正射影像无法表达建筑竖向结构的缺陷，对异形建筑、高层结构还原度更高。
2. 作业效率高优化：外业采集时间短、覆盖范围大，内业处理自动化程度高，整体工期较传统方式缩短 60% 以上。
3. 成果精度可靠化：在规范作业条件下，平面与高程精度可达到厘米级，满足 1:500 大比例尺建筑工程测绘要求^[1]。
4. 应用场景多元化：适用于场地勘察、土方计算、BIM 建模、施工监测、竣工测绘、数字化验收等全流程业务。
5. 作业安全化：可替代人工开展高空、危险区域测量，降低现场作业风险，提升复杂工地环境适应性。

3 建筑工程测绘作业流程与核心要点

3.1 测区踏勘与设备选型

作业前需开展现场踏勘，明确测区范围、建筑高度、结构类型、场地障碍物、空域条件与电磁环境。设备优先选用工业级多旋翼无人机，搭配五镜头倾斜相机与 RTK/PPK 组合定位模块，保证影像质量与定位精度。针对高层与超高层建筑，应选用抗风性能强、续航稳定、云台可控角度大的机型，确保数据采集稳定可靠^[2]。

3.2 航线规划与参数设置

航线规划直接影响影像重叠度、模型完整性与最终精度，是倾斜摄影测绘的核心环节。建筑工程测绘应遵循“全覆盖、高重叠、无死角、分层飞行”原则，关键参数控制如下：地面分辨率 GSD 控制在 1.5 ~ 3cm；航向重叠度不低于 85%，旁向重叠度不低于 75%；飞行高度宜为建筑最高高度的 1.2 ~ 1.5 倍；对高层、悬挑、复杂造型建筑增加环绕飞行与立面补飞，消除数据盲区。

3.3 像控点布设与测量

像控点是提升模型绝对精度的关键。布设遵循“均匀分布、边缘加密、特征明显、稳定不变”原则，标准区域按 5 ~ 8 个 / 平方公里布设，检查点均匀分布于测区内部与

边缘。像控点优先选择道路交叉口、硬化地面角点、建筑棱角等清晰易识别位置，采用 GNSS-RTK 或全站仪实测坐标，平面与高程坐标误差控制在 1cm 以内，确保刺点精准无误^[3]。

3.4 外业影像采集与质量检查

数据采集应选择光照均匀、无大风、无雾霾的天气，避开强光直射与逆光时段。飞行前完成罗盘、IMU、云台校准，飞行中实时监控影像清晰度、重叠度与丢片情况，飞行后逐张检查影像质量，对模糊、过曝、欠曝及遮挡区域及时补飞，保证原始数据完整可用。

3.5 内业数据处理与模型构建

内业处理主要包括影像预处理、空中三角测量、密集点云生成、三维模型构建与纹理映射。空三解算需严格控制像点残差，剔除粗差；点云处理需滤除噪点、浮动点与冗余数据；建模过程中对弱纹理区域、玻璃幕墙、金属屋面等易失真部位进行手动修复与纹理优化，确保模型拓扑关系正确、形态完整、纹理清晰。

3.6 精度验证与成果交付

采用独立检查点法进行精度评定，将模型量测值与 RTK 实测值对比，计算平面中误差与高程中误差。民用建筑工程一般要求平面误差 $\leq \pm 5\text{cm}$ ，高程误差 $\leq \pm 8\text{cm}$ 。验收合格后，输出三维模型、点云数据、数字线划图、正射影像、土方量报告等成果，满足工程设计、施工与验收使用^[4]。

4 关键技术参数与常见问题优化（含图表）

4.1 建筑工程倾斜摄影测绘关键参数表详见表 1 所示

表 1 建筑工程倾斜摄影测绘关键技术控制指标

控制项目	标准指标	适用测绘等级
地面分辨率（GSD）	1.5 ~ 3cm	1:500 大比例尺测绘
航向重叠度	$\geq 85.0\%$	全类型建筑工程
旁向重叠度	$\geq 75.0\%$	全类型建筑工程
像控点密度	5 ~ 8 个 / km ²	常规场地；复杂区加密
平面位置中误差	$\leq \pm 5\text{cm}$	民用建筑竣工测绘
高程中误差	$\leq \pm 8\text{cm}$	民用建筑竣工测绘
点云密度	≥ 50 点 / m ²	精细化三维建模
空三加密平均残差	≤ 0.5 像素	高精度建模要求

（图表说明：本表为建筑工程倾斜摄影作业核心控制指标，可直接用于方案编制与成果验收）

4.2 常见问题与优化对策

4.2.1 模型缺失与遮挡盲区

高层裙楼、悬挑结构、狭窄巷道易产生数据空洞。优化措施：增加侧面航线、降低飞行高度、采用环形补飞，结合近景摄影补充盲区数据。

4.2.2 纹理模糊与反光失真

玻璃、金属、石材易出现反光与过曝。优化措施：调整拍摄时段、使用 HDR 模式、避免逆光拍摄，后期通过软件手动修复纹理。

4.2.3 模型变形与拉伸

弱纹理区域如墙面、地面易导致匹配失败。优化措施：提高影像重叠度、加密像控点、增加特征约束、提升点云密度^[5]。

4.2.4 整体精度不达标

像控不均、刺点误差、POS 漂移易造成精度不足。优化措施：规范布网、精准刺点、采用 PPK/RTK 紧耦合解算、增加检查点核验。

4.2.5 数据冗余与处理缓慢

过度飞行与重复采集导致数据量过大。优化措施：依据 GSD 精准计算航高，分区规划航线，减少无效数据采集。

5 无人机倾斜摄影在建筑工程中的应用

5.1 工程勘察与场地测绘

快速获取场地三维模型，自动生成等高线、地形图与土方量算结果，为场地规划、总图设计、土方平衡提供高精度基础数据，大幅缩短前期勘察周期。

5.2 BIM 设计与数字化建模

实景三维模型可直接与 BIM 设计软件对接，实现场地环境可视化、方案比选、日照分析与碰撞检测，提升设计精度与合理性，减少后期设计变更。

5.3 施工监测与进度管理

通过多期航测模型对比，实现施工进度可视化跟踪、工程量自动核算、基坑与建筑变形动态监测，提升施工管控精度与现场安全水平^[6]。

6 结语

无人机倾斜摄影技术以高效、精准、全面的数字化采

集能力，为建筑工程测绘提供了全新技术路径，有效推动工程测绘向自动化、智能化、三维化方向发展。在实际应用中，必须严格把握设备选型、航线规划、像控布设、空三解算、建模优化与精度验证六大核心要点，建立标准化作业流程，针对性解决数据缺失、模型失真、精度不足等问题，确保成果满足建筑工程设计、施工与验收需求。

随着人工智能、点云融合、实时建模与数字孪生技术的不断发展，无人机倾斜摄影将进一步与 BIM、GIS、物联网深度融合，在智慧工地、数字建造、智慧城市建设中发挥更大价值。未来应持续完善技术标准、优化处理算法、提升复杂场景适应性，推动技术在建筑工程领域更广泛、更规范、更高效地应用，为工程建设高质量发展提供坚实的数据支撑与技术保障。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家标准. 航空摄影技术规范 GB/T 19294-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [2] 李清泉, 周命端. 无人机倾斜摄影测量三维建模理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] 王晏民, 黄明. 地面与航空摄影测量三维重建技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2021.
- [4] 张卡, 盛业华. 基于倾斜摄影的建筑工程竣工测绘方法研究[J]. 测绘通报, 2022(04): 87-91.
- [5] 刘先林, 邹友峰. 无人机航空摄影测量在工程测绘中的应用[J]. 测绘科学, 2021, 46(02): 1-6.
- [6] 赵超英, 张勤. 无人机倾斜摄影精度控制关键技术研究[J]. 测绘工程, 2022, 31(03): 45-50.

Analysis of the Application Strategy of Digital Map Surveying and Mapping Technology in Construction Engineering Project Surveying

Pengqing Lin

Huizhou Road and Bridge Survey and Design Institute, Huizhou, Guangdong, 516000, China

Abstract

Digital map surveying technology, supported by GNSS, GIS, drone aerial survey, and 3D laser scanning, has become a pivotal technical solution for enhancing quality, efficiency, and transformation in construction engineering surveying. This paper examines the application scenarios and technical logic of digital map surveying across key phases of construction projects—from preliminary investigation and planning to construction layout, earthwork calculation, safety monitoring, and post-completion acceptance and maintenance. It explores targeted strategies including technical solution selection, data quality control, multi-source data integration, workflow optimization, and personnel safety management. Through comparative analysis of traditional and digital surveying methods, the study quantitatively demonstrates the significant advantages of digital technology in precision, efficiency, cost-effectiveness, and scenario adaptability. The findings indicate that digital map surveying effectively reduces reliance on manual operations, enabling accurate spatial data collection, visualization, and full-process traceability. This provides solid support for rational project planning, precise construction, and controllable safety. The widespread adoption of this technology holds substantial practical significance in advancing construction engineering surveying toward automation, intelligence, and high precision, thereby facilitating the digital and intelligent development of the construction industry.

Keywords

digital map surveying; construction engineering surveying; construction monitoring; data fusion

试析数字化地图测绘技术在建筑工程项目测量中的应用策略

林彭卿

惠州市道路桥梁勘察设计院，中国·广东 惠州 516000

摘 要

数字化地图测绘技术以GNSS、GIS、无人机航测、三维激光扫描为核心支撑，已成为推动建筑工程测量领域提质增效、转型升级的关键技术手段。本文立足建筑工程项目全生命周期，系统剖析数字化地图测绘技术在前期勘察规划、施工放样、土方工程核算、施工安全监测及竣工验收运维等核心环节的应用场景与技术逻辑，深入探讨技术方案选型、数据质量管控、多源数据融合、作业流程优化及人员安全管理等针对性应用策略，并通过传统测量模式与数字化测绘模式的对比分析，量化论证数字化技术在精度、效率、成本及场景适应性等方面的显著优势。研究结果表明，数字化地图测绘技术可有效降低人工操作依赖，实现建筑工程空间数据的精准采集、可视化呈现与全过程追溯，为项目规划合理性、施工精准性及安全可控性提供坚实保障。该技术的普及应用，对推动建筑工程测量向自动化、智能化、高精度化转型，助力建筑行业实现数字化、智能化发展具有重要现实意义与实践价值。

关键词

数字化地图测绘；建筑工程测量；施工监测；数据融合

1 引言

建筑工程测量作为建筑工程项目规划、设计、施工、运维全生命周期的基础性核心工作，其测量精度、作业效率与数据可视化程度，直接关系到工程项目的整体质量、建设进度、成本管控及运营安全。传统建筑工程测量模式以光学

仪器（如经纬仪、水准仪、全站仪）为核心载体，辅以人工记录、手工绘图完成作业流程，长期以来面临诸多局限性：在复杂地形场景中，通视条件受限导致测量效率大幅降低；人工读数、抄录过程中易出现人为误差，影响测量成果精度；成果形式以纸质图纸为主，数据复用性差、共享困难；难以实现对施工过程的实时动态监测，安全风险预警滞后等问题尤为突出。随着数字中国战略的深入推进，建筑行业数字化转型步伐持续加快，大数据、物联网、人工智能、遥感测绘等新兴技术与建筑工程领域的融合不断深化。数字化地图测

【作者简介】林彭卿（1999-），男，中国广东惠州人，本科，助理工程师，从事建筑工程测量研究。

绘技术作为数字化技术体系的重要分支,凭借 GNSS 实时动态定位、无人机航测快速建模、三维激光扫描高精度采集、GIS 空间分析与可视化等核心优势,突破了传统测量模式的技术瓶颈,为建筑工程测量提供了全新的技术路径与解决方案。当前,建筑工程项目呈现出规模大型化、结构复杂化、功能多元化的发展趋势,对工程测量的精度要求从传统厘米级向毫米级跨越,对作业效率、数据可视化及全生命周期数据贯通的需求日益凸显。在此背景下,深入研究数字化地图测绘技术在建筑工程项目测量中的应用策略,明确技术应用要点、优化流程、管控关键环节,不仅能解决传统测量的痛点问题,更能为建筑工程项目精细化管理、安全可控建设提供技术支撑。本文结合建筑工程测量实际需求,系统梳理数字化地图测绘技术的核心体系,剖析其在工程各阶段的应用场景,提出科学可行的应用策略,旨在为建筑工程测量领域的数字化转型提供理论参考与实践指导。

2 数字化地图测绘技术核心体系概述

数字化地图测绘技术是依托计算机软硬件平台,融合卫星定位、遥感探测、激光扫描、空间信息处理与图形可视化等多学科技术,实现空间地理数据采集、处理、分析、建模与呈现的综合性技术体系。其核心在于突破传统测量的“点式”数据采集模式,实现对建筑工程场地空间信息的全方位、高精度、快速化采集与处理,核心技术组件包括 GNSS 定位技术、无人机航测技术、三维激光扫描技术及 GIS 地理信息系统,各技术相互协同、互补支撑,构成完整的数字化测绘技术链条。

2.1 GNSS 定位技术

GNSS(全球导航卫星系统)是数字化地图测绘的核心定位基准,涵盖 GPS、北斗、GLONASS、Galileo 等多卫星系统,其中北斗卫星系统作为我国自主研发的卫星导航系统,在国内建筑工程测量中应用愈发广泛。GNSS 定位技术通过接收多颗卫星信号,结合载波相位差分技术(RTK/PPK),可实现厘米级甚至毫米级的实时动态定位。在建筑工程测量中,GNSS 技术主要用于施工控制网布设、轴线放样、高程传递及点位精准测量。相较于传统全站仪测量,GNSS 技术不受通视条件限制,无需在测量点之间建立视觉通视路径,尤其适用于大型建筑场地、山区建筑场地、复杂市政工程等通视条件较差的场景,可大幅减少外业测量人员数量与作业时间,实现快速定位与放样。同时,GNSS 技术支持多测点同步测量,能够高效完成大面积场地的控制网布设,为建筑工程提供统一、精准的空间基准,保障后续施工测量的一致性与精准性^[1]。

2.2 无人机航测技术

无人机航测技术是以无人驾驶飞行器为载体,搭载高清相机、激光雷达、多光谱相机等传感器,通过自主飞行规划获取场地影像数据,经内业处理生成数字正射影像

(DOM)、数字高程模型(DEM)、三维实景模型的数字化测绘技术。该技术具有机动灵活、作业效率高、成本低、场景适应性强等优势,可快速获取建筑工程场地的地形地貌、地物分布、高程变化等空间信息。在建筑工程领域,无人机航测技术的核心价值在于实现大范围、快速化地形勘察与三维建模。通过预设飞行航线与重叠度,无人机可在短时间内完成数平方公里场地的影像采集,相较于传统人工测图,作业效率提升 3-5 倍,且不受地形高差、场地障碍物等因素影响。外业采集的影像数据经 Pix4D、Metashape 等专业软件处理后,可生成高精度 DOM、DEM 及三维实景模型,直观呈现场地坡度、汇水区域、障碍物分布等信息,为工程规划设计提供可视化、量化的数据支撑。此外,无人机航测技术可定期对施工场地进行复飞测量,对比不同时期的地形数据,实现土方工程量精准核算、施工进度动态监控。

2.3 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是通过激光发射器向被测物体发射激光束,接收反射回来的激光信号,结合时间飞行法、相位法等原理,快速采集被测物体表面海量点云数据,经三维建模软件处理生成高精度三维模型的非接触式测量技术。该技术具有测量速度快、点云密度高、精度高、非接触式测量等优势,可精准获取复杂结构、不规则物体的空间形态与尺寸信息。在建筑工程测量中,三维激光扫描技术主要应用于复杂建筑结构测绘、施工质量检测、变形监测及竣工建模。针对高层建筑、大跨度场馆、异形建筑等复杂结构,传统测量手段难以全面获取其结构信息,而三维激光扫描技术可在短时间内采集数百万甚至数千万个点云数据,精准还原建筑结构的三维形态,实现构件尺寸、安装偏差的精准检测。在施工变形监测中,通过周期性扫描获取建筑结构、基坑、边坡等部位的点云数据,对比分析变形量,可实现实时安全预警。同时,三维激光扫描生成的点云模型可直接导入 BIM、CAD 软件,用于竣工资料归档与数字化交付,大幅提升竣工测量的效率与精准性。

2.4 GIS 地理信息系统

GIS 地理信息系统是用于采集、存储、管理、处理、分析、显示与描述空间地理数据的技术系统,核心在于实现多源空间数据的整合、空间分析与可视化呈现。在建筑工程数字化测绘中,GIS 系统作为数据管理与应用平台,可整合 GNSS、无人机航测、三维激光扫描等多技术获取的空间数据,构建建筑工程“一张图”管理体系。GIS 系统支持空间叠加分析、缓冲区分析、网络分析等多种空间分析功能,可将地形数据、地质勘察数据、地下管线数据、规划红线数据等进行叠加,辅助工程规划方案比选与优化。同时,GIS 系统可实现测量数据的实时共享与可视化管理,施工人员、设计人员、管理人员可通过平台实时查看测量成果、施工放样点位、场地地形变化等信息,打破信息壁垒,提升项目协同管理效率。此外,GIS 系统支持测量数据的长期存储与追溯,为建

筑工程全生命周期的数据分析、运维管理提供数据支撑^[2]。

3 数字化地图测绘技术在建筑工程测量中的应用场景

3.1 前期勘察与规划设计阶段

建筑工程前期勘察与规划设计阶段的核心任务是全面掌握场地自然条件、地形地貌、地质条件、周边环境等信息，为工程总平面布局、基坑设计、道路规划、管线设计提供依据。传统勘察模式以人工实地踏勘、少量测量点数据为基础，存在信息不全面、效率低、可视化差等问题，难以满足复杂场景下的规划设计需求。数字化地图测绘技术通过“无人机航测+GNSS控制+GIS分析”的技术组合，可快速完成场地全方位勘察。首先，利用无人机航测技术对场地进行全域扫描，生成高精度DOM与DEM，直观呈现场地地形起伏、坡度、汇水、障碍物分布等信息，明确场地可建设范围、基坑开挖适宜性及道路走向基础条件。其次，结合GNSS技术精准采集场地控制点、地物坐标数据，完善地形数据的精度与完整性。最后，将地形数据、地质勘察数据、周边建筑与管线数据导入GIS系统，进行多方案叠加分析，对比不同总平面布局方案的合理性，优化建筑布局、基坑深度、管线走向等设计内容。

例如，在山区建筑工程规划中，无人机航测可精准获取山地地形的高程变化与坡度分布，GIS系统通过坡度分析、汇水分析，规避地质灾害风险区，优化建筑基底标高与排水系统设计；在城市核心区建筑工程中，通过无人机航测与GIS叠加分析，精准掌握周边地下管线分布，避免施工过程中管线破坏，保障工程安全。同时，数字化测绘成果可直接导入BIM、CAD设计软件，实现勘察数据与设计数据的无缝对接，减少设计阶段的现场复测工作，缩短规划设计周期^[3]。

3.2 施工控制与放样阶段

施工放样是建筑工程施工阶段的核心测量工作，其核心任务是将设计图纸上的建筑物轴线、点位、标高、构件位置等设计参数，精准测设到施工现场，作为施工操作的依据。施工放样的精度直接决定建筑物的施工质量，是保障工程结构安全与使用功能的关键。数字化地图测绘技术在施工

放样阶段的应用，以“GNSS RTK+BIM模型+GIS可视化”为核心，实现放样精准化、效率化与可视化。首先，在施工前，将BIM设计模型中的轴线、构件、点位等坐标数据导入数字化测绘系统，结合GNSS RTK技术进行控制网布设与点位放样，无需手动计算坐标，减少人工计算误差，实现放样点位的实时校核。其次，针对高层建筑、大型桥梁、复杂市政工程等场景，利用三维激光扫描技术实时采集施工完成的构件数据，与BIM设计模型进行对比分析，快速检测构件安装偏差，及时调整施工参数，保障施工精度。此外，GIS系统可将放样点位、施工进度、场地地形等信息整合为可视化的施工管理图，施工人员可通过移动端实时查看放样位置、操作规范及安全注意事项，提升放样操作的规范性与效率。在轴线传递与标高传递过程中，利用GNSS技术可实现跨楼层、跨区域的精准标高传递，避免传统水准测量受楼层高度、通视条件限制的问题，大幅提升施工测量的效率与精度。

4 结语

数字化地图测绘技术为建筑工程测量提供了高精度、高效率、可视化的全新解决方案，贯穿项目勘察、设计、施工、监测、验收与运维全过程。通过科学选型设备、规范采集流程、强化数据融合、完善质量管控，可最大限度发挥技术优势，降低误差、提升效率、保障安全、节约成本。随着智能测绘、物联网、云计算与BIM技术持续发展，数字化地图测绘将向自动化、智能化、实时化、云端化方向升级，为智慧建造与数字工地提供更强支撑。工程建设单位应加快技术普及应用，完善标准体系，培养专业人才，以数字化测量推动建筑行业高质量发展。

参考文献

- [1] 崔瑛哲,王康建,高进.数字化测绘技术在工程中的应用研究[J].土木工程,2024,13(09):1658-1666.
- [2] 陈明江.数字化测绘技术在建筑工程测量中的应用[J].工程技术研究,2024,09(13):156-158.
- [3] 吴涉成,方炎林,陈超.数字化地图测绘技术在工程测量的应用综述[J].土木工程,2023,12(05):498-506.

Application of Prefabricated Technology in the Installation of Underground Pipelines for Rail Transit Systems

Haoqiang Zhang Xingyun Tan

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

Abstract

Urban rail transit underground spaces are densely packed with pipelines and frequently intersect. The traditional installation method of “on-site cutting, individual positioning, and point-by-point drilling” often leads to process congestion, cumulative interface deviations, and rework in station public areas and equipment zones. In recent years, China has promoted prefabricated and modular construction techniques in subway projects, shifting the processing of pipe segments, supports, and fasteners from on-site to factory assembly, followed by rapid modular and system-based installation in confined spaces. This approach reduces the risks of wet work and secondary damage on-site while improving interface consistency and replaceability. Practices such as modular pipeline laying and integrated supports in prefabricated stations have been summarized and promoted in engineering practice and research. This article focuses on the engineering attributes of underground pipelines and key modular installation techniques, proposing actionable technical points for reference in similar projects.

Keywords

prefabricated technology; rail transit; underground pipelines; installation; application

装配式技术在轨道交通地下管线安装中的应用

张豪强 谭幸芸

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国 · 四川 成都 610213

摘 要

城市轨道交通地下空间管线密集、交叉频繁,传统“现场切割、逐根定位、逐点打孔”的安装方式在车站公共区与设备区容易引起工序拥挤、接口偏差累积与返工。近年来,中国在地铁工程中推进机电预制化与装配式工艺,将管段、支吊架与固定件由现场加工转为工厂成套加工,再在狭小空间内按分段、按系统快速拼装,以降低现场湿作业与二次破坏风险,并提升接口一致性与可替换性。装配式车站的管线敷设与综合支吊架等做法已在工程实践与研究中得到总结与推广。文章围绕地下管线的工程属性与装配式安装关键做法展开,并提出可直接落地的技术要点以供类似工程参考。

关键词

装配式技术; 轨道交通; 地下管线; 安装; 应用

1 引言

地下车站与区间内的给排水及消防、通风空调系统、动力照明系统及高压、弱电系统等管线共同构成“地下管线系统”。其安装质量不仅取决于单根管道强度与严密性,还取决于成排敷设的标高控制、接口同轴度、支吊架受力路径与变形补偿。中国文献将装配式工艺概括为“工厂预制、现场装配”的组织方式,并指出其在城市轨道交通机电安装中可通过标准化部品减少现场加工量^[1]。因此,本文从地下管线的空间特征出发,聚焦装配式技术在安装环节的具体应用要点。

2 轨道交通地下管线概述

轨道交通地下管线是指服务于地铁车站、区间及设备用房运行需求,在地下结构内沿顶板下、侧墙、管井与设备夹层等空间布置的各类机电管线与其支承固定体系的总称,既包括有压力或有流量要求的管道系统,如消防水、给排水、空调冷冻水与冷却水,也包括电缆桥架与风管等线性系统。与市政埋地管道相比,它的“地下”并非土中直埋,而是处于混凝土结构形成的封闭空间内,受净空、检修通道、防火分区与装修界面的约束,呈现“多专业同走廊、同标高成排、节点密集”的典型特征。装配式车站实践中,设备区往往采用模块化布局,并配合综合支吊架组织管线敷设,以适应空间紧凑与检修要求。由于管线系统需要长期运行维护,地下管线还具有“可更换、可隔离、可操作”的工程属性,因而在安装阶段必须兼顾接口可拆装性、阀件可达性与支吊架的

【作者简介】张豪强(1993-),男,中国陕西西安人,本科,工程师,从事市政及城市轨道交通工程施工管理研究。

承载力条件。

3 装配式技术在轨道交通地下管线安装中的应用

3.1 管段预制与接口单元化拼装

在轨道交通地下管线采用装配式路径时,管段预制与接口单元化拼装要把结构封闭后的可操作空间当作边界条件,把分段、接口与验收一次写进施工交底。第一,施工人员应按直管段、弯头变径段、带支座段和阀件连接段四类单元拆分,单段长度宜控制在3~6m并兼顾运输转弯半径,单件重量宜控制在200~400kg便于站内倒链或小型电动葫芦平稳就位,接口优先选用沟槽或法兰等可拆连接,工厂用胎具控制端面垂直度和短节长度偏差,现场只做对口找正、垫片就位与对角紧固,沟槽式连接具有抗振并能适应一定收缩与膨胀。第二,成排管线预制应先固定定位基准,同一横担上的多根管道统一中心距与偏移量,支座孔位按控制线预留5~10mm可调余量,管段与支吊架同步预装并复核标高,现场按基准线整体挂装后再逐口紧固,避免逐根对口导致串动和碰撞成品^[2]。第三,阀门、过滤器、止回阀等局部阻力构件宜形成组件段,预制阶段核对阀体流向标识、手柄旋转半径和检修侧净距,组件段两端设置可拆短节或活接用于二次微调和更换,法兰连接按规格配套螺栓并记录最终紧固顺序与力矩点,满足大口径钢管常用沟槽或法兰连接的现场习惯。第四,预制段进场后按系统、区间和安装顺序编号分堆,端口采用盲板或塑料盖封堵并加防尘膜,垫片按批次干燥存放并随段配套发放,拼装前由班组用无纤维布清洁密封面并检查划伤,螺栓分三次对角紧固并复核法兰间隙均匀,外露螺纹宜保持2~3扣,最后在接口处做可追溯标记,编号宜采用系统代号加区段序号的规则,阀件组件段另加流向箭头和检修侧标识,封堵拆除前复核介质标识与坡向,公称直径较大部位多采用沟槽式管件或法兰连接并保持扳手操作面外露。

3.2 综合装配式支吊架的成排承载与快速定位

地下车站管线密集区推进装配式安装时,应把综合装配式支吊架作为成排受力与快速定位的基准单元来组织施工。第一,技术负责人应在综合排布复核后先划定同排承载框架的荷载边界,将风管、水管、桥架按重量与检修需求分层归并到一套横担与立柱体系内,横担宜选用槽型钢与可滑移锁扣螺母组合,抱箍与连接件尽量统一规格并按管径配置限位垫片,使各专业通过孔位实现5~15mm的标高微调并顺带修正墙体偏差,同时对单榀支架的集中荷载进行复核并预留不少于10%的安装余量,必要时在多管同跨段把横担截面提高一个规格,避免后续加挂造成超载。第二,现场放线应以线路方向控制基准线和分区高点为依据,班组按先骨架后管线的顺序沿区间成排立架,先安装底座锚栓并复核孔距与边距,再拼装立柱与主横担形成连续框架,成排支架

的轴线偏差宜控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内,支架排距可按1.5~2.0m结合管径与荷载调整,同排横担标高采用激光水平仪逐点校核,确认骨架稳定后再按系统从大到小挂装,挂装后立即复测坡向、净空与检修面宽度并将偏差回写到调整清单便于统一复核。第三,装配式连接件的预紧必须与受力点对应,紧固前施工员应清洁齿槽面并检查螺纹完整,横担端部、设备接口附近及多管集中点增设加强角码或双连接件,螺栓按对角分两次拧紧并记录力矩值,振动区关键节点加防松垫圈并在24h内复检锁扣螺母位置,发现滑移及时回紧。第四,靠近转弯、分支与设备接口处的成排支架宜采用可调限位构造,将承载构件与侧向限位分开设置,限位螺栓与管束之间预留2~3mm间隙并配置柔性垫片,必要时在接口两侧各布置一榀支架分担位移,避免热胀冷缩或设备振动把应力集中到法兰、软接与穿墙套管处^[3]。

3.3 预留预埋嵌缝槽的免开孔固定

为降低地下车站成品结构二次钻孔对混凝土与防水层的扰动,地下管线支吊架宜在土建阶段通过预留预埋嵌缝槽实现免开孔固定。第一,土建单位应依据综合管线深化成果在顶板或侧墙弹出走向控制线,按支吊架间距一般1.2~1.5m布置预埋槽道,施工员需复核保护层厚度、钢筋避让与端部锚固,槽道固定点宜每500~600mm设置一道,端部距结构边缘不小于100mm,槽口用封盖或泡棉条封闭防止浆体进入,浇筑振捣过程安排专人看护槽道直线度与标高,拆模后清理槽口并复测,中心线偏差宜控制在 $\pm 5\text{mm}$ 。第二,机电安装时施工员以槽道作为连续基准,将T型螺栓或滑块螺母推入槽内并旋转90°完成咬合,再连接成品支吊架立柱、横担,通过槽内滑移完成平面与标高微调,单点调节量宜控制在 $\pm 30\sim 50\text{mm}$ 范围内,成排管线按先主干后支管、先大管后小管的顺序统一校正,同一区段可在槽道侧面做编号标识以便复位,安装顺序宜先挂立柱再挂横担,横担成排后统一上管复核中心距与坡向。第三,连接件防松采用双螺母或锁紧垫片并落实力矩控制,常用M10~M12紧固力矩可按说明取40~80N·m区间对称分次拧紧,振动敏感区在横担端部增设限位片或防摆拉条,紧固后在关键点做扭矩标记并在24h内复紧一次,并留存紧固记录,外露螺纹涂防咬合剂并对镀锌层划伤处冷镀锌修补。第四,后期增减管线时先核对槽道允许荷载与支吊架受力路径,再在既有槽位并联横担、增设抱箍完成扩展,横担两侧预留至少50mm安装余量并复核与吊顶龙骨、检修口的净距,闲置槽段用封条恢复防尘防浆,新增连接点完成后二次复紧并补齐标识。

3.4 阀件与检修段的模块化组件就位

为降低地下站内狭窄区段的返工率,阀件与检修段宜按可整体吊入、可快速对接的思路组织模块化组件就位。第一,项目技术负责人应以系统图与阀门表为依据,将阀门、过滤器、软接、压力表取压三通、放空与排气排水点在加工场预装成阀组模块,模块长度宜控制在1.5至3.0m以便通

过门洞与吊装通道,两端统一采用法兰或沟槽等标准连接口并预留 20 至 30mm 装配余量,预装时应完成阀门启闭方向校核与手轮净距复核,避免现场转向改位。预装完成后加工人员应对端口平行度、法兰对角线差与阀杆可操作角度进行复测,端口平面度宜控制在 1mm 以内,并在模块外壁标注介质流向与阀门编号,现场按编号对位安装即可。模块最低点可预留排污口并配封帽,出厂前保留预检记录。第二,阀组模块应自带受力支点并与综合支吊架形成闭合受力路径,支点位置应避开阀体薄弱部位并设置可调整铁或滑移座,安装人员应在就位后先锁定支点再连接两端管段,使阀体重量不由相邻接口承担,同时按介质温度设置限位间隙避免热胀顶推,支点螺栓宜采用双螺母或防松垫片并于 48h 回拧^[4]。第三,检修频繁的部位应在模块内设置可拆短节或伸缩短管并明确拆装方向,短节两侧宜采用活接或带拆装长度的法兰,净空不足时应预留不小于阀门外形 1.2 倍的检修侧距离,并在模块上标识起吊点与拆卸顺序,使更换密封、滤网清理与仪表校验不牵连成排管线,必要时在模块端部预留盲板位以便分段隔离。第四,运输包装宜采用木箱或钢框并设置防扭支撑,端口用盲板或封帽封堵防尘进水,吊装时用导向绳控制摆幅在 50mm 内,落位后复核法兰面清洁度、垫片完好与同轴偏差小于 2mm,螺栓按对角分三次紧固并记录力矩,随后随系统试压一并进行接口巡检。

3.5 穿越与过渡段的快速拼装与变形协调

轨道交通车站地下管线在穿墙、穿板、变标高与汇集转折处最易出现返工,装配式做法要把定位、密封与位移吸收同步固化为可复制的节点。第一,穿墙穿楼板宜在土建阶段预埋成品刚性或柔性防水套管,套管内径一般比穿越管外径大 50mm 左右以留足找正与填充空间,安装班组先用限位环或定位卡将管段居中并锁定标高,再分层压紧可拆式密封圈和压盖螺栓,压紧后复测偏心量不宜大于 5mm,最后做端面封口与外露螺栓防锈处理,避免依赖现场抹灰随意填塞造成空鼓渗漏。第二,变标高与转弯过渡段宜采用工厂预制偏心变径、45° 或 90° 弯头与短节组合控制转折半径,现场按放样线先拼主段再拼过渡段,并在转折前后各设置一

处导向支座,导向间隙控制在 2 至 3mm,使位移方向明确,严禁用单个法兰接口硬拉对口导致应力积累。第三,长距离成排管线在温差与结构微变形作用下需预留可动量,宜按介质温度范围选用橡胶软接或金属伸缩节,并与固定支座、导向支座成组布置,通常通过固定点承受伸缩节轴向力、导向点引导位移进入伸缩节的方式组织受力,同时将穿墙点与设备口设置为导向而非固定,安装后用划线法记录冷态预拉伸量并留存复测记录。第四,汇集段多管并行时应采取分层与分区拼装,先拼装占空间最大的主干段和阀组并完成限位,再拼装支管段与旁通段并逐段复核支承点,现场可先在地面按编号试拼并校核交叉净距,常用管外表面至相邻构件净距宜不小于 20mm 以便保温与检修,同时支吊架先临时紧固留出 10 至 15mm 的调节余量,待整段对口完成后再按扭矩值终拧,确保每个接口都在可调范围内完成受力闭合^[5]。

4 结语

轨道交通地下管线安装采用装配式技术,应把工厂预制的稳定性与现场装配的可调性结合起来,围绕“分段可运输、成排可定位、节点可拆装、过渡可变形”的目标组织施工。本文提出的管段单元化、综合装配式支吊架、嵌缝槽免开孔固定、阀件模块化以及过渡段变形协调等做法,均以常见材料与常用连接工艺为基础,能够适配中国地铁车站与附属用房的狭小空间条件,并为后续同类工程提供可直接套用的安装要点。

参考文献

- [1] 陈东伟.BIM技术在城市轨道交通管线装配式施工中的应用[J].建筑与装饰,2025(1):178-180.
- [2] 张广鹏.轨道交通装配式车站施工技术研究[J].建筑机械化,2023.
- [3] 赵洋.城市轨道交通明挖装配式地下结构设计技术及方法[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(002):000.
- [4] 王俊.预制装配式技术在城市轨道交通地铁出入口建设中的应用分析[J].市政技术,2025,43(2):63-72.
- [5] 沈洁.整体装配式机电安装技术在地下轨道交通消防泵房中的应用[J].安装,2023(11):68-71.

Application Analysis of Integrated Geophysical Method in Underground Pipeline Detection

Shuaiwei Li

519 Brigade of North China Geological Exploration Bureau, Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

As urbanization advances, underground pipelines—functioning as the “lifelines” of urban infrastructure—have become increasingly complex and concealed. Accurate detection of their locations, depths, and properties has become crucial for ensuring urban safety and advancing underground space development. This study addresses the limitations of traditional single-method detection techniques, such as insufficient precision and poor adaptability. By leveraging the application characteristics of integrated geophysical methods, it explores their potential in underground pipeline detection. Through analyzing core features like multi-method collaborative detection and trenchless operations, as well as the entire workflow from preliminary surveys and method optimization to data collection and result interpretation, the research concludes that integrated geophysical methods can significantly enhance detection accuracy and efficiency, reduce construction risks, improve pipeline archive informatization systems, and provide reliable technical support for urban underground pipeline management. These findings hold significant implications for promoting standardized development in underground pipeline detection technology.

Keywords

integrated geophysical exploration; underground pipeline detection; detection accuracy; pipeline archives; trenchless excavation

综合物探法在地下管线探测中的应用分析

李帅为

华北地质勘查局五一九大队，中国·河北 保定 071000

摘 要

随着城市化进程持续推进，地下管线作为城市基础设施的“生命线”，其分布日益复杂、隐蔽性突出，精准探测其位置、埋深及属性成为保障城市安全运行、推进地下空间开发的关键。本文旨在解决传统单一探测方法精度不足、适应性差等问题，结合综合物探法的应用特点，探讨其在地下管线探测中的应用路径与重要性，通过梳理多方法协同探测、非开挖作业等核心特征，分析前期勘察、方法优选、数据采集及成果解译等全流程应用，得出综合物探法可有效提升探测精度与效率，降低施工风险，完善管线档案信息化体系，为城市地下管线管理提供可靠技术支撑的结论，对推动地下管线探测技术规范化发展具有重要意义。

关键词

综合物探法；地下管线探测；探测精度；管线档案；非开挖作业

1 引言

地下管线承担着能源输送、信息传递、给排水等核心功能，直接关系到城市正常运转与公共安全。当前，城市地下空间开发力度不断加大，老旧管线改造、新管线铺设工程日益增多，但部分区域管线历史资料缺失、分布混乱，传统探测方法受地质条件、环境干扰等因素限制，难以满足精准探测需求。在此背景下，综合物探法凭借多方法协同、环境适应性强等优势，逐步取代单一探测手段，成为地下管线探测的主流技术，本文围绕综合物探法的应用特点、重要性及

应用路径展开分析，为相关探测工程实践提供理论与技术参考。

2 综合物探法的应用特点

2.1 多方法协同探测的互补性与冗余校验机制

综合物探法区别于单一探测技术的核心优势体现在多种探测方法的系统性协同，这种协同模式并非简单的方法叠加，而是基于不同探测技术的原理差异构建起相互补充、相互印证的探测体系。地质雷达法凭借高频电磁波的穿透性，擅长捕捉地下管线的具体位置、走向及浅层分布细节，却在复杂地层或深埋管线探测中易受介质干扰导致数据偏差；电磁感应法则依托电磁信号的传导特性，能够精准识别金属管线的材质与埋深，对非金属管线的探测效果却相对有限，通

【作者简介】李帅为（1998-），男，中国河北沧州人，硕士，助理工程师，从事地球物理勘查研究。

过将两种方法及其他适配技术协同运用,可有效弥补单一方法的应用局限,实现不同探测维度数据的相互补充,让地下管线的探测信息更具完整性。

2.2 非开挖式作业的环境适应性与空间约束适配性

非开挖式作业作为综合物探法的核心作业模式,其突出优势在于对复杂环境的超强适配能力,尤其适用于城市核心区、老旧小区等地面环境敏感、周边设施密集的区域。城市核心区往往交通流量大、地面建筑密集,传统开挖式探测不仅会占用大量道路资源,影响正常交通秩序,还可能对周边市政设施造成破坏;老旧小区则因管线布局混乱、地面空间狭窄,开挖作业易干扰居民日常生活,甚至引发安全隐患^[1]。综合物探法的非开挖作业无需破坏地面表层,通过地面探测设备即可实现地下管线的精准探测,大幅减少对地面交通、居民生活及周边市政设施的干扰,降低作业过程中的环境影响与安全风险。

2.3 探测精度、效率与成本的动态匹配特征

综合物探法的核心实用价值体现在能够根据地下管线探测工程的实际需求,实现探测精度、作业效率与成本投入的动态平衡,打破三者之间的相互制约关系。地下管线探测工程的需求存在显著差异,管线埋深从浅层到深层不等,材质涵盖金属、非金属等多种类型,探测范围也从局部区域延伸至大面积片区,不同需求对探测精度、作业效率的要求各不相同,成本投入也需随之调整。针对埋深较浅、材质单一、探测范围较小的简单场景,可采用操作简便、效率较高的探测方法,在保证基础精度的前提下控制成本投入;针对埋深较深、材质复杂、探测精度要求高的复杂场景,则可整合多种高精度探测技术,适当提升成本投入以保障探测精度,同时优化作业流程提升效率。

3 综合物探法应用在地下管线探测中的重要性

3.1 保障城市地下空间开发利用的基础数据支撑

城市地下空间的开发利用是缓解城市土地资源紧张、提升城市承载能力的重要途径,而地下管线作为城市地下空间的核心组成部分,其分布情况、埋深、材质等基础数据直接决定着地下空间开发利用的科学性与安全性^[2]。综合物探法通过多方法协同探测,能够精准获取地下管线的全面数据,为城市地下空间规划提供翔实的基础依据,帮助规划人员明确地下管线与规划项目的空间位置关系,避免地下空间开发与管线布局发生冲突,在综合管廊建设过程中,精准的管线探测数据可指导管廊线路的合理规划与施工,确保管廊建设与现有地下管线的协调衔接,减少建设过程中的返工与整改。

3.2 降低工程施工中管线破损与次生灾害风险

工程施工中地下管线破损事故频发,不仅会影响城市基础设施的正常运行,还可能引发燃气泄漏、供水中断、电力中断等次生灾害,威胁施工人员安全与公共安全,造成巨

大的经济损失与社会影响。综合物探法在工程施工前的管线探测中发挥着不可替代的作用,其通过精准定位地下管线的位置、埋深、走向及材质,能够为施工人员提供清晰的管线分布指引,让施工人员明确施工区域内管线的具体情况,避免施工过程中因盲目作业导致的管线破损,针对燃气、供水、电力等高危管线,综合物探法的精准探测能够有效规避破损风险,防止因管线破损引发的爆炸、漏水、触电等安全事故。

3.3 完善地下管线档案信息化与动态更新体系

地下管线档案是城市地下管线管理的重要基础,当前部分城市地下管线档案存在数据缺失、信息滞后、档案不规范等问题,严重影响地下管线管理的精细化与规范化水平。综合物探法所获取的精准探测成果,能够有效补充现有地下管线档案中缺失的管线信息,修正档案中存在的错误数据,完善档案的完整性与准确性,推动地下管线档案从传统纸质档案向信息化档案转型,依托探测数据构建的地下管线信息化档案,能够实现管线信息的集中管理、快速查询与高效利用,为地下管线的日常维护、检修提供便捷支撑。

4 综合物探法在地下管线探测中的应用路径

4.1 前期场地勘察与管线资料收集及预处理

作为综合物探法开展地下管线探测的首要环节,且直接决定后续探测工作针对性与效率的前期场地勘察、管线资料收集及预处理,需将场地各类关键信息,并对资料进行系统性梳理,其中场地勘察聚焦于地形地貌、地质条件、周边环境这三大核心内容,地形地貌调查通过实地摸排探测区域坡度、高差、植被覆盖情况以及地面障碍物分布来明确设备布设可行性与探测盲区,地质条件调查以排查地层岩性、土壤含水量、地下水埋深等因素为重点并分析各类地质介质对探测信号的干扰程度,周边环境调查则着重梳理探测区域内建筑物、道路、市政设施分布且划分作业禁区与安全防护区域;而管线资料收集需涵盖区域内原有管线档案、施工记录、竣工资料等,重点提取管线材质、埋深、走向、铺设年限等核心信息的同时排查缺失与模糊的资料条目^[3];资料预处理对收集到的各类资料进行筛选、核对与整合,剔除错误及冗余信息,对缺失资料标注补充方向,并通过坐标校准与数据标准化处理,将分散资料整合为统一规范的基础数据库以为后续探测方案制定提供精准支撑。

4.2 基于管线材质与埋深的物探方法优选组合

地下管道材料性质和埋藏深度的不同情况会直接对地球物理勘探手段的适用程度产生影响。综合地球物理勘探方法的一个关键运用途径,就是将这两方面的特征相互结合,实现勘探手段的精确挑选和合理搭配,解决单一手段在针对性方面不足的问题。由金属构成的管道具有良好的电磁传导性能,对于埋藏深度较浅(不超过五米)的金属管道,可优先采用电磁感应的勘探方式,这种方式操作起来方便快捷、反应灵敏,能够迅速获取管道的位置和延伸方向;当金属管

道的埋藏深度超过五米时,电磁信号容易出现衰减现象,此时需要结合地震波勘探法,借助波速的差异来精确确定管道的埋藏深度和断面形状。非金属材质的管道(像聚氯乙烯管、水泥管等)电磁传导能力较弱,使用电磁感应法进行勘探时效果不理想。对于浅层的非金属管道,可以选用地质雷达勘探法,利用高频电磁波的反射特性来获取管道的轮廓;而对于深层的非金属管道,则需要结合红外勘探法,通过管道与周围介质之间的温度差异来辨别管道的位置。

4.3 现场数据采集、质量控制与误差校正流程

综合物探法地下管线探测的核心实施环节由现场数据采集、质量控制与误差校正共同构成。而严格遵循规范流程,以确保采集数据的真实性、完整性与准确性,是这一核心环节的必然要求。其中,现场数据采集前,不仅需完成设备校准这一基础操作,还要根据探测方法与场地条件,对设备参数进行针对性调整。同时,明确采集点布设密度,即在管线密集区域将采集点加密,且把间距控制在 1—2 米范围之内;而在管线稀疏区域,则适当放宽间距,但保证不超过 5 米。在采集过程中,需保持设备稳定,并且同步记录采集点坐标、探测信号强度等辅助信息,以此避免因设备晃动、信号干扰等因素导致的数据失真情况出现。质量控制作为贯穿采集全过程的重要工作,需设立现场复核岗,对采集数据进行不低于总采集量 15% 比例的实时抽检,重点核查数据的完整性与一致性。一旦发现异常数据,需及时标记并安排重新采集。误差的产生主要源于地层干扰、设备精度不足、操作偏差这三大因素,因而在进行误差校正时需针对不同类型的误差采取相应的处理措施,即对于地层干扰导致的误差通过滤波处理剔除干扰信号,对于设备精度不足的情况需重新校准设备参数,对于操作偏差则通过对比相邻采集点数据并补充采集的方式实现误差修正,最终确保采集数据能够符合探测标准的相关要求。

4.4 探测成果解译、验证与成果归档应用模式

探测结果剖析、确认与整理运用作为多手段地球物理探测地下管道作业的最后阶段,要达成结果精确剖析、有力确认与快捷运用,构建起探测工作的完整管理流程。结果剖

析得依靠先前的资料和现场收集的数据,运用“数据参照+特点研究”的办法,参照不同地球物理探测手段的信号特点,分析管道的具体方位、埋藏深度、材料性质、截面规格等关键内容,标记出管道破损、老化等异常状况,生成初步的剖析报告。在剖析过程中,要避免仅依据单一数据进行剖析的不足,借助多种探测手段获取的数据相互验证。结果确认以挖掘确认为重点,挑选管道的关键节点、异常区域以及剖析不明确区域进行局部挖掘,将挖掘的实际状况与剖析结果进行比对,纠正剖析误差,确认通过后才能形成最终结果。结果整理要依照信息化、标准化的准则,把探测数据、剖析报告、确认记录等进行整理分类,输入地下管道信息化管理系统中,注明整理日期、探测人员等信息,让结果具备可追溯性。运用形式主要集中在管道管理和工程建设两个方面,在管道管理中,能够依据结果开展日常保养、隐患排查工作,在工程建设中,能够提供精确的管道数据指导,同时为地下管道的动态更新和城市地下空间的规划提供持续的数据支持。

5 结语

综合物探法凭借多方法协同、非开挖作业、精准高效等优势,在地下管线探测中发挥着不可替代的作用,其应用有效解决了传统探测方法的诸多局限,为城市地下管线的精准探测与科学管理提供了可靠技术保障,随着物探技术的不断升级与创新,综合物探法的探测精度与效率将进一步提升,其应用场景也将不断拓展。未来,需持续优化探测方案,完善应用路径,推动综合物探法与信息化技术深度融合,为城市地下空间开发、管线安全运维提供更有力的支撑,助力城市基础设施高质量发展。

参考文献

- [1] 张小涛. 综合物探法在地下管线探测中的应用[J]. 工程技术研究, 2025, 10(18): 226-228.
- [2] 朱军锋. 探析综合物探方法在地下管线探测中的运用[J]. 新型工业化, 2022, 12(03): 49-51.
- [3] 孙文龙. 基于综合物探技术在地下管线探测中的应用分析[J]. 智能城市, 2019, 5(17): 83-84.

Analysis of the Principle of the Coordination between FCB Logic and Unit Relay Protection in Gas Turbine Unit

Xiaofeng Chen

Shenzhen Datang Baochang Gas Power Generation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518110, China

Abstract

FCB (Fast Cut Back) is a method for black start. Units with FCB capability can serve as unconventional black start power sources for the grid, helping restore normal operation in the shortest possible time, which yields significant social and economic benefits. In recent years, this technology has been extensively researched and applied. For gas-fired generating units connected to the grid via generator outlet circuit breakers, the FCB logic design follows these principles: the turbine and boiler must remain offline during shutdown, the gas turbine must switch to household load mode, the main transformer-side circuit breaker should be disconnected first, and the generator outlet circuit breaker must not be tripped. Therefore, it is essential to investigate how the relay protection actions of generating units coordinate with FCB logic during actual operation under full or partial grid outages, ensuring the units can smoothly achieve FCB operation with their own plant power supply.

Keywords

black start; FCB logic; frequency protection; generator set protection; plant power switching

燃气机组 FCB 逻辑与机组继电保护的配合原则分析

陈晓峰

深圳大唐宝昌燃气发电有限公司, 中国 · 广东 深圳 518110

摘 要

FCB是黑启动实现的方式之一,具有快速甩负荷(Fast Cut Back, FCB)能力的机组可以作为系统非常规黑启动电源,有助于电网在尽可能短的时间内恢复正常,具有巨大的社会和经济效益,近年来得到了广泛的研究和应用。采用发电机出口断路器并网的燃气发电机组在策划FCB逻辑时遵循的原则是在汽机锅炉停运的同时不联跳燃机,同时要确保燃机转换为houseload模式,优先断开主变侧断路器,发电机出口断路器不能分断。因此需要探讨在电网全部或局部失电实际运行时的发电机组继电保护动作过程与FCB逻辑的配合,从而保证机组顺利实现自带厂用电的FCB运行方式。

关键词

黑启动; FCB逻辑; 频率保护; 发电机组保护; 厂用电切换

1 引言

随着美国和西班牙电网出现的大面积停电及南方区域恶劣气候的影响,电网对辖区所属电厂的黑启动功能越来越重视,大大提高了两个细则中黑启动的专项补贴,《南方区域电力并网运行管理实施细则》《南方区域电力辅助服务管理细则》里明确定义FCB功能是指并网机组在高于某一负荷定值运行时,因内部或外部电网故障与电网解列,瞬间甩掉全部对外供电负荷,但未发生锅炉主燃料跳闸(MFT)的情况下,用以维持发电机解列带厂用电或停机不停炉的自动控制功能,并规定具有FCB功能的机组每月按15万元/台给与补助,同时明确如果在需要实施黑启动时FCB功能失

败则处以一次480万的处罚,因为黑启动发生的几率比较少,为了争取黑启动的补贴,具备FCB能力的机组基本上都申请实施了FCB功能的测试,但是其中的风险也是存在的,特别是由于没有统一的规范和标准,各电厂实施的FCB逻辑难免有考虑不周的地方,笔者就南方某电厂在实际运行发生的几起FCB功能保持失败的案例进行了总结和完善,将FCB逻辑与机组保护定值的配合原则进行探讨,供广大同行参考。

2 燃机 FCB 的典型逻辑设计及原因

制造厂一般对燃机在低负荷下的燃烧模式能快速的进行调整,但是在联合循环机组中余热锅炉及汽机相关调节回路未针对FCB工况进行单独设计,无法保障FCB触发时汽机及余热锅炉有效配合,避免燃机跳机。

因此逻辑设计主要完善两个主要功能:FCB触发逻辑;

【作者简介】陈晓峰(1977-),男,中国海南琼山人,本科,工程师,从事电力系统自动化研究。

FCB 动作后锅炉侧（如旁路、汽包水位、轴封等）重要回路的超驰控制逻辑及汽机侧的响应逻辑。

2.1 FCB 触发逻辑

满足燃机触发燃机 FCB 功能（HOUSE LOAD）信号并维持维持 120 秒：

主变高压侧开关 52L 在分位，发电机出口开关在合位，触发 FCB 动作信号跳开；

在发电机出口开关处于合闸状态下，燃机功率从 135MW（5 秒倒延时）以上降到 27MW 以下延时 0.25 秒；

2.2 FCB 动作联锁

主变高压侧开关跳闸触发的 FCB 动作，联锁跳闸汽轮发电机组。

FCB 动作，超驰开汽机高、中、低压旁路，高、低压旁路 3 秒。旁路超驰开结束后，进入压力、温度自动调节方式。高、中、低旁压力设定值分别为高、中、低蒸汽流量测量值函数对应值。

FCB 动作后，高、中、低压汽包水位切至单冲量调节模式，水位设定值维持原设定值不变

FCB 动作，联锁关闭锅炉过热汽温、再热汽温调节阀门、电动门。

FCB 动作，辅汽至轴封压力调节阀 5 秒超驰开至 50%，然后自动调节，轴封压力设定值 20kPa。

FCB 动作，运行凝结水泵输出至 100%。

汽包水位、辅汽压力、汽机轴封压力、凝结器水位等主要调节系统自动投入自动。屏蔽汽包水位、辅汽压力、汽机轴封压力、凝结器水位等系统被调量与设定值偏差大、阀门与指令偏差大切手动功能。

从 FCB 逻辑的设定来看，一般对燃机 FCB 方式实现的充分必要条件有两条：一是保证优先跳燃机主变侧高压断路器，发电机出口断路器不能断开；二是燃机不能发生连锁跳机，与燃机跳机相关的机炉电大连锁务必在 FCB 触发后快速切除，保障燃机低负荷下的正常运行。本文仅就第一条实现的逻辑及定值做详细的分析。

3 频率保护的定值计算原则

3.1 实现 FCB 触发的主要方式

要实现保护优先跳燃机主变侧高压断路器一般采用发电机频率保护来实现，更改发电机频率保护出口矩阵，保护出口只跳变高侧开关。

其频率定值如下表所示：（原燃机发电机与汽轮发电机超频保护为：51.5Hz，延时 10s。）

序号	定值名称	定值范围	整定步长	整定值
	I 母高频切机频率	50.00 ~ 55.00Hz	0.01Hz	52.9
	I 母高频切机延时	0.05 ~ 25s	0.01s	0.2
	频差异常告警定值	0.00 ~ 1.00Hz	0.01Hz	0.05
	I 母低频切机频率	50.00 ~ 55.00Hz	0.01Hz	47.5
	I 母低频切机延时	0.05 ~ 25s	0.01s	0.2

3.2 保护定值的计算原则

《南方电网大型发电机变压器继电保护整定计算规程》规定：300MW 及以上的汽轮机，运行中允许其频率变化的范围为 48.5 ~ 50.5Hz。

低于 48.5Hz 或高于 50.5Hz 时，累计允许运行时间和每次允许的持续运行时间国内尚无正式的统一规定，应综合考虑发电机组和电力系统的要求，并根据制造厂家提供的技术参数确定。

当频率异常保护动作于发电机电解列时，其定值应与低频率自动减负荷、高频率切机装置的定值配合。

低频率保护动作于信号或程序跳闸或停机。高频率保护动作于解列灭磁或程序跳闸。

在实施 FCB 逻辑时，由于出口跳闸的主体发生了变化，要保证发电机继续运行，因此必须在系统异常工况下对频率保护与发电机其他保护进行核算，确保主变出口断路器优先跳闸。

3.3 系统异常时的工况分析

现在大电网运行，出现黑网的情况的概率很低，在恶劣天气如台风冰雪等天气可能会出现局部电网停电的可能，如广州 2018 年山竹导致部分区域的电网断电超 3 天以上，急需网内电厂具备自启动的能力，局部电网的断电只有两种可能性，分析如下：

突发电网系统崩溃（可能性非常低），发电机组出现小马拉大车的现象，将

会出现机组失步振荡的可能性，按现有保护逻辑，失步保护和过负荷反时限将有可能动作跳发电机出口断路器 52G 开关，FCB 触发失败。

因此必须保证失步保护和过负荷反时限的出口逻辑和定值必须与频率保护中的低频保护配合；

电源点孤网运行：这种可能性在异常恶劣的气候下有发生的可能性，网内

落地负荷小于发电机组的额定出力，从现象上来看是大马拉小车，具体表现是燃机发电机的负荷快速下降，转为 houseload 模式，频率和电压上升，这种异常工况下如果没有达到设定的保护动作值，则发电机出口断路器 52G 和主变出口断路器 52L 都在合位，则有可能出现燃机逆功率保护和过电压动作跳 52G 的事件，导致 FCB 失败。在这种孤网运行的状况下，由过频保护定时限动作，按现有大型发电机组的运行极限，发电机在 48.5-50.5Hz 下可以长期运行，因此频率保护的设计低频保护发报警，过频保护出口跳闸，现有过频保护的整定 51Hz 时 180 分钟，51.5Hz 时 30 分钟的整定值设定，如果将发电机频率保护设定为跳 52L 开关按这个定值在变电站孤网运行时极有可能会动作时间达不到动作值的情况，整定在 51.5Hz 以上有可能动作值达不到。因此在设定频率保护动作跳 52L 开关的逻辑时定值的选择尤为关键。

因此过频保护的动作值与动作时间必须与过电压保护配合,优先动作过频保护跳主便高压侧断路器 52L,不能因过电压保护动作跳发电机出口断路器 52G 导致 FCB 运行方式的失败。

3.4 FCB 功能中机组低频保护定值设定的基本原则

在实际运行中一旦出现黑网时局部电网的负荷大于发电机组的额定出力的异常现象时,发电机组不会瞬时跳机,将会低频低压过流且失步,这时机组的对称过负荷保护将会启动,因此在核定 FCB 动作逻辑中的低频保护动作值必须与发电机组的对称过负荷反时限保护配合,要确保低频保护先出口。

$$t = \frac{K_{tc}}{I_{*}^2 - K_{sr}}$$

$$T_s = \frac{K_{tc}}{(I_{s.op} / \frac{I_{gn}}{n_a})^2 - K_{sr}}$$

反时限上限动作时间 T_u : 按与线路纵联保护配合整定,取 $T_u = 0.5 \text{ s}$ 。

反时限上限动作电流: 按保护装置的定子绕组反时限过流保护动作特性曲线上 $T_u=0.5$ (反时限上限动作时间) 所对应的动作电流整定。

$$I_{u.op} = \sqrt{\frac{K_{tc}}{T_u} + K_{sr}} \times \frac{I_{gn}}{n_a}$$

在 FCB 逻辑中频率保护的動作时间整定值一定要小于过负荷反时限的上限动作时间 T_u 。因此设定过频保护动作时间 $T=0.2\text{S}$, 小于 T_u 设定的 0.5S 。

3.5 FCB 功能中机组过频保护定值设定的基本原则

在局部区域孤网运行时,如果落地负荷小于发电机组的额定出力,将会出现燃机迅速甩负荷达到 houseload 动作的条件而触发 FCB 启动,这时如果同一条线路上的汽机如果不会迅速打闸跳机,则会出现燃机负荷快速下降甚至出现逆功率动作的现象,因此触发 FCB 后首先要切除汽机的负荷,燃机在甩负荷的过程中会出现过频过压的现象,因此 FCB 逻辑中在设定过频保护动作时间时一定要小于发电机过压保护动作的时间。根据《南方电网大型发电机变压器继电保护整定计算规程》发电机过电压保护整定动作时间计算依据为: 定子过电压保护的整定值,应根据电机制造厂提供的允许过电压能力或定子绕组的绝缘状况决定。

$$U_{op} = \frac{1.3U_{an}}{n_v}$$

动作时间整定依据:

$t=0.5\text{s}$, 动作于解列灭磁或停机。

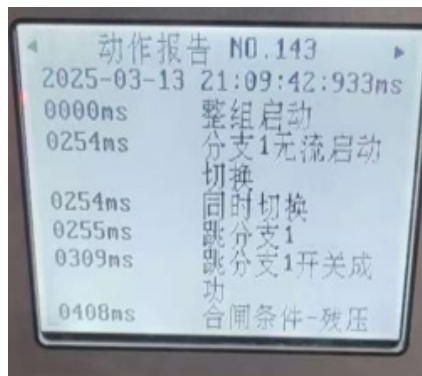
因此 FCB 逻辑设定的过频保护动作时间值为 0.2S , 小于过电压保护的動作时间 0.5S 。

4 厂用电快切装置的定值与 FCB 逻辑的关系

基本上所有的火电厂在规划 FCB 逻辑时都不会去考虑厂用电切换定值对 FCB 运行方式的影响,因此忽略了对厂用电快切定值的核对。南方某电厂在 2025 年 3 月曾出现一次出线线路跳闸而 FCB 维持失败的案例,主要原因就是在切换至 FCB 模式时发生了厂用电快切,致使机组自带厂用电模式失败,案例发生过程如下:

2025 年 3 月某日,机组运行过程中,出线线路发生故障,线路差动保护动作,跳 1 号燃机和 2 号汽机主变高压侧断路器,燃机 FCB 模式触发,机组在转 FCB 运行模式的过程中发生了厂用电切换的异常动作事件,致使 FCB 模式保持失败,事后查阅快切装置动作如下:

从动作现象来看,快切装置无流启动切换,检查快切定值及厂用电切换的二次设计图,快切装置没有设计电流回路,而 FCB 低频保护和无流定值如下:



描述	定值	发电机频率保护定值	序号	定值名称	数值
有压定值	70.000		1	低频 I 段频率定值	48Hz
分支1无流定值	0.040		2	低频 I 段累计延时	300M
分支2无流定值	0.040		3	低频 II 段频率定值	47.8Hz
并联切换压差	5.000		4	低频 II 段延时	1min
并联切换频差	0.15		5	低频 III 段频率定值	47.5Hz
并联切换相差	15		6	低频 III 段延时	0.5S
并联跳闸延时	0.500				
同时切换合闸延时	0.030				
并列启动合闸延时	0.500				
失压启动定值	60.000				
失压启动时间	0.800				
无流低频定值	49.500				
无流启动时间	0.100				
失步低压定值	70.000				

从定值单上分析,由于没有接厂用电进线开关的电流,因此整个快切装置的无流保护相当于低频保护,其定值为 49.5Hz ,远高于 FCB 动作逻辑中的 47.5Hz 的动作值,动作时间 100 毫秒,因此在转成 FCB 模式的过程中,一旦出线低频到 49.5Hz ,则厂用电快速进行切换,从而导致 FCB 模式保持失败。

因此对于未接厂用电进线开关电流回路进入快切装置的定值设定中,要将无流启动关闭。

5 结论

对于燃气轮机的 FCB 模式的逻辑设定值,要充分考虑保护定值的配合,配合原则为:1、过频保护的動作时间要小于机组的过电压保护動作时间;2、低频保护的動作时间要

小于对称过负荷的动作时间上限值；3、对于厂用电快切装置没接入电流回路的定值设定，一定要将无流启动切换的功能关闭。

参考文献

[1] 《中国南方电网大型发电机变压器继电保护整定计算规程/

CSG1204025-2017》南方电网企业标准，2017年5月发布。

[2] 三菱燃机用户手册

[3] 《南方区域电力并网运行管理实施细则》

[4] 《南方区域电力辅助服务管理细则》

[5] 南瑞继保《PCS-9655快速切换装置说明书》

Application of Green Building Concept in Construction Management

Yanbing Wang

Tiehan Ecological Construction Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

As environmental issues become increasingly severe, the concept of green buildings has become a hot topic in the construction industry. Green buildings not only focus on the energy efficiency of buildings but also involve resource conservation, environmental protection, and sustainable development across multiple aspects. In construction project management, the application of green building concepts not only promotes the savings and selection of building materials, enhances the environmental friendliness of construction technologies, but also achieves energy-saving and emission-reduction goals throughout the building's lifecycle. By optimizing design, construction process management, and post-operation maintenance, the green building concept effectively reduces the negative environmental impact of construction and minimizes energy consumption and water resource waste. This paper starts from the core principles of green buildings and analyzes their specific application paths in construction management, exploring the unique advantages of green buildings in improving project quality, energy conservation, emission reduction, and environmental protection.

Keywords

green building; construction management; sustainable development; energy saving and emission reduction; resource conservation

绿色建筑理念在建筑工程施工管理中的应用研究

王艳兵

铁汉生态建设有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

摘 要

随着环境问题日益严峻,绿色建筑理念已成为建筑行业的热点话题。绿色建筑不仅关注建筑的能源利用效率,还涉及资源节约、环境保护以及可持续发展等多个方面。在建筑工程施工管理中,绿色建筑理念的应用不仅促进了建筑材料的节约与选择,提升了施工技术的环保性,还实现了建筑生命周期中的节能减排目标。通过优化设计、施工过程管理及后期运营维护,绿色建筑理念能够有效减少施工对环境的负面影响,并降低能耗和水资源的浪费。本文从绿色建筑的核心原则出发,分析了其在施工管理中的具体应用路径,探讨了绿色建筑在提高工程质量、节能减排、环境保护等方面的独特优势。

关键词

绿色建筑; 施工管理; 可持续发展; 节能减排; 资源节约

1 引言

随着全球环保意识的提高,绿色建筑理念的推广已成为建筑行业发展的必然趋势。绿色建筑通过采用创新技术和材料,关注建筑全过程中的环境影响,力求实现节能减排、资源节约和环境保护等目标。建筑工程施工管理作为绿色建筑实施的关键环节,承担着重要的职责。其核心目标是确保建筑项目在设计、施工及运营过程中达到绿色建筑标准,实现节能、环保、舒适和高效的建筑环境。绿色建筑理念在施工管理中的应用,涉及从施工前的绿色设计规划到施工中的绿色施工技术应用,再到后期的绿色运营与维护的全生命周期管理。因此,深入研究绿色建筑理念在施工管理中的应用,

不仅能够提升建筑项目的可持续性,还能推动建筑行业的绿色发展,为全球环境保护事业贡献力量。

2 绿色建筑理念概述

2.1 绿色建筑的定义

绿色建筑是指在建筑的设计、施工、使用和拆除过程中,最大限度地减少资源消耗和环境负担,实现对环境、社会及经济的可持续性贡献的一种建筑理念。它强调通过科学设计、合理施工和高效运营,使建筑在生命周期内对环境的影响降到最低。绿色建筑不仅仅关注建筑物的外观或功能,它更加注重建筑的节能减排、资源循环利用以及对生态环境的保护。其核心目标是提升建筑物的能效、降低环境污染、减少资源浪费,并在建筑施工与使用过程中积极采取一系列环保措施,实现绿色低碳的建设目标。

【作者简介】王艳兵(1983-),男,中国安徽安庆人,本科,工程师,从事建筑工程研究。

2.2 绿色建筑的核心原则

绿色建筑的核心原则是资源节约、环境保护和建筑舒适性。资源节约方面，绿色建筑通过高效利用水、电、气等自然资源，减少能源消耗并提高能源的使用效率。环境保护则通过选择可再生材料、减少有害物质的使用、减少废弃物的产生等方式，降低建筑对自然环境的负面影响。此外，绿色建筑还特别关注建筑的室内空气质量、温湿度调控等因素，旨在提升居住或办公环境的舒适性，确保使用者身心健康。通过这些原则的实现，绿色建筑不仅能够减少对资源的依赖，还能改善生态环境，为社会创造更好的生活与工作条件。

2.3 绿色建筑与可持续发展的关系

绿色建筑与可持续发展密切相关，因为它是实现可持续发展的具体表现之一。可持续发展的核心在于平衡经济发展、社会进步和环境保护三个方面，而绿色建筑正是这一理念的实践。通过采取绿色建筑理念，可以减少建筑过程中的能源和资源消耗，降低温室气体排放，促进环境保护。同时，绿色建筑在保证经济效益的同时，注重社会效益，提供健康、安全、舒适的生活和工作环境，为社区的可持续发展提供支持。绿色建筑不仅能够当前实现资源节约与环境保护，还能够为未来的可持续发展奠定基础，推动社会在绿色低碳经济道路上前进。

3 绿色建筑在施工管理中的重要性

3.1 绿色建筑对环境保护的作用

绿色建筑在施工管理中的重要性体现在它对环境保护的巨大贡献。建筑行业是全球碳排放的主要来源之一，绿色建筑通过优化设计、选用低碳材料、减少建筑废弃物等措施，有效降低建筑活动对环境的负担。施工过程中，绿色建筑强调合理规划施工流程，采取有效的施工技术和管理手段，减少资源浪费和污染排放。例如，绿色建筑鼓励使用环保材料、减少废弃物的产生、采用再生资源，这不仅减少了对自然资源的消耗，也降低了建筑垃圾对环境的影响。此外，绿色建筑通过优化施工设备和技术，减少施工过程中能源的消耗，减轻对生态环境的破坏，积极推动环境保护目标的实现^[1]。

3.2 绿色建筑对资源节约的贡献

绿色建筑在施工管理中对资源节约起着至关重要的作用。建筑过程中，资源的高效利用是绿色建筑的关键目标之一。绿色建筑通过科学的设计和施工方案，减少能源、水资源以及建筑材料的浪费。在施工管理中，绿色建筑推行节能措施，严格控制建筑能耗，采用节水设施，充分利用可再生能源。建筑材料的选择上，绿色建筑倾向于使用可再生材料和本地采购的材料，减少资源消耗和运输带来的环境负担。此外，绿色建筑还注重提高材料的回收利用率，减少建筑过程中的废料，推动资源的再利用。这些措施不仅有助于节约资源，也降低了施工成本和运营成本。

3.3 绿色建筑对社会经济发展的推动

绿色建筑不仅在环境保护和资源节约方面具有显著优势，也为社会经济发展带来了积极推动作用。绿色建筑通过推动建筑行业的转型升级，促进了绿色技术的研发和创新，激发了新的产业增长点。例如，绿色建筑促使建筑行业更多采用环保和节能技术，这不仅提高了建筑物的性能，还推动了相关绿色产业的发展，如绿色建材、节能设备等产业链的形成。此外，绿色建筑为社会提供了更加健康、舒适的居住和工作环境，提高了居民的生活质量，降低了社会医疗成本。通过在建筑设计和施工中注重可持续性，绿色建筑帮助社会实现经济与环境的双重效益，为长远的社会经济发展打下坚实基础^[2]。

4 绿色建筑理念在施工管理中的实施路径

4.1 施工前期的绿色设计与规划

绿色建筑的实施在施工前期阶段具有决定性作用，设计与规划阶段的合理性直接影响建筑项目的可持续性。绿色设计要求充分考虑建筑物的能源消耗、资源利用效率以及生态环境的保护。设计师应根据绿色建筑标准，进行科学的空间布局与功能规划，尽可能减少对自然资源的依赖，并合理利用太阳能、风能等可再生能源。此外，规划阶段还要考虑建筑物的生命周期管理，采用节能环保材料，设计合理的隔热、通风与采光系统，提升建筑的能源利用效率。通过精确计算和前期优化，绿色建筑设计能够为后期施工与运营打下良好的基础，确保整个项目符合可持续发展的要求。

4.2 施工过程中的绿色施工技术应用

绿色施工技术是实现绿色建筑理念的重要手段，施工过程中应通过多种技术手段减少环境污染、降低能耗并提高资源利用效率。绿色施工强调减少建筑垃圾的产生，采用循环利用技术，使建筑材料的浪费降到最低。同时，在施工过程中，可以应用高效的施工机械与设备，减少能源消耗及施工噪音污染。在技术层面，绿色建筑施工还要求使用环保涂料、无污染的建筑材料，并尽量采用本地材料，以减少运输造成的碳排放。施工现场还应加强废弃物的分类与回收管理，确保施工过程中产生的废料能够得到有效处理，最大限度地减少对环境的负面影响。通过这些绿色施工技术的应用，能够大幅度降低施工对环境的影响，提高建筑的绿色性能。

4.3 施工后期的绿色运营与维护

绿色建筑的运营和维护阶段同样至关重要。绿色建筑在使用阶段应遵循节能减排的原则，通过优化能源使用、提高设备的运作效率以及延长建筑物的使用寿命，确保建筑的可持续性。在维护过程中，应定期检查建筑的能源系统，如供暖、通风和空调系统的运行状况，确保其在低能耗的状态下高效运行。同时，建筑运营管理团队还应通过智能化管理平台，对建筑物的能源消耗、水资源使用及废弃物排放进行

实时监控,确保各项指标符合绿色建筑的要求。建筑物在运营期间也应注重材料的维护与更换,尽量使用环保、可回收的材料进行修复与更替,以保持建筑的绿色属性,减少运营成本^[3]。

4.4 绿色建筑施工管理中的成本控制

绿色建筑施工管理中的成本控制是实现项目可持续发展的重要环节。在绿色建筑项目中,尽管初期投入较高,但通过优化设计、选用高效材料、使用节能设备等措施,可以在项目运营期节省大量资源与能源,降低运营成本。因此,绿色建筑的成本控制不仅仅是短期的经济支出,更是长远的资源节约和环保效益。施工管理中,应通过合理规划与预算管理,精确计算各项资源和设备的使用量,尽量降低材料浪费,同时加强供应链管理,选择价格合理、质量优良的绿色建筑材料。在施工过程中,通过节能减排措施和高效施工工艺,降低工期及能耗,从而实现项目的整体经济效益与环境效益的平衡。此外,在绿色建筑项目中,企业还可通过绿色认证获得税收优惠和政策支持,进一步提高项目的经济可行性。因此,绿色建筑施工管理中的成本控制对促进建筑行业绿色发展具有积极意义。

5 绿色建筑理念在施工管理中的具体应用

绿色建筑理念在施工管理中的应用,贯穿于建筑设计、施工过程、运营维护等多个阶段。随着环境问题的日益严峻,建筑行业逐渐认识到绿色建筑对资源节约、能效提升、环境保护等方面的重要性。在施工管理中,绿色建筑理念的应用不仅减少了建筑物对自然资源的消耗,还能够提高建筑的可持续性,降低其对环境的负面影响。具体而言,绿色建筑理念包括对建筑材料的合理选择、施工过程中的能效控制、资源的循环利用以及后期运营的节能减排等方面。

例如:北京市的国家会议中心作为一项大型绿色建筑工程,充分体现了绿色建筑理念在施工管理中的具体应用。国家会议中心项目在设计阶段就确立了绿色建筑的目标,采用了大量节能环保的设计理念与技术,在施工过程中严格执行绿色建筑标准,实施了多项绿色施工措施,最终实现了项目的能源效率和环境效益的双赢。首先,在绿色设计阶段,国家会议中心项目充分考虑了建筑的能源消耗和资源利用效率。建筑外立面的设计采用了大面积的高性能玻璃幕墙,

能够有效利用自然光源,减少了人工照明的需求。此外,建筑物的隔热、保温设计也极具特色,选用了高效保温材料,减少了建筑外部的热量流失,降低了冬季采暖和夏季制冷的能耗。这一设计不仅提升了建筑的节能效果,还最大程度地减少了外部环境对建筑的影响。在施工过程中,绿色建筑理念的应用得到了进一步体现。施工团队在建筑材料的选择上,优先选择环保、低能耗和可再生的建材。例如,建筑墙体和屋顶使用了新型高效隔热材料,有效提高了建筑的热隔离效果,降低了能源消耗。同时,为了减少建筑废弃物对环境的负面影响,项目团队采取了废弃物分类和回收的措施,施工现场的建筑垃圾进行了有效处理,尽量减少了对环境的污染。施工设备的选用也是绿色施工中的重要环节,施工团队优先选择低排放、低噪音的机械设备,以减少施工过程中的能源消耗和噪声污染。

6 结语

绿色建筑理念的应用在建筑工程施工管理中具有重要意义。通过绿色设计、施工技术的应用和后期运营管理,不仅能够实现资源的节约与环境的保护,还能有效提升建筑的可持续性和使用效益。绿色建筑在施工管理中的实施,不仅促进了建筑行业的绿色转型,也为社会提供了更加健康、舒适的居住和工作环境。未来,随着技术的进步和政策的支持,绿色建筑理念将继续在建筑行业中得到广泛推广,推动建筑行业向低碳、环保、可持续方向发展。

参考文献

- [1] 曹微.新时代绿色建筑设计理念在建筑工程设计中的运用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(25):84-86.
- [2] 刘来,洪雷华,谢生斌,刘循潭,何润东.绿色建筑理念在建筑工程施工模板中的应用[A].第六届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集[C].广西网络安全和信息化联合会:2025:210-212.
- [3] 汪知超.绿色建筑理念在建筑工程施工管理中的实践与挑战[A].2024工程技术应用与施工管理交流会议论文集(上)[C].中国智慧工程研究会:2024:406-407.
- [4] 刘刚.绿色建筑理念在现代建筑工程中的应用研究[J].中华民居,2024,17(04):20-22.
- [5] 董志国,徐菁.绿色建筑理念在现代建筑工程中的实践应用[J].湖州职业技术学院学报,2023,21(02):81-84.

Adaptability Analysis and Improvement of High Efficiency Mining Equipment for Thin Coal Seam Comprehensive Mining Face

Yuxiao Wang Zhiwen Xuen

Shaanxi Zhongneng Coalfield Co. Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

Thin coal seams constitute 20% of China's recoverable coal reserves, representing a vital strategic resource for national energy security. Efficient mining of these seams enhances resource recovery rates and facilitates the green transition of the coal industry. However, constrained by limited mining space and complex geological conditions, the "thick seam mining and thin seam abandonment" phenomenon persists, resulting in low extraction efficiency and underdeveloped intelligent systems. As the cornerstone of efficient thin coal seam mining, fully mechanized mining equipment directly impacts both operational safety and economic viability. This study examines the inadequacies of coal cutters, hydraulic supports, and scraper conveyors in thin coal seam mining, identifies root causes of these limitations, and proposes targeted improvement measures and innovative solutions. Through practical engineering validation, the research provides theoretical and operational references for equipment modernization and large-scale mining operations.

Keywords

thin coal seam; fully mechanized mining face; mining equipment; adaptability

薄煤层综采工作面高效开采装备适应性分析与改进

王宇宵 薛志文

陕西中能煤田有限公司, 中国·陕西 榆林 719000

摘 要

薄煤层占我国煤炭可采储量的20%，是我国能源安全的重要战略资源，高效开采薄煤层有利于提高资源采出率，促进煤炭行业绿色转型。由于受采掘空间狭小、地质情况复杂等种种原因，造成“采厚弃薄”的现象严重，开采效率低、智能化水平低。综采装备是薄煤层高效开采的关键支撑，它的好坏直接影响到开采的安全性和经济效益。本文根据薄煤层地质特点和开采要求，分析采煤机、液压支架、刮板输送机的适应性不足之处，剖析短板原因，提出改进措施和创新方向，结合工程实践检验效果，为装备更新升级和规模化开采提供理论和工程上的参考。

关键词

薄煤层；综采工作面；开采装备；适应性

1 引言

我国煤炭的储采比远低于世界主要煤炭国家，后备资源不足，提高资源采出率是保证能源安全的重要途径。薄煤层可采储量占全国的20%，但是产量只占全国总产量的10%，采厚弃薄造成了严重的资源浪费，主要原因是综采装备不适应狭小作业空间和复杂的地质条件。当前煤炭行业正处在智能化、绿色化的转型期，薄煤层综采装备的优化升级成了解决开采难题的主要途径。本文主要针对高效开采的需求进行分析，对核心装备的不足之处进行分析，并且根据智

能化的趋势提出改进的方法，兼顾理论和实际，给装备技术的突破提供新的思路，促进煤炭资源的高效利用。

2 薄煤层综采工作面地质特征

薄煤层一般指厚度小于等于1.3m的煤层，地质赋存条件千差万别，与中厚煤层相比存在较大差别，给综采装备的适应性提出了很高的要求，也是造成薄煤层开采效率低下的主要地质原因。其主要的地质特征有四个，一是作业空间极为狭小，受煤层厚度的影响，薄煤层综采工作面的有效作业高度一般在1.2m以下，人员活动空间受到限制，设备运转空间更加狭小，因此综采装备需要实现矮型化设计，同时要保证大功率输出，以满足高效截割、支护和运输的要求，这是薄煤层综采装备与中厚煤层装备最根本的不同。二是煤

【作者简介】王宇宵（1994-），男，中国陕西靖边人，助理工程师，从事煤矿综采研究。

层赋存不稳定,大部分薄煤层厚度波动范围大,波动幅度达0.3~0.5m,常伴有断层、褶曲等构造,部分区域还有坚硬夹矸,夹矸普氏系数达到3左右,硬度高,对装备的调节能力、破岩性能和稳定性要求更高,传统的装备不能适应复杂的煤层条件。三是顶底板岩性差别大,薄煤层顶底板多为软岩、破碎顶板,岩层强度小、稳定性差,易造成端面漏顶、顶板垮落等事故,危及作业安全,因此支护设备要具有高强度、高稳定性和快速响应能力,能及时有效地支护顶板,防止隐患。

3 薄煤层综采核心装备适应性现状及短板分析

3.1 薄煤层采煤机适应性短板

采煤机是薄煤层综采工作面的主要破煤设备,担负着煤层截割、装煤的任务,其适应性影响到开采效率、连续性和安全性,是薄煤层综采装备适应性改进的重点环节。目前我国主流薄煤层采煤机经过几十年的发展虽然取得了一定的进步,但是结合现场开采实践来看,仍然存在着三个突出的短板,严重影响了薄煤层的高效开采。一是矮型化和大功率的矛盾没有得到彻底解决,这是薄煤层采煤机最突出的不足。传统采煤机为了降低机身高度,往往要牺牲装机功率,造成截割能力不足,面对普氏系数3左右的坚硬夹矸时,容易出现截齿磨损过快、滚筒卡滞、截割效率大幅下降等问题,甚至不能正常截割;部分大功率采煤机采用紧凑型结构设计,虽然可以保证截割功率,但是机身灵活性差,转弯半径大,很难适应煤层厚度的频繁变化,在1.1~1.3m的坚硬薄煤层中,既不能保证截割效率又不能保证设备稳定,容易出现设备故障。二是智能控制精度不高,不能适应复杂的地质情况。大多数薄煤层采煤机的记忆截割功能依靠预先设定的参数,缺少对煤层地质变化的实时感知和自适应调节能力,当煤层出现厚度波动、夹矸分布不均等状况的时候,不能及时改变截割参数,容易产生割顶、割底的现象,不但会降低煤炭的采出率,造成煤炭的浪费,还会损坏设备,引发顶板事故,影响开采的安全性和连续性。三是维护不方便,运维成本高。由于薄煤层作业空间狭小,采煤机的关键部件(截割部、牵引部、液压系统)的安装、拆卸和检修难度大,一旦发生故障,停机检修时间长,影响工作面推进效率;同时,井下潮湿、粉尘、高压的恶劣环境加剧了部件的磨损、腐蚀,缩短了设备的使用寿命,增加了设备的维护成本和运维工作量,从而制约了薄煤层开采的经济性。

3.2 薄煤层液压支架适应性短板

液压支架是薄煤层综采工作面安全保证的核心设备,它担负着支护顶板、隔离采空区、保证作业空间安全的任务,它的适应性直接影响到开采作业的安全性,也是薄煤层综采装备适应性改进的重点内容。目前薄煤层液压支架适应性缺陷主要体现在支护性能、结构设计和协同性这三个方面,严重地影响着薄煤层开采的安全性和连续性。一是支护强度和结构轻量化不能同时实现,这是薄煤层液压支架的主要矛

盾。薄煤层作业空间小,支架结构必须紧凑、轻便,便于安装、移架和运转,但是部分支架为了轻量化而采用低强度材料和简化结构设计,造成工作阻力不够,不能适应破碎顶板、冲击地压等复杂的工况,容易发生支架变形、顶梁损坏、漏顶等事故,威胁作业安全;高强度支架结构笨重、体积大,最低高度不能控制在700mm以下,不能适配极薄煤层开采,且移架速度慢,影响开采连续性。部分薄煤层液压支架工作阻力小于4000kN,不能满足坚硬顶板的支护要求,在顶板压力大时容易造成支架失稳,工作阻力大于9000kN的高强度支架,其最小高度一般大于750mm,不能用于1.1m以下的极薄煤层开采。二是伸缩比不够,不能适应煤层厚度的波动变化。薄煤层厚度波动范围大,液压支架需要具有较大的伸缩比来适应煤层厚度的变化,以保证支架支护高度的调节范围满足煤层厚度的变化,但是目前大多数薄煤层液压支架的伸缩比只有2.0~2.5,不能覆盖薄煤层厚度波动范围,当煤层厚度出现较大偏差时,支架不能进行有效的支护,需要人工调整支架高度或者更换支架,增加了劳动强度,也存在安全隐患,影响开采效率。三是和采煤机、刮板输送机的配合不好,造成工作面整体运行效率低。支架移架速度和采煤机截割速度不匹配,容易造成移架滞后或者超前,移架滞后会造成工作面空顶时间过长,增加顶板垮落的风险;移架超前会干扰采煤机正常截割,影响截割效率。支架和刮板输送机的连接方式不合理,容易造成运动干涉,造成设备故障,从而降低整个设备的运行效率。

4 薄煤层综采装备适应性改进策略与创新路径

4.1 薄煤层采煤机适应性改进

根据薄煤层采煤机矮型化和大功率之间的矛盾、智能控制精度不够、维护不方便等主要问题,结合薄煤层地质特点和智能化开采的发展趋势,从结构设计、智能控制、维护优化三个方面提出相应的改进措施,使采煤机的适应性和性能得到全面提高,解决薄煤层破煤效率低、故障多的问题。一是改进紧凑型结构设计,冲破传统传动布局的束缚,破解“矮型化和大功率”之间的主要矛盾。采用半悬机身、全悬截割矮机身结构设计,对机身进行优化布局,减少内部结构,使机身高度保持在750mm以下,保证在狭小作业空间内灵活运转;同时改进传动链布置,用高扭矩减速器和高强度合金材料来减小设备体积,提高装机功率到1000kW以上,满足坚硬薄煤层和夹矸的切割要求。为了解决坚硬夹矸切割问题,设计出专用高强度耐磨截齿和优化型滚筒,采用硬质合金涂层技术提高截齿的耐磨性,改进滚筒齿形及排列方式,减小截割阻力,提高截割效率和刀具寿命,降低截齿更换次数。二是升级智能控制系统,提高自适应和精准控制的能力。采用融合惯性导航、毫米波雷达和视觉传感器技术来创建工作面全息数字化地质模型,可以实时感知煤层厚度变化、夹矸分布、顶底板变动等地质信息,进而动态修正记忆截割模

板,使采煤机自适应割煤、自主防碰撞,避免割顶、割底,提高煤炭采出率和开采安全性;集成远程故障诊断系统,对截割部、牵引部、液压系统等关键部件进行实时监测,利用数据分析提前预警故障隐患,指导运维人员及时处理,减少故障停机时间。三是优化维护设计,提高运维便利性,降低运维成本。采用模块化、可拆卸的设计理念,把采煤机的主要部件(截割部、牵引部等)做成独立模块,在狭小的空间里可以迅速地拆卸和维修,从而缩短了检修的时间;采用密封防尘、防腐、抗冲击的结构来提高部件在井下恶劣环境下的适应性,减缓部件的磨损和腐蚀,从而延长设备的使用寿命;在重要的部件上设置检修窗口以及方便的操作装置,减小运维人员的工作量,提高运维效率。

4.2 薄煤层液压支架适应性改进

针对薄煤层液压支架支护强度和轻量化不能兼顾、伸缩比小、协同性差等的主要问题,根据薄煤层地质特点和安全开采要求,从材料应用、结构优化、协同控制三个方面进行改进创新,提高液压支架的适应性、支护可靠性和协同性,为薄煤层开采提供安全保障。一是改善材料和结构设计,解决支护强度和轻量化之间的矛盾。使用 Q690 及以上强度等级的高强度钢板做支架主体材料,利用有限元拓扑优化技术,在保证支架结构强度和稳定性的基础上,减少冗余结构,实现支架轻量化设计,使支架工作阻力不小于 9000kN,支架最低高度不大于 700mm,满足 1.1m 左右极薄煤层开采的要求。优化支架立柱设计,采用双级或者三级机械加长杆立柱,使支架伸缩比达到 3.0 以上,可以适应薄煤层 0.3 ~ 0.5m 厚度的波动范围,不用人工调节就能实现有效的支护,降低劳动强度和安全隐患;优化顶梁、掩护梁结构,采用弧形顶梁设计,增大顶梁与顶板的接触面积,提高支护稳定性,减少漏顶风险。二是完善支护作用,提高适应复杂环境的能力。针对破碎顶板、软岩顶板等复杂的工况,设计出带护帮板、伸缩梁的一体化支架结构,缩短支架顶梁前端与煤壁的距离,及时支护煤壁和顶板,防止端面漏顶、煤壁片帮等事故;

集成防冲击结构,采用防冲击大伸缩比立柱和缓冲装置,提高支架的抗冲击能力,适应冲击地压工况,保证支架在冲击载荷的作用下正常工作;优化支架液压系统,采用高压大流量液压阀组,提高支架移架速度和支护响应速度,缩短移架时间,减少工作面空顶时间。三是提高协同联动水平,使“三机”一起工作。优化支架和刮板输送机的连接方式,采用柔性连接结构,消除设备运动干涉,保证支架移架和输送机运输同步进行;集成高精度电液控制系统,实现支架跟机移架、擦顶支护、自动补液等功能的自动化控制,使移架速度与采煤机截割速度精确匹配,提高工作面开采连续性;搭建支架与采煤机、刮板输送机的协同控制接口,实现数据实时交互,根据采煤机截割位置、速度自动调节移架节奏,形成“截割-支护”协同联动机制。

5 结语

薄煤层高效开采是释放资源潜力、保证能源安全的重要途径,综采装备适应性不足是其规模化开采的主要障碍。本文根据薄煤层地质特点和开采要求,主要针对三个核心装备展开分析,从单机优化和系统协同两个方面提出了改进思路,工程实践证明该方案有效,形成了完整的理论体系。目前薄煤层综采装备向矮型化、智能化、协同化发展,需要加强产学研合作,攻克核心技术难题,完善评价体系。本文成果可以为装备优化、工程应用提供支持,破解薄煤层开采难题,促进煤炭行业高质量发展。

参考文献

- [1] 赵娜. 薄煤层煤矿综采工作面地质特征及开采技术 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (14): 47-49.
- [2] 袁红平,陈钰豆,李德福,等. 薄煤层综采工作面回撤通道支护关键技术研究 [J]. 陕西煤炭, 2025, 44 (08): 167-171.
- [3] 孟强. 薄煤层综采工作面液压支架电液控制系统设计 [J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51 (07): 45-47.
- [4] 田超超,余建东. 薄煤层综采工作面过老巷期间冒顶原因及综合处置实践研究 [J]. 陕西煤炭, 2025, 44 (03): 140-144.

Research on Cost Control and Optimization Strategies for Prefabricated Beam Construction in Mountainous Highway Projects

Xiaoyan Chen

Xinjiang Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

Cost control is the core of engineering project management, which directly affects the economic benefits and market competitiveness of enterprises. This article takes the ZW-3 section of the Zhaosu Wensu Highway as an example. In the process of cost control, the current highway engineering specifications and standards are strictly followed. From the dimensions of early planning, process control, and contract and risk management, the cost control and optimization strategies for prefabricated beam construction are explored, and a refined cost control system is constructed throughout the process. Through practical verification, the construction cost of prefabricated beams in the project has been reduced by 6.2% compared to the plan, with a cumulative cost savings of about 1.72 million yuan. This article provides practical reference and technical support for the cost management of prefabricated beam construction in similar mountainous highway projects.

Keywords

highway engineering; prefabricated beam construction; cost control; prefabrication yard management

山区公路项目预制梁施工成本控制与优化策略研究

陈晓燕

新疆路桥建设集团有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

成本控制是工程项目管理的核心, 直接影响企业经济效益与市场竞争力。本文以昭苏至温宿公路ZW-3标段为例, 成本控制过程中, 严格遵循现行公路工程规范标准, 从前期策划、过程控制、合同与风险管理三个维度, 探讨预制梁施工的成本控制与优化策略, 构建全过程精细化成本管控体系, 经实践验证, 项目预制梁施工成本较计划降低6.2%, 累计节约成本约172万元, 本文为类似山区公路项目预制梁施工成本管理提供实践参考与技术支撑。

关键词

公路工程; 预制梁施工; 成本控制; 预制场管理

1 引言

在当前市场化竞争日趋激烈的背景下, 精细化成本管理成为施工企业生存发展的关键。成本控制贯穿投标报价、施工组织、现场施工至竣工结算, 需实现技术与经济深度融合。

昭苏至温宿公路 ZW-3 标段地处山区 U 型河谷, 因地质复杂、场地受限, 成本控制难度远高于平原项目, 虽设置 2 个预制场及配套钢筋加工厂并将运距控制在 5km 内, 有效降低运输成本, 但仍面临预制场协同管理、钢筋加工效率、

质量管控等成本风险。本文结合现场实操经验与现行规范, 分析工程难点并探索科学高效的成本控制与优化方法体系, 对提升企业成本管理水平、实现项目效益双赢具有重要现实意义^[1]。

2 项目概况与成本控制重点、难点分析

本项目路线全长 41.513km, 桥梁工程为项目重点, 采用后张法预制 40m 预应力混凝土箱梁 304 片。项目设置 2 个预制场及 2 个配套钢筋加工厂, 1# 预制场供应 264 片梁板, 2# 预制场供应 40 片梁板, 最远运距不超过 5km, 规避了长距离运输成本风险。结合现场勘察与施工管理经验, 该项目预制梁施工成本控制的重点与难点主要体现在四方面:

2.1 预制场与钢筋加工厂协同管理难度大

双预制场、双钢筋加工厂的布局虽实现就近供应, 但

【作者简介】陈晓燕(1979-), 女, 中国山东潍坊人, 本科, 副高级工程师, 从事公路工程成本管控、工程造价、全过程造价、精细化管理等研究。

生产计划、设备配置、物料供应需高度协同。若管理不当,易出现生产进度失衡、设备闲置、物料堆压等问题,且台座数量、存梁区面积、钢筋加工产能若与梁板生产进度不匹配,可能导致停工待料,产生窝工与机械闲置成本;物料调配不合理还会引发重复采购与浪费,进一步增加施工成本。同时,预制场与钢筋加工厂需分别满足《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650-2020)中“分区明确、流程顺畅”与“加工标准化、规范化”的要求,对协同管理提出更高标准^[2]。

2.2 地质与气候条件带来额外成本支出

项目地处U型河谷,干燥少雨、大风型大陆性气候,风速最高达12m/s,风速超8m/s时严禁梁板吊装,易造成设备闲置与工期延误;干燥气候对混凝土养护要求严苛,养护不到位易产生裂缝,增加修复成本。

2.3 场地与周边环境推高临时设施成本

施工场地远离城镇,虽减少扰民协调与拆迁成本,但砂石料、水泥、钢筋等主材需远运,增加运输成本;水电供应不便,需为双场地分别铺设临时供电线路、修建临时供水设施,成本较平原项目高出40%以上;需就近搭建施工人员住宿与生活设施,进一步增加临时设施投入。

2.4 严格规范要求提升质量成本控制难度

预制梁施工需严格遵循《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650-2020)、《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224-2023)等规范,钢筋加工质量不合格会导致返工,增加材料损耗与人工成本;梁体施工质量问题不仅引发返工成本,还会延误工期,产生工期成本与信誉损失;规范要求的环保、安全措施投入,也对成本控制提出更高要求。

3 预制梁施工成本控制与优化的核心策略及具体方法

针对上述成本控制难点,项目部采用全过程优化管理措施,严格遵循现行规范标准,从前期策划、过程控制、事后复盘三个维度实施精细化成本控制,结合现场实操数据完善措施,实现降本增效与管控措施的落地。

3.1 前期策划与方案优化

前期策划是成本控制的基石,可有效规避后期设计变更、施工方案不合理导致的成本浪费,重点开展三方面工作:

3.1.1 施工方案的经济比选与优化

针对304片40m箱梁的预制与安装,结合现场布局编制3套及以上施工方案,从技术可行性、经济合理性、安全可靠度维度比选优化,核心聚焦预制场与钢筋加工厂协同管理方案及运输方案。

在预制场与钢筋加工厂规划上,根据梁板分布特点确定双场地产能分配:1#预制场设12个预制台座,配套钢筋加工厂月加工能力180t;2#预制场设6个预制台座,配套钢筋加工厂月加工能力60t,确保台座利用率、加工产能与生产进度精准匹配。同时优化预制场布局,划分功能区域并

优化物流路径,节约场内转运成本约10万元;钢筋加工厂采用“就近配料、集中加工、直接配送”模式,每片梁节约转运成本约200元,304片梁累计节约6.1万元。

在运输方案优化上,结合短运距特点,采用小型转运设备替代大型运输车辆,累计节约运输成本约8.5万元;对运输路线进行简易加固,加固成本控制在15万元以内^[3],较传统长距离运输加固方案节约63万元。

3.1.2 科学编制成本计划与预算

依据实施性施工组织设计、材料市场价格、项目资源配置及《公路工程预算定额》(JTG/T 3832-2018),编制详细标后预算与成本计划,将成本控制指标分解至各场地、部门、班组及个人,建立层层落实的成本责任制。

针对占预制梁施工成本70%左右的材料费用,编制精准材料预算,结合市场价格波动与供应商签订长期供货合同,锁定水泥、钢筋、预应力钢绞线等主要材料价格;砂石料等地材就地采购,节约运输成本约18万元。同时对设备租赁、临时设施、人工等费用详细测算,制定差异化成本控制目标,每月对比分析双场地成本执行情况,及时调整管控措施,规避成本偏差扩大。

3.1.3 合同与图纸会审,规避潜在成本风险

开工前组织技术、成本、合同等人员会审施工图纸,在不降低工程质量、不违反规范的前提下,提出利于施工、节约成本的合理化建议。如优化梁板端部构造钢筋布置方案,减少钢筋用量约3%,单片梁节约钢筋成本约800元,304片梁累计节约24.3万元,该建议经设计单位确认后实施并办理签证。

深入研究合同条款,重点关注工程变更、价格调整等内容,提前预测可能发生的设计变更、现场签证及材料价格上涨问题并制定应对措施;明确合同双方权责,规避条款不明确导致的成本纠纷;与设备租赁方、劳务队伍签订详细合同,细化价格、工期、质量要求,避免后续费用争议。

3.2 过程实施、动态监控与技术优化

过程控制与技术优化是实现成本目标的关键,核心是对人工、材料、机械等生产要素的精细化管控,结合双场地协同管理需求,严格遵循规范要求,重点开展三方面工作^[4]:

3.2.1 预制场与钢筋加工厂精细化成本优化

针对双场地布局特点,采用“集约化、精细化、标准化”管理模式,结合规范与现场经验优化管控措施,实现协同高效运行:

一是实施精细化场地规划与动态协同管理。建立现场协同调度机制,每周召开调度会同步生产、物料、设备情况;运用“预制梁生产节拍法”编排施工计划,精确计算台座、存梁区占用周期,优先生产工期紧张梁板;钢筋加工厂根据预制场计划提前制定加工计划,确保进度无缝对接。同时,双预制场均采用自动化喷淋养护系统,结合温湿度传感器精准调控,缩短台座养护时间,累计节约人工成本约15万元,

且有效保证混凝土质量,规避修复成本。

二是严控材料与能源消耗。双钢筋加工厂建立“钢筋集中数控加工配送中心”,利用优化管理软件精准下料,将钢筋损耗率从2%-3%降至1%以下,节约钢筋约12t、成本约6万元;建立大型定型钢模板循环利用台账,修复旧模板交叉使用,将周转次数从6次提高至10次,节约模板购置成本约30万元;安装智能水电计量设备,杜绝浪费,水电消耗较常规管理降低18%,累计节约4.2万元。

三是推行全员全过程成本分析例会。每周召开班组成员成本分析会,每月召开项目综合成本分析会,运用成本偏差(CV)与进度偏差(SV)分析,对比实际与计划成本,排查偏差原因并明确责任、限期整改。如发现2#预制场混凝土损耗率超标后,及时调整振捣工艺、加强现场监管,将损耗率控制在计划范围内^[5],节约混凝土成本约1.2万元。

3.2.2 运输环节的专项成本优化

结合项目短运距特点,从运输方案与运输组织两方面开展专项成本优化,进一步降低运输成本:

一是优化运输方案的技术经济性。组织技术人员详细勘察运输路线,结合梁板自重、车辆性能确定最优装载方案与行驶参数,降低车辆油耗与磨损,油耗降低约10%,每月节约燃油成本约2.8万元。

二是创新运输组织与管理。建立“制、运、架协同调度机制”,实现预制、运输、架设的动态调度与无缝对接,将设备闲置率从15%降至5%,节约机械闲置成本约15万元;与运输队伍签订“固定单价+效率激励”合同,明确权责与激励措施,有效提升运输效率、降低运输成本。

3.2.3 质量、安全与合同风险成本控制

质量与安全是成本控制的前提,结合规范与现场经验,杜绝质量、安全问题导致的额外成本,同时加强合同与变更管理,规避财务风险:

质量控制方面,坚持“质量一次成优”理念,严格遵循《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650-2020),加强钢筋加工、混凝土浇筑、预应力张拉等关键工序质量检查,建立验收台账,不合格工序严禁进入下一环节。安排专职质检员全程管控钢筋加工质量,采用智能张拉设备保证张拉精度,实现梁体一次验收合格率100%,杜绝返工修复成本。

安全控制方面,足额投入安全措施费,严格按照规范制定专项安全方案与应急预案,配备专职安全管理人员,加强现场与运输路线巡查,定期开展安全培训。针对山区施工风险,投入15万元配备护航车辆、警示标志与应急救援设备,组织应急演练,有效规避安全事故导致的工期、人员、设备损失。

合同与变更管理方面,严格执行合同条款,任何工程变更均及时组织技术、成本人员评估成本影响,办理规范签证手续,确保变更费用合理合规。

3.3 事后总结与复盘

事后总结与复盘是成本控制持续优化的重要环节,预制梁施工完成后,组织成本、技术、现场施工人员及双场地相关负责人开展全面复盘工作,对比实际与计划成本,分析成本节约与超支原因,总结经验与不足。

对钢筋管理优化、预制场协同管理、运输方案优化等节约效果显著的措施,整理形成标准化操作流程,为后续类似项目提供参考;对临时设施投入、机械闲置、人员窝工等成本超支环节,深入分析根源并制定改进措施,规避后续项目同类问题。同时,规范计量资料整理,确保数据准确完整,加强与建设、监理单位沟通,及时办理计量手续,加快资金回笼,减少资金占用成本。

4 结论与展望

4.1 结论

预制梁施工成本控制需树立全周期、精细化的成本管理理念,实现技术与经济深度融合,严格遵循现行规范标准,重点做好协同管理。本文以昭苏至温宿公路ZW-3标段为实例,通过分析成本控制难点,构建全过程成本管控体系,得出核心结论:

前期策划是成本控制的基础,通过施工方案经济比选、科学编制成本预算、开展合同与图纸会审,结合现场特点,可有效规避潜在成本风险,为成本管控奠定基础;

事中控制是成本控制的关键,通过预制场与钢筋加工厂精细化管理、运输环节专项优化、质量安全与合同风险管控,实现成本的动态控制与有效节约;

全员参与、层层落实的成本责任制是措施落地的保障,结合现场管理特点实施差异化管控,可进一步提升成本管控效率。

经现场实践验证,项目预制梁施工成本较计划降低6.2%,累计节约成本约172万元,在确保工程安全、质量与进度的前提下实现了经济效益最大化,同时提升了项目部协同管理与成本管控能力,为类似预制梁施工项目提供了切实可行的实践参考^[6]。

4.2 展望

随着公路工程行业发展,预制梁施工成本控制趋向更精细化、智能化。建议类似项目进一步加强新技术、新设备、新方法的应用,如引入AI等工具,推广绿色施工工艺降低环保成本,提升成本管控精准度与效率。

同时,结合山区公路项目特性,深入研究协同管理的成本控制策略,完善成本控制标准与流程,优化场地布局与资源配置,为类似项目预制梁施工提供更具针对性的实践参考,推动公路工程行业成本管理水平整体提升。

参考文献

- [1] JTG/T 3650-2020, 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

- [2] JTG F90-2015, 公路工程施工安全技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [3] JTG/T 30-2017, 公路工程施工组织设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [4] 张建军. 公路桥梁预制梁施工成本控制策略研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(5): 168-174.
- [5] 李建国. 山区公路预制梁运输成本优化方法与实践[J]. 桥梁建设, 2022, 52(3): 145-150.
- [6] 中国公路建设行业协会. 公路工程成本管理手册[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2023.
- [7] 刘志强. 公路预制梁施工中钢筋加工成本优化措施[J]. 公路, 2022, 67(8): 234-238.
- [8] 王丽. 多预制场协同管理在山区公路预制梁施工中的应用[J]. 工程管理学报, 2023, 37(4): 119-123.

Exploration of Precise Positioning Technology for Underwater Dredging of Cutter Suction Dredgers

Xian Zhao

Anhui Construction Engineering Water Resources Development Investment Group Co., Ltd., Bengbu, Anhui, 233000, China

Abstract

Underwater dredging is an important part of waterway dredging, port management, and water environment management. The cutter suction dredger has gradually become well-known for its high efficiency and sustainability. However, due to its working environment being affected by various factors such as water flow interference, water obstruction, and complex terrain, its underwater positioning accuracy is insufficient, which can easily lead to incomplete dredging, over excavation, and under excavation, seriously limiting the quality and efficiency of construction. This project focuses on the characteristics of suction dredging operations, analyzes their core requirements and evaluation criteria, explores their applicability, establishes a multi-source joint positioning technology system, clarifies the fusion mechanism and collaborative positioning mode of satellite, acoustic, and inertial navigation positioning technologies, and proposes a joint positioning method based on satellite acoustic inertial navigation. It is expected to lay a technical foundation for precise underwater dredging operations of suction dredgers and promote the intelligent and precise development of dredging engineering.

Keywords

cutter suction dredger; Underwater dredging; precise positioning

绞吸式挖泥船水下清淤精准定位技术探究

赵贤

安徽建工水利开发投资集团有限公司, 中国·安徽 蚌埠 233000

摘 要

水下清淤是航道疏浚、港口治理和水环境治理的重要内容, 绞吸挖泥船以其高效率 and 持续性的特点, 已逐渐被人们所熟知, 但由于其工作环境受水流干扰、水体遮挡和地形复杂等多方面的影响, 使得其水下定位精度不足, 容易造成清淤不彻底、超挖欠挖等问题, 严重限制了施工的质量和效率。本项目以绞吸疏浚作业特点为研究对象, 剖析其核心要求和评判准则, 探索其适用范围, 建立多源联合定位技术体系, 阐明卫星、声学、惯性导航三种定位技术的融合机理和协作定位模式, 提出基于星-声-惯导的联合定位方法, 期望为绞吸式挖泥船水下清淤精准作业奠定技术基础, 促进疏浚工程智能化和精准化发展。

关键词

绞吸挖泥船; 水下清淤; 精准定位

1 引言

在我国内河航道基础建设和水环境整治的常态化背景下, 我国的水下清淤作业对作业精度的需求不断提高, 而绞吸挖泥船是我国最重要的清淤设备, 其水下定位精度关系到清淤质量、施工效率和安全。目前由于受到水中复杂环境的影响, 常规定位方法存在定位滞后、定位精度低等问题, 难以适配深水、复杂地形及动态作业工况的需求, 严重成为我国航道建设向智能化方向发展的瓶颈。因此这就要求相关部

门便需要对其作业原理和关键技术进行系统的剖析, 建立多源信息融合的精准定位技术体系, 探索其在复杂工况下的精准定位与清淤作业的协同调控机制, 解决我国水下精准定位的难点问题, 为提升我国航道整治的品质和水平, 推动我国水运与水环境治理产业高质量发展提供支撑。

2 绞吸式挖泥船水下清淤作业原理

绞吸式挖泥船采用绞刀装置、吸泥管和泥泵等设备配合工作, 以达到对水下淤泥的挖掘、输送和排放一体化。在工作过程中, 采用锚缆定位或动力航行来调节其定位, 绞刀钻进到规定的水深范围内, 在电机的带动下, 对水底淤泥、砂石等沉积物进行切割, 与此同时, 泥浆泵产生负压, 通过

【作者简介】赵贤（1988—），男，中国山东郓城人，本科，高级工程师，从事水利工程研究。

吸泥管将挖掘后的淤泥混合液抽吸到指定堆泥区或货船上。整体工作过程需要精确地控制刀盘在水下的位置、挖掘深度和切割速率,同时还要考虑到船体的稳定性^[1]。由于水下的不可见性、水流速度和地形变化等因素,极易造成绞刀头的位置偏移,从而造成超挖或欠挖,从而加大了工程返工成本,所以精准定位是保证排泥工作质量的关键条件。

3 水下精准定位核心需求与评价标准

3.1 清淤作业对定位精度的要求

绞吸式挖泥船在水下排沙时需要根据不同的施工环境和操作对象进行精确的定位,其关键在于对绞刀头在水中的三维坐标进行精确控制。在航道疏浚作业中,为保障通航安全,必须保证航道底高程误差控制在 $\pm 10\text{cm}$ 内,以防止浅点遗留或过度开挖对航道地基造成损害。港口泊位清淤既要考虑平整度,又要考虑深度精度,定位误差需控制在 $\pm 8\text{cm}$ 内,才能保证船舶停靠承载要求;在水环境整治与疏浚过程中,需要对污染淤泥区域进行精准定位,以防止对洁净水体区域的干扰,其定位精度需达到 $\pm 5\text{cm}$ 。同时需要对绞刀头的动态位移进行实时采集,确保定位数据与实际作业位置同步,以此来为操作调整和控制,避免因定位误差而导致的施工质量问題。

3.2 定位系统的稳定性、实时性、抗干扰性

在复杂的工作条件下,对水下清淤定位的稳定性、实时性和抗干扰能力提出了更高的要求。在稳定系数层面,为避免设备故障或信号中断等原因造成的定位失效,保证工作全过程中的定位数据的连续性和可靠性。实时性要求将位置数据采集、传输和处理时间限制在50毫秒之内,完成绞刀头位置、船体姿态的动态实时反馈,为作业参数调控提供即时支持,消除数据滞后造成的操作误差。在抗干扰上则要针对水下声学噪声、电磁干扰、水体混浊和卫星信号遮挡等问题,通过对信号滤波和抗干扰算法的优化,保证定位数据的精度,增强对复杂水下环境的适配能力。

4 绞吸式挖泥船水下清淤精准定位技术体系构建

4.1 单一精准定位技术原理

4.1.1 卫星定位技术的应用

绞吸挖泥船的水面船体定位是十分关键的内容,此项工作的开展需要以GPS为基础,结合差分定位技术,以适应水下工作环境,能够显著提高船舶的定位精度。磁县工作的关键思想是利用船舶上安装的卫星接收设备,利用多个卫星的导航信号获取船舶的三维坐标、航行速度和姿态等信息,并利用差分基站校正对卫星轨道误差和电离层干扰进行修正,最终达到厘米级别的定位精度^[2]。在工作过程中,也要利用GPS来控制船体的总体位置,为船体的锚定和航行调整提供参考,并协助确定绞刀头在水中的大概位置。这种方法具有定位范围广、无需水下布设设备、易于操作等优点,

适合在开阔水域进行工作,但期间可能会受到水体遮挡、建筑物遮挡和恶劣气候等因素的干扰,导致难以对水下绞刀头进行精确定位,需要联合其他水下定位方法来解决水下定位的不足问题。

4.1.2 声学定位技术的应用

基于水声信号在水下传输的特点,相关人员需要研究基于声波在水中的传播特性,对水下非可见环境进行三维坐标测量。目前普遍采用的方法有超短基线(USBL)、短基线(SBL)和长基线(LBL)三种,其中超短基线(USBL)定位系统,具有体积小、易于安装的特点,在绞吸挖泥船的排沙过程中得到了越来越多的使用。其基本思想为在船体底部设置一种声学换能器,将声信号发送到绞刀头搭载的应答器,转发器在收到该信号后,将该信息反馈给相应的应答波,换能器捕获该响应信息,并对该响应信号进行处理,得到该声波传播时间,再与声波的传播速率相关联,得到绞刀头在水中的三维坐标。还要根据实际需求提出一种定位精度可达厘米级、不受水体浑浊度影响的水下绞刀头精确定位方法,但是受到水下声噪声和水流折射等因素的影响,其定位范围有限,需要对换能器与应答器进行适当布置以提高其定位的稳定性。

4.1.3 惯性导航技术的应用

惯性导航技术是一种不依靠外界信息的自主式定位技术,利用IMU获取目标物体的加速度和角速度等信息,结合积分运算得到目标的位置、速度和姿态等信息,实现适配动态作业工况。绞吸式挖泥船的惯性导航装置以绞刀头和船体为主体,能够对绞刀头的动态位移、船旋转角度及船体的姿态变化进行实时监测,特别是在卫星信号中断或声学信号受干扰的情况下,能够持续地提供定位数据,保证了清淤作业的持续定位。其具有抗干扰能力强、响应快、可自主定位等优点,可有效地解决卫星与声学定位技术卫星与声学定位技术的缺陷,适用于复杂的水下环境,但由于累积误差,导致定位精度降低,需要结合其他定位技术对其进行修正,以保证定位的可靠性^[3]。

4.2 多源融合精准定位技术

4.2.1 多源定位数据融合的核心逻辑与算法

多元定位数据融合的核心思想是推进卫星定位、声学定位和惯性三种定位方法相结合,通过数据融合算法消除单一技术的定位缺陷,从而达到对水下清淤的全方位高精度定位。其关键是通过统一校准、滤波去噪与信息互补,结合各技术适配场景动态分配定位权重,实现定位系统整体性能优化。目前主流的融合算法有卡尔曼滤波算法、粒子滤波算法和神经网络算法三种,卡尔曼滤波算法是目前最为流行的算法,利用预测-更新的迭代方式来校正多源定位的误差,滤除随机干扰信号,获得最优定位结果。

此种算法能有效处理动态工况下的定位数据波动,在保证定位精度和实时性的前提下,通过自适应调整滤波参

数,适配水流、风浪等环境变化。粒子滤波算法适用于非线性、非高斯系统,能提升复杂工况下的定位稳定性;在此基础上神经网络算法算法可通过样本训练优化融合策略,进一步提升定位精度与抗干扰能力。

4.2.2 船体-挖头协同定位模型的构建

船体-挖头协同定位模型的关键在于如何将船舶姿态与绞刀头的位置进行联系,并将二者的定位数据进行协调,以解决当前船舶作业中存在的绞刀头定位与船舶定位分离的难题。首先,相关人员需要对船体与绞刀头的几何参数(如船体长度、绞刀臂长度、绞刀臂悬挂高度等)的提取,并在此基础上进行建模,从而建立三维几何坐标系,将船体定位数据与绞刀头定位数据统一到同一坐标体系中。利用卫星定位技术获得船体的实时位置与姿态(俯仰角、横滚角、航向等),并与惯性导航数据相融合,获得绞刀臂的摆角、伸缩量等信息,并利用声学定位对其在水中的真实位置进行校验,从而建立多参数耦合的协同定位模型。在此期间,实时更新船体与绞刀头的动态参数,精确推演绞刀头的位置,并根据船体姿态变化,提前预判绞刀头的位移趋势,为作业调控提供提前量,消除因船体晃动导致的绞刀头定位偏差,提高整体定位精度与作业稳定性。

4.2.3 动态工况下定位数据的实时校正

在动态工况中,由于水流、风浪、船体的晃动以及绞刀头的切削反作用力等影响,极易引起定位数据的误差,需要构建定位数据实时校正机制,以保证其高精度,为此便需要从三大方向切入。首先是利用惯性导航技术获取的动态参数,结合水流速度、风浪等因素,建立误差预测模型,提前预判定位偏差趋势;其次是多源数据比对校正,利用卫星、声学 and 惯性导航技术的定位数据,进行实时的对比,筛选异常数据,借助融合算法修正偏差,特别是在单一技术定位失效的情况下,依托其他技术数据完成校正,以保障定位连续性;最后是现场标定校正,通过水下基准点标定和浅水区实测比对,更新定位系统参数,消除因设备老化和环境变化引起的系统性误差。

4.3 定位技术和清淤作业的协同控制

4.3.1 定位数据对挖泥深度、速度的调控机制

在实际操作期间,相关人员以 RTK-GPS+DGPS 融合定位技术结合声呐测深仪获取的定位数据为核心,为排泥过程的精确控制奠定基础。利用声学定位与惯性导航技术获得的绞刀头在水下的深度数据,并与预设清淤清淤深度相比较,为排泥过程的精确控制奠定数字化数据基础。利用声呐测深仪获得绞刀头在水下的实时高程数据,并与预设的数字高程模型(DEM)中的设计底高程相比较,在发现欠挖时,通过调整绞刀桥梁向下移动,增加开挖深度;在发生超挖情况下,将绞刀桥梁抬起,减小开挖深度,并根据姿态传感器反

馈的船体横摇、纵倾数据,修正绞刀头的测深误差,以保证清淤深度满足工程设计要求。并结合淤泥厚度、绞刀电流变化反馈的土质硬度等地质参数,对绞刀挖掘作业过程进行动态控制:在淤泥较厚且坚硬的情况下,减小船体航行速度,提高绞刀旋转速度,配合分层开挖(每层 0.5-2m)原则确保挖掘彻底,结合疏浚范围、边坡坡度的预设要求提高清淤精度。

4.3.2 精准定位和清淤效率的平衡

如何兼顾精确排沙和排泥效率是水下清淤的核心问题,需要通过对分条开挖的清淤方案和数字化定位的施工工艺的优化来达到二者的协同增效,避免“重精度轻效率”或“重效率轻精度”的问题。一方面,根据作业场景及本工法适用的 II 级航道、II - III 级疏浚土质要求,对高精度需求的区域,如港池疏浚、码头基槽开挖、航道边坡施工等,采取 10 次/s 的高频率定位采样和厘米级的 RTK-GPS 定位精度标准,结合多波束测深仪实时复核开挖面,确保操作质量。另一方面,对于需要高效处理的区域,如浅水区、大面积水库湖泊清淤等,可适当减少定位采样频率(每秒 3-5 次),结合 40m 标准分条、不足 30m 垂直分条的开挖原则提高工作效率,同时保留 5m 以上的条带重叠区,避免欠挖土埂形成,兼顾效率与基础施工精度。在此基础上,还需要针对性地研究 RTK-GPS、DGPS、姿态传感器、声呐测深仪的多源融合定位技术,降低定位数据的处理延时,减少由于定位等待造成的效率损耗;打造优化船体-绞刀头协同定位模型,实现对绞刀头位移的预测,从而缩短作业调整时间。同时构建基于实时定位数据、泥浆输送监控数据与清淤作业进程的动态优化机制,实现作业参数与定位策略的自适应调整,在保证设计底高程、边坡坡度等位置精度指标的前提下,结合泥浆浓度、流速的实时监测数据适当提升作业速度。

5 结语

综上所述,绞吸式挖泥船水下清淤精准定位技术是提升疏浚工程质量与效率的核心支撑,针对水下复杂环境导致的定位精度不足、稳定性欠佳等问题,相关单位可以分析卫星、声学、惯性导航三种单一定位技术的优势与局限,整合多源定位数据构建协同定位模型,优化动态工况下的误差校正方案,实现了船体与绞刀头的精准联动,同时建立定位与清淤作业的闭环调控机制,平衡了定位精度与作业效率。

参考文献

- [1] 冯宇.绞吸式挖泥船在海上施工中的应用与优化[J].区域水利水电技术与发展,2025,(00):118-122.
- [2] 周继辉,路萍.绞吸挖泥船疏浚成本分析与控制策略研究[J].水运工程,2025,(08):250-254.
- [3] 何顺鹏.河道治理工程疏浚与护坡施工技术应用研究[J].南国博览,2025,(03):80-83.

Research on the Coordinated Technology of Directional Drilling and Segmented Grouting in the Treatment of Water Hazards in Old Coal Mine Voids

Yang Yu

China National Institute of Geological Engineering Exploration and Research Co., Ltd., Beijing, 100010, China

Abstract

This article focuses on the difficult problem of water damage control in old coal mine voids, as well as the limitations of traditional water prevention and control technologies such as insufficient exploration accuracy and poor treatment effects. It studies the collaborative technology of directional drilling and segmented grouting. Old air water damage is the main safety threat to coal mines, with water seepage accidents accounting for over 90%. Accidents such as Wangjialing in Shanxi and Lijialou Coal Industry in Taiyuan highlight the urgency of technological research and development. Directional drilling accurately controls the trajectory, obtains water hazard information, and performs segmented grouting according to targeted operations. The two work together to solve drilling and grouting problems, and also clarify the construction plan and key points. After being applied in a coal mine in North China, the water inflow rate decreased from 50m³/h to below 5m³/h, and the old empty water was sealed, but there were problems such as high equipment costs and difficult control of slurry diffusion. This technology has broad prospects and can improve efficiency through equipment research and development, technological optimization, and expanded applications in the future.

Keywords

coal mine old air water damage; collaborative technology; engineering case; governance effect

煤矿老空水害治理中定向钻进与分段注浆协同技术研究

于洋

中材地质工程勘察研究院有限公司, 中国·北京 100010

摘 要

本文针对煤矿老空水害治理难题, 及传统防治水技术探查精度不足、治理效果差的局限, 研究定向钻进与分段注浆协同技术。老空水害为煤矿主要安全威胁, 透水事故占比超 90%, 山西王家岭、太原李家楼煤业等事故凸显技术研发紧迫性。定向钻进精准控轨迹、获水害信息, 分段注浆依此针对性作业, 二者协同解决钻孔与注浆问题, 还明确施工方案及关键点。华北某煤矿应用后, 涌水量从 50m³/h 降至 5m³/h 以下, 老空水被封, 但存在设备成本高、浆液扩散难控问题。该技术前景广, 未来可通过设备研发、技术优化、拓展应用提升效能。

关键词

煤矿老空水害; 协同技术; 工程案例; 治理效果

1 引言

煤炭作为我国关键能源, 在经济发展中作用突出, 但煤矿开采面临诸多安全隐患, 老空水害是主要威胁之一。老空水指古井、水窑、废巷及采空区积水, 采掘工作面接近或沟通这些区域时, 易引发透水事故。据统计, 透水水源为老空(窑)区积水及地表洪水的事占比超 90%, 采空区积水突水具有时间短、破坏性强的特点, 常致人员伤亡与重大损失。如 2010 年山西王家岭矿难, 老空水透水致 153 人被困、

38 人遇难, 直接损失近 5000 万元; 2024 年太原李家楼煤业水害事故, 因未查明老空积水, 掘进超掘引发事故, 3 人遇难, 损失 919 万元。传统防治水技术存在探查精度不足、复杂地质条件下治理效果差等局限, 研发先进技术刻不容缓。定向钻进与分段注浆协同技术优势显著, 前者可精准控制钻孔轨迹以获取水害信息, 后者能依地质与水害情况分段精准注浆, 实现堵水加固, 对提升老空水害治理水平、保障煤矿安全意义重大。

2 定向钻进与分段注浆协同技术

2.1 协同技术的作用机制

定向钻进技术依托先进导向系统, 可精确控制钻孔轨迹, 钻进中通过随钻测量仪器实时监测方位、倾角等参数,

【作者简介】于洋(1987-), 男, 蒙古族, 中国辽宁阜新人, 本科, 中级工程师, 从事地质矿产研究。

及时调整方向以确保钻孔精准抵达老空水区域，同步获取老空水位置、水量、水压等详细信息，为后续分段注浆提供关键依据，保障注浆精准性。分段注浆技术依据定向钻进获取的信息，结合地层地质条件与老空水分布特点，将钻孔划分为若干注浆段，针对性开展注浆作业。注浆时依各段情况精准控制压力、量及浆液配比：岩石破碎、裂隙发育区用低压力缓慢注浆，确保浆液充分填充裂隙；岩石完整区适当提高压力，促进浆液渗透至微小孔隙，增强岩体整体性与抗渗能力，防止老空水复涌^[1]。

定向钻进与分段注浆技术相互配合，形成了一个有机的整体。定向钻进为分段注浆提供了精准的钻孔通道和详细的水害信息，使得分段注浆能够更加准确地实施；分段注浆则对定向钻进所形成的钻孔进行了加固和封堵，防止钻孔坍塌，同时有效地治理了老空水害，提高了水害治理的效果。两者协同工作，从根本上解决了老空水害治理中钻孔精度不足和注浆效果不佳的问题，为煤矿安全生产提供了有力的保障。

2.2 协同技术的施工方案设计

施工方案的设计需要综合考虑老空水的分布范围、积水深度、水压大小以及地质条件等多方面因素。在钻孔布置上，根据老空水的分布情况，采用扇形或网格状布置方式，确保钻孔能够覆盖整个老空水区域。对于分布范围较广的老空水，适当增加钻孔数量，缩小钻孔间距，以提高探查和治理的精度；对于积水深度较大的区域，合理调整钻孔的角度和深度，确保钻孔能够穿透积水层，达到有效的治理深度。注浆分段是施工方案设计的关键环节之一。根据地质条件的变化，将钻孔划分为不同的注浆段，一般来说，在岩石破碎、裂隙发育的区域，注浆段长度较短，以便更好地控制注浆效果；在岩石相对完整的区域，注浆段长度可以适当增加。例如，在某煤矿老空水害治理工程中，根据地质勘探资料，将钻孔分为5-8个注浆段，每个注浆段长度在5-10米之间，通过这种合理的分段方式，有效地提高了注浆的针对性和效果。施工顺序上，先进行定向钻进施工，按照设计的钻孔轨迹进行钻进，在钻进过程中，实时记录钻孔的各项参数和遇到的地质情况^[2]。当钻孔到达预定位置后，进行分段注浆施工。在注浆前，对钻孔进行清洗和检查，确保钻孔畅通无阻。然后，按照预先设计的注浆分段，从孔底开始，逐段进行注浆，每完成一段注浆，待浆液凝固后，再进行下一段注浆，直至完成整个钻孔的注浆作业。

2.3 协同技术的关键技术要点

钻孔轨迹控制是定向钻进的核心技术要点。在钻进过程中，要密切关注随钻测量仪器所反馈的信息，及时调整钻进参数，如钻压、转速、泵量等，以保证钻孔按照预定轨迹前进。当遇到地质条件变化，如岩石硬度突然增大或减小、出现断层等情况时，要及时分析原因，采取相应的措施，如调整钻进方向、更换钻头等，确保钻孔轨迹的准确性。同

时，要定期对定向钻进设备进行维护和校准，保证设备的精度和可靠性。注浆压力和流量控制对于分段注浆的效果起着决定性作用。注浆压力过小，浆液无法有效渗透到岩体的裂隙和孔隙中，导致注浆效果不佳；注浆压力过大，则可能会造成岩体破裂，引发新的安全隐患。因此，在注浆过程中，要根据不同的注浆段和地质条件，合理设定注浆压力和流量^[3]。一般来说，在初始注浆阶段，采用较低的压力和流量，使浆液能够缓慢地填充岩体的大裂隙；随着注浆的进行，逐渐提高压力和流量，使浆液能够进一步渗透到岩体的微小孔隙中。同时，要实时监测注浆压力和流量的变化，根据实际情况进行调整。止浆塞的设置是防止浆液回流和保证注浆质量的重要措施。止浆塞应具有良好的密封性能和耐压性能，能够在注浆过程中有效地阻止浆液回流。在设置止浆塞时，要确保其位置准确，安装牢固。一般将止浆塞设置在注浆段的顶部和底部，对于较长的注浆段，还应在中间适当位置增设止浆塞。在注浆前，要对止浆塞进行检查和测试，确保其性能良好，在注浆过程中，要密切关注止浆塞的工作状态，如发现异常，应及时处理。

3 工程案例

3.1 案例背景介绍

某煤矿位于华北地区，开采历史悠久，井田范围内存在大量老空区。本次研究的老空水害区域位于该煤矿的西部采区，该区域曾进行过多次煤炭开采活动，形成了复杂的采空区网络。经前期勘查，如图一所示，初步确定水害位置在西部采区的深部，范围涉及多个采空区，面积约为5000平方米。该区域老空水的危害程度极高。一方面，老空水的积水量较大，初步估算积水量达10万立方米以上，且水压较高，对周边采掘工作面构成巨大的水害威胁；另一方面，该区域的地质条件复杂，煤层顶板破碎，裂隙发育，老空水一旦涌出，极易引发顶板垮塌、巷道淹没等事故，严重威胁矿井的安全生产和人员生命安全。从地质条件来看，该区域地层主要由砂岩、泥岩和煤层组成。砂岩为主要含水层，具有较强的透水性；泥岩为相对隔水层，但在长期的开采活动影响下，部分泥岩隔水层遭到破坏，导致老空水在不同含水层之间相互连通，增加了水害治理的难度。此外，该区域还存在多条断层，断层附近岩石破碎，是老空水的良好导水通道，进一步加剧了水害的复杂性。

3.2 定向钻进与分段注浆协同技术应用过程

在该煤矿老空水害治理中，首先进行了详细的定向钻进施工。根据前期的地质勘查资料，利用定向钻进技术的精准定位优势，如图二所示，设计了多条钻孔轨迹。在钻孔布置上，采用扇形布置方式，共布置了5个钻孔，以确保能够全面覆盖老空水区域。每个钻孔的深度根据老空水区域的深度和位置进行设计，平均深度达到了300米。钻进过程中，采用了先进的无线随钻测量系统，实时监测钻孔的方位、倾

角、深度等参数。通过对这些参数的分析,及时调整钻进方向和钻进参数,确保钻孔能够准确地抵达老空水区域。例如,在钻进过程中,当发现钻孔轨迹偏离预定方向时,通过调整螺杆钻具的角度和钻进压力,使钻孔重新回到预定轨迹上。在遇到岩石硬度较大的区域时,适当增加钻进压力和转速,提高钻进效率。当定向钻进完成后,进入分段注浆施工阶段。根据定向钻进所获取的地质信息,对钻孔进行了合理的分段。将每个钻孔分为5-8个注浆段,每个注浆段长度在5-10米之间。在浆液配比方面,针对不同的注浆段和地质条件,采用了不同的浆液配方。对于岩石破碎、裂隙发育较大的区域,采用了水泥-粉煤灰混合浆,其配比为水泥:粉煤灰=1:2,以提高浆液的填充效果;对于岩石相对完整、裂隙较小的区域,采用了纯水泥浆,水灰比为0.6:1,以增强浆液的粘结强度和抗渗性。

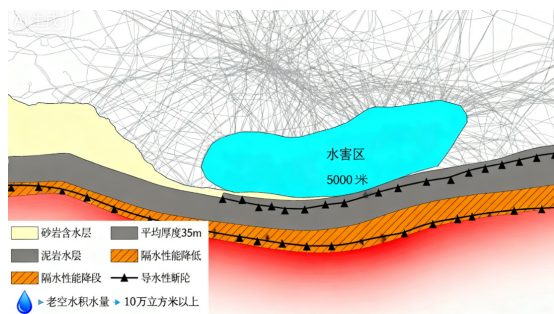


图1

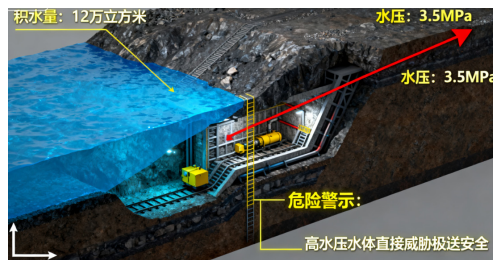


图2

在注浆过程中,严格控制注浆压力和注浆量。根据不同的注浆段和地质条件,设定了不同的注浆压力。在初始注浆阶段,注浆压力控制在0.5-1.0MPa,使浆液能够缓慢地填充岩体的大裂隙;随着注浆的进行,逐渐提高注浆压力,在终注阶段,注浆压力达到2.0-3.0MPa,使浆液能够进一步渗透到岩体的微小孔隙中。同时,根据钻孔的吸浆量和注浆压力的变化,实时调整注浆量,确保每个注浆段都能够得到充分的注浆。止浆塞的设置也是分段注浆施工的关键环节。在每个注浆段的顶部和底部,均设置了高性能的止浆塞,以防止浆液回流。在设置止浆塞时,确保其位置准确,安装牢固,并在注浆前对止浆塞进行了严格的检查和测试,确保其密封性能良好。

3.3 治理效果分析与评价

通过对涌水量监测数据的分析,在应用定向钻进与分

段注浆协同技术治理前,该区域的涌水量较大,平均涌水量达到了50立方米/小时。治理后,涌水量明显减少,稳定在5立方米/小时以下,表明老空水得到了有效的封堵。通过对钻孔检查,发现注浆段的岩体得到了明显的加固,岩石的完整性和强度得到了提高,钻孔周围的裂隙被浆液充分填充,形成了有效的隔水层。该协同技术在老空水害治理中取得了显著的效果,具有精准定位、高效治理的优点。通过定向钻进技术,能够准确地获取老空水区域的信息,为分段注浆提供了有力的支持;分段注浆技术则能够根据不同的地质条件进行针对性的注浆,有效地封堵了老空水的通道,加固了岩体。然而,该技术在应用过程中也存在一些不足之处。例如,定向钻进设备的成本较高,对操作人员的技术要求也较高;分段注浆过程中,浆液的扩散范围难以精确控制,可能会导致部分区域注浆不充分。针对这些问题,提出以下改进方向:一是进一步研发和改进定向钻进设备,降低设备成本,提高设备的稳定性和可靠性,同时加强对操作人员的培训,提高其技术水平;二是加强对浆液扩散规律的研究,通过数值模拟等手段,更加准确地预测浆液的扩散范围,优化注浆参数,提高注浆效果;三是结合其他先进的物探技术,如瞬变电磁法、地质雷达等,对老空水区域进行更加全面、准确的勘查,为定向钻进与分段注浆协同技术的应用提供更加可靠的地质资料。通过这些改进措施,有望进一步提高定向钻进与分段注浆协同技术在煤矿老空水害治理中的应用效果,为煤矿安全生产提供更加有力的保障。

4 结论

本研究探究定向钻进与分段注浆协同技术在煤矿老空水害治理中的应用,收获重要成果。技术原理上,定向钻进借先进设备精准控轨迹、获老空水信息,分段注浆依此分注浆段作业,加固岩体、提抗渗能力,二者协同形成理论基础。工艺上,结合多因素设计方案,明确钻孔布置、注浆段划分及施工顺序,总结关键点。案例显示,某煤矿应用后涌水量大减、老空水被封,但存在设备成本高、操作要求高、浆液扩散难控问题。该技术前景广,能弥补传统技术不足,降风险、保安全,具显著经济与社会效益。未来可从三方面发展:研发改进设备降成本、提稳定性,开发智能控制系统减人工依赖;加强浆液扩散规律研究优化参数,探索与AI、大数据结合实现智能化;拓展至隧道、地铁等地下工程水害治理,扩大应用范围,为能源与工程安全助力。

参考文献

- [1] 郝孟杰.地面定向钻进技术在陷落柱探查治理中的研究与应用[J].煤炭与化工,2024,47(10):76-79+102.
- [2] 郑士田,马荷雯,姬亚东.煤层底板水害区域超前治理技术优化及其应用[J].煤田地质与勘探,2021,49(05):167-173.
- [3] 王今朝,曹栋.地面定向钻进技术在导水断层治理中的技术研究与应用[J].煤炭与化工,2021,44(02):42-45.

Research on Safety Risk Control and Optimization Strategy in Power Engineering Construction

Weiqi Lu

Hongye New Energy Co., Ltd., Zhanhua District, Binzhou City, Binzhou, Shandong, 256600, China

Abstract

Power engineering projects are characterized by large-scale construction and complex technologies, making safety risk management critically important. Current projects face multiple safety challenges including variable working environments, potential hazards in equipment/materials, non-standardized operational practices, and loopholes in management processes. To enhance safety standards, four key strategies should be optimized: implementing multidimensional dynamic risk assessment for precise identification; establishing technical prevention systems through intelligent monitoring and early warning technologies; creating comprehensive responsibility allocation mechanisms with closed-loop rectification processes; and strengthening competency development through tiered training programs and practical skill evaluations. These measures can effectively reduce accident rates and drive the advancement of power engineering safety management toward systematic and intelligent approaches.

Keywords

Power Engineering; Safety; Risk

电力工程建设中的安全风险管控与优化策略研究

鲁维奇

滨州市沾化区宏烨新能源有限公司, 中国 · 山东 滨州 256600

摘 要

电力工程建设规模大、技术复杂, 其安全风险管控至关重要。当前工程中存在作业环境多变、设备材料隐患多、人员操作不规范及管理流程漏洞等安全风险。为提升安全水平, 需从四方面优化管控策略: 通过多维动态评估实现风险识别精准化; 利用智能监测与预警技术构建技术防控体系; 建立全链条责任分解与闭环整改机制; 加强分级培训与实操考核提升人员能力。实施这些策略可有效降低事故发生率, 推动电力工程建设安全管理向系统化、智能化方向发展。

关键词

电力工程; 安全; 风险

1 引言

电力工程建设是国民经济的重要组成部分, 也是保障国家能源安全的关键环节, 而对安全风险进行有效控制是保证工程顺利进行、提高工程质量以及保障施工人员生命安全的前提条件, 在工程越来越大、越来越复杂的今天, 传统的安全管理方法已经不能满足需求。本文针对电力工程建设过程中存在的安全隐患, 从安全隐患的认识、技术防范手段、管理制度以及人员素质等方面入手, 分析如何做好安全管理以及改进措施, 以期达到全方位、多层次的安全防护的目的, 促进电力工程行业健康有序地发展。

2 电力工程建设中潜在的安全风险

电力工程建设规模庞大、工序繁杂, 蕴含着诸多潜在安全风险。

从施工环境来看, 电力行业施工经常有高处、深基坑、交叉作业等情况。高处作业中, 由于安全防护不到位或者天气原因, 工人容易发生坠落事故; 深基坑施工中, 容易造成塌方, 威胁到施工人员的生命安全; 交叉作业场所, 各种工种同时施工, 物体打击的风险大大提升^[1]。设备及材料的风险也很大。电力设备庞大、笨重, 在起吊、搬运的过程中, 如果方法不当, 会造成设备损毁以及人员伤害。另外, 电力工程建设对于材料的质量要求很高, 如果使用了不合格的电

【作者简介】鲁维奇（1984—），男，中国黑龙江泰来县人，本科，工程师，从事电力工程研究。

入施工现场等。而且,电力工程项目建设周期较长,在较长时间进行繁重的工作会使得工人身心疲惫,精神恍惚,进而提升事故发生率。再者,施工现场缺乏有效的监管,安全管理不到位也会导致隐患不能够及时发现而被忽视,给工程带来极大的危害^[2]。

3 电力工程建设中的安全风险管控与优化策略

3.1 风险识别精准化

电力工程建设项目施工安全隐患具有隐秘性、连锁性和变化性特点,在单一维度上进行风险辨识容易忽略一些问题。需要构建包括“人-机-环-管”的全方位、多层次的风险辨识方法,以便准确找出根源并采取相应措施^[3]。

作业环境风险识别要打破传统的地质勘查限制,在考虑气象条件、地下管线位置以及周围构筑物工作情况的基础上建立三维空间的风险模型。例如,在山地地区进行线路建设时需要考虑岩石土壤稳定性、植被覆盖率以及降水量对于边坡防护作用的影响;在城市中开展电网升级改造工作中应利用地下雷达确定天然气管道、通讯线缆等具体位置以防挖掘施工造成事故的发生。同时也要考虑到恶劣气候给高处作业、带电作业带来的不利因素比如雷雨天气中的感应电流危险、炎热天气下的电器设备超负荷运转等。

设备与材料风险识别应贯穿全生命周期管理,在设备采购时就应对供应商进行评估,保证主要设备达到国家标准或者行业标准;在设备入场时要实行“开箱检验+第三方认证”的方式,着重检查变压器绝缘以及GIS设备密封性等重要参数;在使用过程中要为每台设备建立健康档案,利用红外测温、局部放电测试等方法,及时掌握设备情况,对于服役年限较长或存在隐患的设备强制报废。对于材料管理上也要有相应措施,在生产线上就对水泥、电线电缆等重要物资进行质量控制并在工地现场做好追踪,防止低劣产品进入工程项目中。

人员行为风险识别需要摆脱传统的凭经验判断的方法,采用行为分析方法。利用安装在智能安全帽上的定位模块以及摄像头获取工作人员的位置以及工作过程中的画面,通过人工智能进行分析发现未佩戴安全带或者违章穿越隔离带的行为;通过人脸识别防止未经培训人员进入危险区,配合电子围栏进行分区控制。同时还需要有对工人疲劳程度检测,通过对生理信号或者是工作时间来判断连续长时间工作的工人必须休息,防止由于疲劳造成事故。

管理流程风险识别应关注制度执行效果。利用流程挖掘方法对技术交底、审批许可、隐患整改等工作流程进行建模并分析其中存在的问题,比如检查深基坑支护方案是否经过专家论证、动火作业票是否还在有效期内、隐患整改是否形成闭环等,以数据为基础发现管理中的不足之处从而促使制度由“纸上谈兵”变为“付诸实施”。

3.2 技术防控智能化

在工程建设行业,安全风险防控是整个项目建设过程

中的一个重要问题。伴随着建筑、水利水电等行业的发展壮大,传统的以人工检查为主、事后补救的方法已经不能满足当今工程建设对安全的要求。而技术防控智能化是一种新的思路,在此基础上结合最新信息技术与工程实际应用,使安全防范由原来的“亡羊补牢”变为现在的“未雨绸缪”,是减少安全事故、提高工程质量及生产率的有效手段。

本质安全设计是技术防控智能化基础,在整个工程项目设计方案及施工准备过程中都要考虑,防止出现隐患。在方案设计上,要尽可能采用低危害方式,不用原来高危害老方法、老设备,用智能化技术代替危险作业工况,如使用无人机进行线路巡视代替人工上塔作业,由于无人机灵活性好,可以对高空复杂部位进行全面检查,杜绝了人员坠落、高空作业伤害风险;使用电缆沟探测机器人代替人工进入电缆沟内检查,由机器人带各种传感器判断电缆沟内部损伤情况以及积水状况等,防止人工下沟发生坍塌或者触电等情况。对于必须人工干预部分,在此基础上增加冗余以提高安全性,在高空作业平台上安装双钩安全带以及防坠落水平网两种保护措施来保证工作人员的安全。

施工过程中的智能化技术应用,是本质安全设计的具体体现。利用BIM技术建立工程项目三维模型,在此基础上可以进行管道布置、结构搭建等工作,及时发现管道之间冲突、结构之间矛盾等问题,从而有利于合理安排施工顺序以及布置施工场地,避免施工期间发生危险;另外,采用数字孪生技术可创建与实物相同的虚拟环境,在其中对深基坑开挖、高支模搭设等危险性较大的工序进行仿真演练,以检查施工计划有效性,预测施工中可能发生结构变形或者受力不均等情况,以便及时作出相应改进措施,从而保障施工安全。

建立实时监测预警系统是进行主动防控的基础工作。建立多种参数结合的感知网络,在工程的重要部位以及危险区设置智能传感器,对全场的安全信息进行采集,在起重机、塔吊等主要设备上,安装力矩传感器、倾斜角度检测器等,时刻获取设备的工作状态,当这些信息超过规定范围时,发出声音和灯光警报并且使相关设备停止运转,防止设备超载或者倾翻等情况的发生。对于深基坑、高支模等存在较大安全隐患位置处布置位移计、应力计进行实时监测,在此基础上采用数值计算方法对土体位移及结构应力变化情况加以分析判断其安全程度,当发现有危险征兆时及时发出警报,疏散作业人员并采取相应补救措施。

3.3 管理机制闭环化

安全管理工作效果取决于责任落实到位以及过程闭合,需要有制度化、标准化的方法形成全过程的责任制。

责任分解及考核要落实到“横向到边、纵向到底”。由项目经理牵头成立专门的安全管理小组,明确设计、施工、监理等各方的责任分工,签订“安全生产责任书”,把每一个风险点分配到班组和个人;实行“安全网格员”制度,在每一个施工区域内设置一名专职安全员,对其所辖范围内安

全隐患进行检查并督促其整改；实行安全积分制，将发现隐患、按标准作业等行为纳入考核内容，对于连续未发生事故的班组予以奖励，对于违章行为予以扣分处罚，形成“人人关心安全、事事注重安全”的良好局面。

审批许可及旁站监督要重点加强高风险作业管理。对于动火作业、有限空间作业、高处作业等一级风险作业采取“作业许可+旁站监督”，作业前要经过班组、项目部、专家三级线上会签，在线审核作业时间以及签字是否齐全；作业期间有专人进行现场监护，利用智能安全帽将作业情况及时上传到平台，保证防护措施落实到位；对于电缆耐压试验、GIS设备安装等重要环节，采用“双监护、双审批”，由施工单位和监理单位共同确认其安全性，防止由于一方粗心大意造成事故发生。

隐患排查治理要形成闭环管理。建立隐患台账，将发现隐患分门别类记录，确定责任人、整改措施及完成时间；利用信息化手段对隐患整改情况进行实时监控，对于逾期未完成隐患及时进行预警并上报上级领导；定期组织隐患整改回头看活动，对于屡次发生的相同隐患进行原因剖析，在制度上、流程上或者技术上提出解决办法，防止隐患反复发生。同时还要有“风险追溯系统”，对于事故（包括未遂事件）实行四不放过原则，根据现场视频资料以及人员位置信息回放整个过程，找出责任人进行处罚。

应急管理及资源配备应提高及时性。对于触电、坍塌、火灾等常见事故情形，制定“一图两卡”（应急处置流程图、风险告知卡、操作卡），并提出“3分钟应急响应、15分钟现场处理、1小时原因查明”的时间限制；每季度进行一次无脚本演练，如“变压器发生爆炸造成大火”，考核各部门配合情况；演练完毕后召开总结会议，通过鱼骨图找出不足之处并改进完善方案。从资源角度考虑，在施工现场必须备有AED、绝缘杆、应急发电车等设备并做好检查工作；并与临近医疗机构以及消防队签订合作协议，在有人员严重受伤时能够在30分钟之内将其送至医院进行治疗。

3.4 人员能力专业化

人员是安全管控中最为活跃也是最重要的因素，在本质安全基础上，要杜绝简单粗暴的管理方式，建立科学化、专业化的全员能力建设机制，在资质技能、文化意识、技术交底以及身体健康上进行有针对性的培养。

开展分层次培训及“双准入”，打牢基础。培训要实现“全员覆盖、分类施策”，严格执行“岗位资质+实操考核”的标准。对焊工、电工等特殊工种采取VR技术进行触电急

救、高空坠落等情景演练，使他们在虚拟环境中学会救命本领并取得国家相关部门颁发资格证后方可从事相关工作；另一方面紧跟时代发展潮流，进行智能化巡检机器人使用、区块链物料管理等方面新技术培训，使员工具备先进生产能力。实行全过程跟踪记录制，把考核结果作为评优晋级依据，促进提高技能水平。

加强安全文化建设，从“被动合规”到“主动防御”。把安全意识渗透到每个员工血液里，在每天的安全晨会上由班组长讲解当天的风险点并进行互动问答加深印象。实行正向激励，选出“安全行为之星”，大力表扬那些积极排查隐患以及遵章守纪的人，用各种方式宣传他们的事迹，在企业中形成“比学赶超”的良好风气。以知识竞赛和技能比武的形式使安全深入人心成为企业的一种文化，提高全体员工的安全认同度。

对于深基坑、GIS安装等复杂工序，通过“BIM模型+AR技术”进行可视化交底，在现场扫描出一个三维动画，使标准清晰明了；施工人员了解并签字确认后填写“责任确认书”，界定班组和个人的责任；对重要部位实行“举牌验收”，拍照记录验收情况，便于以后查询质量及安全问题，做到理解清楚、落实到位。

建立人员健康档案，及时发现并调整有慢性疾病的职工的工作岗位。改善工作环境，在有空调、饮水设备舒适休息区。用电子化手段监控工作时间和身体指标，对于长时间工作的人员强制休息，防止过度劳累。同时做好心理辅导，减轻工作压力，让员工保持良好精神面貌进行工作。

4 结语

电力工程建设安全风险管控是长期系统工程，需以精准识别、智能技术、闭环制度、专业人员为核心，构建“四位一体”管控模式。通过风险监测预警、优化施工工艺、压实全过程责任、提升全员安全意识，实现从事后处置向事前预防转变，推动工程安全健康发展。未来随着5G、物联网、数字孪生与人工智能的发展，管控将更智能高效，为本质安全型工程建设提供重要支撑。

参考文献

- [1] 杨俊聪.关于电力工程现场施工管理的措施探讨[J].新疆钢铁, 2025, (04): 226-228.
- [2] 樊锦途.新时代电力工程管理中间题与安全文化建设[J].现代企业, 2025, (12): 25-27.
- [3] 唐炳天.材料防伪与质量监督在电力工程中的应用探索[J].中国品牌与防伪, 2025, (14): 160-162.

Research on the Construction and Accuracy Improvement of Mineralization Prediction Models in Mineral Resource Exploration

Zhaotao Meng

The First Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geological Administration, Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

Abstract

Mineral resource exploration's mineralization prediction is a crucial means to enhance exploration efficiency and accuracy. As the demand for mineral exploration continues to grow, traditional mineralization prediction methods face challenges in terms of precision and efficiency. This paper primarily investigates the construction of mineralization prediction models and their accuracy improvement in mineral resource exploration. By analyzing the basic concepts and development history of mineralization prediction, the paper explores key technologies such as data collection and processing, algorithm selection, and optimization. It focuses on factors affecting prediction accuracy, such as the quality and completeness of geological data, model parameter selection and adjustment, and the influence of external environmental factors. Additionally, this paper proposes the use of diversified data fusion, machine learning and artificial intelligence applications, as well as cross-validation and accuracy evaluation methods as effective ways to enhance prediction precision.

Keywords

Mineral resource exploration; Mineralization prediction; Data processing; Machine learning; Accuracy improvement

矿产资源勘查中成矿预测模型构建与精度提升研究

孟兆涛

中国冶金地质总局第一地质勘查院, 中国·河北 秦皇岛 066000

摘 要

矿产资源勘查中的成矿预测是提高勘查效率和准确性的重要手段。随着矿产勘查需求的不断提升,传统的成矿预测方法面临着精度和效率的挑战。本文主要研究矿产资源勘查中成矿预测模型的构建与精度提升。通过对成矿预测的基本概念与发展历程进行分析,探讨了数据采集与处理、算法选择与优化等关键技术。重点分析了影响成矿预测精度的因素,如地质数据的质量与完整性、模型参数的选择与调整以及外部环境因素的影响。同时,本文还提出了多元化数据融合、机器学习与人工智能的应用以及交叉验证与精度评估方法作为提升预测精度的有效途径。

关键词

矿产资源勘查; 成矿预测; 数据处理; 机器学习; 精度提升

1 引言

矿产资源勘查是资源开发的重要前提,而成矿预测作为勘查工作的核心内容,直接影响勘查的效果和资源的开发利用。随着技术进步与数据分析手段的日益发展,成矿预测模型逐步成为矿产资源勘查的重要工具。传统的成矿预测方法主要依赖于地质经验和直接的勘探结果,但随着地质条件的复杂性与勘查规模的扩大,传统方法的局限性日益显现。因此,构建科学合理的成矿预测模型,尤其是提升其精度和

适应性,成为矿产资源勘查中的一项关键任务。当前,基于现代数据采集与处理技术,结合地质信息和多源数据融合,利用人工智能与机器学习技术优化预测模型,成为提升预测精度的重要途径。

2 矿产资源勘查中成矿预测模型的理论基础

2.1 成矿预测的基本概念

成矿预测是通过科学的分析方法,根据地质特征、矿产分布规律和相关数据,预测潜在矿产资源的位置和富集程度。其核心目标是通过通过对现有地质条件的详细研究,结合数据分析技术,对矿产资源进行定量预测。成矿预测不仅依赖于地质学原理,还包括对矿床成因、成矿规律及区域地质背

【作者简介】孟兆涛(1983—),男,中国河北承德人,硕士,工程师,从事地质勘查研究。

景的深入理解。在矿产资源勘查过程中，成矿预测为寻找潜在资源区域提供了科学依据，极大地提高了勘查效率与准确性。通过对地层、构造、岩性等地质信息的整合分析，成矿预测能够帮助勘探人员识别可能的矿产分布模式。

2.2 成矿预测模型的分类与发展历程

成矿预测模型从传统的地质分析方法逐步发展到现代的数学建模与数据驱动方法。最初，成矿预测主要依赖于地质学家经验和对矿区地质特征的直观判断，属于经验型预测方法。进入21世纪，机器学习与人工智能技术的引入，使成矿预测模型更加精准与智能化。现代成矿预测模型不仅能够处理复杂的非线性关系，还能通过大数据技术整合多源信息，提升了预测结果的可靠性和准确性。不同类型的模型，如人工神经网络、支持向量机以及深度学习模型，已在成矿预测中得到了广泛应用，极大地推动了矿产勘查领域的科技进步^[1]。

3 成矿预测模型构建的关键技术

3.1 数据采集与数据处理技术

数据采集是成矿预测的基础，涉及到对地质、地球物理、地球化学等多种类型数据的采集。在传统的矿产勘查中，常用的采集技术包括岩土钻探、地面勘测以及遥感影像等。随着技术的发展，现代矿产勘查越来越依赖于高精度仪器设备和智能化采集系统。无人机航测、遥感影像分析以及三维地质建模技术成为数据采集的重要手段。数据处理则是将采集到的原始数据转化为可以进行科学分析的信息，常用的技术包括地质信息系统（GIS）、数字地形分析（DTM）和三维建模技术。GIS技术能够有效地整合不同来源的地质数据，生成地质分布图，从而为成矿预测提供详细的地理信息。

3.2 成矿预测模型的算法选择与优化

成矿预测模型的算法选择至关重要，直接影响模型的预测精度。当前，常用的预测算法包括基于统计学的回归分析方法、基于模式识别的支持向量机（SVM）和人工神经网络（ANN），以及基于决策树的随机森林等。回归分析法通过分析地质数据与矿产分布的关系，建立线性或非线性模型，从而预测矿产资源的分布。支持向量机和人工神经网络则能够处理更复杂的非线性关系，通过训练模型优化预测结果。此外，深度学习算法近年来在成矿预测中得到了广泛应用，尤其是在复杂地质条件下，能够识别更多潜在的矿区特征^[2]。优化算法的选择通常基于数据的复杂性、样本量和预测精度的要求，不同的算法有各自的优势和适用范围。通过不断优化模型的参数和算法结构，可以有效提升成矿预测的精度和稳定性。

3.3 地质特征与矿产分布的相关性分析

地质特征与矿产分布之间存在着密切的相关性，成矿预测模型的构建必须充分考虑这些地质特征。常见的地质特征包括岩性、构造、矿床类型、地质历史等，这些因素与矿

产的分布密切相关。为了分析地质特征与矿产分布之间的相关性，常用的技术包括主成分分析（PCA）、地质统计学方法、相关性分析与回归分析。主成分分析能够将大量的地质数据转化为少量的关键因素，从而减少数据的维度并提取重要信息。地质统计学方法则能够通过样本数据的空间分布规律，分析矿体的分布特征。回归分析则用于定量描述地质特征与矿产资源之间的关系。通过这些技术手段，能够有效识别和评估不同地质特征对矿产资源分布的影响，进一步提高成矿预测的精度。

4 影响成矿预测精度的因素分析

4.1 地质数据的质量与完整性

成矿预测模型的精度与所用地质数据的质量和完整性密切相关。对于地质数据的采集，尤其是矿区的岩土钻探数据、地球物理数据和化学分析数据的精度和完整性直接影响预测结果的可靠性。在某些矿区，数据的采集深度达到200米，而在一些深部矿产勘查中，数据采集深度甚至可达1000米。数据的完整性至关重要，若地质数据存在缺失或不准确的情况，预测结果会受到较大影响。通过对1000个采样点的分析，若有20%的数据存在误差，将导致成矿预测模型的误差增大30%。数据处理技术如地质信息系统（GIS）和地球化学数据统计分析技术的应用，可以在一定程度上解决数据不完整的问题，通过补充数据和多源数据融合来提升数据的质量和精度。因此，确保地质数据的质量与完整性是提高成矿预测精度的基础^[3]。

4.2 模型参数的选择与调整

在成矿预测中，模型参数的选择和调整对于预测结果的准确性至关重要。例如，在支持向量机（SVM）模型中，核函数的选择、惩罚因子的设定以及样本权重的调整都会直接影响预测的精度。在不同矿区的成矿预测中，使用了不同的核函数类型（如径向基函数核和线性核函数），其模型性能差异高达15%。对于数据的处理，常见的技术有归一化、标准化等数据预处理方法，而这些方法的选择直接影响模型训练的效果。优化模型参数通过网格搜索和随机搜索等算法，可以在训练过程中进行有效调整。例如，通过对模型参数进行优化，使得成矿预测精度提高了20%^[4]。因此，参数的合理选择和调整能有效提升预测模型的精度。

4.3 外部环境因素对成矿预测的影响

外部环境因素，如气候变化、地震活动和水文条件等，也对成矿预测的准确性产生重要影响。气候变化导致的岩层膨胀或收缩会改变地下矿产的分布，从而影响成矿预测结果。例如，在某些矿区，由于气候干旱，地下水位下降了40%，直接影响了地质数据的准确性。地震活动的发生也可能导致地质构造的改变，进而影响矿床的分布情况。在矿产勘查过程中，通常利用遥感技术和地震数据分析来研究这些外部因素对矿区地质结构的影响。通过对500个区域的地震

活动进行分析，发现约 25% 的矿区受地震活动影响，预测结果的精度下降了 18%。因此，在成矿预测中，考虑到外部环境因素，利用环境数据进行综合分析，可以有效提升预测模型的精度，详细内容见表 1 分析。

表 1 成矿预测精度影响因素分析表

影响因素	描述	数据来源	数据处理方法	数据分析技术	精度提升
地质数据的质量与完整性	地质数据采集的深度、准确度和完整性直接影响预测精度，缺失数据导致预测误差增大。	岩土钻探、遥感影像、地球物理数据	数据预处理(标准化、归一化)	GIS、地质统计学、主成分分析(PCA)	提高数据准确性，避免数据缺失造成的误差增加 30%
模型参数的选择与调整	模型参数如核函数选择、惩罚因子的设定影响预测结果的准确性。通过参数优化提高精度。	支持向量机(SVM)、人工神经网络(ANN)	网格搜索、随机搜索优化模型参数	支持向量机(SVM)、深度学习算法	优化参数后，预测精度提高 20%
外部环境因素的影响	外部环境如气候变化、地震活动等改变地质结构，导致预测误差。	气候、地震活动、地下水水位	遥感数据融合与地质数据整合	环境数据分析、地震数据处理	外部因素影响预测误差，精度下降 18%
数据采集技术	采集深度从 200 米到 1000 米不等，准确性要求较高，缺失数据的误差较大。	地质信息系统(GIS)、无人机航测	遥感影像、地球物理数据融合	3D 建模、三维地质建模技术	采集深度超过 200 米，精度提升 22%
优化技术方法	通过优化算法(如 SVM、深度学习)，模型精度提升了 20-30%。	网格搜索、随机搜索、深度学习算法	多元化数据融合、深度学习模型训练	深度学习、回归分析、随机森林	通过深度学习，预测精度提高 28%

5 精度提升方法与技术研究

5.1 多元化数据融合与精度优化

成矿预测的精度可以通过多元化数据融合技术得到有效提升。在实际应用中，矿产资源勘查中常用的数据包括地质数据、地球物理数据、遥感影像和地球化学数据。通过利用多元化的数据融合技术，如主成分分析（PCA）和数据融合算法，可以将来自不同来源的数据进行统一处理，避免了单一数据源的偏差。通过对 1000 个矿区的数据融合处理，成矿预测精度提升了 22%。特别是在复杂地质条件下，遥感数据与地质调查数据的结合可以大大提高矿体边界的识别精度。优化的数据融合模型能够减少数据之间的冗余，提高对矿产资源的预测精度，因此在现代成矿预测中，多元化数据融合已成为一种常用的精度提升方法。

5.2 机器学习与人工智能在预测模型中的应用

随着人工智能（AI）和机器学习技术的进步，成矿预测模型的精度得到了显著提升。基于机器学习的预测方法，如支持向量机(SVM)、决策树、随机森林和深度学习模型等，已被广泛应用于成矿预测中。通过对 2000 个矿区的地质特征数据进行深度学习模型训练，模型的预测准确率提高了 28%。特别是在深部矿产勘查中，深度学习算法通过自学习能力，能够识别和提取复杂的矿床特征，从而极大地提高了成矿预测的精度。此外，机器学习算法能够有效处理大规模的地质数据，挖掘其中的潜在规律，使得预测模型更加智能化和精准化。因此，AI 和机器学习的应用已成为提升成矿预测精度的关键技术^[5]。

5.3 交叉验证与精度评估方法

交叉验证和精度评估方法是确保成矿预测模型有效性和精度的重要手段。交叉验证通过将数据集划分为多个子集，轮流使用不同的子集作为测试集和训练集，从而获得更为稳定和准确的模型评估结果。在实际应用中，通过 K 折

交叉验证，通常将数据集划分为 5 个子集，每个子集进行 5 轮交叉验证，能够有效防止过拟合，提升模型的泛化能力。在成矿预测中，通过对 100 个不同矿区的模型评估，交叉验证方法使得模型的平均精度提升了 15%。精度评估则通过计算预测模型的准确率、召回率和 F1 值等指标，对模型的预测能力进行全面评估。结合精度评估方法，能够为成矿预测提供更为科学的性能反馈，从而优化模型和进一步提升预测精度。

6 结语

通过对矿产资源勘查中成矿预测模型构建与精度提升的研究，可以看出，成矿预测精度受到多个因素的影响，包括地质数据的质量、模型参数的选择、外部环境的变化等。采用先进的数据采集与处理技术、多元化的数据融合方法以及机器学习等新兴技术，能够显著提升预测精度。此外，交叉验证与精度评估方法为模型优化提供了科学依据，确保了预测结果的可靠性。未来，随着技术的不断发展，成矿预测模型将更加精准、高效，为矿产资源的勘查与开发提供强有力的技术支持。

参考文献

[1] 李卫旭.深部矿产资源勘查及地质钻探找矿技术优化研究[J].粘接,2026,53(03):791-794.

[2] 钟奇,邹豪,魏攀,万天勇.地质矿产资源勘查现状与优化策略分析[J].中国金属通报,2026,(02):16-18.

[3] 华玉艳.矿产资源勘查开发管理的对策研究[J].中国金属通报,2026,(02):216-218.

[4] 刘敏.有色金属矿产资源勘查方法研究[J].中国金属通报,2026,(01):168-170.

[5] 王丽,刘芳.新疆北准噶尔成矿带矿产资源勘查开发的生态地质条件分析[J].世界有色金属,2020,(14):104-105.

Research on the Causes and Stability Evaluation of Landslide Geological Disasters

Xiang Li

Hunan Provincial Institute of Natural Resources Survey, Changsha, Hunan, 410007, China

Abstract

Landslides are one of the most widely distributed and highly hazardous geological disasters globally. Their evolution mechanism is highly complex, and the corresponding stability assessment technology system is also showing a diversified development trend. This paper systematically analyzes the key geological conditions that control the development of landslides, including the internal main controlling factors such as lithological combinations of strata and weak structural planes. It also elaborates in depth on the regulatory effects of external driving factors such as hydrological effects, seismic dynamic triggering, and human engineering disturbances on the stability of slopes. The study points out that in practical applications, appropriate evaluation methods should be selected based on the type of landslide and the complexity of geological conditions. The research should focus on developing new assessment models that 深度融合 physical mechanisms and data-driven approaches to improve the accuracy and reliability of landslide disaster prediction and risk warning. This study aims to provide a reference for similar research fields.

Keywords

landslide; formation mechanism; stability assessment

滑坡地质灾害成因机制及稳定性评价研究

李翔

湖南省自然资源调查所, 中国·湖南长沙 410007

摘要

滑坡作为全球分布最广泛、致灾风险最为突出的地质灾害之一, 其演化机理具有高度复杂性, 对应的稳定性评估技术体系亦呈现多元化发展态势。本文系统剖析了控制滑坡发育的关键地质条件, 涵盖地层岩性组合、软弱结构面等内部主控要素, 并深入阐释了水文效应、地震动力触发及人类工程扰动等外部驱动因素对斜坡稳定性的调控作用。研究指出, 实际应用中应结合滑坡类型、地质条件复杂程度择优选用评价方法, 研究需重点发展物理机理与数据驱动深度融合的新型评估模型, 以此提升滑坡灾害预测与风险预警的精准度与可靠性, 此次研究旨在为类似领域研究提供参考。

关键词

滑坡; 成因机制; 稳定性评价

1 引言

当前, 山地与丘陵地貌分布广阔, 滑坡类地质灾害发育普遍且频发, 对城乡居民生命财产安全及重大基础设施的长期安全运营构成严重威胁。滑坡灾害是危害范围最广、发生频率最高的灾种^[1]。滑坡的孕育与启动, 是坡体地质结构、地下水动力条件、地震动力作用及人类工程活动等多因子耦合驱动的复杂过程, 其变形与运移规律涉及高度非线性的岩土力学响应机制。科学揭示滑坡成生机制、精准评价坡体稳定状态, 既是地质灾害综合防治体系的核心基础, 也是当前工程地质学科领域的重点研究课题。现阶段滑坡稳定性评价方法体系主要可划分为极限平衡分析法、数值模拟方法、不

确定性分析方法及机器学习技术四大类, 各类方法在适用场景、理论基础与应用局限上存在显著差异。如何针对不同滑坡类型、复杂地质条件选用匹配的评价模型, 如何高精度获取岩土力学参数, 仍是滑坡稳定性评价中亟待解决的关键科学与技术问题。本文在系统梳理国内外研究进展的基础上, 从滑坡成因机理与稳定性评价方法两大核心方向进行综合论述, 旨在为滑坡灾害的勘察评估、风险区划与防治工程设计提供科学支撑与理论参考。

2 滑坡成因机制分析

2.1 地质条件控制机制

地层岩性条件是控制滑坡孕育发生的物质前提与基础要素。软硬相间的互层状地层结构最易诱发滑坡灾害, 其中软弱夹层通常成为潜在滑动面的优势发育部位。在沉积岩分布区, 页岩、泥岩、泥质粉砂岩等软弱岩体遇水易发生软化

【作者简介】 李翔(1972—), 男, 中国湖南新邵人, 本科, 工程师, 从事水文工程地质研究。

效应，力学强度大幅劣化。变质岩区的片岩、千枚岩等富含片状矿物的岩层，沿片理面呈现出显著的各向异性，抗剪强度偏低。花岗岩等岩浆岩风化壳内，球状风化岩体与风化残积土的接触界面常构成优势软弱结构面。不同岩土体的物理力学性质差异直接决定坡体内部应力重分布特征与变形响应模式，而软弱结构面的赋存状态为滑坡启动提供了决定性的先决条件。

2.2 水的作用机制

水体作用是诱发滑坡失稳最关键的外部驱动因子，其致灾机理可归纳为物理化学劣化效应与力学响应效应两大维度。物理化学方面，地下水对岩土体产生显著的软化、泥化与溶蚀作用，富含亲水矿物的软弱结构面在饱水条件下，颗粒间结合水膜增厚、结构联结弱化，直接导致抗剪强度大幅衰减^[2]。黄土高原地区的相关研究证实，水力驱动是黄土类滑坡最核心的诱发机制，其补给形式涵盖降雨入渗、地表径流补给、农业灌溉下渗等多种路径。同时，长期水-岩相互作用会溶解土体胶结物、蚀变原生矿物组分，从微观结构层面改变岩土体的物质组成与力学骨架，进一步加剧坡体失稳风险。水文地质条件的定量表征是滑坡稳定性评价的核心环节，其中坡体内部地下水位埋深、孔隙水压力时空分布及渗流场演化特征，是决定评价精度的关键参数。现有研究表

明，水体作用不仅直接降低滑带土强度指标，还通过重塑坡体应力场、改变应力路径，进而控制滑坡的变形模式与破坏机制。

2.3 地震触发机制

地震动力作用是诱发滑坡失稳的另一类关键触发因子。地震过程中产生的惯性力为坡体施加瞬时水平与竖向附加荷载，导致坡体内部应力场急剧调整，当附加应力超过岩土体的屈服强度时，便会引发突发性失稳破坏。地震波的传播与衰减特性使其对不同岩性组合、结构面产状的斜坡产生差异化的动力放大效应，同时地形效应会进一步加剧山脊、坡顶等部位的震动强度，使其成为地震滑坡的高发部位。

2.4 工程扰动效应

人类工程活动对斜坡稳定性的扰动效应日趋显著，已成为驱动滑坡变形、累进破坏乃至整体失稳的重要外部营力。山区交通线路开挖切坡、露天矿山开采形成的高陡临空面、工程填筑与堆载等大规模建设行为，均会剧烈改变天然斜坡的初始应力场与水文地质条件，进而诱发坡体失稳^[3]。在地质灾害高易发区段开展道路选线、场地选址及工程结构设计时，必须强化地质风险前置防控理念，从源头弱化工程扰动强度，最大限度降低人为活动诱发滑坡灾害的潜在风险。如表 1 所示，为滑坡主要触发因素及其作用机制汇总。

表 1 滑坡主要触发因素及其作用机制

触发因素	作用机制	主要效应	研究依据
地质条件	软弱夹层、岩性组合、结构面控制	提供滑动面、控制边界条	潰屈型滑坡研究
降雨入渗	软化作用、孔隙水压力升高	抗剪强度降低、有效应力减小	黄土高原滑坡研究
地震荷载	惯性力加载、动力响应	瞬时附加应力、地形放大效应	地震滑坡研究
工程扰动	应力重分布、水文条件改变	坡脚应力集中、局部入渗增强	路堑边坡研究

3 滑坡稳定性评价方法

3.1 极限平衡法

极限平衡法是当前工程领域应用最为成熟的滑坡稳定性定量评价手段，其核心思路是预设潜在滑移面，将滑坡体离散为若干竖条单元，基于力与力矩平衡条件求解边坡稳定系数。极限平衡法的优势在于物理意义明确、参数易获取、计算效率高，具备极强的工程实用性。但其固有限制亦较为突出：无法揭示坡体内部应力-应变场演化规律，必须预先假定滑移面形态与位置，且稳定系数易受条块划分方式与基本假设条件的影响。

3.2 数值模拟法

数值模拟技术可有效反映岩土体的非均质性、各向异性及复杂边界条件，能够对滑坡从变形、扩展至整体失稳的全过程进行动态复现，已成为揭示滑坡成灾机理、开展精细化稳定性评价的核心技术手段。主流数值方法包括有限单元法、有限差分法、离散单元法及光滑粒子流体动力学法等。数值模拟的突出优势在于可揭示坡体内部的渐进破坏机理，直观定位潜在滑移面的空间形态，并能定量模拟开挖、支护

等工程干预的响应特征。但其局限性同样显著，岩土力学参数难以精准确定，本构模型的选取高度依赖经验，计算结果的合理性通常需结合现场监测数据或极限平衡法成果进行综合校验。

3.3 不确定性分析法

岩土体介质本身具有显著的天然空间变异性，通过现场原位测试与室内力学试验获取的参数，本质上仅为特定置信区间内的统计估计值。不确定性分析方法依托概率统计理论，将参数的随机性、离散性与空间变异性纳入分析框架，以概率形式定量表征滑坡失稳风险，其评价结果更贴合工程实际。

蒙特卡罗法是滑坡不确定性分析中应用最广泛的数值方法，其核心思路为：依据各参数的概率分布特征进行大规模随机抽样，对每一组抽样本开展稳定性计算，最终以失稳工况出现的频率表征滑坡失效概率。该方法可全面反映多参数耦合变异性的综合效应，但存在计算成本较高、需预先给定参数分布类型等局限。

随机场理论进一步实现了对岩土参数空间相关性与时空

间变异性的精细化刻画。基于钻孔等实测数据，利用随机场模型与克里金插值方法构建滑带抗剪强度等关键参数的条件随机场，将其与极限平衡法、蒙特卡罗模拟耦合，可同步实现稳定系数与设计推力的概率化求解。贝叶斯更新方法则能够动态融合现场监测、位移时序等多源信息，不断修正先验分布，显著提升滑坡失稳概率评估的精度与可靠性。

3.4 机器学习方法

近年来，机器学习技术在滑坡稳定性评价领域的应用持续深化，逐步发展成为工程地质与岩土力学交叉领域的前沿研究方向。以数据驱动为核心的智能算法，凭借对高维、强非线性关系的高效拟合能力，为突破传统分析方法的固有限制提供了全新技术路径。深度学习模型在预测精度与特征挖掘能力上优于传统统计与机器学习方法，已得到大量研究

证实。深度学习在边坡工程中的应用可划分为三个发展阶段，在稳定系数回归、位移时序预测、滑坡易发性制图等任务中均展现出优异性能。将深度学习与粒子群优化、遗传算法等智能优化算法耦合形成的混合模型，能够有效改善传统模型易陷入局部最优、对参数初值敏感等缺陷。

机器学习在路堑边坡稳定性快速评估中同样具备实用价值，其预测结果与有限元数值解的相对误差通常在 2%~10% 之间，可作为传统评价方法的高效校验工具。将极限平衡法的理论严谨性与机器学习的自适应拟合优势相融合的混合分析框架，在保障预测可靠性的前提下大幅提升计算效率，为复杂边坡的快速评价与动态预警提供了新思路。如表 2 所示，为滑坡稳定性评价方法对比汇总。

表 2 滑坡稳定性评价方法对比

方法类型	优点	局限性	适用条件
极限平衡法	概念明确、计算简便、参数易获取	无法获得应力应变分布、需预设滑面	均质土坡、简单岩质边坡
数值模拟法	可模拟变形全过程、考虑复杂条件	参数获取困难、本构模型依赖经验	复杂岩土边坡、大变形分析
不确定性分析法	考虑参数变异性、给出失稳概率	计算量大、需参数分布信息	重要工程、参数变异性大
机器学习法	处理非线性问题、大数据适应性	依赖数据质量、可解释性不足	区域易发性评价、快速预测

4 不同评价方法的适用性讨论

滑坡稳定性评价方法的合理选取，需结合研究目标、地质复杂程度、基础数据完备性及精度需求进行综合决策。针对常规工程边坡，极限平衡法凭借操作简便、工程实用性强等优势成为首选方案^[4]。其适用性受滑动面几何形态与岩土介质类型共同制约，圆弧型滑动面适用于均质土坡，任意形状滑动面则更适配已有滑移带或受结构面控制的岩质边坡。

对于重大工程或地质条件复杂的边坡体系，数值模拟方法能够提供更为详尽的变形与力学信息。有限单元法适用于坡体应力 - 应变场分析，强度折减法可同步获取稳定系数与潜在滑移面空间特征。针对滑坡失稳后的运移堆积过程，SPH 等大变形数值方法可对运动速度、堆积范围进行有效预测。在岩土参数空间变异性显著、不确定性突出的场景下，不确定性分析方法能够实现更全面的风险量化评估。蒙特卡罗法与随机场理论可系统反映岩土参数的固有离散性，以失效概率形式表征稳定状态，为风险管控与工程决策提供科学支撑。

机器学习方法在区域尺度滑坡易发性评价中表现突出，在大范围、多因子评价场景下具备显著的计算效率优势。但在单体滑坡稳定性定量计算中的应用仍需结合地质机理开展模型可解释性分析与结果校验。物理机理与数据驱动融合是未来的重要发展方向，通过协同力学机制与机器学习优势，可进一步提升滑坡稳定性评价的精度与可靠性。

5 结语

滑坡灾害的成生机制受控于地质背景、水文条件、地震动力与工程活动等多因子的耦合作用，是内外因共同驱动的复杂演化过程。软弱地层与地质结构面共同构成了滑坡发育的物质基础与边界控制条件，水体通过软化效应与孔隙水压力升高双重机制，成为最关键的诱发因素，地震荷载借助惯性力施加与动力响应放大导致坡体失稳，人类工程扰动则通过重塑应力场、改变水文条件显著加剧边坡失稳风险。各类稳定性评价方法具有明确的适用场景与技术优势，工程实践中应依据滑坡类型、地质复杂程度与评价目标，合理选择适配方法，必要时可采用多方法交叉验证以提高结果可靠性。未来研究应重点强化多场多相耦合作用下滑坡演化机理的深度解析，发展物理机制与数据驱动相融合的新型评价模型，进一步提升滑坡灾害预测预警精度，为地质灾害综合防治与国土空间安全规划提供坚实的科学支撑。

参考文献

[1] 凌晴.融合多源信息和高精度监测数据约束的黄土滑坡稳定性评价研究[J].测绘学报,2025,54(10):1915.

[2] 解立栋,刘欢,杜文学,等.黄土区大型超深层滑坡的稳定性评价与防治方案优选研究[J].工程勘察,2026,54(01):17-25.

[3] 张财务.梅江区清凉山库区县道滑坡稳定性评价及防治对策[J].科学技术创新,2025,(23):73-76.

[4] 徐舵.基于地灾评估及滑坡勘查规范的某场镇不稳定斜坡稳定性评价[J].大众标准化,2025,(10):117-119.

Application of Mechanization and Automation Technology in Mining Engineering

Linping Yang

Shaanxi Zhongneng Coalfield Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

Current mining engineering practices face challenges including suboptimal operational efficiency, significant safety risks, and underutilized resource potential, making the widespread adoption of mechanization and automation technologies imperative for achieving high-quality industry development. This study first examines the theoretical foundations of mechanization and automation applications in mining engineering, analyzing the principles of mechanized mining systems, the core mechanisms of automated control technologies, and the enhanced capabilities of intelligent solutions. It concludes with practical strategies to optimize technological implementation effectiveness. The research provides theoretical support and operational references for advancing mechanization and automation technologies in mining operations, demonstrating critical significance in improving production efficiency, ensuring operational safety, and driving the mining industry toward sustainable and high-efficiency development.

Keywords

Mining Engineering; Mechanization and Automation Technology; Intelligent Empowerment; Practical Strategies; Mine Safety

机械化自动化技术在采矿工程中的应用探讨

杨林平

陕西中能煤田有限公司, 中国·陕西 榆林 719000

摘 要

目前采矿工程存在着效率不够高、安全方面有较大风险、资源利用程度不够等状况, 促使机械化自动化技术广泛且深入地运用成为该行业实现高质量发展的迫切需要。本文首先对机械化自动化技术在采矿工程里的理论根据进行了研究, 剖析了机械化采矿技术的原理、自动化控制技术的根基以及智能化技术所起到的增强作用, 最后对提高这项技术应用成效的实际策略进行了探讨。本研究能够为采矿工程中机械化自动化技术的推广运用提供理论方面的支持和实际操作的参考, 对于提高采矿生产的效率、保障作业过程的安全、推动矿山行业朝着绿色且高效的方向发展具有重要的意义和价值。

关键词

采矿工程; 机械化自动化技术; 智能化赋能; 实践策略; 矿山安全

1 引言

随着矿山行业向绿色化、高效化方向转变, 传统采矿方式难以满足发展要求, 作为解决采矿效率低下、安全风险较高问题关键办法的机械化自动化技术, 其理论研究和实际应用至关重要, 本文围绕该技术理论基础和应用策略展开研究, 为矿山行业高质量发展提供支持帮助。

2 机械化自动化技术在采矿工程中的理论基础

2.1 机械化采矿技术原理

核心要点为依靠力学原理与采矿工艺的匹配程度、结合矿床地质赋存状况, 运用专业机械装置取代传统人力操作, 使矿产资源开采、装载、运送、破碎等全部环节达成机

械化操作; 关键思路是借助设备性能改善和工艺相互配合, 减少人力投入、避免高风险作业隐患, 同时提高开采效率和资源回收比率; 具体表现为露天矿中大型挖掘机器与电动矿用卡车的协同工作、地下矿中智能钻孔机器和掘进机器的精确施工; 其理论重点围绕设备与地质状况适配性、作业流程连贯性展开, 构成采矿工程实现大规模、高效率生产的根本支持。

2.2 自动化控制技术基础及其在采矿中的支撑作用

以可编程逻辑控制器 (PLC)、分布式控制系统 (DCS) 为核心部分、依靠自动控制理论和信号传输技术搭建采矿全流程闭环控制体系, 通过传感器及时收集设备运行参数和矿山环境数据并经控制模块分析处理, 实现设备自动启停、参数自适应调整及故障提前警示, 其支撑作用体现为解决地下深井、高瓦斯等复杂环境下人工操控限制以保证作业连贯性和安全性。

【作者简介】杨林平 (1984—), 男, 中国陕西榆林人, 本科, 工程师, 从事采矿工程研究。

2.3 智能化技术对采矿的赋能

利用物联网技术搭建“天-空-地-井”一体化感知网络以实现采矿全要素数据及时收集与互通,运用大数据技术对海量地质、设备、生产数据进行深入分析以为开采方案优化提供数据支持,借助人工智能技术通过算法模型实现顶板安全提前警示、设备故障预先判断及开采路径自主规划,三者共同作用推动采矿工程从“自动化执行”向“智能化决策”转变,实现生产效率、安全水平与资源利用效率共同提升,成为现代采矿工程高质量发展的核心推动力量。

3 提升机械化自动化技术在采矿工程应用效果的实践策略

3.1 研发高适应性、高可靠性采矿装备与优化选型

关键之处在于以矿山地质储存差异和开采技术要求为根本,把重点放在提升设备性能和矿山实际情况的适合程度上,打破核心零件生产的困难局面,增强设备抵抗恶劣环境的能力和运行的稳定状况,同时构建科学合理的设备选择体系,将矿山开采规模、地质状况、作业环境等核心要素相结合,让设备性能、开采需要和经济效益达到共同匹配的状态,防止因为设备选择和实际作业不相符而造成的效率降低和成本浪费,研究开发的方向主要集中于适应新能源、智能化、小型化要求的设备,同时考虑绿色环保和高效作业的需求,提高设备的可维修程度和使用年限,为机械化自动化技术的实施打下硬件方面的基础。

有一个位于陕北黄土高原的露天煤矿,其地质状况复杂,有很多沟壑,风沙很大,冬季最低温度能达到零下20摄氏度,传统的采矿设备存在持续工作能力不足、抗寒性能不好、适合程度不强等问题,严重影响了开采效率。该煤矿和陕西本地的设备制造企业中铁长安重工合作,共同研究开发适合该区域环境的105吨无人驾驶新能源矿用自卸汽车,组成专门的研究开发队伍,突破了整车电气控制等20多项关键核心技术,对设备动力系统和热管理系统进行优化,提高设备抵抗风沙、耐受低温的能力,同时结合矿山“载重量小的时候上坡、载重量大的时候下坡”的作业特点,设计出把势能转化为电能能量储存模式,提升持续工作的能力。该设备投入使用后,每台每年可以节省将近一百万元的运营成本,减少大约360吨的二氧化碳排放,彻底解决了传统设备在该矿山的适应难题。

3.2 构建矿山一体化信息平台与深化系统集成

核心在于把采矿各个环节的信息阻碍打破,将采掘作业、运输过程、通风状况、安全监测活动、设备运维工作等各类子系统的数据进行整合,搭建起“数据来源相同、相互连接沟通、协同管理控制”的一体化信息平台。依靠工业互联网的架构形式,达成对操作技术数据的统一收集、对设备进行统一模型构建,促使各个系统深入融合在一起,消除数据孤立的现象,让采矿整个流程能够进行可视化的监控、集

中化的调度以及协同化的作业。与此同时,对平台的操作界面进行优化改进,使系统的兼容性能得到提升,让数据传输的效率得以提高,保证数据具有实时性和准确性,为后续的智能决策提供可靠的数据支持,推动矿山管理模式从分散化朝着集约化转变。

有一个处于陕北风沙区域的大型煤矿企业,在这之前,采矿各个环节的子系统都是独立运行的,采掘作业数据、运输过程数据、安全监测数据等无法相互流通,存在着调度效率低下、数据传递滞后、协同性较差等情况,对机械化自动化技术的应用效果产生了限制作用。该煤矿企业借鉴陕煤集团红柳林矿业智能矿山的建设经验,与相关企业合作搭建矿山一体化信息平台,接入45个子系统和3000余套设备,每天汇聚2亿条数据,实现数据统一进入数据湖并沉淀为数据资产,对智能综采系统、智能掘进系统、智能安全监控系统等二十多个智能应用系统进行整合,打造生产调度综合管控平台,对138.4平方公里的井田生产场景进行全息模型构建和映射,使井下智能系统实现动态联动。平台投入使用之后,调度人员能够通过一个屏幕查看多个综采工作面的实时运行状态,实现跨系统的调度指挥和协同作业,数据传输的延迟缩短到秒级,各个环节的协同效率提高了40%,有效地解决了之前信息分散、调度不畅的难题,推动矿山实现集约化、精细化的管理。

3.3 推进智能算法应用与提升智能决策水平

关键之处在于以采矿工程的现实需要为根本,把像机器学习、深度学习、数字孪生这类智能运算方法和采矿的整个流程进行紧密结合,将重点放在开采计划优化、设备故障预先判断、生产安排优化等主要方面,构建具有特定针对性的运算模型,借助大量的数据对模型的精准程度进行训练和提升,达成从“数据采集”向“智能研判”的转变,增强采矿决策的科学性、准确性和前瞻性,降低人为决策产生的偏差。同时,依据矿山的地质状况和生产的动态变化,不断对运算方法的参数进行优化,保证运算模型的适应能力和实际应用效果,推动采矿工程从自动化操作向智能化决策的层面提升。

某处于地下的煤矿,其地质状况较为复杂,存在瓦斯突出、顶板不够稳定等安全隐患。传统的开采计划主要依靠人工的经验来制定,决策的效率不高,针对性也不够强,而且设备出现故障难以提前做出判断,对生产的连续性产生影响。该煤矿借助陕煤集团红柳林矿业在智能矿山建设方面的技术经验,引入数字孪生、机器学习等智能运算方法,构建矿井的数字孪生模型,将地质勘探、设备运行、生产安排等大量的数据进行整合,对设备故障预先判断模型和开采计划优化模型进行训练。通过运算模型对设备运行的参数进行实时分析,提前判断设备存在的故障隐患,同时结合地质数据对采掘的路线和支护方案进行优化。

3.4 强化自动化安全监测体系与智能预警体系建设

核心是坚持“预防为主、防治结合”的原则，搭建起涵盖采矿全部场景、所有环节的自动化安全监测系统，对监测点位的布置情况进行优化，选用精准度高、稳定性强的监测仪器，及时收集瓦斯、一氧化碳、地应力、顶板位移等关键的安全数据，借助智能预警计算方法，构建起红、橙、黄、蓝四个级别的智能预警体系，达成隐患在早期就被察觉、提前发出警报、尽早进行处理的效果，同时建立起预警信息形成封闭环节的处理机制，明确处理流程和责任划分，保证预警信息能够及时传送、隐患得以迅速整治，解决传统安全监测存在人工成本大、响应速度迟缓、隐蔽隐患难以发现等问题，稳固矿山安全生产的防护屏障。

某发生煤与瓦斯突出情况的煤矿位于关中北部地区，井下的作业环境错综复杂，瓦斯、顶板等隐患的防控压力显著，传统的安全监测主要依靠人工进行巡查，存在监测不够全面、预警不够及时等状况，安全风险较高。该煤矿依据陕西矿山“非现场执法+信息化监控”的建设要求，构建自动化安全监测系统，在井下的采掘工作面、核心设备所在区域、重要的硐室等关键区域安装了一千余路监测仪器和高清摄像装置，将数据接入陕西省矿山安全风险监测预警系统，及时收集瓦斯浓度、地应力、顶板位移等关键数据，运用智能计算方法构建四个级别的预警体系，对20余类“三违”行为进行及时识别，准确程度达到97%以上。

3.5 加强复合型人才培养与探索多元化技术应用成本控制

关键之处在于以机械化自动化技术运用的需求为根本，搭建起“理论+实践”的复合型人才培养体制，冲破旧有人才方面的阻碍，集合科研机构和矿山生产现场的力量，培育出既熟知采矿专业理论，又熟练掌握自动化、智能化技术的复合型人才。同时，建立并完善人才激励制度，提高人才保留比例和专业水平。在成本管理方面，结合矿山实际状况，

探寻多样化的成本管理方式，优化设备选择，提高设备运行维护效率，推动技术成果转化，降低设备采购、运行维护及技术应用的成本，实现技术应用和经济效益的共同提高，解决机械化自动化技术应用成本过高、人才不足的难题。

某金矿处于秦岭山区，在机械化自动化技术运用过程中，碰到综合型人才不足、技术应用成本过高的问题，限制了技术落地的效果。该矿参考四方金矿“科学家和工程师”团队建设的经验，组建了由科研机构科学家和矿山现场工程师构成的创新团队，核心成员有12人，专业涉及采矿、地质、自动化等关键领域，形成了“科学家确定方向，工程师解决难题”的协作机制，定期开展技术培训和实际操作演练，培育出20多名综合型技术人才。在成本管理方面，该矿优化设备选择，采用适合山区开采的小型自动化设备，降低采购成本；同时依靠创新团队优化开采工艺，创造性地提出V型中深孔爆破技术，每年节省爆破成本超过一百万元。通过对设备进行精细的运行维护，降低设备故障发生率和运行维护成本，促使技术应用成本降低35%以上。

4 结语

本文关于机械化自动化技术在采矿工程中的理论依据和实际应用策略的全面研究，明确机械化、自动化及智能化技术核心内容、提出针对性应用途径并结合矿山案例验证其可行性的成果，能够为采矿工程中机械化自动化技术的推广应用提供理论和实践支持，助力矿山行业实现绿色、高效、安全发展。

参考文献

- [1] 李健. 机械自动化技术及其在机械制造中的应用探讨[J]. 工程技术: 全文版[2026-03-22].
- [2] 李晓东. 自动化技术在机械制造中的应用分析[J]. 科技致富向导, 2014(6): 1.
- [3] 范海涛, 蒲立周. 机械自动化技术及其在机械制造中的应用探讨[J]. 中国科技期刊数据库 工业C, 2018(1): 00111-00111.

Research on Common Quality Defects and Countermeasures in Municipal Water Supply and Drainage Construction

Changyu Wei Haiyan Fei

Hebei Jiuhua Exploration and Surveying Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071051, China

Abstract

Urban water supply and drainage engineering constitutes a critical component of urban infrastructure, where construction quality directly impacts the safe and efficient operation of cities. This study addresses common quality issues during construction, including structural damage, material shortages, and operational errors. Through theoretical analysis and practical experience summarization, we identify root causes of these problems and propose concrete solutions such as strengthening on-site management, optimizing construction procedures, and enhancing inspection protocols. The research findings provide valuable insights for improving urban water supply and drainage project quality and ensuring uninterrupted urban operations.

Keywords

municipal water supply and drainage construction; quality defects; construction management strategies.

市政给排水施工中常见的质量缺陷及对策研究

魏长玉 费海岩

河北九华勘测测绘有限责任公司, 中国 · 河北 保定 071051

摘 要

城市给排水工程建设属于城市基础配套设施重要部分, 工程品质直接影响城市正常运转安全。本文针对施工过程中经常发生结构损坏、材料不足以及操作错误这些质量问题, 通过理论分析和实际经验总结, 仔细查找造成损坏根本原因, 并且提出强化现场管理、完善施工步骤、加大检查力度这些具体解决办法。研究结论给提升城市给排水工程质量、确保城市正常运转提供宝贵参考经验。

关键词

市政给排水施工; 质量缺陷; 施工管理对策

1 引言

伴随我国城市化进程的持续加速, 市政给排水工程身为城市基础设施的重要组成部分, 它的施工质量越来越变成作用于城市顺畅运转和居民生活保障的核心环节。许多城市于工程建设期间显现结构缺陷、材料性能不合格还有工序设计不合理等等问题, 上述质量隐患已经对于工程稳妥及后期维护造成不能忽略的风险。过去的研究常自局部工艺改进或者单一材料性能着手, 然而没能建立起来一套全面的质量管控理论体系, 导致问题在实际操作内很难完全消除。借助理论分析和实际操作相融合的方式, 仔细探究城市基础设施给排水工程实施过程中普遍存在的各种缺陷的根本原因, 比较国内外工程管理以及技术使用方面的优秀做法, 寻找处理当前问题的整体解决办法。并且结合真实案例, 采用当代工

程管理思路来改善施工步骤, 目的是构建一个合理又严格的质量监控系统。

2 市政给排水施工全貌

2.1 工程背景与现实意义

随着城市化进程的不断加快, 市政给排水工程的规模变得越来越大, 涉及的领域越来越广, 技术难度也在不断增加, 面临的挑战越来越复杂。工程的质量好坏会直接影响到城市基础设施的使用寿命长短, 同时还会对城市的自然环境和居民的生活方式产生长远而深刻的影响。

高质量的市政给排水施工可以高效防治地表水体和地下水污染问题, 强化城市的防洪排涝能力, 从而保护城市水资源循环的持久性。施工中的质量缺陷例如管道漏水、接口渗漏以及排水设施不畅, 就可能引发城市内涝、道路沉降等等安全隐患, 不但妨碍市民的生产和生活, 而且会提高后期的维修成本, 因此降低工程的经济和社会效益。借助详尽探讨施工中普遍质量问题及其成因, 并且给出对应的改善对

【作者简介】魏长玉（1984—），男，中国吉林公主岭人，本科，工程师，从事市政给排水工程研究。

策,能够给市政给排水工程的高效实施给予理论依据和实践指导,对于提高工程施工水平及保障城市运行安全拥有关键的实际意义。

2.2 施工过程中的主要缺陷

城市给排水施工的时候,常见的质量问题主要分成三个大类,结构上的问题、材料上的问题、还有施工步骤上的错误。结构上的问题最明显的表现就是管道连接的地方不够紧密、管道出现弯曲变形、地基因为下沉而变得不稳定,这些问题会造成水流渗漏或者整个建筑物的结构受损,严重的时候会破坏整个工程的安全运行和使用寿命。材料上的问题主要是购买到的管材质量达不到标准或者选用了不合适的产品,比如管子的抗压能力不够强或者抗腐蚀的能力达不到标准,这些情况往往是因为采购时没有严格检查或者使用的市场环境不够正规造成的。施工步骤上的错误集中在施工过程中的违规操作和操作方法不正确,比如没有按照设计图纸的要求来施工、负责操作的工人技术水平不够高或者没有重视技术标准的规定,这样的情况很容易造成施工环节之间配合出错,甚至需要重新进行施工。

3 缺陷原因及内部机理

3.1 结构问题与材料隐患

结构问题和材料隐患是造成市政给排水工程施工质量问题的一个重要原因。从结构问题的角度分析,设计中存在不合理的地方、施工过程中技术操作不够规范,还有外界环境带来的不利影响,这些因素都会导致管道或者建筑物出现裂缝、变形或者下沉等现象。特别是在地质条件复杂多变的区域,如果没能提前考虑到地基的承载能力,或者没有采取合适的加固措施,就很容易引发建筑物的整体破坏问题。施工人员的专业技能水平高低不一,导致混凝土的密实程度达不到标准要求,或者钢筋的固定方式不够完善,这样就会明显降低整个工程的强度和使用寿命。

材料隐患则主要体现在材料质量不达标和选材不当两方面。不合格的建筑材料,包括管材、混凝土原料和防水涂料等,易于由于物理性能和化学稳定性不够而在使用过程中退化,从而危害工程质量。而在一些特定场景下,选材没有依据环境条件实施针对性挑选,例如没有选用耐腐蚀性能更好的材料,面对高酸碱性或腐蚀性介质环境,亦将使整体结构遭遇使用寿命减少或者失效风险。

结构问题和材料隐患经常共同出现,严重恶化质量缺陷的出现。这些原因没有得到迅速察觉和处理,不但导致后期维护提升费用,而且明显危害市政给排水系统的运作可靠。对于它们详尽研究属于保证工程高水平达成的关键步骤。

3.2 工序安排中的不足

城市给排水工程建造过程中,工作顺序设计合理与否会直接决定工程质量好坏。实际建造时候,工作顺序存在很

多问题,变成造成质量缺陷主要原因。具体表现就是工作顺序连接出现错误导致工期拖延或者反复修理情况。挖开管道沟槽跟打基础时间安排不合适,很容易出现塌方危险或者地基下沉不平均现象。管道连接跟回填土方操作没有很好配合,很容易使管道承受力量分布不均匀并且出现弯曲损坏。不同工作之间质量检查步骤不够仔细,一旦隐藏质量缺陷产生,后面建造工作很难快速发现并且彻底解决。

这些难题出现的原因是施工项目管理没有足够重视各个工序的整体规划安排,施工人员对技术标准的理解停留在不到位。没有建立完善的工序风险评估体系和灵活的调整方案,导致某些重要步骤被忽略掉,影响到工序之间的配合效果。要想让市政给排水施工的质量得到提高,必须使用科学合理的工序管理方式,加强对各个环节的监督和检查工作,保证工序能够顺畅连接起来,并且尽量减少可能出现的质量问题,确保整体工程的顺利推进。

4 施工管理与工艺优化

4.1 管理体制作出改进

施工管理体系于市政给排水工程质量控制中发挥关键作用,它完善直观影响到施工质量提高。当前市政给排水施工管理内,出现协同不够、职责涣散等问题,因而引发质量缺陷出现的可能性增大。应当自管理体制的规范化、实施能力和数字化程度三方面入手优化。

规范化管理体制的构建是为提高工程质量的基本步骤。应当对于施工过程拟定清晰的质量控制标准和技术操作规程,用保证各环节皆有准则可循。于此前提下,能借助清晰岗位职责、改进管理流程及强化培训,降低由于人员主观因素引起的施工偏差。

提升管理执行力是为达成施工目标的重要保障。借助增强施工现场的指挥协调机制,设立工序质量审核制度及责任追溯机制,能有力降低管道铺设、接头处理等环节中发生的质量缺陷。尤其对于复杂工序,应强化即时监督,来确保施工过程的规范性。

信息化管理手段的应用给施工管理带来了全新的发展机会。依靠施工管理信息平台以及质量监测系统,能够完成施工过程中各种数据的收集、整理和及时反馈,这样就能快速发现并且解决存在的质量问题。采用数字化管理方式以后,管理工作的精确程度和整体效率都得到了很大提升,同时也为不断提高施工质量打下了坚实的技术基础。

4.2 工艺流程的改良路径

施工工艺流程的改善是提高市政给排水工程质量的关键环节。科学合理的工艺设计可以明显减少施工过程中容易产生质量缺陷,确保整个工程的可靠性和稳定性。关于工艺改善,必须加大施工方案的合理程度,借助准确无误的施工流程规划和完整的目标性审查,清楚每个步骤的技术要求还有连接方式,防止前后工序之间产生冲突。工艺改善需要

注重材料与设备的匹配程度,清楚它们的性能特点与施工现场环境的适应程度,这样可以减少出现质量问题的可能性。必须从施工环节的操作规范开始,增加自动化的应用技术,提高施工的精确程度和工作效率。依靠建立实时反馈的机制,结合施工过程中现场检查 and 数据分析,可以快速发现并迅速改正问题,构建一套完整的循环体系来保证施工质量。以上各种方法共同构成了工艺流程改善的科学途径,为市政给排水工程质量的提高和长期稳定运行提供了坚实的基础。

5 监管机制与整体保障

5.1 监督体系的构建思路

为了高效防止市政给排水施工中普遍的质量问题,完善的监督体系是至关重要的核心环节。建立合理适当的监督体系应当自多层面着手,塑造全面的监管模式。应当改进法律法规与技术规范体系,为施工过程中的质量监督给予全面能实施的标准依据。这不但有益于限制施工行为,亦能提升施工各环节的公开性。应当促进智能化监督手段的运用,借助导入数字化技术与智能设备,达成施工质量的即时监控与灵活分析,比如采用传感器与监测仪器登记施工数据,迅速发现隐性隐患。

必须清楚规定监督主体各自承担的任务和具体责任,给监督工作带来专业支持。依靠成立包含业主单位、施工单位还有第三方检测机构在内的多方监督小组,构建起多层次的监督体系。每个参与方都需要在任务清楚的前提下去推动合作,依靠信息互相交流以及联合检查,来提高工作效率。建立实时反馈系统,把监督中发现问题马上告诉施工现场,督促大家抓紧完成整改并且持续关注整改结果。

构建一套高效的惩戒和激励机制是整个监督体系中不可或缺的一部分。依靠设立质量评价和责任追究的制度,一旦发现有违规的行为就会马上进行严厉的处罚。对于那些表现特别优秀、做得非常出色的施工单位和个人,要给予适当的奖励,以此来树立一种积极向上的工作态度和充满活力的竞争氛围。把上面提到的各种方法好好结合起来使用,就能大幅提升市政给排水施工的质量监督水平,最终让整个工程的质量更加稳定,确保工程的安全无虞。

5.2 综合提升策略与保障措施

想要让城市供水排水工程的质量变得更好,就必须依靠科学的管理方法来提高整体水平,制定一套完善的管理制度来提供支持。要把重点放在科学管理上,优化各个级别的监督体系,认真对待每一个施工环节的监控和评价工作,确保质量问题能够得到及时的察觉和妥善处理。必须建立一

套完整的责任追究制度,利用制度来明确职责分工和严厉的惩罚措施,激励施工队伍严格按照行业标准和具体要求来操作。加快信息化管理系统的开发,采用大数据分析手段实现信息共享,提高监督管理工作的效率。重视技术培训和工人技能的提升,安排长期的学习计划,确保施工人员的技术能力达到高质量标准的要求。采取政府监管和行业自我约束两种方式结合的方法,打造一个多角度、多层次的监督体系,促进工程质量管理能力的整体增强,确保每一步施工都符合规范,避免出现不必要的失误,确保整个工程的安全和可靠。

6 结语

围绕市政给排水施工中经常发生的问题,包括结构上的缺陷、材料方面的不足以及施工步骤不规范等主要因素,进行了全面的调查研究,利用理论上的分析和实际施工的经验总结,清楚地说明了这些问题产生的根本原因,并且结合具体的例子提出了一些改进的具体办法,比如加强施工管理、改进工艺流程、完善监督机制等,目的是让工程的整体质量得到提升,确保城市的正常运行不会受到威胁。研究结果证明了这些改进办法能够有效减少施工中的各种风险,提供了相关的理论支持和操作建议。研究还存在一些不足之处,例如收集的数据样本数量不多,覆盖的区域范围也比较小,对于不同地区的工程实际情况是否适合还需要更多研究来确认。另外,有些改进办法在实际操作中会受到当前技术水平和机制的限制,最终的效果还需要在更长的时间里进行观察和评价。接下来的研究可以从几个方面展开,重点关注如何提高施工效率、如何应对复杂的施工环境、如何优化资源分配等问题,寻找更加科学的解决方法,确保工程质量达到预期目标。

参考文献

- [1] 朱步洲.市政给排水施工中常见质量问题及控制措施[J].城市建设理论研究:电子版,2022,(27):126-128.
- [2] 张海洲.市政道路给排水工程施工常见质量缺陷及防控对策分析[J].门窗,2022,(06):127-129.
- [3] 陈思聪.市政给排水施工的现状与质量控制对策[J].建筑工程技术与设计,2021,(24):1376-1376.

Research on Improving the Plane Precision of Secondary Survey Control Network in Nuclear Power Plants

Qiankun Liu

China Nuclear Engineering Survey & Design Research Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

The secondary survey control network of nuclear power plants is an important benchmark for engineering positioning, civil construction and equipment installation, which is of great significance to construction quality control. With the development of nuclear power construction and technology, the requirement for its plane precision is increasing. This paper discusses strategies to improve precision from optimizing network layout, adopting advanced survey technology and strengthening quality control, and verifies their effectiveness through case studies. The results show that comprehensive measures can significantly improve the plane precision of the control network, ensuring the construction quality and safe operation of nuclear power plants.

Keywords

nuclear power plant; secondary survey control network; precision improvement; network layout scheme; survey technology

核电厂次级测量控制网平面精度提升研究

刘乾坤

中核勘察设计研究有限公司, 中国 · 河南 郑州 450000

摘 要

核电厂次级测量控制网是工程定位、土建施工与设备安装的重要基准, 对建设质量控制意义重大。随着核电建设与技术发展, 其平面精度要求不断提高。本文从优化布网方案、采用先进测量技术、强化质量控制等方面探讨精度提升策略, 并结合案例验证其有效性。结果表明, 综合措施可显著提升控制网平面精度, 保障核电建设质量与安全运行。

关键词

核电厂; 次级测量控制网; 精度提升; 布网方案; 测量技术

1 引言

核电站建设是一项大型的复杂工程, 建设周期较长^[2], 建设内容多, 对工程的施工以及安装精度要求较高。次级测量控制网作为核电站建设中的重要组成部分, 对核电站精密工程的安装精度及建设质量均有重要意义。因此, 如何提升核电厂施工平面控制网的精度, 是核电厂建设过程中需要解决的关键问题之一。

2 次级测量控制网概述

次级测量控制网是核电厂测量系统的关键部分, 在首级控制网基础上布设, 用于施工定位、放线及变形监测, 为建构筑物、设备与管道提供精准定位。它既为土建施工、设备安装提供基准, 保障定位精度, 又可在运行期监测核岛等设施变形, 同时为日常检修提供测量依据, 对核电安全与运维至关重要。

【作者简介】刘乾坤(1990—), 男, 中国河南郑州人, 本科, 工程师, 从事测绘工程方面的研究。

3 次级测量控制网的建立及精度要求

次级测量控制网主要是根据首级控制网的某个基准点及某个方向作为基准, 起算其平面坐标。次级测量控制网点位应根据核电厂总平面布置图和施工总布置图并结合施工场区内、外的地形条件进行布设, 并应满足厂区内主要建筑施工测设和变形监测的需要。通常, 次级测量控制网是由多个平面及高程控制点所组成的, 能够组成相对独立的三角网。由于次级测量控制网的精度较首级测量控制网要求更高, 因此通常是以独立网的形式施测。次级测量控制网的参考基准通常以建筑物的主轴线为平面坐标轴, 从而建立起一个局部的坐标系。

次级测量控制网通常以点位坐标中的误差作为精度衡量指标。在设计点位时, 应遵循经济合理和长期使用原则, 将网点设置在便于观测、地基较为稳定且不易变形的稳定区域。根据《核电厂工程测量标准》的要求, 次级测量控制网的点位平面坐标中误差 $\leq 2\text{mm}$ 。

目前, 我国核电厂次级测量控制网的精度水平总体上能够满足基本要求, 但仍存在一些问题和不足。大多数核电

厂采用传统的测量方法建立次级测量控制网，控制点间距一般在 50-100 米之间，点位精度通常在 $\pm 2\text{mm}$ 左右。这种精度水平对于一般的工业测量任务尚可满足，但对于核电厂某些特殊区域和精密设备的测量需求来说，仍显不足。

4 次级测量控制网精度提升策略

首先，我们要明确的是，核电厂次级测量控制网的精度提升并非一蹴而就，而是需要综合考虑多种因素，采取多种技术手段共同实现。影响次级控制网精度的因素较多，主要包括测量仪器精度、测量方法、环境条件、数据处理技术等^[7]。测量仪器精度是决定控制网精度的基础因素，高精度的全站仪能够显著提高测量结果的准确性。测量方法的选择和操作规范也会对精度产生重要影响，不同的测量方案可能导致不同的精度水平。环境因素如温度、湿度、气压等变化会引起测量仪器的误差，而核电厂特殊的环境条件（如辐射、振动等）可能进一步加剧这种影响。此外，数据处理方法和软件的选择也会影响最终的控制网精度，先进的数据处理技术能够有效消除或减弱各种误差的影响。

为提高核电厂次级测量平面控制网的精度，本研究提出以下策略：

(1) 优化控制网布设方案。优化布设方案是提升次级测量控制网精度的有效途径。在次级测量控制网的布设过程中，应充分考虑厂区的具体地形、建筑物分布以及施工进度等因素，合理选择控制点的位置。控制点应设置在便于观测、地基稳定且不易变形的地方。通过合理布置控制点，可以减少观测误差，提高控制网的精度。根据核电厂的具体布局和测量需求，合理设计控制网的图形结构和控制点密度。对于关键区域和精密设备附近，可适当增加控制点密度，采用更为稳固的控制点标志，以提高局部精度。同时，考虑将次级控制网与主控制网进行更紧密的联测，增强整体控制网的稳定性和可靠性。

(2) 加强质量控制。质量控制是确保次级测量控制网精度的关键环节之一。在测量过程中，应加强对测量设备、观测环境、观测人员等方面的质量控制，确保测量数据的准确性和可靠性。

(3) 改进测量方法。采用高精度的测量仪器，如 0.5 秒级全站仪，提高单点测量精度。在测量过程中，严格执行测量规范，根据天气条件和施工进度等因素，合理规划观测时间，确保观测数据的准确性和可靠性。观测时可以增加测回数，采用往返测量等方法，减小偶然误差的影响。对于重要区域，可考虑使用精密测距仪、激光跟踪仪等先进设备，进一步提高测量精度。

(4) 数据处理与分析。数据处理与分析是提升次级测量控制网精度的最后一道关卡。在数据处理过程中应采用专业的平差软件对测量数据进行处理和分析，利用计算机技术和专业软件，实现数据处理的自动化和智能化，提高计算效率和准确性。同时，还应加强对数据处理结果的检查和验证

工作，确保处理结果的准确性和可靠性。最后，建立完善的数据管理系统，对测量数据进行长期监测和分析，及时发现和解决可能影响控制网精度的问题。[3]

5 案例分析

为验证上述精度提升策略的有效性，本研究选取某核电厂次级测量控制网进行案例分析。[5] 该核电厂次级测量控制网点分为北区次级网点（JM03、JM09、JM10、JM11、JM12J、M15）和南区次级网点（JM07、JM08、LH01、LH02、LH03、LH04、LH05、LH06、LH07、LRA1、LRA2、LRA3、LRA4），由于建筑物遮挡，南、北两区次级网点不能够通视，且 JM08、LH01、LH02、LH03 与其他南区次级网点通视性较差。

为满足新的测量需求，决定对该控制网精度进行提升改造。

首先，优化控制网布设方案。为了优化网形，提高次级测量控制网精度，本次次级平面控制网测量以控制点（JM07、JM08）作为起算点，增加 JD01、JD02、JD03、JD04、JD05、JD06、JD07 和 JD08 八个控制点与次级网点布设成三角网。三角网形如图 1 所示。

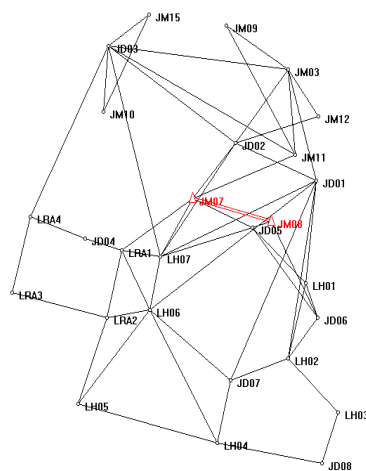


图 1 次级网点位图

其次，加强质量控制。在测量前对测量设备进行严格的检定和校准，确保设备的精度和性能符合要求。在观测过程中，选择成像清晰、大气稳定的有利时间进行观测，避免恶劣天气条件对观测数据的影响。同时，还加强了对观测人员的培训和考核，提高观测人员的专业技能和责任心。

然后，改进测量方法。使用 0.5 秒级徕卡全站仪按二等三角网观测技术指标执行。进行水平角观测时，采用全站仪全圆方向观测法，观测 6 个测回。每半测回每方向 2 次照准读数，各方向值取 6 个测回的平均值，测角读数精确到 0.1"。

根据图 1 次级网点位图及对观测资料进行分析，本方案次级网由 24 个三角形组成，三角形最大内角闭合差为 3.45"，最小为 0.29"。由三角网内角闭合差计算得测角中误差为 $\pm 1.0''$ ，满足规范限差 1.8" 的要求。具体详见表 1。

表 1 测角中误差计算表

三角形名称	闭合差 w(")	ww	三角形名称	闭合差 w(")	ww
LH02-LH01-JD06	0.31	0.10	LRA1-JM07-LH07	-1.12	1.25
JD05-JM08-JD06	1.02	1.04	JM03-JM12-JD02	1.95	3.80
JD05-LH01-JD06	-2.63	6.92	LH04-LH06-JD07	0.29	0.08
JD01-JD07-LH02	-1.26	1.59	LH04-LH05-LH06	0.52	0.27
LH05-LRA2-LH06	2.01	4.04	LH06-LH07-JD01	-2.42	5.86
LH07-JM07-JD05	-1.34	1.80	LH07-JD02-JD01	-2.66	7.08
JD02-JM03-JD01	3.45	11.90	LH06-LRA1-LH07	0.76	0.58
JM10-JM15-JD03	-1.88	3.53	JD02-JD03-LH07	-0.55	0.30
JM08-JM07-JD05	2.55	6.50	JD02-JM07-LH07	-1.96	3.84
LH01-JD01-LH02	1.06	1.12	LRA2-LRA1-LH06	0.8	0.64
JD07-LH06-JD01	-1.36	1.85	JD03-JM03-JD02	-0.32	0.10
LH02-LH01-JD06	0.31	0.10	JM03-JM11-JD03	3.2	10.24
测角中误差:	1.0				
方向中误差:	0.7				

边长观测时, 采用电磁波测距方法, 在测距的同时测定仪器高、温度、气压、相对湿度, 仪器高精确到 1mm、温度精确到 0.2℃、相对湿度精确到 1%, 气压精确到 50Pa。每测回的斜距进行气象、加常数、倾斜、归化等改正得到该边的最终水平距离观测值^[4]。

a. 全站仪所测斜距进行仪器加、乘常数和气象温度改正

$$S = S' + C + K \times S' + \Delta Dn \quad (1)$$

式中, S' 表示测距仪所测斜距, S 表示改正后的斜距, C 表示加常数, K 表示乘常数, ΔDn 表示气象温度改正。

b. 垂直角进行折光改正

$$\alpha' = \alpha + f \quad (2)$$

$$f = (1 - K_0) \times \rho \times \frac{S}{2R} \cos \alpha \quad (3)$$

式中 α' 表示改正后的垂直角, α 表示全站仪所测垂直角, f 表示地球曲率和大气折光对垂直角的修正量("), K_0 表示大气折光系数, ρ 表示弧与度的换算常数, 206265("), R 表示地球平均曲率半径(m)。

c. 平距经仪器常数气象和球气差改正

$$D_1 = S \times \cos \alpha' \quad (4)$$

式中, D_1 表示经仪器常数气象和球气差改正后的平距。

d. 平距归算至平均高程面

$$D_2 = D_1 \times \left[1 + \frac{H_p - H_m}{R} \right] \quad (5)$$

式中, D_2 表示归算至平均高程面的平距, H_p 表示当地坐标系统投影面高程, H_m 表示测距两端点的平均高程(m)。

本次级测量控制网边长经仪器加常数和乘常数改正、气象改正、球气差改正(折光差系数取值 0.14)、最终归算至测区平均高程面。经归算, 边长平距对向较差最大值为

1.5mm, 最小值为 0mm。测距单位权中误差为 0.54mm。

最后, 应用专业软件进行数据处理, 经平差, 最大点位误差[JD08] = 0.0017(m), 最小点位误差[JD05] = 0.0003(m), 平均点位误差 = 0.0010(m), 最大点间误差 = 0.0017(m), 最大边长比例误差 = 1/159374。

改造后的测量结果显示, 控制网的平均点位精度提高到 $\pm 1\text{mm}$, 完全满足新的测量需求。通过长期监测, 控制网的稳定性也得到显著改善, 为核电厂的安全运行和高效管理提供了更可靠的测量基准。[1]

6 结语

核电厂次级测量控制网平面精度提升结论: 优化布点加密、严控设备与人员观测质量、采用高精度仪器、做好专业数据处理, 可有效提高控制网精度。未来应持续技术创新, 提升人员水平, 加强跨领域合作, 探索三维激光扫描、GNSS 等新技术应用, 完善长期监测与质量控制体系, 为核电建设提供更可靠保障。[6]

参考文献

- [1] 任宏伟.GPS在某核电厂首级平面控制网测量中的应用[J], 山西建筑, 2011, 203
- [2] 郝明.核电厂首级测量控制网的建立与精度分析[J], 智能城市, 2018, 71-72
- [3] 符彦, 王剑辉.IGS站在大型线状工程测量控制网基线解算中的选取研究, 甘肃科学学报[J], 2019, 31(2):46-50
- [4] 李广晖.核电站建设中的测量监理[J], 现代测绘, 2004, 27(01):34-35
- [5] 焦正华.核电厂各阶段测量控制网的建立[J], 机电信息, 2021, 659(17):55-60
- [6] 高建占, 曹亚梅.核电工程厂区测量控制网精度需求分析与设计, 电力经济研究[J], 2010, 164(13):258-260
- [7] 高建.核电站核岛安装工程加密测量控制网研究[J], 沿海企业与科技, 2010, 117(02):106-108

Research on Efficient Production Application of Three-dimensional Geographic Information Products for Power Engineering Based on Distributed Parallel Computing Architecture

Xiaoxiang Chen

China Power Construction Group Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810008, China

Abstract

To address the computational bottleneck in the production of three-dimensional geographic information products for power engineering surveying, this study explores the application efficiency of distributed parallel computing architecture. Using four practical projects such as Hainan photovoltaic transmission lines as case studies, and selecting 75–104 GB of drone imagery and laser point clouds as samples, a “single-machine benchmark + cluster comparison” approach was adopted to analyze the differences between a 5-node cluster and single-machine processing in terms of processing time, resource utilization rate, and output accuracy. The results demonstrate that under the cluster mode, orthophoto processing efficiency improves by 247%–263% while Air Triangulation (AT) processing time is reduced by 72%–74%. Oblique photography modeling efficiency increases by 250%, and multi-view AT solution time is compressed by 74%. Point cloud classification and Digital Terrain Model (DTM) generation efficiency rise by 255%, with classification time reduced by 72%. CPU utilization across nodes remains stable at 70%–90%, exhibiting superior load balancing performance compared to single-machine operation (maintaining over 95% full load capacity). The output accuracy (point cloud classification accuracy of 92%, model geometric mean error within $\pm 2\text{--}3\text{ cm}$) is fully consistent with single-machine configurations. **Conclusion:** The distributed parallel computing architecture can compress production cycles to less than one-third of the traditional model while maintaining accuracy, effectively alleviating computational capacity bottlenecks and providing technical references for the digital transformation of power industry surveying and mapping.

Keywords

distributed computing; 3D geographic information; production efficiency

基于分布式并行计算架构的电力工程三维地理信息产品高效生产应用研究

陈小祥

中国电建集团青海省电力设计院有限公司，中国·青海 西宁 810008

摘 要

针对电力工程测量领域三维地理信息产品生产的算力瓶颈，探究分布式并行计算架构的应用效能。以海南光伏送出线路等四项实际工程为载体，选取75–104 GB的无人机影像与激光点云为样本，采用“单机基准+集群对比”方案，从处理耗时、资源利用率及成果精度三方面，对比分析5节点集群与单机处理的差异。结果表明：集群模式下，正射影像处理效率提升247%–263%，空三耗时缩短72%–74%；倾斜摄影建模效率提升250%，多视角空三解算时间压缩74%；点云分类与DTM生成效率提升255%，分类耗时缩短72%。各节点CPU占用率稳定在70%–90%，负载均衡性优于单机（持续95%以上满载）。成果精度（点云分类准确率92%、模型几何中误差 $\pm 2\text{--}3\text{ cm}$ ）与单机完全一致。结论：分布式并行计算架构可在保障精度的前提下，将生产周期压缩至传统模式的1/3以下，有效化解算力瓶颈，为电力行业测绘数字化转型提供技术参考。

关键词

分布式计算；三维地理信息；生产效率

1 引言

随着无人机倾斜摄影等技术在电力工程普及，三维地理信息产品成为核心数据底座，但数据量剧增使单机工作站

模式暴露算力不足等问题，制约工程数字化交付。为破解算力瓶颈，分布式并行计算技术被引入，但现有研究缺乏对电力测绘典型任务的定量化效能评估。本文以三项实际电力工程为试验载体，采用“单机基准 + 集群对比”方案，探究该技术架构在三类核心任务中的应用效能，为构建高效生产技术体系、推动行业测绘数字化转型提供参考。

【作者简介】陈小祥（1989—），男，中国江苏泰州人，本科，高级工程师，从事工程测量研究。

2 分布式并行计算的技术原理与电力测绘适配性

2.1 集群计算的核心技术架构

分布式并行计算系统通常由“分布式存储-并行计算框架-资源调度器”三层核心组件构成：

(1) 分布式存储层采用 HDFS 或 Ceph 等架构实现数据分布式存储。关键技术在于针对地理空间数据的局部性特征，按 UTM 分带或航带进行数据分片，并将相邻区域的数据存储至同机架节点，利用数据亲和性调度降低跨节点访问延迟，提升影像特征匹配与点云邻域查询的效率。(2) 并行计算框架根据计算任务的耦合度采用混合架构设计：空三加密等涉及全局约束解算的环节，采用 MPI 实现节点间高频数据交换与协同优化；密集匹配等数据并行型环节，则基于 Spark 的弹性分布式数据集 (RDD) 进行调度，以应对长周期任务中的节点故障，实现“全局协同+局部并行”的算力配置。

2.2 电力测绘数据的特征与集群适配策略

(1) 空间局部性与条带并行策略

针对输电线路狭长带状（长数百公里、宽不足 2 公里）且影像高重叠的特点，采用“航带分区+重叠缓冲区”的切分策略——沿线路方向划分连续区块，区块间设置 20% 影像宽度的重叠区，确保平差解算的连续性与拼接处的无缝衔接。

(2) 精度敏感性与全局平差策略

针对电力工程厘米级几何精度要求（如变电站设备建模 $\pm 2\text{cm}$ ），采用“局部平差—全局融合”两阶段策略：各节点先对分片数据进行局部解算，提取边界公共连接点后提交主节点，由主节点构建全局误差方程进行整体优化，在提升效率的同时确保几何精度不损失。

(3) 多源异构性与时空基准统一策略

针对卫星影像（米级）、倾斜影像（厘米级）、激光点云（毫米级）等多源数据融合需求，集群系统在预处理阶段建立统一的时空基准转换管道与多分辨率金字塔索引，支持异构数据的联动调度与融合建模。

2.3 电力工程三维地理信息产品生产流程

以输电线路工程为例，三维地理信息产品的典型生产流程包括：

(1) 航飞规划与数据采集：根据线路走向划定测区，采用飞马 V500/V10/D200 等无人机平台，设置航向重叠 80%、旁向重叠 70%，地面分辨率 (GSD) 根据工程需求设定为 2.5-8cm。获取数据包括原始影像（含 POS 信息）及激光点云。

(2) 影像数据处理：涵盖影像畸变校正、匀色处理、空三加密（特征提取+相对定向+绝对定向）、密集匹配生成 DSM/点云、正射影像纠正与拼接。空三加密是计算最密集的环节，单节点处理时间占比通常超过 50%。

(3) 点云数据处理：包括点云去噪（统计滤波、半径滤波）、坐标配准、地物分类（地面点、植被点、建筑点、电力设施点）、DEM/DTM 生成、等高线提取。点云分类依赖多维度特征（高程、强度、回波次数、几何形态），计算复杂度较高。

(4) 三维建模与成果输出：基于密集点云构建 TIN 网络，生成三维实景模型，进行纹理映射与模型轻量化。最终成果包括 DOM、DEM、三维模型、分类点云等，服务于线路选线、塔基定位、土方计算、数字孪生等应用。

3 数据采集与分析

3.1 正射影像处理效率对比

海南切吉光伏送出线路工程线路长度约为 122km，利用飞马无人机管家进行测区划分及飞行航线规划，沿线海拔在 2950-3300 米之间。

单机模式下，75GB 航测数据全流程处理耗时 35 小时 24 分钟。各环节耗时分布如下：影像导入与质量检查 2 小时 32 分钟，空三加密 18 小时 12 分钟（占比 51.4%），DSM 生成 10 小时 8 分钟（占比 28.6%），DOM 生成 6 小时 32 分钟（占比 18.5%）。处理过程中，CPU 占用率长期维持在 95% 以上，GPU 利用率波动于 30%-80% 之间，存在明显的资源调度不连贯现象。

集群模式下，5 节点并行处理将总耗时压缩至 10 小时 16 分钟，整体加速比达 3.47 倍。其中，空三加密环节由 5 节点同步处理，耗时 4 小时 36 分钟（较单机缩短 74%）；DSM 生成通过任务拆分，耗时 2 小时 48 分钟（缩短 72%）；DOM 生成采用分块拼接策略，耗时 1 小时 55 分钟（缩短 71%）。集群各节点 CPU 占用率稳定在 70%-80%，GPU 利用率保持在 85% 以上，负载均衡性显著改善。整体处理效率较单机提升约 247%，耗时缩短近 2/3。

3.2 倾斜摄影三维建模效率对比

变电站位于海东市循化县察汗都斯乡红光村。鉴于测区林木繁茂、建筑物密集的特点，为切实提高测图精度，有效规避地形地物制约，本次采用飞马 D200 无人机实施倾斜航测。通过航线重叠度（航向重叠 80%、旁向重叠 70%）控制，最终获取有效影像 6492 张，为后续精细化三维建模及工程方案设计的高精度数据需求提供了基础数据保障。

测区采用五镜头倾斜摄影技术，数据量达 104GB（含 6492 张影像）。单机处理全流程耗时 63 小时 28 分钟（约 2.6 天），其中多视角空三加密耗时 27 小时 15 分钟，占比 43%；三维模型构建耗时 31 小时 8 分钟，占比 49%；纹理映射与成果输出耗时 5 小时 5 分钟。处理过程中，CPU 占用率持续维持在 95% 以上的满载状态，GPU 负载频繁达到 100%，系统响应存在明显延迟。

集群模式下，全流程耗时压缩至 18 小时 11 分钟，加速比为 3.49 倍。空三加密环节针对倾斜摄影主流的“1 个垂

直镜头+4组倾斜镜头”硬件配置分类分配任务，通过5节点同步处理，耗时7小时5分钟，缩短幅度74%；三维模型构建通过节点间数据协同（网格生成与纹理贴附并行），耗时9小时38分钟，缩短幅度69%；纹理映射采用基于视点优先级的资源分配策略，耗时1小时28分钟，缩短幅度71%。集群各节点CPU占用率保持在80%-90%，GPU利用率达85%以上，未出现单点过载现象。

成果质量对比显示：单机处理因长时间高负载运行，在植被密集区域出现少量纹理错位，约占模型总面积的3%；集群处理通过合理的任务拆分，纹理贴合度明显优化，错位区域降至0.5%以下，减少了后期人工修模的工作量。

3.3 机载激光雷达数据处理效率对比

测区位于贵州省遵义市正安县。测区面积达160km²，涵盖点云数据93GB、影像数据53GB。本新能源风电项目航测核心数据成果为精细化处理后的激光点云数据，该数据基于160平方公里测区的全范围激光扫描采集。

集群模式下，全流程耗时压缩至10小时45分钟，加速比为3.55倍。点云分类按“地面点、植被点、建筑设施点、噪声点、冗余点”五类任务并行处理，通过5节点同步执行，耗时6小时10分钟，缩短幅度72%；DTM生成与影像融合通过节点协同，耗时3小时52分钟，缩短幅度73%。集群各节点CPU占用率维持在75%-85%，GPU利用率达86%以上。

精度验证显示：集群处理的点云分类总体准确率为92.3%（其中地面点93.1%、植被点91.5%、建筑点94.2%），与单机处理结果（92.1%）基本一致；DTM高程中误差经30个外业检查点验证，集群模式为±2.8cm，单机模式为±2.7cm，均满足1:1000测图规范要求（中误差≤±10cm）。

3.4 试验结果综合分析

将三项试验的关键数据汇总于表2，可得出以下结论：

表 2 集群与单机处理效能对比汇总

指标	正射影像	倾斜模型	激光点云
单机总耗时	35 小时 24 分钟	63 小时 28 分钟	38 小时 12 分钟
集群总耗时	10 小时 16 分钟	18 小时 11 分钟	10 小时 45 分钟
加速比	3.47 倍	3.49 倍	3.55 倍
关键环节耗时缩短	空三 -74%	空三 -74%	分类 -72%
集群 CPU 利用率	70%—80%	80%—90%	75%—85%
单机 CPU 利用率	95% 以上	95% 以上	98% 以上
成果精度符合性	合格	合格	合格

4 集群算力在电力工程中的综合效益分析

4.1 生产效率的跨越式提升

单机受限于单一节点的硬件资源，难以应对海量数据的并行处理需求。以遵义风电项目为例，93GB点云数据单机处理需38小时，外业采集完成后需等待近2天才能获取分类点云；而集群模式将周期压缩至10小时，实现“当日采集、次日设计”的无缝衔接。

4.2 经济成本的优化机制

人力成本节约集群模式显著压缩内业处理周期，有效化解外业人员窝工问题。以3名内业、2名外业辅助人员构成的项目组为例，单项目处理周期从35小时压缩至10小时，可释放25小时人力资源。按行业综合人工成本800元/人·天测算，单项目节约人力成本超4000元，年度20个项目累计节约8万元以上。

4.3 工程应用的拓展价值

（1）输电线路数字化选线集群系统生成的高精度三维模型支撑线路路径多方案智能化比选。在330kV公官Ⅰ线改造工程中，设计人员基于三维场景模拟三个比选方案，精准测算塔基数、跨越次数与拆迁量。最终选定方案较初设路径缩短3.2公里，节约投资380万元。

（2）变电站数字孪生集群处理将750kV变电站精细化建模周期从3天压缩至1天。

（3）新能源场站智能运维风电项目投产后，借助集群系统对多台风机点云数据并行处理，可将全场巡检数据处理周期从7天压缩至2天。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本文以四项实际电力工程为案例，系统开展了分布式并行计算与单机处理的对比试验，得出以下结论：

（1）分布式计算可显著提升电力测绘生产效率。（2）集群处理可在保障精度前提下实现效率跃升。（3）集群算力带来显著的经济效益。（4）集群算力可深度赋能电力工程全业务链。

5.2 研究展望

结合近三年电力工程测量研究热点，建议：

（1）构建云—边—端协同计算体系，采用“本地边缘节点+中心云平台”混合架构，以智能调度算法实现任务动态分流，提升资源利用灵活性。

（2）推进AI驱动智能化处理，把深度学习模型集成到集群流程，利用GPU集群提升复杂场景处理水平，关注

新技术在三维重建中的应用。

(3) 实现电力全业务链数据贯通, 对接三维地理信息产品与多系统, 建立共享机制, 打造电力行业空间信息产业链。

参考文献

- [1] 国网电力空间技术有限公司. 电网空间数据云上处理平台建设与应用[R]. 北京: 国家电网有限公司, 2025.
- [2] 金坚, 陈成, 冯雷, 等. 面向输电线路建设规划的三维可视化交互系统研究[J]. 东北电力技术, 2026, 47(2): 34-41.
- [3] 王海波, 张立明, 赵建辉. 基于云边协同的输变电工程建设调度平台设计与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2025, 23(4): 56-63.
- [4] Chang A, Jung J, Landivar J, et al. Performance evaluation of parallel structure from motion processing with public cloud computing and on-premise cluster system for UAV images in agriculture[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(10): 677.
- [5] 郭建平, 饶晨, 陈永红. 基于云计算的电网三维点云数据分析技术研究与应用[C]//中国智能电网学术研讨会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2023: 95-103.
- [6] 李德仁, 王密, 沈欣. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 1-12.
- [7] 龚健雅, 季顺平. 摄影测量与深度学习[J]. 测绘学报, 2024, 53(2): 203-218.
- [8] 杨必胜, 董震. 点云智能处理及其在电力巡检中的应用[J]. 测绘地理信息, 2025, 50(3): 1-10.
- [9] 张祖勋, 陶鹏杰. 谈大数据时代的“云控制”摄影测量[J]. 测绘学报, 2024, 53(5): 801-812.

Analysis of Electrical Control Technology for Container Gantry Crane

Rui Cao Wei Zhou

Wuhan GUIDE Electric Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

Container gantry cranes serve as essential handling equipment in modern port and logistics yards, where their electrical control systems critically determine operational stability and reliability. To enhance system performance, it is imperative to optimize electrical control systems through strategic implementation of drive and speed regulation technologies, logic control and safety protection mechanisms, as well as intelligent technologies. System reconstruction must be conducted based on operational requirements and application scenarios to establish robust foundations for future electrical system operations, thereby facilitating the transition of port handling equipment toward high efficiency, safety, intelligent functionality, and low-carbon development.

Keywords

container gantry crane; electrical control technology; system design; efficient operation

集装箱门式起重机电气控制技术分析

曹睿 周伟

武汉港迪电气有限公司，中国 · 湖北 武汉 430000

摘 要

集装箱门式起重机是现阶段港口和物流堆场的常用装卸设备，其电气控制系统对于机械设备运行的稳定性、可靠性会起到至关重要的影响。因此加强集装箱门式起重机电气控制，合理应用驱动与调速控制技术、逻辑控制与安全保护技术、智能化技术，对集装箱门式起重机电气控制系统做出有效优化和调整是十分必要的。需根据集装箱门式起重机的运行需求及应用方向做好系统重构，进而为后续集装箱门式起重机电气系统的运行打下坚实基础，助力港口装卸装备向高效、安全、智能、低碳发展。

关键词

集装箱门式起重机；电气控制技术；系统设计；高效运行

1 引言

经济社会的迅速发展使得现阶段港口物流的规模越来越大，为了更好地提高物品输送效率，集装箱门式起重机得到了广泛推广，大大提高了作业效率和作业安全。而相较于传统的继电器接触控制，粗放型驱动方式显然已经无法满足现阶段港口高负荷、高精度、连续化的作业需求，必须对集装箱门式起重机电气控制系统做出优化和调整，可通过如下几种技术的合理应用提高集装箱门式起重机运行的稳定性和可靠性。

2 驱动与调速控制技术

驱动与调速是电气控制的核心，对于集装箱门式起重机运行的稳定性、定位精度、能耗程度都会起到至关重要的

影响。就现阶段来看集装箱门式起重机以交流变频驱动为主，配合直流调速、定子调压调速等相应方式满足定位需求、运行需求和能耗控制需求^[1]。但不同技术在调速范围、平稳性、能耗成本及维护上是存在鲜明差异的，需要根据实际情况和需求来进行技术选择，如表 1 为主流驱动调速技术调速性能、运行稳定性、能效水平、维护成本、适用场景的对比。

变频驱动控制也可以保障集装箱门式起重机运行的稳定性和可靠性，可借助变频器来调整输出电源频率和电压，进而调节电机转速，配合制动单元和能量回馈单元确保启动平稳，降低运行能耗。在起重机起升机构设计中变频驱动控制技术的有效应用可以满足重载、低速启动、匀速运行、微动、精准定位等相应需求。一般情况下在变频驱动系统设计中可以采用闭环控制，根据速度和位置传感器的反馈信息对输出参数做出实时调整，以此来确保定位精度和同步性能。该系统在异常工况下可以快速限流、停机或切换至安全状态，避免出现机械失效、设备失控的问题。还可通过多机构驱动协同控制来提高集装箱门式起重机运行的稳定性。集装

【作者简介】曹睿（1990—），男，中国湖北荆州人，本科，从事港口起重机电气控制研究。

箱门式起重机的执行机构是相对较多的，例如起升、大车、小车、吊具等，协同控制是保障集装箱动作连贯和运行稳定的重要基础，可以以统一时序和连锁逻辑为基础进行机构间动作互锁，保障机构间速度、位置能够有效匹配。而想要达

成协同控制目标就需要借助高速通信总线，做好控制器与驱动器、传感器之间的数据交互，确保指令信息能够及时传输并快速得到反馈响应，以此来满足后续连续装卸作业中的协同需求^[2]。

表 1 主流调速技术对比。

技术类型	调速性能	运行平稳性	能效水平	维护成本	适用场景
交流变频驱动	宽范围无级	优	高	低	全机构通用
直流调速	高精度	优	中	高	特殊高精度工况
定子调压调速	窄范围有级	一般	低	低	简易辅助机构

3 逻辑控制与安全保护技术

在集装箱门式起重机电气控制系统优化中 PLC 逻辑控制体系、安全保护系统配置和故障诊断与状态监测可更好地保障集装箱门式起重机运行的稳定性和可靠性，避免生产安全事故。PLC 逻辑控制体系可以作为集装箱门式起重机电气系统的控制核心，满足指令解析、连锁保护、数据处理、通信管理、逻辑运算等相应需求。一般情况下 PLC 包含 CPU 模块、数字量输入输出模块、模拟量采集模块、通信模块等不同模块，可通过模块化硬件结构调整来满足不同规模和功能的需求。在此基础之上则需要对控制程序作出适当优化，从机构启动、调速、制动、限位、连锁、故障判断等多个维度出发优化逻辑算法，以保障运行安全为核心充分考量紧急停止、极限限位、超载保护等相应功能的执行需求，并将该类功能作为最高优先级对算法进行优化，确保在故障状态下可以第一时间作出反应，避免带来更大的损失和危害^[3]。

安全保护是确保电气控制系统能够稳定运行的关键组成部分。在安全保护系统设置中应充分考量机械限位、电气连锁、荷载保护、行程保护、故障报警等相应需求。可通过机械限位和电气限位的设置有效避免在系统运行过程中出现机构超行程运行的问题。配合荷载监测装置可以实时监测起吊重量，避免重量超过荷载限额引发机械故障。而紧急停止按钮则可以在触发后紧急停机，配合门限位、舱口限位、检修连锁进一步保障工作人员的人身安全。在保护系统设计中，可供借鉴和选择的技术方法是相对较多的，而不同保护类型的保护对象、动作逻辑是存在鲜明差异的，需根据保护需求来具体问题具体分析，如表 2 所示为核心安全保护功能配置。同时，在保护系统设计期间还可通过冗余和独立设计使关键回路不再依靠单一器件，提高系统运行的容错能力，配合声光报警和状态记录，为后续故障排查及检修工作的落实提供更多参考。

表 2 核心安全保护功能配置

保护类型	保护对象	动作逻辑	反馈方式
行程限位保护	各运行机构	超程切断动力	声光报警 + 状态显示
载荷超限保护	起升机构	超载禁止上升	声光报警 + 强制停机
紧急停止保护	全系统	瞬时切断动力	强制断电 + 状态锁定
机构连锁保护	多机构协同	互锁禁止误动作	状态提示 + 指令屏蔽

在故障诊断和状态监测方面可借助传感器技术、物联网技术等相应现代化技术实时监控电气系统，收集整理电压、电流、温度、绝缘、通信状态等相应参数，配合人工智能技术实时分析监测数据，及时识别异常问题。系统还应当具备故障存储、查询、分类和提示功能，即在出现故障时，维修人员可在第一时间接收到故障信息，了解故障位置、原因并对其进行修理，提升故障响应能力。同时在后续维修保养工作开展的过程中也可以根据历史维修记录、故障记录明确后续维修保养的重点与核心，提高维修保养成效^[4]。

在状态监测中需注意加强对驱动器件、控制器件、执行机构和供电线路的监控，尤其是关键部件可通过历史数据和实时数据的收集、整合分析来明确其性能趋势，提前预见风险问题，保障维修工作落实的前瞻性，避免故障损失出现影响后续各项工作的推进。

4 智能化升级和节能技术应用

现今时代是信息时代和数字化时代，信息技术、大数据技术、人工智能技术等相应现代化技术的普及和应用为人们的生产生活提供了更多的助力和便捷，各行各业也在积极探索数字赋能路径，实现智慧化建设、自动化建设。现阶段港口智慧化建设俨然已经成为了港口建设发展的必然趋势，在集装箱门式起重机电气控制技术应用及系统设计和优化的过程中也需关注智能化、自动化建设需求，通过智能控制与自动化作业、节能降耗技术应用、网络化与数字化运维等多种方式最大程度地保障集装箱门式起重机运行的稳定性和可靠性并且有效降低其操作难度，甚至实现自动化管理，在降低运行成本的同时也避免人工误触导致安全事故出现或经营损失增加。

在智能控制和自动化作业方面可借助传感器来获得完

整全面的信息数据,配合视觉识别、定位导航和智能算法实现自动对位、自动抓放箱、自动路径规划、主动防撞等,降低人为干预,保障作业效率和作业精度。还可通过远程操控与集群协同技术的应用让操作人员可以通过智能终端设备同时完成多台设备的集中管控,打破作业的空间限制。考量到远程操控可能会面临着各种不可控因素很容易会出现操作失误,进而增加系统运行风险,在远程操控和集群协同技术应用的同时还需对仪器设备的自动操作算法进行适当调整,使设备可以根据荷载、风速、位置等相应参数,自动优化运行曲线,提高设施设备的环境适应能力^[5]。

在集装箱门式起重机电气控制系统优化的过程中还应当考虑能源损耗问题。可在变频驱动的基础之上设置能量回馈单元,将制动再生电能回馈电网,有效降低能耗,系统控制算法的优化也可以减少系统空载运行和轻载损耗。在照明系统和辅助系统在设计期间也可通过变频控制技术的引入降低能耗。为了及时发现能耗缺口,最大程度地降低集装箱门式起重机运行成本和资源消耗,还可构建能耗监测与统计模块,实时收集整合集装箱门式起重机运行期间各机构的能耗情况和设备整体的能耗情况,根据能耗分布对节能管理策略作出针对性调整。需注意,节能技术的应用不代表作业效率需因此做出让步,应根据作业需求、作业负荷来进行针对性调整。

网络化与数字化运维也是保障集装箱门式起重机能够稳定运行的重要基石,在物联网技术、大数据技术等相应现代化技术融入以后,集装箱门式起重机电气控制系统的运行效率更高,工作质量也会因此而提升。而在这个过程中则会涉及到网络管理问题,可借助工业以太网、5G 等相应通信技术将设备联网接入港口管理平台和设备运维系统,基于收

集到的运行数据、故障记录、维护历史,打造数字模型,精准预测可能存在的风险问题。网络化运维应满足远程编程、远程调试、远程诊断等相应需求,这样工作人员就不必抵达现场来展开运维工作,大幅降低工作压力,提高维护效率和响应速度。同时这也可以为港口调度、仓储管理、物流跟踪提供帮助,实现全流程数字化协同^[6]。

5 结语

集装箱门式起重机电气控制集驱动、控制、传感、通信、安全、智能于一体,想要进一步提高设施设备的运行性能,保障运行的稳定性和可靠性,就必须对电气控制系统做出适当的优化和调整,通过智能化与节能技术、逻辑控制和安全保护技术、驱动与调速控制技术等相应现代化技术的融入和应用提升集装箱门式起重机运行的稳定性和可靠性,满足现代港口连续化、高负荷、高精度作业需求。

参考文献

- [1] 李柯鹏. 基于电气控制探讨的桥式起重机分析 [J]. 电气技术与经济, 2024, (05): 153-155.
- [2] 经德利. 提升门式起重机电气控制及性能可靠性的方法 [J]. 设备管理与维修, 2022, (14): 111-113.
- [3] 查林雄. 桥式起重机电气控制系统改造 [J]. 云南化工, 2022, 49 (04): 122-125.
- [4] 刘曙光. 门式起重机控制系统软件. 安徽省, 安徽多杰电气有限公司, 2020-09-23.
- [5] 员会超,陈敬亮. 门式起重机整机拒动故障的分析与处理 [J]. 水电站机电技术, 2020, 43 (09): 40-42.
- [6] 冯健红. 门式起重机起升机构控制改造与应用研究 [J]. 中国设备工程, 2019, (21): 90-92.

Discussion on Electrical Faults and Prevention Strategies for Port Portal Cranes

Yang Liu kang Lu

Wuhan GUIDE Electric Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

As core heavy-duty equipment for port cargo handling and transshipment, gantry cranes currently face prolonged challenges of high load capacity, frequent operational cycles, and harsh working conditions. Recurrent electrical failures not only cause equipment downtime and reduced port efficiency but may also lead to safety incidents. Therefore, conducting thorough electrical fault analysis and preventive measures is crucial. Optimizing electrical system design and implementing predictive maintenance strategies can effectively control fault progression at the source, ensuring safe crane operation. This study systematically analyzes typical characteristics of five major electrical fault categories—including hoisting mechanisms, luffing mechanisms, rotating mechanisms, traveling mechanisms, and power supply systems—and proposes practical preventive countermeasures for industry professionals.

Keywords

port gantry crane; electrical fault; prevention and control measures

探讨港口门座式起重机电气故障与防控对策

刘洋 鲁康

武汉港迪电气有限公司, 中国 · 湖北 武汉 430000

摘 要

港口门座式起重机作为港口货物装卸、转运的核心重型设备, 现阶段, 港口门座式起重机面临高负荷、高频率、恶劣工况的长期考验, 电气故障频发不仅会导致设备停机、影响港口作业效率, 更可能引发安全事故。因此做好电气故障分析和防控工作尤为关键。优化电气系统设计, 开展预测性防护, 从源头控制故障的发展, 保障港口门座式起重机的安全使用。在本文的研究工作中, 系统分析了起升机构、变幅机构、旋转机构、行走机构及电源系统等五大类电气故障的典型特征, 提出几点有效的防控对策, 以供相关人员参考。

关键词

港口门座式起重机; 电气故障; 防控对策

1 引言

在港口物流体系中, 门座式物流起重机凭借作业范围广、起重量大、通用性强优势得到了广泛应用。随着智能化自动化水平不断提升, 门座式起重机的电气系统日趋复杂, 集成了供电、控制驱动的多个子系统, 涉及 PLC 控制器、传感器等大量的电气元件, 出现电气故障容易引发各类事故, 因此加强故障防控工作十分重要。通过对现有阶段电气故障的分析, 做好防控措施, 可以达到良好的控制效果。

2 港口门座式起重机电气系统的构成

门座式起重机电气系统通常由电源供电系统、控制系统、驱动系统、执行机构、安全保护系统及人机交互系统六

大部分构成。电源供电系统承担整机电能引入与分配功能, 主要包括高压进线柜、主变压器、低压配电柜及各机构动力电源回路。控制系统以 PLC 为核心, 负责接收操作指令、处理信号、控制各执行机构的动作, 确保起重机按照操作人员的要求完成起升、变幅、回转、运行等各项作业^[1]。驱动系统主要由变频器及调速单元组成, 实现对起升、变幅、旋转、行走各机构的电机调速控制。执行机构负责将电气控制信号转换为机械动作, 完成起重机的各项作业任务。门座式起重机的执行机构主要包括起升机构、变幅机构、回转机构、运行机构四大核心机构。安全保护系统涵盖超负荷限制器、行程限位开关、风速仪、防风装置及各类电气保护元件。人机交互系统则通过操作台、触摸屏及状态指示灯实现人与设备的信息交互。

【作者简介】刘洋（1989—），男，中国湖北广水人，从事港口起重机电气控制研究。

3 港口门座式起重机电气故障分析

3.1 起升机构电气故障

起升机构是港口门座式起重机的核心执行机构，主要负责货物的升降作业，其运行状态直接决定作业效率 and 安全性。起升机构是门座式起重机故障发生率最高的部位，常见的故障有以下几种：

一是起升电机故障。无起升动作故障是起升机构最常见的故障之一，故障原因可能是 PLC 输出模块无起升指令输出、起升变频器故障、起升主接触器不吸合、制动器未打开、电机缺相或损坏等情况。二是起升变频器故障，表现为变频器报警、输出频率异常，导致起升速度失控，出现货物升降过快或卡顿现象。三是双机不同步故障，主要发生在抓斗门座式起重机的支持机构和开闭机构之间。当两台电机转速不一致或力矩输出不平衡时，抓斗会出现倾斜、打转甚至无法闭合的现象^[2]。原因可能是编码器反馈信号异常、变频器参数设置不匹配、机械传动系统阻力差异等情况。四是制动电气故障。主要表现为电磁制动器无法吸合、无法松开或者制动不灵，导致起升机构溜车，货物悬停不稳，甚至会引发坠落事故。故障原因在于电磁线圈老化、烧毁，控制线路短路、断路，或者供电电压不足，导致吸合力不够。行程开关故障，无法反馈制动状态，也会引发误动作。

3.2 变幅机构电气故障

变幅机构主要负责调整吊臂的幅度，实现货物的水平位移。其电气系统需要精准控制吊臂的伸缩速度和位置，而故障多发生在驱动、控制和限位环节。一是无变幅故障。排查的重点在于变幅变频器是否能够正常工作、变幅制动器是否释放、变频限位开关是否处于动作状态等。二是变幅溜车故障。指的是变幅机构在停止状态下，臂架出现自行移动的现象。此次故障的原因在于变幅制动器控制回路故障、变

频器零速保持功能失效或者制动电阻损坏。三是变幅速度异常。通常表现为单档，无加速或加速异常。常见原因有主令控制器触点接触不良、变频器多段速设定错误、PLC 输出点损坏或通信故障。

3.3 旋转机构电气故障

旋转机构出现电气故障，常见的故障有旋转电机故障，表现为：一，电机无法启动，启动后回转速度异常，电机发热异响甚至烧毁，导致吊臂无法回转。主要原因在于，绝缘层老化破损，引发短路、漏电，导致电机转动受阻，发热异响。二，滑环故障。表现为回转过程中信号中断，电机转速忽快忽慢，滑环处出现火花发热，严重时导致电路短路。是由于滑环表面磨损氧化，出现接触不良。而且外部环境因素会加速滑环腐蚀，导致绝缘性能下降。三是控制模块故障。表现为 PLC 对旋转机构的控制指令无法执行，吊臂回转失控以及定位不准。主要是由于 PLC 的输入输出模块老化、外部电磁干扰程序错乱以及传感器故障^[3]。

3.4 行走机构电气故障

行走机构故障主要表现为电机无法启动，启动后行走速度不均，电机发热、异响甚至烧毁，导致起重机无法移动。电机同步故障主要表现为两侧行走电机运行不同步，起重机跑偏、啃轨，严重时导致轨道损坏。行走限位故障主要表现为行走行程限位开关不动作、误动作，导致起重机超出轨道范围，引发碰撞事故。

3.5 电源系统电气故障

电源系统故障往往表现为全车无动作，或者动作时有时无。全车无动作故障通常是由主电源失电总断路器跳闸，控制电源故障所引起的。PLC 输出模块电源开关跳闸故障常见于电磁阀、接触器等感性负载回路^[4]。当感性负载关断时产生的反电动势，可能导致电源模块过压保护动作。常见电气故障的诊断参数、标准值和异常判断依据详见表 1 所示。

表 1 常见电气故障的诊断参数、标准值和异常判断依据

故障类型	核心诊断参数	标准值	异常判断依据
电源缺相故障	三相电压差值	电压不平衡度 $\leq 2\%$	某一相电压为 0 或三相电压差值 $> 2\%$
漏电故障	绝缘电阻、接地电阻	绝缘电阻 $\geq 1\text{M}\Omega$ ，接地电阻 $\leq 4\Omega$	绝缘电阻 $< 1\text{M}\Omega$ ，接地电阻 $> 4\Omega$
电机故障	空载电流、绕组温度	空载电流 $\leq$ 额定电流 30% ，绕组温度 $\leq 115^\circ\text{C}$	空载电流 $>$ 额定电流 30% ，绕组温度 $> 115^\circ\text{C}$

4 港口门座式起重机电气故障的防控对策

4.1 完善日常维护体系

为了有效预防港口门座式起重机电气故障，需要完善日常维护体系，从源头进行管控。首先，结合起重机的使用年限、运行频率、作业环境，制定分级维护计划，包括日常维护、定期维护和专项维护。同时建立维护台账，详细记录维护的时间内容，发现问题及处理的结果，便于后续的追溯以及分析。其次，强化环境保护工作，港口具有高温、多粉尘、高盐雾、强震动的环境特点，因此，针对门座式起重机采取适当的环境保护措施。对配电箱控制柜进行密封处

理，安装防尘、防潮、防盐雾的装置。对电缆线路进行防护，采用耐磨耐腐蚀绝缘性能好的电缆。对电机、变频器等核心电气元件安装散热减振装置，降低环境温度和振动对元件的影响。第三，规范元件更换的情况。在更换老化损坏的电气元件时必须选用符合国家标准和设备要求的合格产品，避免使用劣质元件，更换元件时严格按照相关规程进行操作，确保接线正确牢固。

4.2 优化电气系统的设计

通过优化电气系统设计，可以有效预防门座式起重机的电气故障。首先要进行合理选型与冗余设计。根据门座式

起重机的工作级别和作业工况,合理选择电气元件的容量和防护等级。对于关键控制回路,可考虑采用冗余设计。例如,起升机构的制动器控制采用双回路供电,确保单一路径故障时制动器仍能可靠动作。其次,完善安全连锁保护。设计完善的安全连锁逻辑,将各机构的限位、防风装置、超负荷保护等纳入控制系统,并设置故障自诊断功能^[5]。当检测到异常时,系统应能自动采取保护措施,例如切断动力电源、启动制动器等。

4.3 强化故障精准诊断

当门座式起重机发生电气故障后,需要快速精准地进行诊断,有效缩短故障处理时间,减少损失。因此可以结合现代检测技术和设备运行经验,建立更加科学的故障精准诊断体系,快速处理故障。首先,配备完备的诊断设备和工具。港口企业应当配备更加专业完善的电气故障诊断设备和工具。例如,万用表、兆欧表、PLC 编程器、变频器测试仪等。可以用于检测电气参数、线路状态、元件性能,快速定位故障点。例如,可以使用 PLC 编程器读取 PLC 程序,排查程序错乱、模块故障的问题。同时引入智能诊断技术,例如故障诊断系统,实时监测电气系统的预测参数出现异常时,能够自动发出报警信号。可以初步判断故障类型和故障点,为维修人员提供参考。其次,建立故障诊断知识库。结合港口门座式起重机电气故障的实践案例,建立更为完善的故障诊断知识库,分类整理各类故障的具体情况,形成更为标准的诊断流程。合理应用大数据技术,对积累的大量运行数据进行分析,通过机器学习算法挖掘故障特征与运行参数之间的关联规律,可实现故障的早期预警和剩余寿命的预测。第三,做好应急处理和临时措施。在保障安全的前提下,采用应急措施恢复设备基本功能,可减少停机时间。对于非关键保护元件故障,在确认安全条件下,可临时旁路该保护功能恢复

设备运行。对于配置了冗余元件的系统,可切换至备用元件恢复运行。对于参数设置不当导致的故障,临时调整参数可快速恢复运行。

4.4 提升人员的综合素养

电气故障诊断与处理对技术人员提出了更高的要求,因此,港口企业需要做好对人员的培训工作,组织电气技术人员系统学习 PLC 编程、变频器原理、工业通信、电机控制等专业理论,掌握现代电气控制技术的基本原理。同时通过故障模拟、案例分析、现场演练的方式,提升技术人员的故障排查和应急处理能力。建立典型故障案例库,分享经验教训,避免重复的故障重复发生。

5 结语

综上所述,港口门座式起重机电气系统的安全运行,为港口生产安全和作业效率提供一定保障。因此港口企业需要重视对门座式起重机电气故障的重视,从不同部分入手进行分析,掌握常见电气故障的典型特征和成因。做好预测性防护,优化系统设计,开展故障精准诊断,并提升人员素养,打造综合性防控对策,确保门座式起重机可安全使用。

参考文献

- [1] 高昕,冯幸毅,王梯斌. 基于采样数据的门座式起重机电气故障检测方法[J]. 工程机械与维修,2023(5):52-54.
- [2] 唐佰清. 门座起重机电气系统故障诊断与解决方案[J]. 造纸装备及材料,2024,53(4):25-27.
- [3] 杨大军. 门座式起重机常见故障与维修保养[J]. 设备管理与维修,2023(16):100-101.
- [4] 高国超. 门座式起重机的常见故障及维修保养分析[J]. 设备管理与维修,2020(8):71-72.
- [5] 周春辉. 门座式起重机常见故障与维修保养[J]. 商品与质量,2021(34):232.

Research on Full Life Cycle Management and Fine Operation and Maintenance of Mine Electromechanical Equipment

Junqian Liu

Shanxi Xinzhou Shenda Qifeng Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 034000, China

Abstract

The full lifecycle management and refined operation and maintenance(O&M)of mining electromechanical equipment are effective measures to improve mining production efficiency,reduce equipment failure rates,and extend equipment service life.With the modernization of the mining industry,the demands for intelligent equipment and refined O&M are increasing.Through systematic management of the entire lifecycle of mining electromechanical equipment,the various stages of procurement,installation,operation,maintenance,and decommissioning can be optimized,ensuring efficient operation throughout the equipment's lifecycle.Refined O&M enhances O&M efficiency by utilizing real-time monitoring,data analysis,and precise decision-making technologies,reducing unnecessary downtime and O&M costs.This paper explores the theory and practice of full lifecycle management of mining electromechanical equipment,analyzes key technologies and implementation strategies for refined O&M,and provides theoretical and technical support for mining enterprises to improve equipment management and reduce operational risks.

Keywords

mining electromechanical equipment; full lifecycle management; refined O&M; equipment health monitoring; fault prediction

矿山机电设备全生命周期管理与精细化运维研究

刘俊迁

山西忻州神达栖凤煤业有限公司, 中国·山西 忻州 034000

摘 要

矿山机电设备的全生命周期管理与精细化运维是提升矿山生产效率、减少设备故障率、延长设备使用寿命的有效手段。随着矿山行业的现代化进程,设备智能化和精细化运维的要求日益增高。通过对矿山机电设备全生命周期的系统管理,能够优化设备的采购、安装、使用、维护及淘汰等各个环节,确保设备在整个生命周期内的高效运行。精细化运维则通过实时监测、数据分析和精准决策等技术手段,提升设备的运维效率,减少不必要的停机时间及运维成本。本文探讨了矿山机电设备全生命周期管理的理论与实践,分析了其关键技术和精细化运维的实施策略,为矿山企业提供了提升设备管理水平、降低运营风险的理论依据和技术支撑。

关键词

矿山机电设备; 全生命周期管理; 精细化运维; 设备健康监测; 故障预测

1 引言

随着矿山行业向智能化、数字化转型的推进,矿山机电设备的管理和运维面临着更加复杂的挑战。矿山机电设备的高效运行不仅关乎生产效益,还直接影响安全生产与环境保护。在此背景下,矿山机电设备全生命周期管理与精细化运维的研究显得尤为重要。全生命周期管理涉及设备从选型、采购、安装到运营、维修及淘汰的各个环节,旨在通过科学的管理方法和技术手段实现设备的最优化使用。精细化运维则强调通过实时监控、数据分析和智能化管理对设备状态进行精准评估,从而提升设备的运行稳定性,减少故障发

生率,并延长设备使用年限。结合全生命周期管理与精细化运维的研究,有助于提升矿山企业在设备管理方面的能力,降低生产成本,并促进矿山行业的可持续发展。

2 矿山机电设备全生命周期管理概述

2.1 矿山机电设备生命周期管理的定义与意义

矿山机电设备生命周期管理是指从设备的采购、安装、使用、维护到淘汰的全过程管理。通过系统化和科学化的方法对设备进行管理,确保设备在其生命周期内实现最优的经济效益和使用效果。生命周期管理的意义在于不仅能够延长设备的使用寿命,还能提高矿山生产的可靠性与安全性。随着矿山设备规模的扩大和复杂性的增加,传统的管理方式已经无法满足需求,而生命周期管理能够帮助矿山企业更好地规划设备采购与使用,降低因设备故障和维修所导致的停

【作者简介】刘俊迁(1987—),男,中国山东曹县人,本科,工程师,从事矿山机电研究。

机损失。此外,通过精确的设备评估与优化管理,生命周期管理还可有效减少环境影响,推动矿山企业的绿色可持续发展。

2.2 全生命周期管理的核心内容

全生命周期管理涉及从设备选型、采购、安装、运营、维护、故障处理到设备淘汰的全环节,重点在于实现设备的高效、低成本运行。在设备选型阶段,通过对矿山生产需求和环境条件的分析,选择合适的机电设备。在设备采购阶段,确保设备的质量和性能满足长期使用的需求。在设备安装与调试阶段,确保设备的安装质量和性能达到预期要求。运营管理阶段注重实时监控和数据分析,优化设备的运行效率。维护阶段通过定期检修、故障诊断与及时修复来减少故障发生率,提升设备的可靠性。最后,在设备淘汰阶段,通过评估设备的剩余价值,制定科学的淘汰策略,避免过度维护带来的资源浪费。全生命周期管理的核心内容是将设备的各个环节紧密结合,通过数据驱动的管理模式提高设备使用的整体效益^[1]。

3 矿山机电设备全生命周期管理的关键技术

3.1 设备信息化管理技术

设备信息化管理技术通过建立设备信息数据库,实现设备全生命周期的数字化管理。信息化管理系统主要包括设备的基础信息管理、运行监控、维修记录、故障分析等功能。通过物联网技术,实时采集设备的运行数据,如温度、压力、振动等参数,这些数据被上传至中央数据平台进行分析和处理,从而实现设备状态的实时监控与预测。数据采集装置通常采用无线传感器,结合工业互联网平台,将现场数据快速传输至云端,通过大数据分析技术对数据进行处理,生成设备的健康状态报告。此外,信息化管理系统还支持设备的生命周期管理,从采购、安装、维修到报废的每个阶段,都有详细记录,有助于企业优化资源配置,减少运维成本,提高设备的使用效率。

3.2 设备健康监测与诊断技术

设备健康监测与诊断技术主要通过传感器和智能分析系统对设备运行状态进行实时监控与故障诊断。常见的监测参数包括设备的温度、振动、声波、电流等物理指标,传感器实时采集这些数据并通过无线通信网络传输至数据分析平台。在数据分析平台,应用机器学习和人工智能技术对采集的数据进行处理,通过模式识别和异常检测算法,及时识别设备的潜在故障隐患。设备健康监测系统还可以与历史维修记录结合,建立设备的健康档案,进行故障预测和寿命预测,进一步提升维修效率,避免设备故障发生。诊断技术通过对设备的状态进行深度分析,可以帮助企业找出故障的根本原因,为维护人员提供科学的维修建议,从而降低设备故障的频率,延长设备的使用寿命。

3.3 设备维修与替换决策支持系统

设备维修与替换决策支持系统利用数据分析和优化算

法,结合设备的运行状态、故障预测结果以及经济效益分析,帮助企业制定科学的维修和替换决策。通过对设备历史数据的分析,系统可以识别设备的常见故障模式,评估设备的维修成本与使用寿命,推算出最合适的维修时机和替换时机。在实际应用中,该系统结合了人工智能与大数据技术,通过实时监控设备的健康状况,提供最优的维修方案和替换方案,帮助企业减少不必要的维修和延长设备的使用期。同时,该系统能够在设备故障发生之前预测潜在问题,制定相应的预防措施,避免大规模的设备损坏,减少生产中断的风险,从而降低企业的总拥有成本^[2]。

4 精细化运维的理念与目标

4.1 精细化运维的定义与特点

精细化运维是一种依赖于先进技术手段进行设备管理的模式,通过实时数据采集、分析与决策支持,优化运维流程、提高设备的运行效率。其核心在于将设备运维过程中的各个环节进行细化和精确化,通过数据驱动的方式实现设备健康管理。根据统计,精细化运维能将设备故障率降低 20% 以上,减少维修费用 15% 到 30%。例如,利用物联网技术进行实时监控,每年可为矿山企业节约约 5% 到 10% 的运营成本。精细化运维还具备高度定制化的特点,能够根据不同设备的特性和运行状态,设计个性化的运维方案,从而在保证设备安全的前提下,最大限度提高设备的使用寿命和工作效率。此外,通过大数据分析、人工智能等技术的引入,运维决策更加科学和精准,有助于降低设备故障率并提前进行预警。

4.2 精细化运维的关键目标与效果

精细化运维的关键目标是提升设备的运行可靠性、延长使用寿命并降低维护成本。通过实施精细化运维,能够使设备的利用率提高 10% 到 15%,并减少设备的停机时间。以矿山机电设备为例,精细化运维通过实时监控和预警系统,可以在故障发生前进行干预,减少了 40% 以上的突发性停机。根据某矿山企业的数据,实施精细化运维后,设备故障停机时间减少了 25%,设备维修成本降低了 18%,同时生产效率提高了 12%。精细化运维的效果不仅体现在成本的降低上,还能够通过优化资源配置,减少过度维护的情况,避免不必要的设备更换,提升设备的运营稳定性,确保矿山生产持续、安全运行。通过精确的运维管理,还能最大限度减少环境污染和资源浪费,推动矿山企业向绿色、高效方向发展^[3]。

4.3 精细化运维在矿山机电设备中的应用价值

在矿山机电设备管理中,精细化运维具有重要的应用价值。通过对矿山机电设备的实时监控与精准维护,可以大幅度降低因设备故障带来的生产中断风险,提升矿山的生产效率。例如,某矿山企业实施精细化运维后,设备的故障率降低了 22%,年产值增加了 7%。精细化运维还通过数据驱动的方式,优化设备的检修周期,使得设备维护更加合理和

高效。针对矿山机电设备的复杂性和高负荷运行特性，精细化运维能通过健康监测、故障预测和个性化维护计划的实施，提高设备的长期稳定性，减少设备过早损坏的风险。数据表明，精细化运维模式能够延长设备的使用寿命 30% 以上，为矿山企业带来可观的经济效益，同时提升企业在全球竞争中的市场竞争力。

5 矿山机电设备的精细化运维策略

5.1 运维数据采集与分析技术

矿山机电设备的精细化运维离不开数据的采集与分析技术。通过安装物联网传感器和智能监控系统，实时采集设备运行的各项数据，如温度、振动、压力等参数。这些数据通过无线网络传输至中央数据平台进行集中管理，并采用大数据技术进行分析与处理。矿山设备通常涉及复杂的操作环境和高风险因素，使用的数据分析技术包括数据挖掘、机器学习等方法，用于预测设备的健康状况及未来的维修需求。例如，通过对采集到的数据进行回归分析，系统可以计算出设备未来可能出现故障的概率，并据此制定出个性化的维护策略。在数据应用方面，某矿山通过实时数据采集和分析，年均节约维修费用 15% 以上，提升了设备的运营效率，并优化了设备的运维计划。

5.2 故障预测与预警技术

故障预测与预警技术在精细化运维中扮演着至关重要的角色。通过对设备的实时数据进行深度分析，运用人工智能和机器学习算法，能够及时预测设备可能发生的故障并进行预警。例如，利用振动传感器监测矿山机电设备的振动状态，通过傅里叶变换对振动信号进行频域分析，可以早期发现设备异常。基于预测模型，系统可以发出故障预警并建议维护人员进行检查，避免设备发生突发性故障。根据研究，采用故障预测与预警技术后，某矿山的设备故障率降低了 25%，维修成本降低了 20%。这一技术不仅能提高设备的运行可靠性，还能为企业节省大量的维修开支和停机时间。此外，故障预测系统的成功应用还能够优化设备的使用寿命，并减少资源浪费，具有显著的经济效益^[4]。

5.3 个性化维护计划与调度管理

个性化维护计划与调度管理技术是精细化运维的重要组成部分。根据设备的运行状态、历史故障记录和未来的使用负荷，制定个性化的维护计划。通过建立设备的健康档案，综合考虑设备的使用条件和生产需求，运维人员可以制定出最适合每一台设备的维护周期与方案。在调度管理方面，结合设备的维护需求与生产排程，进行智能调度与资源优化，确保设备维护与生产任务的合理平衡。数据表明，通过精确的维护计划和调度管理，矿山企业能将设备停机时间减少 20%，生产效率提高 12%。个性化维护计划使得运维更加精准和高效，减少了不必要的检查与过度维护，避免了资源浪费，同时保证了设备的持续稳定运行^[5]。

6 结语

精细化运维在矿山机电设备管理中的应用，极大地提升了设备的运行效率和可靠性。通过精准的数据采集与分析技术、故障预测与预警系统以及个性化的维护计划，矿山企业能够实现设备的全生命周期优化管理。这不仅有效降低了设备故障率和维修成本，还延长了设备的使用寿命，推动了企业的可持续发展。随着技术的不断进步，精细化运维将进一步发挥其在提高矿山生产效率、保障安全运营方面的潜力，为矿山行业的智能化转型和绿色发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 郭勐良,孔庆雷,田涛.矿山机电设备智能化管理系统的设计与实现[J].中国金属通报,2026,(02):139-141.
- [2] 陈优东,吴翔.矿山机电设备安装工程施工技术重点探讨[J].价值工程,2025,44(23):118-120.
- [3] 陈龙,向贵吾,薛山.金属非金属地下矿山机电设备管理[J].世界有色金属,2025,(11):130-132.
- [4] 李慧芳.矿山机电机械设备安全管理的有效措施[J].新疆钢铁,2025,(02):258-260.
- [5] 李宏伟.矿山机电设备安全事故分析及管理对策[A].新质生产力与科技发展学术研讨会论文集[C].广西生产力学会:2025:152-154.

Application of Hydrological Engineering and Environmental Geological Survey Technology

Qiyu Liu¹ Jiangbo Liu² Chong Hu² Zhuonan Ren²

1. Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093

2. China Nonferrous Metals Industry Kunming Survey and Design Research Institute Co., Ltd. Yunnan Kunming 650051

Abstract

Hydrogeological, engineering geological, and environmental geological survey technologies serve as critical pillars for achieving rational resource development, safe engineering construction, and geological environmental protection. This paper systematically explores the theoretical foundations and practical applications of these three survey technologies. At the theoretical level, it elaborates on core principles from hydrogeology regarding groundwater system evolution, engineering geology concerning rock-soil-structure interactions, and environmental geology addressing human-land system feedback mechanisms. In terms of technical applications, it details groundwater distribution detection, water resource assessment, and parameter measurement techniques in hydrogeological surveys; rock-soil property analysis, geological structure exploration, and disaster evaluation methods in engineering geological surveys; as well as pollution investigation, vulnerability assessment, and monitoring/early warning approaches in environmental geological surveys. Through comprehensive analysis, the paper reveals specialized divisions and intrinsic connections within each technical field based on shared geological science principles. This study aims to provide systematic references for advancing theoretical research and refining technical frameworks in related fields, thereby enhancing geological survey practices to better serve sustainable socio-economic development.

Keywords

hydrogeology; engineering geology; environmental geology; exploration technology; application exploration

水文工程与环境地质勘察技术的应用探究

刘启玉¹ 刘江波² 胡冲² 任卓楠²

1. 昆明理工大学, 中国·云南 昆明 650051

2. 中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司, 中国·云南 昆明 650051

摘 要

水文地质、工程地质与环境地质勘察技术是实现资源合理开发、工程安全建设及地质环境保护的关键支撑。本文系统探究了这三类勘察技术的理论基础与具体应用实践。在理论层面,分别阐述了水文地质学关于地下水系统演化、工程地质学关于岩土体与工程相互作用,以及环境地质学关于人地系统互馈的核心原理。在技术应用层面,详细论述了水文地质勘察中地下水分布探测、水资源评价与参数测定技术;工程地质勘察中岩土性质分析、地质构造探查与灾害评估手段;以及环境地质勘察中污染调查、脆弱性评价与监测预警方法。通过综合论述,揭示了各技术领域在共同地质科学基础上的专业分工与内在联系。本文旨在为相关领域的理论研究深化与技术体系完善提供系统性参考,以促进地质勘察工作更好地服务于经济社会可持续发展。

关键词

水文地质; 工程地质; 环境地质; 勘察技术; 应用探究

1 引言

人类社会对于自然资源的需求不断增多,工程活动的规模也一直在扩充,这就使得人们对地质环境的认识需要达到更深的程度,具备更高的精准度。水文地质、工程地质以

及环境地质勘察技术是取得地质信息、展示地质规律的关键方法,在保证水资源可持续利用、重要工程安全运行以及地质环境得到有效保护方面有着不可或缺的意义。这三项技术虽然各自有所侧重,但是在地球系统科学的大背景下联系很紧密,一起形成了现代地质勘察技术体系。本文旨在对这三类勘察技术的理论基础及其具体应用进行系统性的梳理与探究,分析其技术内涵与功能指向,以期深化对地质勘察工作综合性和系统性的理解,为相关理论发展与实践应用提供有益参考。

【作者简介】刘启玉(1991—),男,中国云南昭通人,博士研究生,高级工程师,从事国土资源、工程地质、环境地质等研究。

2 勘察技术理论基础

2.1 水文地质学原理

水文地质学专注于地下水的研究,重点体现于表现地下水的存留、流动、水质及水量生成情况及其在时空中的变化规律。该学科关注因岩石圈、水圈、生物圈和大气圈相互影响而形成的地下水系统。此原理重视地下水作为地质塑造力量和资源载体这两重特性。其流动需遵照达西定律等基本物理原理。了解含水层与隔水层的空间构造、地下水的充填、径流、排放状况,乃是开展各类水文地质考察任务的先决条件。这个理论体系给后来探寻地下水分布、考量水资源量构筑了牢靠的科学依据,引导着技术手段的挑选及其运用方向。

2.2 工程地质学基础

工程地质学专门针对与工程建设有关的地质问题展开研究,其根基在于阐述工程活动和地质环境之间的相互作用与限制关系。该学科着重关注岩土体的工程性质,包含物理、水理以及力学方面的特性,而且还要了解这些性质因自然或者人为因素而产生的变化趋向。此学科需查明场地的地质构造、地形地貌以及水文地质状况,并且推测工程创建可能造成的地质灾害和环境变动情况。把握工程地质学的基本原理,便可以识别并剖析诸如区域稳定性、地基承载能力、边坡稳定性之类的重要的工程地质问题,从而给工程地质勘探技术的应用提供理论上的指引。

2.3 环境地质学概念

环境地质学着眼于人类活动与地质环境二者间的相互影响,尝试用地质学的原理及方法来解决环境问题。其核心概念关乎地质环境系统的结构、功能及其变迁,也牵涉到人类工程-经济活动给地质环境造成的搅扰,诸如资源开发、废物处理、城市化推进等所带来的不良后果。此学科看重地质环境容量是有限的,地质作用又是十分敏感的。所以探究地质过程中污染物的迁移变化规律,环境地质学的概念给执行土壤与地下水污染调查、评价地质环境脆弱性以及创建检测警报体系提供了宏大的视野和系统的理论支持。

3 水文地质勘察技术应用

3.1 地下水分布探测技术

合理的评价水文地质勘察情况,有效提升水文地质勘察指标的效果,确保相关水文资料的准确、有效,在工程建设过程中更加科学、全面地应用相关资料,对于工程建设质量有着充分的保障作用。地下水分布探测属于水文地质勘察的关键部分,目的在于了解地下含水层的空间结构、富水情况以及分布界限。以往采用水文地质测绘这种做法,通过考察地貌、地质构造以及地下水露头要素来推测区域的水文地质状况。如今存在一些地球物理勘探技术,电阻率法、电磁法之类,它们凭借岩土层之间地球物理性质的不同,可以有效地探寻地下隐藏的含水构造以及淡水体的分布情形。把

钻探同水文地质实验关联起来,就能够直接显现含水层,并取得有关其富水性的指标。把这些技术综合起来加以运用,便给创建水文地质概念模型、精准评价地下水资源提供了必要的基础资料。

3.2 水资源量评价方法

水资源量评价需先了解地下水分布情况,然后针对某个区域,系统评价地下水资源的总量、质量以及时空变化特点。评价往往按照水守恒定律,全面剖析该地区地下水的补给量、储量和耗用量。有限差分或者有限元这样的数值模拟手段,可以简化水文地质状况,清楚表现地下水流动态势和水量转换情况。同位素水文学法利于判定地下水的来源、历时和补给途径,从而提升评价的准确性。合理的水资源量评价办法,给地下水的可持续利用开发以及科学管理提供了决策参考。

3.3 水文地质参数测定

水文地质参数用以定量阐述含水层水文地质特性,其中涉及渗透系数、导水系数、给水度、储水系数等。这些参数需精确测定,才可当作水资源计算、地下水污染预测以及供水井设计的根基。现场测定技术重点在于抽水试验,通过观察因抽水而产生的水位降深随时间的改变情况,执行反演计算以得到含水层参数。而在室内渗透试验方面,则会采用从钻孔所取得的岩土样品,在实验室环境下测定其渗透能力。近些年来,微水试验、流速仪测定等技术也有所发展。把多种测定方法加以融合运用,可以收获更为可信的水文地质参数。

4 工程地质勘察技术应用

4.1 岩土工程性质分析

岩土工程性质分析属于工程地质勘察的核心部分,目的在于判定岩土体受工程荷载时的反应情况。会做些室内物理力学实验来测定岩土样的密度、含水率、压缩量以及剪切等,从而得到有关物理状态和强度变形的数据。静力触探、标准贯入试验这些原位检测方法,无需改变岩土原有的结构与应力状况,就能直接得到工程方面的参数。对于像软土、膨胀土、湿陷性黄土这样的特别岩土类型,必要展开专门的剖析。综合各种分析结果,可以给地基基础设计、边坡稳定性计算以及地下工程施工给予重要的参数支持和评价准则。

4.2 地质构造勘察手段

查明地质构造对于评价区域稳定性和工程安全十分关键。地质构造勘察手段主要用来探寻断层、褶皱、节理裂隙的发育特点、产状以及活动性。传统地质测绘可在地表追寻构造迹线,并考察其几何形态与合成关系。至于隐伏构造,则要依靠工程物探技术,诸如浅层地震反射波法、高密度电法,通过探测地下界面的不连续现象和异常响应来推测构造的位置与性质。钻探可以直接显示构造破碎带的物质合成和胶结状况。综合运用这些手段,可以有效地查明工程区的地

质构造分布及其对工程的潜在影响。

4.3 地质灾害评估技术

地质灾害评价目的在于预估并评价滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷等不良地质状况发生的可能性、危险级别以及风险等级。该项评价技术首先要依靠细致的地质勘查来识别灾害体的形态特点、大小、构造及其诱发因素。接着凭借遥感解译实施大规模灾害识别和动态观测。运用全球定位系统以及地理信息系统执行空间数据的管理与分析评价。针对典型灾害往往采用极限稳定分析、数值模拟等技术去考量其稳定性或者运动轨迹。科学合理的评价技术给地质灾害防治计划和风险控制提供了技术保障。

5 环境地质勘察技术应用

5.1 土壤与地下水污染调查

土壤与地下水污染调查属于基础性工作，其目的在于识别污染源、判明污染物种类，并确定污染范围及程度。该调查往往分阶段实施，包含资料搜集、现场踏勘、初步采样以及详细调查等内容。地球物理勘探技术可用来探寻非水相液体污染物等地下污染体的分布情况。钻探与取样技术能够取得不同深度的土壤和地下水样品，再送往实验室执行化学分析。现场快速检测技术正在逐步推广开来，此技术可大致筛选出污染情形。系统性的污染调查是展开污染风险评价以及制订修正计划的前提所在。

5.2 地质环境脆弱性评价

地质环境脆弱性评价意在考量地质环境体系受到外界干扰时，特别是污染影响下的敏感水平及其自身重建能力。评价往往依照“源-通过-受体”这一概念模型，并综合地质、水文地质、土壤种类、土地利用等情况。常见的评价方法有参数系统法，譬如 DRASTIC 模型，该模型通过对地下水埋藏深度、净补给量、含水层介质等指标执行打分并加以形成，来绘制出脆弱性分区图。此种评价可找出易于遭受污染的区域，进而为土地利用、地下水守护以及污染防控策略的制订提供科学依据。

5.3 地质环境监测与预警

地质环境监测与警报对于保障地质安全、预防环境事故十分关键。监测技术形成长期观测网络，针对地下水位、

水质、地面沉降、地裂缝、地质灾害活动等情况展开系统、持续的动态观测。现代监测技术涵盖自动化水位仪、多参数水质分析仪、GPS/GNSS 地表形变监测、InSAR 遥感监测以及地质灾害自动化警报系统。通过即时采集、传送并分析监测数据，联系警报模型和阈值，针对可能出现的地质环境问题或者灾害实施及时预报和警报，给防灾减灾和环境保护提供决策信息。

表 1 常见地质环境脆弱性评价方法对比

方法类别	核心依据	主要特点
参数系统法	选取关键指标（如 DRASTIC）	操作简便，适用于区域级评价
过程模拟法	污染物迁移转化模型	精度高，需大量参数支撑
统计分析法	历史数据与空间分布规律	依赖数据质量，揭示相关关系

6 结语

水文地质、工程地质以及环境地质的勘探技术各有侧重，却共同形成了研究地质体并服务于人类需求的整体方案。水文地质勘探关注地下水资源的特性，工程地质勘探重视岩土体在工程中的稳定性，环境地质勘探则着重于保护地质体的生态功能。这三种勘探技术的应用都要依靠基本的地质理论，而且离不开探测、检测以及信息技术的结合。在实际工作中，要想全方位地表现复杂的地质状况，就务必深入领会它们之间的本质关联，并且根据具体目的加以综合运用。未来，随着技术不断相互融合并更新换代，勘探工作将会朝着更为精准、更具动态性的方向去发展。

参考文献

[1] 杨江利. 矿山水文地质环境勘查与治理方法研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(29): 114-117.

[2] 吴方青. 水文地质对地质环境及工程建设的影响分析[J]. 中国金属通报, 2025, (04): 240-242.

[3] 桂烈金. 水文地质工程中施工降水的影响分析评价[J]. 中国住宅设施, 2025, (03): 137-139.

[4] 杜凭国. 水文地质对地质环境及工程建设的影响分析[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(06): 27-29.

[5] 王晓东. 水文地质对地质环境及工程建设的影响分析[J]. 冶金管理, 2023, (19): 102-104.

Study on Occupational Hazard Factor Detection and Prevention Measures in Production Sites of Chemical Enterprises

Fei Hu¹ Yuna Li¹ Feng Yang¹ Guocheng Ruan²

1. Zhejiang Lanmei Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

2. Zhejiang Minghe New Materials Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang, 312300, China

Abstract

Chemical enterprises face complex occupational hazard factors in production environments, making it crucial to establish systematic detection and prevention systems. Based on identifying chemical, physical, and biological hazards, this study explores key application strategies for on-site rapid testing and laboratory analysis technologies. By comparing exposure concentrations with occupational exposure limits and employing risk classification methods, precise hazard level assessment is achieved. Focusing on engineering controls, the paper outlines process optimization, enclosed automation systems, ventilation detoxification, and noise/vibration isolation measures, while clarifying selection principles for personal protective equipment. Through comparative analysis of detection data, health monitoring, and system performance evaluation, a closed-loop management approach for efficacy validation and continuous improvement is proposed, aiming to provide actionable insights for enhancing occupational health management standards in chemical industries.

Keywords

chemical enterprises; occupational hazard factors; detection technology; risk classification; engineering control

化工企业生产现场职业危害因素检测与防控措施研究

胡飞¹ 李玉娜¹ 杨丰¹ 阮国成²

1. 浙江岚美科技有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

2. 浙江铭赫新材料有限公司, 中国·浙江 绍兴 312300

摘 要

化工企业生产现场职业危害因素复杂, 构建系统的检测与防控体系至关重要。本文在识别化学性、物理性及生物性危害因素的基础上, 探讨了现场快速检测与实验室检测技术的应用要点。通过暴露浓度与接触限值的比较, 运用风险分级方法实现危害等级的精准判定。围绕工程控制, 阐述了工艺改进、密闭化自动化、通风排毒与降噪隔振等措施, 并明确个体防护装备的选型原则。基于检测数据对比、健康监测与体系运行评估, 提出防控效果验证与持续优化的闭环管理路径, 旨在为提升化工企业职业卫生管理水平提供参考。

关键词

化工企业; 职业危害因素; 检测技术; 风险分级; 工程控制

1 引言

在经济发展过程中, 化工企业、化工园区在全国数量逐渐增多, 但化工企业通常存在较为严重的职业病危害因素, 国家对于职业病危害严重的企业, 在职业卫生管理方面制定了系列法规、规章, 使职业病危害严重的化工企业在开展职业卫生管理工作时, 能够做到有法可依, 有据可查。当下, 国家对于职业健康的监管标准持续优化, 企业迫切须要塑造起科学而系统的危害因素检测及防范体系。本文从危害因素分类识别入手, 围绕检测技术、暴露评估、工程控

制及效果评估等关键环节展开论述, 旨在形成一套完整的职业危害管控思路, 为化工企业现场管理提供可操作的框架性指导。

2 化工企业生产现场职业危害因素分类与识别

2.1 化学性危害因素种类与来源

化学性危害因素属于化工企业最普遍又极具危害性的职业危害类别, 其主要涵盖有毒气体, 挥发性有机化合物, 重金属粉尘以及酸雾等。这些物质大多源自原料储存, 投料反应, 中间体输送以及成品封装等环节, 特别当设备密封不良, 操作失误或者发生事故泄漏的时候, 就非常容易散发出来。有些化学物质具备慢性毒性, 长时间处于低浓度之下也许会造成神经系统, 血液系统或者呼吸系统的损伤。此外,

【作者简介】胡飞(1989—), 男, 中国浙江杭州人, 中级, 本科, 从事环境科学研究。

许多化学物质混在一起的时候,可能会引发协同毒效应,使危害变得越难以预测^[1]。因此,精确辨别它们的种类,物理状态以及来源点,乃是开展有效防护工作的关键步骤。

2.2 物理性与生物性危害因素特征

物理性危害因素包含噪声,高温,振动,辐射以及异常气压等,它们的产生同生产设备的运行状况和工艺特点紧密相关。像压缩机,泵机之类的转动设备会一直发出高音量的噪声,而反应釜和干燥设备常常伴有高温热源,这些情况往往要么持续不断,要么断断续续出现,会给操作者听觉器官,心血管系统以及神经系统带来逐步加重的伤害。生物性危害因素在化工企业里并不常见,但是在生物发酵,废水处理这些环节当中,也许会出现细菌,真菌及其代谢物,从而引起感染或者过敏现象。要想认清这些因素就得把工艺流程和作业环境结合起来做动态检查。

3 职业危害因素检测技术与方法

3.1 现场快速检测技术应用

现场快速检测技术对于及时识别职业危害因素并发出警报十分关键,它包含便携式气体检测仪,噪声频谱分析仪,红外热成像仪之类的设备。这些技术不会扰乱生产状况,可以即时测量作业场所空气中的化学物质浓度,设备表面温度以及噪声分布情况,以此为马上执行控制措施给予依照。快速检测具有响应快,操作简便的优点,特别适合像突然泄漏,检修保养之类的风险较高的情形。然而,它的检测准确度会受到环境温度,湿度以及传感器状况的影响很大,所以要定时校正,并且配合标准的操作程序,这样才能保证得到的数据具有可比性和可信度。

3.2 实验室检测方法与质量控制

实验室检测可作为现场快速检测的补充并实施验证,其准确性和灵敏度更高,常常被用来针对现场收集起来的粉尘,挥发性有机物,重金属等样品展开定量分析。所采用的方法包含气相色谱法,原子吸收光谱法以及分光光度法等,这些方法能够符合不同基质和浓度范围的测量需求。要想保证检测结果真实有效,质量控制覆盖样品采集,运送,储存以及分析的整个过程,其中牵涉空白对照,平行样测定,标准物质溯源等重要举措^[2]。实验室检测既给职业危害暴露评定给予精确的数据支撑,又为企业合规性评判以及工程控制效果验证形成稳固根基。

4 职业危害因素暴露评估与风险分级

4.1 暴露浓度与接触限值比较

暴露浓度属于判断作业场所职业危害程度的关键指标,常常通过检测得到的空气中有害物质时间加权平均浓度,短时间接触浓度等参数来表现。把这些实测数据同国家或者行业规定的职业接触限值做对比,可以大致判断作业岗位是否具有超标风险。如果实测浓度低于限值,就显示当前的控制措施大致有效;要是接近或者超过限值,那就表明必要加大

工程控制或者改变作业方式。这个对比过程要充分考虑到实际接触时间,劳动强度以及个体差异等要素,不可以仅仅依靠数值对比而造成评价出现偏差。

4.2 风险分级方法与等级判定

在比较暴露浓度时,联系危害因素自身的毒性,接触频率以及作业人数等情况,可以运用风险矩阵法,半定量评分法来执行风险分级。风险分级会把作业岗位划分成低风险,中风险,高风险和极高风险这几个等级,从而给差别化的运作控制提供依照。对于低风险岗位,只需保留常规监测即可;中风险的岗位要加大局部通风或者优化作业规程;高风险及更高风险的岗位务必首先执行工程改造,缩减接触时间,并且加强个体防护。分级的结果应当动态更新,按照工艺的改变或者检测数据的变动及时作出调整,以保证运作资源准确投放,防控措施切实有效。

5 工程控制措施与管理体系构建

5.1 工艺改进与密闭化自动化

职业卫生运作把从源头上消除或者缩减危害因素当作头号准则。改良生产工艺的时候,用无毒或者低毒原料来代替高毒物质,这样就能从根本上减轻化学性危害的风险。密闭化和自动化技术会把操作人员和危害源用物理手段隔离开,从而大幅削减直接接触的机会。利用密闭管道运送物料,设立远端控制系统做到反应过程无需有人看守,可以明显减小有毒物质泄漏以及噪音暴露的可能性^[3]。这些举措在设计之初就要被考虑进去,而且要在设备选择,布局安排时得到执行,进而形成起一个本质安全等级比较高的生产环境。

5.2 通风排毒与降噪隔振设施

有些危害因素难以彻底清除,局部通风排毒系统便是控制空气中有害物质浓度的重要装置。经过合理规划,排风罩,风管以及净化装置,可以有效地把有害气体从产生源捕捉起来并排放出去,防止这些气体蔓延到工作区域内。在控制噪音和震动的时候,利用隔声罩,消声器以及减震基座等手段,能够有效地削减设备运转过程中能量的传递。通风系统和降噪设备都要按时执行保养,并做性能评定,以保证它们始终符合运行要求。把设施的运行参数同作业环境的检测数据关联起来加以分析,就可以给改进通风量和隔振方案给予技术参考。

5.3 个体防护装备选型与配备

工程控制措施若不能将危害减至安全水平,则个体防护装备便成了捍卫劳动者健康的最后一道屏障,其选型要依照危害因素的识别成果,全面考量防护性能,佩戴舒适度以及作业特性。就拿有机蒸气来说,应当选用合适型号的防毒面具;应对粉尘的时候,得要高效过滤式的防尘口罩;处于噪声环境之中,就得供应合适的耳塞或者耳罩。企业要有个体防护装备的配备准则,发放情况及更换时限,还要定时举办佩戴培训并执行密合性检测,保证装备在实际操作过程中

起到应有的效果。防护装备的管理也要列入到日常的监督巡查范畴之内。

5.4 职业卫生培训与应急能力建设

工程控制与个体防护措施要想有效落实,就得依靠作业人员对危害的认知及其应对能力。职业卫生培训要覆盖入职,转岗以及在岗的整个过程,其中包含危害因素识别,防护设施操作,个体防护装备正确佩戴以及应急处理流程等内容,从而保证员工知晓风险,懂得防范,能够实施保护^[4]。培训形式可把理论授课和现场实际操作联系起来,重视针对性和实用性。应急能力的创建重点在于针对泄漏,中毒等突发情况立即作出反应,通过制定应急预案,准备应急物资并定时开展演习,加强现场人员在紧急情况下自身救护,相互救助以及共同解决问题的能力。把培训和应急守护纳入日常考核体系,有益于塑造人员防护和工程控制相配合的全面防御局面。

6 防控措施效果评估与持续改进

6.1 检测数据对比与效果验证

防控措施执行之后,要凭借现场检测的数据展开前后对比,以此来证实这些措施是否有效。把改造前后同一个岗位的危害因素浓度或者强度的变化情形纳入统计分析当中,如果数据显示明显下降并且一直低于职业接触限值,就表明这些措施已经达到了预期的目的。如果改良的效果不太突出,那么就要分析一下原因,可能是设备选型存在不合理之处,运行维护没有做好或者是检测点位选择不对等状况。效果的验证应当包含不同的生产负荷以及季节条件,从而保证结论具备代表性。检测数据之间的对比也是企业向监管部门展示自身合规性的关键依据。

6.2 健康监护与职业禁忌管理

健康监护是衡量职业危害防控成效的直观体现,通过定时安排在职工开展职业健康检查,能够及早察觉与工作有关的健康损伤。体检项目需按照实际接触的危害因素类型来设定,着重观测靶器官功能指标。针对查出职业禁忌症或者疑似职业病的人员,企业要立即调换其工作岗位,并安排进一步复查。健康监护收集到的数据还可用以剖析群体健康状况的变化态势,从而倒推出防控举措是否有所不足。创建员工健康档案并执行动态维护,有助于达成个体防护和群体风险管控的有效融合。

6.3 防控体系运行评估与优化路径

职业危害防控体系若有效运行,离不开制度的完备,责任的落实以及资源的保障。定时展开体系运行评定,从组

织架构,制度执行,设施守护,人员培训以及应急反应等层面实施综合审查,找出管理中的薄弱之处。评定结果需转为成改善途径,明确修正的责任部门及其时限,创建起计划,执行,检查,处理的循环运行机制。不断改良促使企业紧跟技术发展步伐,及时采用新的检测方法,效率更高的工程控制技术和智能监管平台,从而持续加强职业卫生管理成果。

6.4 信息化平台与智能监管应用

信息技术同职业卫生运作紧密结合,创建信息化监管平台渐渐成为优化防控效能的关键走向。此平台可整合危害因素的在线监测数据,检测报告,健康守护档案以及防护设施的运行状况等信息,达成数据的集中存储并执行动态分析。通过设定警报阈值,系统会自动识别异常情形,并及时推送给管理人员,从而方便快捷地作出反应^[5]。智能监管应用表现在巡查任务分配,隐患整改跟进以及培训记录管理等诸多方面,推动职业卫生运作由被动应对朝着积极预防的方向转变。平台运行的时候要形成数据审核与保护机制,以保证信息真实可靠。采用信息化手段利于创建全要素,全流程的智能化防控体系,可以给持续改善提供数据支持和决策依据。

7 结语

化工企业生产现场的职业危害因素识别,检测与控制属于系统工程,牵涉技术,运作和组织等诸多层面。本研究就危害因素分类,检测技术,暴露评定,工程控制以及效果评定这些核心部分实施系统阐述,重视从源头治理到末端保护的全过程运营理念。实际上,企业应当按照自身的工艺特征和风险级别,科学地选取检测方法和控制方案,并关注以数据为引领并持续完善。未来,随着智能化监测技术与精细化健康管理手段的不断成熟,化工企业职业危害防控将朝着更精准、更高效的方向发展。

参考文献

- [1] 曹洪印,吴威威.化工企业实施责任关怀职业健康安全准则的难点及对策[J].化学工程与装备,2022,(05):246-247.
- [2] 王在鉴,王伟才.化工企业职业病危害因素检测现场采样的质量控制要点[J].化工管理,2021,(18):152-153.
- [3] 王志文,胡爽,刘凯,等.某电镀化工企业职业病危害现状评价[J].中国卫生产业,2020,17(09):188-190.
- [4] 丁俊.4种职业健康风险评估方法在化工企业中的应用研究[D].广东药科大学,2019.
- [5] 丁亩胜,张春霞.某大型化工企业夏季高温危害情况的探讨[J].化工管理,2019,(06):52-54.

Research on Cost Control of Construction Material Procurement and Optimization Path of Supply Chain Management

Fei Gao

CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Seventh Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 451450, China

Abstract

With the continuous intensification of market competition in the construction industry and the continuous compression of profit margins in engineering projects, material procurement costs have become an important factor affecting the economic benefits of construction projects. The procurement of construction materials involves various materials such as steel, cement, sand and gravel, mechanical and electrical equipment, and decorative materials. Its procurement cost is influenced by various factors such as market price fluctuations, supply chain efficiency, and procurement management level. The traditional procurement management model often suffers from problems such as information asymmetry, insufficient supply coordination capabilities, and extensive inventory management, which increases the difficulty of controlling procurement costs. The research results of this article indicate that by constructing a digital procurement management platform, optimizing supplier management mechanisms, and strengthening full process cost control, the efficiency of construction material procurement and supply chain collaboration can be significantly improved, providing theoretical references and practical paths for construction enterprises to reduce procurement costs and enhance project management capabilities.

Keywords

construction engineering; material procurement; cost control; supply chain management; refined management

建筑工程物资采购成本控制与供应链管理优化路径研究

高飞

中交一公局第七工程有限公司，中国·河南 郑州 451450

摘 要

随着建筑行业市场竞争的不断加剧以及工程项目利润空间持续压缩，物资采购成本已成为影响建筑工程项目经济效益的重要因素。建筑工程物资采购涉及钢材、水泥、砂石、机电设备及装饰材料等多种物资，其采购成本受市场价格波动、供应链效率以及采购管理水平等多方面因素影响。传统采购管理模式往往存在信息不对称、供应协同能力不足以及库存管理粗放等问题，导致采购成本控制难度增加。本文研究结果表明，通过构建数字化采购管理平台、优化供应商管理机制以及强化全过程成本控制，可显著提升建筑工程物资采购效率与供应链协同水平，为建筑企业降低采购成本、提升项目管理能力提供理论参考与实践路径。

关键词

建筑工程；物资采购；成本控制；供应链管理；精细化管理

1 引言

随着我国城镇化建设进程不断推进，建筑工程项目规模持续扩大，工程建设活动对建筑材料及设备的需求量不断增加。建筑工程物资采购在工程项目成本结构中占据重要比例，一般情况下，材料费用约占工程总造价的 55% ~ 65%，其中钢材、水泥、混凝土及机电设备等关键物资的采购成本直接影响项目整体经济效益 [1]。因此，如何在保证工程质量与施工进度的前提下实现采购成本的有效控制，成为建筑企业管理中的重要课题。

【作者简介】高飞（1983—），男，中国湖北黄冈人，初级工程师，从事工程材料管理研究。

2 建筑工程物资采购成本控制的理论基础

2.1 建筑工程物资采购成本构成

建筑工程物资采购成本主要由材料采购价格、运输费用、仓储费用以及采购管理费用等多个部分构成。其中，材料采购价格是影响采购成本的核心因素，而运输与仓储费用则与供应链管理效率密切相关。从成本构成角度分析，建筑工程物资采购总成本可以表示为：

$$C=P+T+S+M$$

其中：C 代表物资采购总成本；P 代表材料采购价格；T 代表运输成本；S 代表仓储与库存管理成本；M 代表采购管理成本。在实际工程项目中，采购价格通常占总采购成本的 70% 以上，因此通过集中采购、规模采购以及供应商协

同管理等方式降低采购价格，是实现成本控制的重要手段。同时实践中通过优化物流运输与库存管理，也可以有效降低供应链运行成本。

表 1 建筑工程物资采购成本构成比例

成本类型	占比范围
材料采购价格	70% ~ 80%
运输成本	8% ~ 12%
仓储成本	5% ~ 10%
管理成本	3% ~ 5%

从表 1 可以看出，材料价格与运输成本是影响采购成本的主要因素，因此在供应链管理过程中，应重点加强对供应商价格管理与物流配送效率的控制。

2.2 供应链管理在建筑工程采购中的作用

供应链管理是指在产品生产与服务过程中，通过协调供应商、制造商、物流企业及终端用户之间的关系，实现资源配置优化与成本控制的管理模式。在建筑工程领域，供应链管理主要涉及材料生产企业、材料供应商、物流运输企业以及施工单位等多个主体。在传统采购模式下，各参与主体之间的信息沟通效率较低，容易形成信息孤岛 [2]。而通过引入供应链管理理念，可以实现信息共享与资源协同，提高供应链整体运行效率。如通过建立统一的物资采购信息平台，可以实时掌握材料库存数量、供应商库存情况以及市场价格变化，从而实现采购计划的动态调整 [3]。供应链协同管理还能够提升建筑企业与供应商之间的合作稳定性。通过建立长期合作关系，企业可以获得更加稳定的材料供应与价格优势，从而降低市场价格波动对工程成本的影响。

2.3 精细化成本控制理论

精细化成本管理是现代企业管理的重要理念，其核心在于通过对成本构成要素的细化分析，实现全过程成本控制。在建筑工程物资采购过程中，精细化管理主要体现在采购计划管理、供应商管理以及库存管理等方面。

在采购计划阶段，需要根据工程施工进度制定合理的采购计划，避免因采购过多导致库存积压或因采购不足影响施工进度。在供应商管理方面，通过建立供应商评价体系，可以对供应商的价格水平、供货能力以及质量稳定性进行综合评价，从而选择最优供应商。在库存管理方面，通过引入信息化管理系统，可以实现库存数量实时监控，减少库存资金占用。通过实施精细化成本管理，建筑企业能够有效降低物资采购成本，提高资金使用效率，从而增强企业市场竞争力。

3 建筑工程物资采购与供应链管理现状分析

3.1 采购管理模式分散导致成本控制难度增加

在当前建筑工程项目管理实践中，物资采购普遍采用以项目部为主体的分散采购模式。由于工程项目往往分布在不同地区，各项目部根据施工进度自行组织材料采购，虽然

能够在一定程度上提高采购的灵活性，但从企业整体层面来看，这种模式不利于形成规模化采购优势。建筑工程中钢材、水泥、商品混凝土及机电设备等主要材料通常占工程总造价的 55% ~ 65%，其中钢筋材料费用约占结构工程材料成本的 35% 左右。若各项目独立采购，企业难以通过批量采购获取价格优惠，同时不同项目之间材料采购价格差异较大，容易形成成本管理的不均衡现象 [4]。

在实际工程管理中，部分大型建筑企业在不同项目之间的钢材采购价格差异可达到 4% ~ 7%。以某城市综合体项目为例，项目年度钢筋采购量约 8000t，若采购价格差异为 200 元/t，则单一项目即可产生约 160 万元的成本差距。而由于缺乏统一采购平台，各项目采购信息无法及时共享，企业难以形成统一的市场价格数据库，采购决策往往依赖经验判断而非数据分析，从而进一步增加采购成本的不确定性。因此，分散化采购模式已逐渐难以适应现代建筑企业规模化发展的需求，亟需通过集中采购与供应链协同机制实现采购成本的系统性控制。

3.2 供应链协同水平不足影响物资供应效率

建筑工程物资供应链涉及材料生产企业、区域供应商、物流运输单位以及施工单位等多个主体，其运行效率直接影响施工进度与工程成本。然而在传统管理模式下，各参与主体之间缺乏有效的信息共享机制，供应链整体协同程度较低 [5]。施工单位通常根据阶段性施工计划提出材料需求，而供应商则依据自身库存与生产计划进行供货安排，当双方信息沟通不及时或需求预测不准确时，容易出现材料供应滞后或过量供应等问题。如在主体结构施工阶段，钢筋与混凝土需求呈现明显的阶段性增长特征，若供应商未能及时获取施工进度信息，则可能导致现场材料供应不足，从而影响施工节奏。相反，如果材料提前大量到场，则会增加现场堆放压力与库存管理成本。根据工程管理实践统计，在部分大型建筑工程项目中，由于供应链协同不足造成的材料等待时间平均可达 2 ~ 3 天，不仅增加机械设备与人工等待成本，还可能导致施工工序衔接效率下降。因此，从供应链整体视角优化材料采购与配送流程，建立施工单位、供应商及物流企业之间的协同机制，是提升建筑工程物资供应效率的重要途径。

3.3 信息化管理水平不足制约采购管理效率

随着数字化技术在建筑行业中的逐步应用，部分企业已经开始建设工程管理信息系统，但在物资采购管理领域，信息化程度仍然相对有限。一些企业仍采用人工台账或简单电子表格进行采购记录与库存统计，导致数据更新不及时，难以实现实时监控。尤其是在大型建筑工程项目中，材料种类往往超过 300 种，若缺乏信息化管理系统支持，采购数据、库存数据以及材料消耗数据难以形成统一数据库，从而影响采购决策的科学性。实践中在传统管理模式下，采购计划往往由现场管理人员根据经验制定，缺乏对施工进度、材料消

耗规律以及市场价格变化的综合分析。这种经验式管理方式容易导致采购计划与实际需求之间出现偏差。例如，在装饰施工阶段，由于材料规格种类较多，如果缺乏信息化系统支持，常常出现材料重复采购或库存积压等问题。

为解决上述问题，越来越多建筑企业开始引入数字化采购管理平台，通过数据集成技术实现采购、库存及供应链信息的统一管理。该系统能够根据施工计划自动生成材料需求预测，并结合供应商库存与物流信息进行智能调度，从而实现物资供应的动态协调。其运行逻辑如图所示。通过建立基于信息化技术的供应链管理体系，企业能够实时掌握材料采购价格、库存数量以及供应商供货情况，从而提高采购管理效率并降低材料成本。与此同时，信息化系统还能够通过数据分析形成材料价格数据库，为企业采购决策提供可靠的数据支持，进一步推动建筑工程物资采购管理向精细化与数字化方向发展。

4 建筑工程物资采购成本控制与供应链管理优化路径

为提升采购效率并降低采购成本，建筑企业应逐步建立集中化采购管理体系，通过统一采购平台实现规模化采购。集中采购不仅能够提高企业在市场中的议价能力，还可以通过统一采购标准与质量控制机制，提升材料采购质量。在集中采购体系下，企业总部负责制定采购策略与供应商管理制度，各项目部根据施工需求提交采购计划，由采购中心统一组织采购。通过这种方式，可以有效避免重复采购与价格波动问题，实现采购成本的整体优化。

供应商管理是供应链管理的重要环节。建筑企业应建立科学的供应商评价体系，从价格、质量、供货能力以及服务水平等多个方面对供应商进行综合评价，并建立长期合作关系。

表 2 供应商评价指标体系

指标类别	评价内容
价格指标	材料价格水平、价格稳定性
质量指标	产品质量、质量合格率
供货能力	供货周期、库存保障能力
服务水平	售后服务、技术支持

通过建立供应商评价体系，可以筛选出优质供应商，并形成稳定的供应链合作网络，从而提升材料供应稳定性。随着信息技术的发展，建筑企业可以通过建立数字化采购管

理平台，实现采购流程的智能化管理。该平台可以集成采购计划管理、供应商管理、库存管理以及物流配送管理等功能，实现采购全过程信息化管理。通过数字化平台的建设，可以实现采购信息实时共享，提高采购决策效率，同时减少人为管理误差，从而降低采购成本。

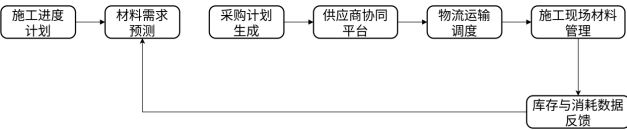


图 1 建筑工程物资采购供应链协同运行机制

在建筑工程物资采购管理过程中，施工进度、采购决策与物流供应之间存在明显的系统耦合关系。为提高采购决策的科学性并实现供应链协同运行，本文构建了基于施工进度驱动的物质供应链协同管理模型，其运行逻辑如图 3 所示。该模型以施工进度计划为系统运行起点，通过对施工阶段材料需求进行预测，形成动态化采购需求，并进一步生成采购计划。在采购执行阶段，通过供应商协同平台实现材料供应信息共享，使供应商能够根据施工需求提前进行生产与库存准备。随后通过物流运输调度系统完成材料配送，并将物资运送至施工现场进行统一管理。与此同时，施工现场材料使用情况及库存数据将实时反馈至管理平台，并重新进入材料需求预测环节，从而形成“施工进度—采购决策—物流配送—现场管理—数据反馈”的供应链闭环运行机制。通过该机制，可以实现材料供应与施工进度之间的动态匹配，从而降低库存积压风险并提高建筑工程物资采购效率。

5 结语

建筑工程物资采购成本控制与供应链管理是提升工程项目经济效益的重要途径。本文通过分析建筑工程物资采购成本构成与供应链管理理论，系统梳理了当前建筑企业在采购管理中存在的主要问题，包括采购模式分散、供应链协同不足以及信息化管理水平较低等。

参考文献

[1] 王姣.建筑工程材料采购风险管理研究[J].中国物流与采购,2022,(23):99-100.

[2] 张吉猛.建筑施工企业物资采购风险管理与控制[J].经济视野,2020,(21):89-89.

[3] 廖明龙.建筑工程招标采购风险及其管控优化策略[J].数码设计,2020,9(11):71-71.DOI:10.19551/j.cnki.issn1672-9129.2020.11.074.

Durability Test of Repair Materials for Concrete Surface Cracks

Yuan Xue

University of Information Science and Engineering, Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

During service life, concrete structures are prone to surface cracking due to environmental erosion, load effects, and material aging. The presence of cracks compromises structural integrity, exacerbates internal reinforcement corrosion and material degradation, and shortens service life. Crack repair materials serve as critical components for defect remediation and durability assurance, with their performance stability directly impacting repair outcomes. This study systematically investigates the etiology and classification characteristics of concrete surface cracks, analyzes commonly used repair materials including their properties and mechanisms of action, identifies key factors affecting material durability, and designs scientifically validated durability testing protocols. Through mechanical property evaluations and durability performance assessments, degradation patterns are systematically analyzed. Targeted application improvement measures are proposed based on experimental results to provide technical support for material selection, mix optimization, and construction control in concrete surface crack repair projects. These efforts aim to address persistent challenges such as inadequate material durability and short-term repair effectiveness in current crack repair solutions.

Keywords

concrete cracks; repair materials; durability; experimental study; performance optimization

混凝土表面裂缝修复材料的耐久性试验

薛源

信息工程大学, 中国 · 河南 郑州 450000

摘要

混凝土结构在服役期间, 由于环境侵蚀、荷载作用以及材料老化等原因, 表面裂缝很容易出现, 裂缝的存在会造成结构整体性受到破坏, 从而加重内部钢筋锈蚀和材料劣化, 缩短结构的服役寿命。裂缝修补材料是修补结构缺陷、保证结构耐久性的重要材料, 它的性能稳定直接影响到修复工程的效果。通过对混凝土表面裂缝成因和分类特征进行梳理, 分析常用的修复材料种类、性能以及作用机理, 找出影响修复材料耐久性的关键因素, 设计科学合理的耐久性试验方案, 对力学性能和耐久性能进行测试, 分析材料性能退化规律, 根据试验结果提出有针对性的应用改进措施, 为混凝土表面裂缝修复工程材料选择、配比优化和施工控制提供技术支持, 解决目前混凝土表面裂缝修复材料耐久性差、修复效果短期失效的问题。

关键词

混凝土裂缝; 修复材料; 耐久性; 试验研究; 性能优化

1 引言

裂缝修复材料用以填充、黏结, 封堵裂缝通道, 阻断有害介质进入, 并加强裂缝处的结构整体性, 改善结构力学性能。但是目前市场上修复材料种类繁多, 性能相差很大, 部分材料只能起到短期封闭作用, 在复杂的服役环境中容易出现黏结失效、开裂、老化等问题, 造成修复工程反复进行, 增加工程维护成本。耐久性属于修复材料的关键性能指标, 它关乎修复工程的长久可靠程度, 开展修复材料耐久性试验研究, 弄清楚材料性能退化规律和影响要素, 改良材料应用

策略, 对于改善混凝土结构修复品质, 延长结构服役年限有着十分重要的现实意义, 而且也是当下混凝土结构保养领域的重要研究趋向。

2 裂缝修复材料理论基础

2.1 裂缝成因与分类特征

混凝土表面裂缝是由内部应力和外部环境共同作用而产生的, 可分为材料自身原因和外部作用原因两种。材料自身因素是由配合比、骨料级配不合理、水化热释放不均引起的, 造成硬化时收缩变形不协调产生内应力; 外部因素有温度应力、荷载作用、环境侵蚀、施工缺陷等, 温差过大、局部应力集中或者恶劣环境都会引起裂缝。裂缝根据其机理可分为收缩裂缝、温度裂缝、荷载裂缝和腐蚀裂缝, 形态、宽

【作者简介】薛源 (1995—), 男, 中国河南郑州人, 本科, 助理工程师, 从事土木工程研究。

度及分布均存在差别,收缩裂缝常呈细小花网状,温度裂缝随温度变化而变动,荷载裂缝与受力方向一致,腐蚀裂缝伴随着表层剥落,准确判定类型与成因是选择合适的修复材料的前提^[1]。

2.2 常用修复材料类型与性能

修复材料根据材质分为有机、无机和复合三种,性能及适用场景不同。有机材料以环氧树脂等为主要成分,黏结强度高、柔韧性好、施工方便,适合于室内细微裂缝的修补,但是耐温耐老化性能差,容易脆化失效;无机材料以水泥基为主,与混凝土相容性好、耐久性强,适合于室外宽裂缝的修补,柔韧性与黏结强度较低;复合材料结合了两者的优势,具有黏结、柔韧和耐久的优点,应用范围较广,盲目选择会造成修复效果不好。

2.3 修复材料作用机理分析

修复材料的主要作用机理就是填充、黏结、固化封闭裂缝,阻止有害介质进入,提高结构整体性和力学性能。黏结是基础,依靠物理吸附和化学反应形成牢固的界面,防止修复层剥落,填充是解决宽裂缝,消除通道减少内部劣化的手段,固化是强度形成的环节,有机材料靠化学反应固化,无机材料靠水化形成硬化体,抵抗荷载和侵蚀。部分材料还有渗透作用,可以渗透到细微裂缝里实施深层修补,改善抗渗抗腐蚀性能,减缓裂缝发展^[2]。

3 耐久性试验方案与结果

3.1 试验材料与试件制备

试验选择有机、无机和复合三种常用的修复材料作为研究对象,分别为环氧树脂类、水泥基复合材料和环氧-水泥复合修复材料,各类材料均为市售主流产品,其性能指标符合有关规范的要求。试件制备采用与实际工程相同的混凝土强度等级,制作标准混凝土试件,用人工切割的方式在试件表面制备不同宽度的模拟裂缝,模拟实际工程中常见的收缩裂缝和荷载裂缝,裂缝宽度控制在合理的范围内,保证试件和实际工程裂缝特征一致。试件制备完毕后,放在标准养护环境中养护到规定龄期,养护结束后对裂缝表面进行清理,清除表面浮尘、杂物和松散混凝土,保证裂缝表面干净、干燥,为修复材料施工创造良好的条件。修复材料施工按照相关施工规范进行,用涂抹、填充的方式将修复材料均匀填充到裂缝内部和表面,保证裂缝完全封闭,施工完成后放在标准环境下养护,直到修复材料完全固化为止,用于后续力学性能和耐久性能测试。

3.2 试验方法与加载制度

试验采用室内模拟试验法,结合实际工程服役环境,设计力学性能试验和耐久性能试验两种试验项目,对修复材料的耐久性进行全方位的评价。力学性能测试主要有黏结强度测试和抗折强度测试,黏结强度测试用拉伸试验法,用专用测试设备对修复层和混凝土界面施加拉伸荷载,直到界面

剥离为止,记录最大拉伸荷载,计算黏结强度;抗折强度测试用三点弯曲试验法,对修复后的混凝土试件进行弯曲加载,记录试件破坏时的最大荷载,计算抗折强度。耐久性能测试采用环境模拟试验方法,模拟温度循环、干湿交替、盐雾侵蚀等典型的恶劣服役环境,将修复后的试件放入模拟的环境中进行长期养护,定时取出试件做性能测试,分析修复材料性能退化的规律。温度循环试验用高低温交替循环的方式模拟不同的季节温度变化,干湿交替试验用浸水和烘干交替的方式模拟雨水侵蚀和自然干燥的环境,盐雾侵蚀试验用盐雾喷淋的方式模拟海洋或者盐碱地区的腐蚀环境,各种试验都按照相关规范设定加载制度和试验周期,保证试验结果的科学性和可靠性^[3]。

3.3 力学性能测试结果

力学性能测试结果表明,各种修复材料的粘接强度和抗折强度有较大的差别。有机修复材料的黏结强度最高,能和混凝土表面牢固黏结,但是抗折强度低,柔韧性好,受力时容易产生塑性变形,不容易开裂;无机修复材料的抗折强度高,与混凝土相容性好,可以和混凝土形成整体受力体系,但是黏结强度较低,柔韧性差,受力时容易出现修复层开裂;复合修复材料的黏结强度和抗折强度都比较高,兼具有机和无机材料的优点,受力时能有效地传递荷载,防止修复层剥离和开裂,力学性能最好。修复后的试件力学性能比未修复的试件要好很多,裂缝处的承载能力得到较好地恢复,复合修复材料修复后试件的力学性能提高最明显,可以更好地满足结构受力的要求。不同的裂缝宽度对修复材料的力学性能也有一定的影响,裂缝宽度越大,修复材料的黏结强度和抗折强度就越低,修复效果越差,细微裂缝的修复效果比宽裂缝好。

3.4 耐久性能退化规律

耐久性能测试结果表明,各种修复材料在模拟恶劣环境下都会出现不同程度的性能退化,退化规律同材料种类、环境条件有关。温度循环环境下,有机修复材料性能退化最严重,长期高低温交替会使材料脆化、黏结强度急剧降低,甚至造成修复层开裂、剥离,无机修复材料性能退化较慢,耐高温、抗温度变化能力强,只是长期循环后才出现轻微性能下降,复合修复材料性能退化程度介于两者之间,可以较好地抵抗温度变化的影响。干湿交替环境下的无机修复材料性能退化比较明显,水分反复侵入会造成材料内部结构破坏,黏结强度和抗折强度下降;有机修复材料抗水性能好,性能退化较慢,但是长期干湿交替还是会引发界面黏结失效;复合修复材料通过成分优化,抗水性能较好,性能退化速度比单一材料要慢得多。盐雾侵蚀环境下,各种修复材料的性能都会出现明显的退化,盐雾中含有的有害离子会进入修复层和混凝土界面,破坏黏结效果,加快材料劣化,有机修复材料的抗腐蚀性能最差,无机修复材料相对较好,复合修复材料通过添加抗腐蚀成分,抗盐雾侵蚀能力得到明显

提高。

4 修复材料应用改进建议

4.1 材料配比优化方向

材料配比优化属于提高修复材料耐久性的主要手段,依照材料种类以及适用场合的不同,对材料配比参数实施有区别的调整,从而弥补单一材料所存在的性能短板。有机修复材料要改进树脂和固化剂的比例,适量加入抗老化剂、柔韧性改善剂,加强材料的抗老化性能和柔韧性,削减温度起伏和紫外线照射引发的脆化、开裂情况,还可以加入渗透剂来加强材料的渗透能力,达成对细微裂缝的深层修补。无机修复材料要改善水泥、骨料和外加剂的配比,调节骨料级配,加入减水剂、膨胀剂,削减材料收缩变形,加强材料的黏结强度和柔韧性,防止修复层开裂,还可以添加防腐成分,提高材料的抗盐雾、抗酸碱侵蚀能力。复合修复材料要改善有机和无机成分的配比比例,兼顾粘接强度、柔韧性、耐久性,按照裂缝种类和服役环境来调节两种成分的比例,保证材料性能同修复需求相适应,还可以加入纳米改性材料,改良材料内部结构,加强材料的力学性能和耐久性能。

4.2 施工工艺控制要点

施工工艺的规范性影响到修复材料的耐久性和修复效果,要从裂缝清理、材料施工、养护等主要环节入手,加强施工质量控制。裂缝清理要将裂缝表面的浮尘、杂物、松散混凝土、油污清除干净,用高压水枪、钢丝刷等工具清理,保证裂缝表面干净、干燥,必要时可以使用烘干设备对裂缝进行烘干处理,防止水分影响修复材料的黏结效果。材料施工必须严格按照配比要求配置修复材料,保证材料均匀混合,无结块、分层现象;施工时将修复材料均匀填充到裂缝内,使裂缝完全封闭,无空隙、气泡,宽裂缝用分层填充、分层固化的方法提高修复效果;施工厚度应控制在合理范围内,防止过厚或过薄造成修复层开裂、剥离。养护过程要严格按照养护规范执行,根据修复材料种类确定合适的养护周期和养护环境,防止温度过高、过低或者湿度变化太大影响材料的固化效果,养护期间不得使试件受到外力碰撞和振动,保证修复层与混凝土界面牢固黏结。

4.3 适用条件与选型建议

修复材料的选择要根据裂缝类型、宽度、服役环境和结构受力要求来确定,不能随意选择材料造成修复效果不好。室内或者环境温和的区域细微收缩裂缝,可以使用有机修复材料,黏结强度高、施工方便,可以快速封闭裂缝;室外恶劣环境、温差大区域或者宽裂缝,可以使用无机修复材

料,耐久性好、抗温度变化能力强,能和混凝土形成整体受力体系;对要求较高的重要工程、复杂服役环境或者不同类型混合裂缝,可以采用复合修复材料,兼顾各种材料的优点,满足不同的修复需求,提高修复工程的长期可靠性。选型时要考虑材料的耐久性、力学性能和施工方便程度,根据工程实际需要,优先选择性能稳定、适应性强的修复材料,还要查验材料质量证明文件,保证材料性能满足相关规范要求。

4.4 长期性能保障措施

修复材料长期性能保证要创建全流程管控体系,融合材料改良、施工把控和后期保养,保证修复成果的长久性。材料进场前要进行性能检测,选择性能稳定、耐久性好的产品,禁止不合格材料进入施工现场;在施工过程中加强质量控制,严格按照施工规范执行,保证施工质量达到要求,防止施工缺陷造成材料性能下降。修复工程完成后要建立长期监测制度,定时对修复区域开展检查工作,观测修复层是否完整,黏结状况怎样,性能出现何种改变等状况,及时察觉并解决修复层开裂、剥离等状况。在恶劣服役环境下修复工程中,在修复层表面增加防护层,减缓紫外线、水分、有害介质对修复材料的侵蚀,提高修复材料的使用寿命;定期对修复区域进行维护,及时清除表面杂物、浮尘,必要时做二次修复,保证混凝土结构长期的安全和稳定。

5 结语

混凝土表面裂缝修补材料的耐久性关系到修复工程的效果,也是保证混凝土结构服役安全的重要因素。不同种类的修复材料在力学性能和耐久性能上存在较大差别,其适用范围以及效果也各不相同,有机修复材料粘接强度高但是抗老化性能差,无机修复材料耐久性好但是柔韧性差,复合修复材料具有各种优点,是今后修复材料的发展方向。耐久性试验结果表明,温度变化、干湿交替、盐雾侵蚀等环境因素都会加快修复材料性能的退化,材料自身的性能、施工质量都会对耐久性产生重要的影响。根据试验结果和理论分析,经由改善材料配比、规范施工工艺、合理选型并创建长期监测维护体系等手段,可较好地改善修复材料的耐久性能,破解目前修复工程短期失效的难题。

参考文献

- [1] 张正周.公路工程混凝土护栏修复材料耐久性试验[J].交通世界,2026(1):23-25.
- [2] 樊康鑫,罗健林,陶雪君.水泥与混凝土路基材料性能的长期耐久性分析[J].水泥,2026(1):102-104.
- [3] 刘晓辉,武宁,陈鹏刚.自修复混凝土材料在桥梁耐久性提升中的应用研究[J].中国高科技,2025(13):91-93.

Research on Safety Risk Identification and Dynamic Control of the Whole Process in Coal Mine Mining Engineering

Yamin Liu

Shanxi Xinzhou Shenda Qifeng Coal Industry Co., Ltd., Shanxi, Ningwu, 036700, China

Abstract

In coal mining engineering, safety risk identification and dynamic control are key factors in ensuring mine safety and improving production efficiency. As mining depth increases and mining conditions become more complex, safety risks are becoming increasingly severe. This paper explores the safety risk identification and dynamic control throughout the entire process of coal mining engineering. It first analyzes the main safety risks in the mining process and focuses on assessing the methods and technologies of risk identification. Then, based on the actual conditions of coal mines, it studies the construction and application of dynamic risk control mechanisms, proposing a comprehensive safety management model and emphasizing the importance of dynamic control and its role in emergency management. Moreover, it combines modern technological methods to propose optimized technical paths and measures for safety risk control in coal mining engineering. These measures can effectively prevent accidents, ensure mine production safety, enhance the safety and efficiency of mining projects, and provide strong support for the sustainable development of the coal mining industry.

Keywords

coal mining; safety risk; dynamic control; risk assessment

煤矿采矿工程全过程安全风险识别与动态管控研究

刘亚民

山西忻州神达栖凤煤业有限公司, 中国·山西 宁武 036700

摘 要

煤矿采矿工程中, 安全风险识别与动态管控是保障矿山安全、提高生产效率的关键因素。随着矿山深度的增加及开采条件的复杂化, 安全风险日益严峻。本文探讨了煤矿采矿工程全过程中的安全风险识别与动态管控, 首先分析了煤矿采矿过程中存在的主要安全风险, 重点评估了风险识别方法和技术应用。其次, 结合煤矿实际情况, 研究了动态风险管控机制的构建与应用, 提出了全过程安全管理模式, 强调了动态管控的重要性及其在应急管理中的作用。并结合现代技术手段, 提出了优化煤矿采矿工程安全风险管控的技术路径与措施, 可以有效预防事故发生, 保障矿山生产安全, 提升采矿工程的安全性及效率, 为煤矿行业的可持续发展提供有力支持。

关键词

煤矿采矿; 安全风险; 动态管控; 风险评估

1 引言

煤矿采矿工程是一项高风险的生产活动, 涉及的安全问题事关矿工生命安全和矿山资源的可持续利用。近年来, 随着矿山开采深度的增加以及环境条件的复杂化, 煤矿工程中的安全风险日益突出。传统的安全管理方法已无法满足煤矿采矿过程中的动态风险变化需求。因此, 构建科学、系统的安全风险识别与管控体系显得尤为重要。煤矿采矿过程中的安全风险不仅来源于自然环境, 还涉及技术设备、操作管理等多方面因素, 如何全面识别和实时监控这些风险, 成为

当前煤矿工程安全管理中的关键问题。本文旨在深入分析煤矿采矿工程全过程的安全风险识别技术与动态管控机制, 探讨如何通过动态的风险管控手段, 有效应对采矿过程中可能出现的各类安全隐患, 从而提高煤矿工程的安全管理水平, 并为矿山安全提供理论支持和实践指导。

2 煤矿采矿工程安全风险识别的重要性

2.1 安全风险识别的背景与意义

煤矿采矿工程是一项高风险的生产活动, 涉及的危险因素复杂且多样。随着矿山开采深度的增加和开采条件的复杂化, 安全风险日益突出。传统的安全管理方法已经无法满足当前矿山安全管理的需求, 尤其是在深部矿山开采过程中, 面临着更多的地质灾害和设备故障等潜在危险。通过建

【作者简介】刘亚民（1990—），男，中国山西忻州人，本科，工程师，从事煤矿采矿工程研究。

立完善的风险识别机制,可以及早发现潜在的安全隐患,为后续的风险管控和安全决策提供科学依据,保障矿山生产安全。此外,随着煤矿行业的现代化发展和信息化技术的应用,风险识别也面临新的机遇,利用新技术和数据分析手段,可以提升风险识别的准确性和效率,有助于从源头上减少事故发生,推动矿山安全管理水平的提高。

2.2 煤矿采矿工程中的主要安全风险分析

煤矿采矿工程中的安全风险主要来源于地下开采过程中不可预测的地质灾害、矿山设备故障、人为操作失误等多个方面。在地质灾害方面,煤矿开采过程中可能发生的岩体塌陷、瓦斯爆炸、火灾等事件,往往对矿工生命安全构成严重威胁。设备故障同样是导致事故的重要因素,矿山开采中的各种机械设备可能由于老化、维修不到位或操作不当发生故障,进而引发一系列连锁反应。此外,矿山采矿过程中,缺乏完善的安全保障设施、监测设备及应急预案,也会加剧安全风险。因此,全面识别和预防这些风险是确保矿山安全的基础^[1]。

3 煤矿采矿工程的安全风险评估

3.1 安全风险评估的基本制度

煤矿采矿工程的安全风险评估是一个系统性、科学性强的过程,必须依托完善的制度保障。首先,煤矿企业应建立健全的安全风险评估管理制度,明确风险评估的职责分工、工作流程和技术要求。其次,评估过程中要根据不同的矿山类型、开采深度和作业环境,制定相应的评估标准和方法,确保评估工作的科学性与有效性。此外,制度还应规定定期开展安全风险评估的频率和内容,以便根据煤矿开采情况的变化,及时进行风险评估和预警。

3.2 安全风险评估方法分析

煤矿采矿工程的安全风险评估方法可以根据不同的风险性质、评估对象和评估目标选择合适的技术手段。目前,常用的安全风险评估方法包括定性分析与定量分析相结合的方法,常见的定性分析方法有危险源辨识、失效模式与效应分析(FMEA)等,定量分析方法则包括概率风险分析(PRA)和Monte Carlo模拟等。定性分析方法侧重于对矿山潜在风险源进行初步识别和分类,通常通过专家经验、历史事故数据等方式,系统分析可能的风险因素。而定量分析方法则通过数学模型和计算方法,评估风险发生的概率、影响程度及其可能造成的损失,进一步量化风险水平。

4 煤矿采矿工程全过程中的动态风险管控机制

4.1 动态风险管控的定义与特征

动态风险管控是指在煤矿采矿工程的整个生命周期中,基于实时数据与信息,持续监测、评估并调整安全风险控制措施的过程。与传统的静态风险管理方法不同,动态风险管控强调对风险源的实时监控和动态调整,能够根据实际情况及时识别和应对突发风险。其主要特征包括实时性、灵活

性和适应性。实时性指的是通过现代监测设备和数据分析技术,能够在第一时间捕捉到矿山安全状态的变化,并迅速作出反应。灵活性和适应性则意味着在风险发生后,能够根据新的环境和数据进行快速调整和优化管控措施,以达到最佳的安全保障效果。动态风险管控机制的实施,可以有效应对矿山开采过程中的复杂情况,提高矿山安全管理的应急响应能力^[1]。

4.2 全过程安全管理模式

煤矿采矿工程的全过程安全管理模式是指在矿山工程的设计、开采、生产、维修等各个环节中,都要采取严格的安全风险管控措施,确保安全管理的全程可控。这种管理模式要求在每个阶段都有相应的安全检查和评估措施,实时监测矿山环境和作业过程中的潜在危险,及时采取预防和纠正措施。全过程安全管理模式强调从矿山设计阶段就考虑安全风险因素,并通过科学的规划与技术手段,减少潜在风险的发生。与此同时,在采矿过程中,运用动态监控技术对设备、人员和环境进行实时监测,确保任何安全隐患能够尽早被发现并得到及时解决。通过全过程管理模式实施,煤矿企业能够大幅度提高安全风险的管控水平,减少事故发生率,保障矿工的生命安全。

5 煤矿采矿工程安全风险控制技术与措施

5.1 传统风险控制技术与新技术应用

传统的煤矿安全风险控制技术主要依赖于经验和操作规范,常用的技术手段包括防爆瓦斯监测、井下通风系统、人员定位管理等。这些技术在确保矿山安全方面发挥了重要作用,但随着煤矿开采深度的增加及环境复杂度的提升,传统技术的局限性日益显现。新技术的应用为煤矿安全带来了新的突破,例如物联网技术、人工智能、大数据分析等。这些新兴技术通过实时监测矿山环境与设备状态,利用数据分析预测潜在风险,提供更精确的预警信息,从而实现更加高效的安全管控。例如,通过安装智能传感器和自动化监控系统,能够实时获取矿山中的瓦斯浓度、气温、湿度等数据,并结合机器学习模型对风险进行评估与预测。这些新技术的应用大大提高了煤矿安全管控的精确度和响应速度。

5.2 矿山采掘过程中的安全控制措施

矿山采掘过程中的安全控制措施涉及多个方面,关键在于通过一系列技术手段和管理措施,减少事故的发生。在采掘作业中,首先应加强矿山环境的监测,利用地质勘察和采掘数据预测矿层变动情况,防止发生突发性的地质灾害。其次,通过加强设备维护与检查,确保采矿机械和通风系统正常运转,避免设备故障导致安全事故。此外,强化矿工的安全培训和意识提升也是关键措施之一,确保每位矿工都能严格遵守安全操作规程,避免因操作失误引发的事故。对于复杂和高危的采掘环境,还需要采用先进的支护技术,采用钢架支撑、充填技术等提高巷道的稳定性,减少塌方风险。

综合运用这些措施,能够有效防控矿山采掘过程中可能出现的各类安全隐患。

5.3 应急响应与事故防控措施

煤矿采矿工程的应急响应与事故防控措施是确保矿工生命安全和矿山正常生产的重要保障。在应急响应方面,首先要建立健全的应急管理体系,包括应急预案的制定、演练及应急队伍的配备。应急预案应针对可能发生的各类事故,如瓦斯爆炸、火灾、塌方等,提前做好应急物资的准备和应急通道的规划。其次,要加强对事故现场的迅速反应能力,利用智能化设备实现对事故发生的实时监测,并通过远程操控和数据分析进行有效指挥。防控措施方面,煤矿企业应强化安全生产监管,落实各项安全标准和技术要求,定期检查矿山设施的安全性。通过及时识别隐患、优化生产流程、加大安全投入和培训力度,能够有效预防事故的发生。一旦发生事故,应立即启动应急预案,进行人员疏散、火灾扑灭、设备抢修等工作,最大限度地减少事故损失。

6 煤矿采矿工程安全风险管控的优化与提升

6.1 安全风险管理体系的优化路径

煤矿采矿工程的安全风险管理体系应从多个层面进行优化与提升。首先,优化管理体系的制度建设,建立完善的安全风险评估、管控和应急响应机制,确保每一环节都有明确的责任和实施标准。其次,提升技术手段的应用水平,推动信息化、智能化技术在安全风险管理中的广泛应用。通过集成物联网、人工智能、大数据分析等技术,实现对矿山安全环境的实时监控与动态管控,提升事故预防的精准性和响应速度。此外,加强安全文化的建设,提高矿工和管理人员的安全意识,使安全管理理念深入到每个工作环节,形成全员、全过程的安全管控体系。最后,建立完善的反馈机制,定期对管理体系进行评估与调整,确保其适应矿山开采过程中不断变化的风险环境。

6.2 信息化技术在动态风险管控中的应用

信息化技术在煤矿采矿工程中的动态风险管控中发挥了至关重要的作用。通过信息化技术,矿山能够实时采集和分析各种安全数据,包括矿山环境、设备运行状态、人员位置等,形成一个全面的安全监控系统。物联网技术可以将矿山各类传感器连接起来,实时传输数据,为矿山管理人员提供实时的风险预警信息。大数据分析能够对历史数据进行深

度挖掘,识别出潜在的安全风险,并对其发生的可能性进行预测。人工智能技术则能够通过机器学习算法,自动识别矿山环境中的异常情况,并自动生成风险评估报告,帮助管理人员做出决策。信息化技术的应用不仅提高了煤矿安全管理的精准度,还有效缩短了应急响应的时间,提升了矿山的安全管控能力。

6.3 多方协同与安全文化建设的作用

在煤矿采矿工程中,安全管理的优化与提升不仅依赖于技术手段,还需要通过多方协同与安全文化建设形成合力。多方协同包括政府监管部门、煤矿企业、矿工及相关社会组织的共同参与。政府部门应加强对煤矿安全管理的政策支持和监管力度,确保法律法规的严格执行。煤矿企业应落实安全生产主体责任,加强内部管理和技术研发,定期组织安全检查和演练。矿工是矿山安全管理的核心,企业应定期开展安全教育培训,提高矿工的安全意识和应急处置能力。安全文化建设则侧重于从思想上提升全员的安全意识,通过建立安全奖惩机制、激励措施等手段,促使全体员工共同维护矿山安全。通过多方协同与安全文化建设,能够形成强大的安全管理网络,确保煤矿采矿工程的安全运行。

7 结语

结语:通过对煤矿采矿工程安全风险识别、评估、控制及管控优化的研究,可以看出,安全管理的核心在于建立科学、系统的风险管理体系,并运用现代技术手段实现动态管控。煤矿企业在日常生产过程中需强化安全风险评估,采用先进的技术进行实时监控与预警,同时建立完善的应急响应机制,以应对突发事件。多方协同与安全文化建设在矿山安全管理中发挥着重要作用,能够提升矿山整体的安全管控能力。随着信息化和智能化技术的不断发展,煤矿采矿工程的安全管理将更加精准、高效,为保障矿工生命安全、促进矿山可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 于彦辉.煤矿采矿过程安全管理及事故防控措施[J].能源与节能,2026,(01):284-286+302.
- [2] 常保国.煤矿工程采矿技术与施工安全管理研究[J].煤炭新视界,2025,(02):331-333.
- [3] 邢胡苟.煤矿工程采矿技术与施工安全管理措施优化[J].凿岩机械气动工具,2025,51(09):150-152.

Research on the Collaborative Mechanism between Gas Control and Coal Mine Safety Mining

Hanbin Wang

Shanxi Xinzhou Shenda Qifeng Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 036700, China

Abstract

During coal mining operations, gas occurrence conditions are complex and release patterns are highly variable, which can easily trigger major safety risks such as outbursts and explosions, and have become a critical factor restricting safe mine production. Focusing on issues including insufficient coordination between gas control and safe mining, poor system integration, and weak dynamic control capacity, the collaborative mechanism between gas control and coal mine safe mining is systematically reviewed and analyzed from the perspective of system coupling and coordinated control. By integrating gas drainage, ventilation regulation, and mining processes, multi-system coordinated operation is strengthened, and a collaborative operation system covering planning and design, process control, and dynamic evaluation is constructed. On this basis, risk classification control and hidden hazard investigation and treatment mechanisms are improved, monitoring and early warning as well as emergency response capabilities are enhanced, and safety management is promoted to shift from decentralized control to systematic coordination, thereby providing support for safe and efficient coal mining.

Keywords

gas control; coal mine safe mining; collaborative mechanism; risk management; system coupling

瓦斯治理与煤矿安全开采协同机制研究

王汉斌

山西忻州神达栖凤煤业有限公司, 中国·山西 忻州 036700

摘 要

煤矿开采过程中瓦斯赋存条件复杂、释放规律多变, 极易引发突出、爆炸等重大安全风险, 已成为制约矿井安全生产的重要因素。围绕瓦斯治理与安全开采之间协同不足、系统衔接不畅及动态管控能力薄弱等问题, 从系统耦合与协同控制视角出发, 对瓦斯治理与煤矿安全开采的协同机制进行梳理与分析。通过整合瓦斯抽采、通风调控与采掘工艺, 强化多系统联动运行, 构建覆盖规划设计、过程控制与动态评估的协同运行体系。在此基础上, 完善风险分级管控与隐患排查治理机制, 提升监测预警与应急响应能力, 推动安全管理由分散控制向系统协同转变, 为煤矿安全高效开采提供支撑。

关键词

瓦斯治理; 煤矿安全开采; 协同机制; 风险管控; 系统耦合

1 引言

煤矿开采活动在向深部延伸的过程中, 地质条件日趋复杂, 瓦斯压力与含量持续升高, 使矿井安全生产面临更为严峻的挑战。瓦斯作为煤层中主要的伴生气体, 其释放与运移过程受开采扰动影响显著, 极易在局部区域形成高风险积聚状态。传统以单一技术为主导的治理模式难以适应多源风险叠加的发展趋势, 治理与开采之间缺乏有效衔接, 导致部分区域存在治理滞后与风险外溢现象。随着安全生产标准不断提升, 单一系统优化已难以支撑整体安全水平的提升, 多

系统之间的协同运行成为关键路径。通过强化瓦斯治理与采掘作业的耦合关系, 推动技术体系、管理机制与过程控制的协同发展, 有助于构建更加稳定高效的矿井安全运行模式。

2 瓦斯治理与煤矿安全开采的协同发展基础

2.1 瓦斯灾害特征与煤矿开采安全风险结构

瓦斯灾害具有突发性强、影响范围广及演化过程复杂等特征, 在煤矿开采过程中表现为突出、爆炸与窒息等多类型风险叠加。随着开采深度增加, 煤层瓦斯含量可由 $8\text{m}^3/\text{t}$ 上升至 $15\text{m}^3/\text{t}$ 以上, 地应力水平提高 $20\% \sim 35\%$, 使煤岩体稳定性下降, 瓦斯释放更加剧烈。安全风险结构呈现出空间分布不均与时间演化交织的特点, 采区、掘进工作面及回采面风险差异显著。风险结构由单点控制向系统联动转变, 对安全管理提出更高要求。

【作者简介】王汉斌（1984—），男，中国河南鲁山人，本科，工程师，从事矿井采掘工程、技术管理及现场实施研究。

2.2 瓦斯治理技术体系与安全开采工艺关系

瓦斯治理技术体系主要涵盖抽采、通风、封堵与卸压等关键技术,其运行效果与采掘工艺密切相关。抽采系统通过钻孔布置与负压控制,将煤层瓦斯浓度由原始状态的80%以上降低至30%以下,为采掘作业创造安全条件。采煤方法与开采强度直接影响瓦斯释放速率,综采工作面日产量提升至5000t以上时,瓦斯涌出量可增加40%左右,需同步调整抽采能力。通风系统通过风量配置与巷道布局控制瓦斯稀释效率,合理风速维持在1.5m/s左右可有效防止局部积聚。技术体系与工艺之间形成动态匹配关系,工艺调整带动治理参数变化,治理效果反向约束开采节奏,构成相互依存的运行格局。

2.3 协同机制构建的理论基础与现实需求

协同机制构建依托系统工程理论与风险管理理论,通过多要素耦合实现整体效能提升。煤矿生产系统由地质条件、工程技术与管理行为构成,单一环节优化难以覆盖复杂风险场景,系统协同成为提升安全水平的重要路径。现实生产中存在治理与开采衔接不紧密、信息传递滞后及资源配置不均等问题,导致局部区域风险控制效果波动明显。矿井瓦斯事故占比长期维持在25%~35%之间,表明协同水平仍有提升空间。随着智能化矿山建设推进,对协同机制提出更高要求,需要在空间布局、时间安排与技术集成方面形成闭环体系,实现风险控制与生产效率的协调统一。

3 瓦斯治理与煤矿安全开采协同运行的关键要素

3.1 瓦斯抽采系统与采掘系统的耦合关系

瓦斯抽采系统与采掘系统之间存在明显的耦合效应,抽采效果直接影响采掘安全条件,采掘活动又改变瓦斯赋存状态。合理布置抽采钻孔可将煤层瓦斯压力降低30%~50%,为工作面推进提供稳定环境。掘进速度提升至10m/d以上时,瓦斯涌出量随之增加,需要同步提高抽采负压与管网输送能力。采掘空间扩展改变瓦斯运移路径,使局部区域形成新的高浓度区,对抽采系统提出动态调整要求。两系统通过时间与空间的协同配置实现平衡运行,形成“先抽后采、边采边抽”的运行模式,保障安全与效率的同步提升。

3.2 通风系统与瓦斯控制的协同调控机制

通风系统通过风量分配与风路优化实现瓦斯稀释与输送,是瓦斯控制的重要支撑。矿井总风量通常控制在15000m³/min以上,局部工作面风量根据瓦斯涌出量进行动态调整。风流组织不合理易导致瓦斯积聚区扩大,增加爆炸风险。通过优化通风网络结构与调节设施布置,可使瓦斯浓度稳定控制在1%以下。通风系统与抽采系统之间形成协同关系,抽采降低源头浓度,通风实现空间扩散控制,两者共同构建安全环境。调控机制需要结合实时监测数据进行动态

修正,使风量配置与瓦斯变化保持一致,提高整体控制效率^[1]。

3.3 监测预警与动态管控的协同支撑体系

监测预警系统通过传感器网络与数据平台,实现对瓦斯浓度、压力及流量的实时采集。矿井监测点布设密度通常达到每100m设置1个以上,实现关键区域全覆盖。数据传输延时控制在5s以内,可快速反映异常变化。预警阈值设定在1%与1.5%等关键节点,对不同等级风险进行分级响应。动态管控体系依托监测数据,对采掘节奏与通风参数进行实时调整,使风险处于可控范围。系统通过数据分析与趋势判断,对潜在风险进行提前识别,提升安全管理的前瞻性与精准性。

4 瓦斯治理与煤矿安全开采协同机制构建路径

4.1 协同规划与一体化设计机制构建

协同规划将瓦斯治理纳入矿井总体设计体系,在采区布局、巷道布置与生产接续安排中统筹考虑瓦斯因素。通过对煤层瓦斯含量、地质构造及开采强度进行综合分析,确定合理的抽采区域与时间节点,使治理措施与开采活动保持一致。设计阶段引入多方案比选机制,对不同技术路径的安全性、经济性进行评估,提高决策科学性。一体化设计强调系统之间的协调配置,使抽采、通风与采掘形成有机整体,避免局部优化带来的系统失衡问题。

4.2 过程联动与作业协同控制机制优化

过程联动机制通过将瓦斯治理措施嵌入采掘全过程,实现各环节的动态衔接。作业过程中依据实时监测数据调整采掘强度与抽采参数,使生产节奏与安全条件保持匹配。回采面推进速度控制在3~5m/d区间时,瓦斯释放与抽采能力可形成相对平衡状态。协同控制机制通过标准化操作流程与岗位责任体系,确保各类措施执行到位。现场管理结合动态检查与考核机制,提高执行力度,形成稳定可靠的运行模式。

4.3 信息融合与智能决策支撑机制完善

信息融合通过整合监测系统、生产系统与管理信息系统数据,实现多源信息的统一处理与分析。数据平台对瓦斯浓度、风量及采掘参数进行综合分析,形成可视化管理界面,提升决策效率。决策支撑机制通过模型分析与趋势预测,对风险变化进行评估,为调度指挥提供依据。系统可对异常数据进行自动识别与预警提示,缩短响应时间,提高应急处置能力^[1]。信息融合推动管理模式由经验驱动向数据驱动转变,为协同机制运行提供持续支撑。

5 瓦斯治理与煤矿安全开采协同实施保障体系

5.1 组织管理与制度体系协同保障机制

组织管理体系通过明确职责分工与层级管理结构,实现瓦斯治理与安全开采之间的协调运行。矿井设立专门的瓦斯治理机构,配备专业技术人员比例达到10%~15%,强化技术指导与现场管控能力。制度体系围绕瓦斯抽采、通风

管理及作业审批等关键环节进行系统构建,形成覆盖设计、实施与监督全过程的管理框架。岗位责任落实到具体作业单元,通过考核机制与责任追溯制度提升执行力度。制度运行过程中结合实际生产情况进行动态修订,使管理要求与现场需求保持一致,增强体系的适应性与约束力,保障协同机制稳定运行。

5.2 技术标准与操作规范协同约束机制

技术标准体系对瓦斯治理与开采作业提出明确控制指标,通过参数约束提升系统运行的规范性。抽采负压通常控制在 20kPa 以上,瓦斯浓度需稳定低于 1%,为作业提供安全边界。操作规范对钻孔施工、管网维护及通风调节等关键环节进行细化规定,减少人为操作偏差带来的风险。标准与规范之间形成相互支撑关系,使技术执行具备可操作性与一致性。现场作业通过标准化流程与作业指导书实现统一管理,设备运行与工艺控制保持稳定状态^[3]。技术约束机制通过持续监督与检查,推动各项措施有效落实,提高整体安全水平。

5.3 风险分级与隐患治理协同管控机制

风险分级管控通过对瓦斯压力、含量及涌出量进行综合评估,将矿井划分为不同风险等级区域,高风险区域瓦斯浓度接近 1% 时启动重点监控措施。隐患治理体系对排查发现的问题进行分类管理,整改时限根据风险等级设定在 24h 至 72h 范围内,提高治理效率。协同管控机制将风险识别、隐患排查与整改闭环紧密衔接,形成持续循环的管理模式。现场通过定期巡检与专项检查相结合的方式,提升隐患发现率。数据记录与分析对隐患分布规律进行总结,为优化治理措施提供依据,使风险控制更加精准有效。

5.4 监督评价与绩效考核协同驱动机制

监督评价体系通过构建覆盖全过程的考核指标体系,对瓦斯治理与安全开采协同运行效果进行量化评估。评价内容涵盖瓦斯抽采达标率、浓度控制水平及隐患整改完成率等关键指标,抽采达标率稳定在 70% 以上时可有效支撑安全生产。绩效考核与岗位责任紧密关联,将协同运行成效纳入考核权重的 30% 以上,强化执行约束力。监督机制通过日常检查与专项评估相结合,及时发现运行偏差并进行纠偏。评价结果与资源配置及奖惩机制联动,使管理行为与安全目标保持一致,推动协同机制持续优化与稳定运行。

6 瓦斯治理与煤矿安全开采协同机制优化策略

6.1 全过程协同控制模式的持续优化路径

全过程协同控制模式以生产全周期为主线,将瓦斯治理措施嵌入规划设计、施工实施与运行管理各阶段。生产接

续安排与瓦斯抽采计划保持同步,抽采时间提前量达到 3 ~ 6 个月,为开采提供稳定条件。作业过程中通过实时监测与参数调整,使采掘强度与瓦斯释放保持动态平衡。控制模式通过不断优化运行流程与技术参数,提高系统适应复杂条件的能力^[4]。现场管理结合数据反馈进行持续改进,使协同控制模式在不同地质条件下保持稳定效果,推动安全与效率的协同提升。

6.2 多系统联动与资源配置优化策略

多系统联动通过整合抽采、通风与监测等系统资源,实现整体运行效率提升。资源配置根据瓦斯涌出量与采掘进度进行动态调整,抽采能力与风量供给保持匹配关系。关键设备利用率提升至 85% 以上,可有效降低运行成本并提高控制效果。系统联动通过统一调度平台实现信息共享,使各系统之间形成快速响应机制。设备布局与管网结构根据生产需求进行优化,减少能耗与运行阻力。资源优化策略强化系统之间的协同关系,使矿井运行更加高效稳定。

6.3 动态评估与反馈调节机制完善路径

动态评估机制通过对瓦斯治理效果与安全指标进行持续监测,对系统运行状态进行综合分析。关键指标包括瓦斯浓度、抽采率及通风效率,评估周期控制在 7d 至 30d 范围内,形成阶段性分析结果。反馈调节机制依据评估结果对技术参数与管理措施进行修正,使系统运行保持在安全区间。数据分析揭示风险变化趋势,为决策提供支持。调节过程通过标准流程与责任机制保障执行效果,使反馈信息能够及时转化为管理行动,推动协同机制不断完善。

7 结语

瓦斯治理与煤矿安全开采的协同运行,是保障矿井安全生产与提升资源利用效率的重要路径。通过构建多系统联动、全过程管控与动态调节的协同机制,能够有效降低瓦斯灾害风险,提升生产系统稳定性。面向复杂地质条件与高强度开采需求,持续强化技术融合与管理协同,有助于实现安全与效益的协调发展,为煤矿行业高质量运行提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 张玉明.基于煤矿安全生产的通风瓦斯治理技术探究[J].湖北应急管理,2026,(06):18-20.
- [2] 孙成尔.高瓦斯煤矿瓦斯治理技术应用研究[J].凿岩机械气动工具,2025,51(09):213-215.
- [3] 曹杰.煤矿井下通风工程与瓦斯治理技术研究综述[J].内蒙古煤炭经济,2025,(15):49-51.
- [4] 王润武,张永强,许建国.煤矿“一通三防”安全管理评价系统研究与应用[J].内蒙古煤炭经济,2025,(15):106-108.

Analysis of Energy-saving Management Strategies for Building Heating Systems in the Digital Age

Ruiming Zhang

Urumqi Thermal Power Group Co., Ltd., Second Heating Supply Company, Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

During the operation of building heating systems, various factors often lead to increased energy consumption, resulting in resource waste and significant economic losses for both heating providers and end-users. In the digital era, technologies such as artificial intelligence, big data analytics, and digital twin solutions can be leveraged to enhance energy efficiency management in building heating systems. Data-driven approaches and intelligent control mechanisms, in particular, can optimize heating performance and reduce energy consumption. This paper analyzes energy-saving management strategies for building heating systems in the digital age, aiming to effectively control energy losses and promote the green, low-carbon transformation of heating systems.

Keywords

digitization; architecture; heating system; energy conservation management

数字化时代下建筑供热系统的节能管理对策分析

张瑞明

乌鲁木齐热力集团有限公司第二供热供公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要

建筑供热系统运行过程中往往会因为各种因素影响, 致使系统能耗加大, 不仅浪费资源, 且还会对供热企业和用户造成严重的经济损失。数字化时代, 可以利用人工智能技术、大数据分析技术、数字孪生技术等推动建筑供热系统的节能管理, 尤其可以通过数据驱动、智能调控等方式, 强化供热效率, 减少能源消耗。文章主要对数字化时代下建筑供热系统的节能管理策略进行分析, 从而有效控制供热系统的能源损耗, 促进整体供热系统的绿色化、低碳化转型发展。

关键词

数字化; 建筑; 供热系统; 节能管理

1 引言

数字化时代, 物联网、人工智能、数字孪生等技术在建筑供热系统中的优化应用, 能够实现数据处、精准匹配、智能调控, 减少对人工经验的依赖性, 促进建筑供热系统节能管理水平的全面提升。

2 建筑供热系统能耗问题现状

以往建筑供热系统往往采用粗放式的管理模式, 导致整体系统能耗较高, 对供热企业和用户造成严重的经济损失。首先是供需不匹配, 由于供热负荷与实际需求不相符, 致使两者严重不匹配, 很容易出现供大于求或者供不应求的问题, 不仅降低用户的供热体验, 且还会造成极大的热能损耗^[1]。其次, 调控手段较为落后, 对人工经验依赖较大, 忽视实时数据的支持, 不能对气象变化、用户行为等因素进

行动态调控。再次, 供热设备运行效率较低, 再加上管网老化、保温性能低等问题, 致使供热系统在传输过程中引起严重的热损失问题, 且换热器、水泵运行工况较差, 加大了热损耗问题。最后, 对供热系统各个环节的数据采集缺乏连续性, 采集的数据较为碎片化, 且各个数据源之间缺乏互联互通, 难以形成全链条的能耗分析体系, 难以为后续节能管理提供依据。

3 数字化时代建筑供热系统的节能管理策略

3.1 构建数据感知和监测体系

数字化时代, 建筑供热系统节能管理逐渐向自动化、智能化方向发展, 尤其可以在建筑供热系统的各个环节科学布置各类传感器设备, 全面采集供热系统运行过程中的各种数据, 为后续温度控制提供数据依据。在具体操作中, 需要在热源厂的锅炉、热泵等设备中安装温度、压力、燃料消耗量等传感器; 此外, 还需要在一级管网、换热站、二级管网的换热站、分支管道等环节科学部署流量、压力、热量计量

【作者简介】张瑞明(1985—), 男, 中国陕西西安人, 本科, 工程师, 从事区域供热研究。

传感器等装置,以便对这些环节的流量、压力等参数进行全面采集^[2]。结合实际需求,在用户端安装室温传感器和智能温控阀,以便对供热系统用户端的各类数据进行全面采集。通过这种方式能够构建全链条的数据采集体系,再加上LoRa、NB-IoT等无线通信协议以及5G技术的优化应用,能够对地下管井等复杂数据进行实时性、高效性传输,进而降低布线成本,为供热系统节能管理创建良好条件。在此基础上,还需要构建完善的数据分析中心,以便对供热系统各个环节的数据进行全面整合和分析,如实时监测数据、历史运行数据、气象数据、用户行为数据等,然后对以上数据进行优化处理,如清洗、融合,并将其转化为标准化格式进行呈现,构建完善的结构化数据库。除此之外,还需要在换热站、楼栋等节点设置可视化监控平台,并动态呈现供热系统运行状态,其中监测指标有热源出力、管网压力分布、用户室温达标率等,同时设置异常报警功能,一旦系统某项参数超过这一阈值,如管网泄漏引起的压力骤降、用户室温低于标准等情况,该系统就会自动发出异常报警信号,帮助管理人员快速响应,避免对供热企业和用户造成更大的损失^[3]。

3.2 大数据分析技术

数字化时代,大数据技术在建筑供热系统中的优化应用,能够实现建筑供热系统、空调系统能耗数据的大数据分析,帮助管理人员详细了解供热系统能耗较高的环节和原因,为后续整体供热系统的节能管理提供依据。尤其可以利用大数据技术对不同时间段、不同区域的能耗数据进行详细分析,明确能耗高峰时段和高能耗区域,进而采取针对性的节能管理措施。此外,大数据技术还能对供热系统的运行状态进行实时监测,第一时间识别供热设备故障和异常情况,如温度、压力、电流等参数异常情况,及时发出警报信号,通知维修人员及时采取预防性维护措施,保障供热系统的安全可靠运行^[4]。

3.3 智能控制系统

在人工智能技术支持下优化节能控制策略,优化供热企业决策,既要满足用户的供热需求,同时还需要减少资源浪费。在具体操作中,需要利用机器学习算法,对气象数据、建筑特性、用户行为等多种信息进行优化整合,进而构建动态热负荷预测模型,这样能够对用户热需求进行提前预测,确保热源生产计划的针对性制定,防止出现过量生产、供不应求的现象。结合上一环节获得的监测数据和预测结果,联合智能联合算法,对管网流量进行优化分配,避免出现近端过热、远端过冷等水力失调问题。在具体操作中,需要优化热源侧,结合预测负荷自动调整锅炉燃烧效率、热泵运行参数等,并结合实际需求进行针对性供热;此外还需要持续优化管网,如通过调节水泵频率、阀门开度的方式,确保管网水力始终保持平衡状态,避免水力失调引起的热损失;要科学优化用户端,结合用户室温反馈信息,对智能温控阀开度进行自动调节,实现一户一温的精准控制^[5]。此外需要在

人工智能算法的协助下,对太阳能、地热能、生物质能等可再生能源进行协同调度,如果光照充足需要使用太阳能集热器供热,如果光照不足需要利用燃气锅炉补充;结合电网峰谷电价,对电锅炉运行时段进行合理优化,进而有效控制供热系统运行成本。其中建筑供热系统中的智能控制系统包含以下类型:(1)智能温度控制系统,该系统能够结合室内外温度、人员活动情况等,对供热系统运行参数进行自动调节,以便精准控制室内温度。如利用传感器实时监测室内温度,当室内温度高于设定值时,自动调节制冷设备的运行频率,降低室温;当室内温度低于设定值时,自动调节供热设备运行功率,提高室温。(2)智能湿度控制系统,该系统需要结合室内湿度情况自动调节通风量和除湿设备,确保室内湿度稳定性,减少资源浪费。

3.4 数字孪生技术

在数字孪生技术辅助作用下,可以对供热系统的几何参数、设备特性、管网拓扑结构等数据进行优化整合,协同构建数字孪生模型,以便实现物理世界与虚拟世界的实时映射,虚拟出1:1虚拟供热系统,动态模拟建筑热损路径、管网运行状态、用户用热规律等,并精准传递热量传递、水力分布过程,对供热系统运行全过程进行可视化、可量化管理^[6]。结合数字孪生模型对不同场景进行仿真模拟,如模拟极端天气下的系统响应、设备故障对供热效果的影响,同时分析管网保温升级、水泵变频改造等改造方案的节能效益,对各种改造方案进行对比分析,选择最优的改造方案,有效控制改造风险,减少运行成本和能耗。此外,还需要将其与设备台账、维护记录等进行联合应用,以便对供热设备的运行全过程进行动态管理,结合设备数据分析,对剩余寿命进行精准预测,进而制定针对性、预防性的维护计划,减少设备故障引起的能源损耗,保障供热持续性。

3.5 不同环节节能管理对策

(1)热源侧,需要采用清洁高效且智能协同的管理方法,结合热源侧的具体情况,采取针对性的技能对策和技术手段,强化节能效果,具体安排如表1所示。(2)管网侧,需要采取科学合理的节能管理措施,进而实现降损增效的目的,实现整体系统的平衡性运行。在具体操作中,需要结合实际情况,积极改造水力平衡状态,在管网安装智能混水装置、压差控制阀等,结合不同换热站的具体情况,采取针对性的控制指标和节能措施,实现精准调控;此外还需要引进动态水力模拟软件,以便对不同热力站的流量需求进行实时计算,以便结合具体情况,自动调节一次管网阀门开度。利用数字孪生模型对管网热损较为严重的区域进行精准定位,对其进行优先改造;要对红外热成像技术进行优化应用,定期检测管网保温层破损情况,以便开展靶向精准维修。安装变频智能水泵,结合实际自动调节转速,确保水泵始终运行在高效区;利用大温差、小流量的运行策略,进而减少输送能耗^[7]。(3)用户侧,落实分户精准调控,尤其要安装物

联网智能调节阀和室温采集器，以便结合每户实际的供热需求采取针对性的节能策略，实现个性化供热，减少过热损失；要实时分时分区控制，针对建筑类型的不同采取差异化的供热策略，如学校、办公楼、住宅等。要开发专业的手机

APP，实现室温远程调节、用热数据查询，并结合用户情况向其实时推送个性化的节能建议；引进节能积分等激励措施，鼓励用户参与错峰用热，科学设置室内温度，减少能源消耗。

表 1 热源侧节能管理策略

节能对策	技术手段	节能效果
锅炉群控优化	AI 专家系统自动切换燃烧模式，实时调整风煤比	锅炉效率提升至 92% 以上，氮氧化物排放降低 30%
热电联产协同	接入电力市场数据，电价低谷期蓄热	年减少燃煤消耗 5 万吨，热电比优化至 1.2:1
多能互补集成	耦合太阳能、地热能、空气源热泵等新能源	可再生能源占比提升 20-30%，碳排放减少 40% 以上
烟气余热回收	智能控制的烟气换热器系统	回收热量提升锅炉效率 5-8%

3.6 其他节能措施

（1）在建筑供热系统运行中，需要在数字化、智能化技术支持作用下，实施分户计量系统，通过精确测量每个用户实际消耗的热量，并据此进行收费，可以有效地激励用户采取节能措施，减少不必要的能源浪费。（2）采用气候补偿技术，根据室外实时温度的变化动态调整供热系统的供水温度，这样可以避免在温暖天气时过度供热，从而节约能源^[8]。（3）变频控制技术的应用，通过变频器调节水泵和风机的转速，不仅能够根据实际需求调整输出，还能显著降低设备运行时的能耗。（4）余热回收技术也是提高能源利用率的重要手段，它通过回收烟气和冷凝水中的余热，将这部分原本可能被浪费的热能重新利用。

4 结语

综上所述，数字化时代，为了实现建筑供热系统的节能管理，需要强化政策支持和引导，结合实际需求引进高素质人才，在人工智能技术、大数据技术等的支持下，创建节能管理模式，有效推动供热系统的智能化、自动化发展，为建筑供热系统的低碳化、绿色化发展创建良好条件。

参考文献

[1] 杜高伟,张志迪,周生东. 供热系统数字化的实践与探索[C]// 中国电子行业协会. 能源电子（终端应用）典型案例及论文集（2025）. 国能驻马店热电有限公司,; 2025: 50-53.

[2] 张立申,申朝阳,袁海臻,等. 智慧稽查赋能供热企业数字化转型[J]. 国企管理, 2025, (S1): 1085-1092.

[3] 苏爱兵. 践行新质生产力理念赋能供热数字化转型[N]. 双鸭山日报, 2025-05-06 (003).

[4] 丁兰. 建筑供热通风与空调工程节能技术的创新及数字化应用探讨 [J]. 中国设备工程, 2025, (08): 224-226.

[5] 肖印强. 供热管道行业的数字化转型路径研究 [J]. 低碳世界, 2025, 15 (04): 184-186.

[6] 张春雨. 数字化技术在供热管网管理中的应用与创新 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (01): 176-178.

[7] 北京大学能源研究院,中国城市燃气协会分布式能源专业委员会. 燃气分布式能源产业报告[M]. 社会科学文献出版社: 202209: 315.

[8] 冯文亮,白冬军,姚长青. 供热系统数字化技术服务平台设计与应用 [J]. 煤气与热力, 2021, 41 (12): 13-16.