

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2025 年 12 月 第 36 期 (总第 625 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 罍 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：昆明滇印彩印有限责任公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2025 年 12 月 25 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特殊声明，即视作该文署名作者同意将该文章著作权中的汇编权、印刷版和电子版（包括光盘版和网络版等）的复制权、发行权、翻译权、信息网络传播权的专有使用权授予《科海故事博览》编辑部，同时授权《科海故事博览》编辑部独家代理许可第三方使用上述权利。未经本刊许可，任何单位或个人不得再授权他人以任何形式汇编、转载、出版该文章的任何部分。

目录 Contents

科技博览

- 001 钢—混组合结构剪力键力学性能研究
..... 邹麒麟, 张成龙, 周 阳, 刘 瑞
- 004 基坑施工中砂土抽水对土体位移影响分析
..... 朱海峰
- 007 静载试验在提升桩基承载力检测精度中的应用
..... 黄 涌
- 010 计量校准中机械力学模型的应用研究
..... 安子豪
- 013 大型双螺杆挤出机输送特性分析及磨损规律研究
..... 苏杰万
- 016 基于 BIM+GIS 技术的复杂地形道路工程勘察设计一体化研究
..... 温少雄, 陈秀青

智能科技

- 019 电气自动化在智能电网中的关键技术与应用
..... 黄 颖
- 022 火电厂锅炉排烟温度高的智能诊断与应对策略
..... 栗 凯
- 025 基于标准组串模型的光伏电站智能运维系统研究
..... 翁得汉, 李宪章, 束秋节, 林颖若
- 028 智慧液化气监管平台随瓶安检照片 AI 智能审核研究
..... 王在华
- 031 基于工业物联网的焊接车间数据采集与监控系统研究
..... 聂瑞金
- 034 Linux 内核防火墙与 Shell 脚本在网络运维自动化中的应用
..... 黄道金
- 037 基于无人机图像识别的输电线路绝缘子污秽在线监测系统研究
..... 田沈凡, 李海荣

应用技术

- 040 沥青路面施工技术在市政配套道路中的应用
..... 麦伟俊

目录 Contents

- 043 非开挖施工技术在市政管道施工中的运用分析 诸卫卫
- 046 高速公路路面基层大宽度摊铺与协同碾压施工技术 马尼比
- 049 高海拔地区输电线路组塔作业安全施工技术及措施研究 梁 飞
- 052 钓鱼引孔法在复杂地质条件下钢栈桥搭设施工的实践与分析 李洪志
- 055 软土地基中 500 kV 输电线路钻孔灌注桩施工沉降控制措施研究 庞土伟
- 058 熔岩地质条件下现浇箱梁大钢管支架基础换填片石工艺的创新与应用 刘 洋

科创产业

- 061 风电开发复杂地形风资源评估方法 杨忠贤
- 064 基于 PLC 技术的新能源风力发电控制系统研究 乔静男
- 067 深度调峰工况下电力锅炉燃烧稳定性分析及优化 李俊杰
- 070 生产型企业光伏电站扩建项目全生命周期环境评价 朱晓晨
- 073 某水电站轴流转浆式水轮发电机组调速器升级改造 王雪峰, 张 琛, 王艳平
- 076 光伏电站智能运维关键技术及日常效能提升方法探析 来文雅
- 079 高原地区水电站智慧电厂体系构建研究——以扎拉水电站为例
..... 刘大庆, 谢学东, 蒲 进, 熊小康, 滕泽诚
- 082 基于化学仪表精确测量的亚临界机组水汽循环系统腐蚀速率评估 冀亚妮

技术管理

- 085 110 kV 变电站接地网施工质量监理分析 盘武光
- 088 高压输电线路施工期生态保护措施分析 郑水生
- 091 水质自动监测数据质量控制关键环节研究 陈志平
- 094 人工智能在建筑结构缺陷检测中的应用研究 陈秋旭
- 097 历史建筑检测数据的多源融合与智能分析方法 黄诗茜
- 100 基于施工全过程管理的六边形索塔保护层合格率保障策略 冯 杰
- 103 基于风险矩阵的电力工程电气施工安全管理优化与案例分析 杨 帆

科学论坛

- 106 导电变温涂料的制备性能研究 吴昊洋, 王宁信, 刘啸飞, 张炳蔚, 袁 新
- 109 智算中心的综合安全体系与方案设计 闫崇喆
- 112 数控加工技术在机械设计中的应用探析 林金盛
- 115 水利工程高边坡勘察设计质量控制措施研究 雷永旭
- 118 短肢剪力墙在民用建筑设计中的应用探究 来燕丰
- 121 窄间隙焊接工艺及自动化设备在厚板焊接中的应用研究 王永庆
- 124 多工况水文极值计算与水库调洪演算耦合研究——以深圳西丽水库为例 刘修佳

钢—混组合结构剪力键力学性能研究

邹麒麟¹, 张成龙¹, 周阳^{1*}, 刘瑞²

(1. 成都大学建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106;

2. 四川省建筑工程质量检测中心有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 本文系统梳理了钢—混组合结构中剪力钉和 PBL 剪力键力学机理研究成果, 研究表明: 剪力钉的长度、直径与材质, 都是其极限承载能力与荷载—滑移关系的关键影响因素; 在疲劳荷载作用下, 剪力钉承载能力有一定的退化; 同时, 各国规范提出的承载能力计算式低估了 UHPC 中剪力钉的抗剪能力; 组合结构中 PBL 剪力键的力学性能主要受其贯穿钢筋直径、开孔板厚度和开孔板孔径等影响; 相较于剪力钉, PBL 具有更好的变形能力和抗疲劳退化能力; 将剪力钉和 PBL 剪力键组合使用, 可在有限布置范围内提高组合结构整体性、延性和抗疲劳性能。

关键词 钢—混组合结构; 剪力钉; PBL 剪力键; 力学性能

基金项目: 四川省科技计划资助“钢-UHPC 组合结构和混合结构复合剪力键力学机理研究”(项目编号: 2024NSF SC0926)。

中图分类号: TU311

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.001

0 引言

钢—混凝土组合梁结合了钢材和混凝土两种材料的优势, 兼具钢材优秀的抗拉性能与混凝土的抗压性能, 并能使两种材料产生协同作用, 达到“1+1 > 2”的效果, 因而被广泛应用于建筑结构和桥梁结构中^[1-2]。然而, 普通混凝土抗拉强度较低, 应用于组合梁负弯矩区时易出现裂缝, 影响结构受力性能与耐久性。而超高性能混凝土(UHPC)相较于普通混凝土(NC), 兼具更高的强度、韧性与耐久性, 因此采用 UHPC 替代传统混凝土所形成的钢-UHPC 组合结构具备优异的力学性能, 应用前景广阔。

目前, 在实际工程中应用较为广泛的剪力连接件主要包括剪力钉和 PBL 剪力键。剪力钉施工工艺成熟, 经济可靠, 但抗剪承载力与刚度相对较低; PBL 剪力键则兼展现出承载力高、刚度大、延性好等综合力学特性^[3]。使其能够有效传递大剪力, 能抑制界面滑移并具备良好的塑性变形能力。为推动钢-UHPC 组合结构应用, 本文系统梳理了剪力钉力学性能的研究进展。

1 剪力钉力学性能研究

1.1 静力特性研究

1. 抗剪承载力。推出试验是研究剪力钉抗剪性能的主要研究方法, 通过改变其直径、长度、布置形式

及界面处理等因素, 系统分析对抗剪性能的影响。各国规范也针对其在普通混凝土中的极限承载力给出了具体计算公式。众多学者针对 UHPC 中剪力钉的抗剪性能、剪切刚度及荷载—滑移等力学性能开展研究。武芳文^[4]等设计了 8 个剪力钉试件进行推出试验, 探讨了各设计参数, 如剪力钉规格及长度、混凝土类型对其极限抗剪承载力的影响。邓宗才^[5]等设计了 6 个钢-UHPC 轻型组合结构短剪力钉试件, 考察了剪力钉规格、长度、布置数量及界面黏结对其极限承载能力的影响, 在此基础上提出了适用于计算 UHPC 中剪力钉的抗剪承载力的预测公式, 并构建了荷载—滑移模型。陈志丹^[6]等通过 13 个不同长度的推出试验发现, 所有试件破坏模式均为剪力钉剪断, 并据此提出了 UHPC 中剪力钉的抗剪承载力经验公式与荷载—滑移本构模型。研究表明, 规范推荐的剪力钉承载能力计算公式低估了 UHPC 中剪力键的抗剪承载能力。

2. 荷载—滑移曲线。荷载—滑移曲线是研究材料力学性能的重要手段, 反映材料在不同荷载下的滑移行为及其力学响应。武芳文^[7]等指出剪力钉直径对荷载—滑移曲线影响显著。邓宗才^[8]等的研究进一步揭示了剪力键几何参数对其力学性能的影响规律: 增大直径能显著提升剪力键的抗剪承载力、弹性及塑性刚度; 减小纵向间距对单个剪力键的抗剪强度影响不显

*本文通信作者, E-mail: zhouyangswjtu@163.com。

著；而在相同间距内增加剪力键数量，虽能提高组合结构的整体抗剪强度，却会牺牲其延性变形能力。

3. 抗剪刚度。抗剪刚度是能够表征材料或构件抵抗剪切作用下变形能力的关键参数，对理解钢—混凝土组合结构界面滑移性能及整体非线性行为具有重要意义。其影响因素包括剪力钉直径、保护层厚度、长径比、剪力钉与混凝土弹性模量之比等。在荷载—滑移曲线上任意某一点处的割线模量，反映对应点的抗剪刚度特性。计算并确定组合结构中剪力钉的抗剪刚度有多种途径，如采用组合结构中钢梁和混凝土梁接触界面在特定滑移量（如 0.2 mm 或 0.8 mm）时荷载—滑移曲线所对应的割线进行剪力钉的抗剪刚度计算，或采用近似公式进行计算，日本规范（JSCE）建议以承载力 1/3 对应的点作为割线端点，欧洲规范则建议取 70% 受剪承载力处。徐启智^[9]分别采用 1/3 P_u 、0.7 P_u 、0.5 P_u 及 0.2 mm 滑移点作为割线端点分析界面抗剪刚度，并指出：大直径短钉与 UHPC 形成的组合结构具有较高抗剪刚度，可有效抑制界面相对滑移，提高抗滑移性能。邓宗才^[10]等研究表明，直径 16 mm 剪力钉的抗剪刚度明显高于 13 mm 剪力钉，说明直径增大有助于提升抗剪性能与剪切刚度。

1.2 疲劳性能研究

1. 抗疲劳性能。抗疲劳性能指材料在循环荷载作用下抵抗疲劳破坏的能力。剪力钉作为连接混凝土与钢梁的关键构件，其疲劳性能备受关注。卫星^[11]等以钢与混凝土之间的相对滑移量作为指标，通过设计正交疲劳试验，系统研究了 PBL 剪力键疲劳破坏机理和 S-N 曲线；李萌^[12]通过推出试验发现，钢—UHPC 组合结构中的短剪力钉相较于普通混凝土中的剪力钉具有更优的疲劳性能。孙艳华^[13]基于有限元方法提出了钢—UHPC 组合结构中短剪力钉疲劳寿命的预测公式，适用于 UHPC 中剪力钉的疲劳性能评估。

2. 疲劳退化能力。疲劳退化能力指结构或构件在循环荷载下抵抗损伤累积并维持性能的能力。对剪力钉而言，评估其疲劳退化能力至关重要。石广玉等^[14]开发的三维断裂力学模型，成功实现了对剪力钉焊缝疲劳裂纹扩展的精确模拟与寿命预测。该模型为评估剪力钉的疲劳退化性能提供了有效工具。为进一步提升其适用性，研究者认为后续工作需考虑随机荷载与材料非均匀性等复杂因素。

2 PBL 剪力键力学性能研究

PBL 作为一类高效的抗剪连接件，因其优越的承载力、较高的抗剪刚度以及良好的延性表现而受到广泛

关注。然而，其抗剪性能存在明显的方向依赖性。其抗剪承载能力受抗剪钢板尺寸、端部承压条件及贯穿钢筋设置等因素影响。

2.1 静力特性研究

1. 抗剪承载力。肖林等^[15]的推出试验表明，在混合梁钢混结合段中，采用 UHPC 能显著强化 PBL 剪力键的性能，其承载力与抗剪刚度分别获得了超过 30% 与 60% 的提升。该研究也将开孔钢板厚度确定为影响其力学行为与破坏模式的重要因素。在承载机理方面，张钰菲^[16]结合推出试验与有限元分析，揭示了组合结构中的 PBL 剪力键极限承载力机制，并明确了关键参数。在应用层面，王序^[17]的研究表明，采用高强纤维混凝土与 UHPC 的 PBL 连接组合梁，其破坏模式均表现为钢筋剪断，且混凝土能保持良好的整体性。方志等^[18]通过试验与理论分析发现，抗剪钢板尺寸是影响 PBL 剪力键力学响应及破坏模式的关键因素；贯穿钢筋对抗剪承载力的提升效果随 UHPC 榫损伤程度增大而增加，由无明显损伤时的 5.3% 提高至整体压碎时的 14.9%。基于此，研究推导并验证了钢—UHPC 组合桥面板中 PBL 剪力键的抗剪承载力计算公式。

2. 荷载—滑移曲线。PBL 剪力键的载荷—位移响应过程可划分为弹性、弹塑性与破坏三个阶段。在初始的弹性阶段，曲线基本保持线性，但在接近屈服点时会发生偏离。这种偏离的机理因试件而异：在抗剪钢板较弱的试件中，主要归因于钢板与 UHPC 间界面粘结的逐步退化；而在钢板较强的试件中，UHPC 材料的开裂是更为关键的诱因。方志^[19]等试验表明，增加抗剪钢板剪切面积可显著提高试件极限荷载与极限滑移，且延性系数基本保持稳定。随抗剪能力增强，破坏模式从“钢板剪断（UHPC 无损）”依次发展为“UHPC 榫局部压碎后钢板剪断”和“UHPC 榫整体压碎后钢板剪断”，相应极限荷载分别提升 97.8% 和 199.3%，极限滑移增加 40% 与 126.7%。

3. 抗剪刚度。抗剪钢板设置端部承压后，其下部区域可协同参与抗剪工作，这增加了一倍的有效剪切面积，从而显著提升组合结构中 PBL 剪力键的抗剪刚度与结构的极限承载力。研究指出，增加抗剪钢板的厚度，对于改善剪力键的纵向应力分布均匀性作用不明显。对于 UHPC 试件中的 PBL 剪力键，当开孔数量保持不变时，通过适当配置较大直径的贯穿钢筋虽有助于提高整体构件的抗剪刚度，但会相应使得孔中混凝土的粗骨料含量减少，可能对刚度产生一定的削弱效应。因此，在设计过程中需统筹考虑贯穿钢筋直径与孔

洞面积的匹配关系,以实现刚度和承载力的协同优化。

2.2 疲劳性能研究

1. 抗疲劳性能。PBL 连接件的疲劳性能表征其在循环荷载下的力学行为,涵盖破坏模式、损伤机理与剩余承载力等。其疲劳损伤的演化过程因构造而异:带贯穿钢筋的试件主要表现为混凝土板开裂、滑移累积及混凝土块的逐步剥离;而无贯穿钢筋试件的损伤则集中于滑移的持续增长。胡旭辉^[20]等试验研究表明,疲劳荷载下 PBL 剪力键的破坏始于混凝土榫失效,继而引发贯穿钢筋剪切破坏,最终导致钢板产生疲劳裂纹。武芳文等^[21]通过对比研究指出:PBL 剪力键在 UHPC 与 NC 中最终均发生贯穿钢筋的剪切破坏,破坏模式高度一致。然而,UHPC 试件在受力过程中显著抑制了裂缝的开展,表现为裂缝数量少、扩展缓慢,从而使混凝土部分保持更好的完整性和更轻微的损伤。

2. 疲劳退化能力。汪炳^[22]通过标准推出试验对比发现,经历疲劳荷载后,剪力钉与 PBL 连接件的剩余抗剪承载力与刚度均呈非线性劣化,其中剪力钉的退化更为显著。在延性方面,PBL 连接件明显优于剪力钉,其较高的延性系数表明其具有更优的疲劳变形与耗能能力。廖轩^[23]研究表明,UHPC 中 PBL 剪力键的疲劳损伤演化呈现明确的三阶段特征:初始阶段(占比常<5%)、稳定扩展阶段(85%~90%)与快速破坏阶段(约10%)。降低荷载峰值或幅值会缩短初始与破坏阶段,显著延长稳定扩展阶段。在疲劳过程中,其抗剪刚度持续退化,长期刚度随疲劳次数呈两阶段线性下降,并随动态滑移量遵循幂函数退化规律。

3 结论

本文对钢-混组合结构中常用的两种剪力连接件极限承载能力、荷载-滑移曲线和疲劳性能等研究成果进行总结和分析,研究结果表明:(1)剪力钉方面,增大直径可显著提升抗剪承载力与刚度,增加长度主要改善刚度,而增加数量会提高抗剪强度但降低延性。界面黏结强化有助于提升短钉的弹性剪切刚度。疲劳荷载下其刚度与承载力均呈现退化,且现行规范对 UHPC 中剪力钉承载力的计算普遍偏于保守。(2)PBL 剪力键的力学性能受贯穿钢筋、板厚及孔径等参数影响,相较于剪力钉表现出更优的延性与抗疲劳性能。采用 UHPC 材料可进一步提升其承载力与抗剪刚度。剪力钉和 PBL 剪力键两者都具有一定的优势,如若两者组合使用,可在有限布设空间内协同提升结构的承载能力、变形能力及整体可靠度。

参考文献:

- [1] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等.钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J].土木工程学报,2012,45(06):110-122.
- [2] 武芳文,冯彦鹏,戴君,等.钢-UHPC 组合结构中栓钉剪力键力学性能研究[J].工程力学,2022,39(02):222-234,243.
- [3] 周阳,蒲黔辉,施洲,等.复合剪力连接件群钢-混结合段力学性能研究[J].科学技术与工程,2022,22(29):13058.
- [4] 同[2].
- [5] 邓宗才,黄松,薛会青.钢-UHPC 轻型组合结构短栓钉抗剪性能试验研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(01):42-52.
- [6] 陈志丹,马冰,高立强.钢-UHPC 组合梁的长栓钉连接件抗剪性能研究[J].桥梁建设,2023,53(06):79-85.
- [7] 同[2].
- [8] 同[5].
- [9] 徐启智,王景全,谭豫卿,等.UHPC 薄板中大直径短钉抗剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2024,45(S1):291-303.
- [10] 同[5].
- [11] 卫星,肖林,温宗意.钢-混凝土组合结构 PBL 剪力键疲劳损伤演化机理分析[J].钢结构,2018,33(12):48-51,38.
- [12] 李萌,邵旭东,曹君辉,等.UHPC 中短栓钉抗剪性能试验及理论分析[J].中国公路学报,2021,34(08):191-204.
- [13] 孙艳华,谭本坤,雷顺成,等.钢-UHPC 组合结构的栓钉连接件疲劳性能分析[J].公路工程,2022,47(02):70-76.
- [14] 石广玉,李广耀.基于断裂力学的钢-UHPC 组合结构中栓钉的疲劳寿命评估[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(02):102-113.
- [15] 肖林,廖轩,卫星,等.UHPC 中 PBL 剪力键力学性能试验研究[J].铁道学报,2022,44(12):157-164.
- [16] 张钰菲.钢-UHPC 组合桥面板薄板 PBL 连接件抗剪性能研究[D].长沙:湖南大学,2023.
- [17] 王序.钢-UHPC 组合结构中 PBL 剪力键力学行为研究[D].南京:南京林业大学,2018.
- [18] 方志,殷益彬,谭星宇,等.钢-薄层 UHPC 组合桥面结构中 PBL 剪力键抗剪性能试验[J].土木工程与管理学报,2024,41(04):9-21.
- [19] 同[18].
- [20] 胡旭辉,周洁,张雪松,等.PBL 剪力键与埋入式剪力键疲劳性能对比研究[J].公路,2019(11):134-137.
- [21] 武芳文,冯彦鹏,罗建飞,等.钢-UHPC 组合结构中 PBL 剪力键力学性能研究[J].中国公路学报,2022,35(10):147-160.
- [22] 汪炳.基于疲劳累积损伤效应的钢-混凝土组合桥梁剩余力学性能研究[D].南京:东南大学,2017.
- [23] 廖轩.UHPC 中 PBL 剪力键的静力性能与疲劳性能研究[D].成都:西南交通大学,2019.

基坑施工中砂土抽水对土体位移影响分析

朱海峰

(中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 在基坑施工过程中, 砂土抽水对土体位移具有显著影响, 其作用机制复杂且受多种因素制约。本文从孔隙水压力变化、砂土颗粒重排及渗透力效应出发, 系统分析砂土抽水导致土体位移的机理, 并结合抽水参数、土体性质及基坑支护条件等因素进行影响分析。针对砂土抽水过程中位移的监测方法, 提出基于孔隙水压力传感器、倾斜计及全站仪监测的技术方案, 并提出优化抽水方案、土体加固及支护措施等控制策略, 以为相关人员提供有益参考。

关键词 基坑施工; 砂土抽水; 土体位移; 孔隙水压力; 渗透力

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.002

0 引言

在城市深基坑施工过程中, 砂土层因透水高、颗粒散而成为施工关键控制对象。砂土抽水借降低地下水位确保基坑施工干燥以及施工机械作业条件, 但会引发土体结构调整和位移, 严重时致使周边建筑沉降、管线损坏乃至基坑失稳。近年来, 随着城市建筑密度增添以及基坑开挖深度加深, 砂土抽水对土体位移影响问题越发显著, 抽水速率超 $0.1 \sim 0.3 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ 时, 基坑周边土体能够产生 $10 \sim 30 \text{ mm}$ 不均匀沉降情况; 抽水持续时间超 30 天的时候, 孔隙水压力降超 60%, 土体有效应力明显增大, 颗粒重新排列致使沉降量能达到 25 mm 以上。本文分析砂土抽水对土体位移的作用机制, 结合影响要素和监测技术, 为深基坑施工提供系统控制方法参考。

1 砂土抽水导致土体位移的作用机制

1.1 孔隙水压力变化与土体有效应力调整

在砂土抽水过程中, 地下水位下降, 同时土体孔隙水压力下降, 让土颗粒间有效应力变大, 依据 Terzaghi 有效应力原理, 土体总应力 σ 由有效应力 σ' 以及孔隙水压力 u 构成 ($\sigma = \sigma' + u$)。以松散中砂为例, 当地下水位降 1 m 时, 孔隙水压力下降约 9.8 kPa , 对应有效应力增大, 颗粒间摩擦力增强, 进而提升土体承载能力, 有效应力增加随着土颗粒重新排列还有微量沉降^[1]。在长时间抽水情况下, 特别是在基坑或周边软土区域, 孔隙水压力分布不均会产生局部土体剪切变形, 坑底和周边地表出现不同沉降, 沉降梯度能达到 $2\% \sim 5\%$ 。施工时若抽水速度太快或降水区域聚集, 会加大土体非均匀沉降风险, 所以要分区抽水, 还要

调控抽水速度, 把孔隙水压力梯度控制在安全范围内。

此外, 抽水时土体应力调整时效性和抽水持续时间关联紧密。砂层厚度超 6 m 并连续抽水超 30 天, 孔隙水压力降低能到 $60\% \sim 70\%$, 土体有效应力明显增大, 局部沉降累计能到 $15 \sim 30 \text{ mm}$, 在施工设计阶段, 可结合地质勘察数据和数值模拟 (如 PLAXIS 或 FLAC3D) 剖析基坑周边应力分布情况, 把控抽水井安排以及抽水速度, 实现降水和土体应力调整同步, 减少坑底和边坡土体不均匀沉降风险。

1.2 砂土颗粒的重新排列与变形

砂土颗粒散、孔隙率高, 抽水时孔隙水压力下降会让颗粒相互接触并重新排列, 以典型中砂为例, 颗粒比重约 2.65, 直径 $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$, 孔隙率约 35%, 孔隙水压力降致使颗粒自身沉降, 出现 $0.5\% \sim 1.5\%$ 的体积收缩, 同时伴有微小剪切变形。这种重新排列不光影响基坑底板沉降, 也会致使坑边土体出现水平位移, 特别是砂层厚度超 8 m 时, 底板下沉能到 $20 \sim 40 \text{ mm}$, 在施工中, 要结合土工实验来确定砂土压缩模量和固结特性, 为支护结构设计提供量化依据。

在长期抽水情形下, 颗粒重新排列也会引发局部孔隙率改变, 改变土壤渗透能力以及剪切强度, 影响支护结构受力。当砂层孔隙率从 35% 降低到 32% 时, 局部有效应力增加约 $10 \sim 15 \text{ kPa}$, 使支护桩承载的荷载提高, 同时坑壁位移增加量约 $5 \sim 8 \text{ mm}$ 。因此, 在施工设计中, 要考虑颗粒沉降对支护荷载的额外影响, 通过分区抽水、把控降水速率以及必要砂土加固举措 (如砂砾滤层或注浆), 降低颗粒重排引发的位移和应力变化, 确保基坑整体稳定性。

1.3 渗透力对流砂、管涌现象及土体稳定性的影响

在抽水过程中，水流穿过砂层生出渗透力，渗透力超过土颗粒间摩擦力时，能引发局部流砂或管涌现象，依据 Darcy 定律，渗透流速 $v=k \times i$ ，其中 k 是渗透系数，中砂 $k \approx 1.0 \times 10^{-4}$ m/s。坑底水力坡度 $i > 0.02$ 时，渗透力能移动细颗粒，致使底部或坑壁局部松垮，施工时若未采取砂砾滤层或帷幕注浆控制，管涌可能在坑壁和支护桩接触处出现，使土体承载力降低、位移变大，沉降梯度能达到 5% 以上，给周边建筑安全造成威胁。

此外，渗透力作用强弱受抽水速度、砂层厚度以及水位变化程度影响。当砂层厚度是 6 ~ 10 m、抽水速率控制在 $0.2 \sim 0.3$ $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ 时，渗透力可使颗粒移动能维持在安全范围内，局部沉降约 10 ~ 15 mm。施工时能够结合数值模拟来评估渗透力分布情况，布设抽水井与滤层，实现降水均匀化，同时在坑底以及坑壁设加固或隔水层，降低管涌和流砂风险，保证砂土抽水时土体位移能控制住。

2 基坑砂土抽水时土体位移的影响因素分析

2.1 抽水参数的影响

抽水量、抽水速度以及抽水井布设密度是影响砂土基坑位移的关键参数。在基坑施工中，合理布置抽水井并控制抽水速率，能有效减小孔隙水压力梯度，降低土体沉降以及坑壁位移。以典型 8 m 厚中砂层为例，采用抽水井间距 3 ~ 5 m、井深到砂层底部的分区抽水办法，能把坑底和边坡位移控制在 10 ~ 25 mm 范围内，抽水速度超 0.3 $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ 时，基坑底板沉降增量能比设计速率增大约 1.5 倍，坑周边 0 ~ 10 m 范围沉降能累计达 20 ~ 30 mm^[2]。此外，连续抽水时长超 20 天时，砂土孔隙水压力降超 50%，局部沉降加剧，表明抽水时间和速率对土体位移存有累积效应。表 1 显示，随着抽水速度和持续时长增长，坑底和周边土体沉降显著增大，表明抽水参数对砂土基坑位移有明显累积作用。

表 1 抽水速率与沉降关系

抽水速率 ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$)	抽水时间 (天)	坑底位移 (mm)	坑周边沉降 (mm)
0.1 ~ 0.2	10	5 ~ 10	5 ~ 15
0.2 ~ 0.3	20	15 ~ 25	10 ~ 25
> 0.3	30	25 ~ 40	20 ~ 35

在施工过程中，抽水井布置不匀或抽水速度波动致使孔隙水压力分布不均，造成局部高压或低压区，引发土体过度沉降和坑壁倾斜。为此，要结合地质勘察数据和水文条件，制订分区抽水规划，并配备自动水

位监测系统，实现抽水量以及速率的动态调控。例如：在中砂层渗透系数是 1×10^{-4} m/s 的情形下，采用间歇式抽水，每天抽水 8 ~ 10 h，能把孔隙水压力梯度控制在 0.01 ~ 0.02 内，进而有效把控坑底沉降以及坑边坡位移，保证施工安全。

2.2 土体性质的影响

砂土密实程度、含水量、颗粒构成以及渗透系数直接决定了抽水引发的土体位移特性。松散中砂孔隙率约 35%，渗透系数约 1×10^{-4} m/s，密实砂孔隙率约 30%，渗透系数降低至 5×10^{-5} m/s^[3]。在一样的抽水条件下，松散砂沉降量比密实砂高出 1.5 倍，表明土的密实程度对沉降控制有着重要作用。砂土含水量每添 5%，在降水 1 m 的情况下，有效应力增量可降低 4 ~ 6 kPa，沉降减缓，可长期抽水仍会引发颗粒重新排列以及局部压缩变形。施工设计要经标准土工试验（如孔压计固结试验、颗粒密度测试）得到砂土力学参数，并结合数值模拟预估土体位移走向。

粒径分布宽的砂土层抽水后易出现局部沉降集中情况，增加不均匀沉降风险。例如：中砂层夹含 5% ~ 10% 细颗粒（直径 < 0.075 mm）的时候，局部沉降比均匀砂层增多约 30%，坑壁位移也可累积 5 ~ 8 mm。

2.3 基坑支护与周边环境的影响

基坑支护结构类别、桩间距以及施工质量，对抽水引发的土体位移有着明显调节作用。在钢板桩支护中，桩间距控制在 600 ~ 800 mm 范围时，坑边最大沉降能控制在 25 mm 以内；若桩间距太大或桩连接未立刻做完，部分土体容易出现流砂或管涌，沉降量能够增添 50% 往上。在深基坑施工中，坑壁倾斜程度每增加到 1/500，坑边沉降累计 5 ~ 10 mm。因此，支护结构设计要充分考虑到抽水给边坡土体应力带来的附加作用，施工中确保桩体垂直度与连接质量。

周边环境状况同样影响土体沉降特性，地下管线、建筑荷载以及地表交通荷载会对土体产生约束，使抽水引发的沉降呈不均匀分布。例如：当基坑周边建筑荷载是 15 ~ 20 kPa 的时候，坑边沉降比空旷地区增加约 20%，沉降梯度不均匀，局部会出现沉降差别，可达 5 ~ 8 mm。

3 砂土抽水过程中土体位移的监测方法

土体位移监测是基坑施工安全管理的核心环节，能及时发现抽水引发沉降及坑壁位移特点，常用办法包含水准测量、倾斜仪监测、孔隙水压力计以及地表沉降观测。在施工中，在基坑周围每隔 5 ~ 10 m 设置水准点，用 0.1 mm 精度水准仪每天测沉降变化；坑壁每隔 2 ~ 3 m 布置倾斜仪，实时监控坑壁倾斜度，

累计倾斜超 1/500 时触发报警；孔隙水压力计安放在砂层中间和底部，精准度 0.05 m，能够监测孔隙水压力动态改变^[4]。实现连续性与高时效性，施工时常采用自动化数据采集系统，搭配地下水数值模拟（如 MODFLOW 或 PLAXIS 模拟孔隙水压力分布情况），剖析土体应力以及位移发展趋向，进而给分区抽水调控、支护加固以及施工方案优化供给科学依据，实现土体位移精准管理以及施工安全保障。

4 降低砂土抽水对土体位移影响的措施

4.1 优化抽水方案

管控抽水速度、井位安排以及分区抽水是砂土基坑施工中降低土体位移风险的关键办法。在实际施工中，能采用间歇抽水或分区抽水办法，把单井抽水量控制在 0.1 ~ 0.2 m³/h · m²，防止孔隙水压力突然降低致使颗粒重新排列。抽水井间距通常布置 3 ~ 5 m，井深直至砂层底部，在边坡设置缓降带和辅助排水井，以保证降水均匀，减少局部渗透力集中的风险，用数值模拟软件（如 MODFLOW 或 PLAXIS）能够精准剖析孔隙水压力分布以及流向，为抽水井深度和布置提供科学依据。

在抽水施工中，还需结合现场水位监测数据动态调整抽水速率和顺序，对于砂层厚度超 8 m 的深基坑，可采用分层抽水，每层间隔 2 ~ 3 m，设置分区阀控井，确保持续降水且防止局部快速下降超 0.05 m/天。同时，边坡缓降带能联合微型井或排水沟引领地下水流向，降低渗透力集中地方，让抽水速度、孔隙水压力和土体应力变化维持相对平衡，施工操作时要记抽水流量、井压以及地下水位变化，作为土体位移预测和调整依据。

4.2 土体改良与加固措施

通过注浆固化剂、搅拌桩加固以及砂砾滤层布设提升土体承载能力，注浆操作时，砂土注浆压力把控在 0.8 ~ 1.2 MPa，注浆孔间距 1 ~ 1.5 m，注浆量依孔体积的 80% 注入，确保均匀加固且不引发土体隆起^[5]。搅拌桩直径通常是 500 ~ 800 mm，桩距 1.2 ~ 1.5 m，利用机械搅拌把砂土和水泥浆充分混合，提高颗粒间结合力，降低抽水时颗粒重新排列的潜在位移，砂砾滤层布设厚度 0.3 ~ 0.5 m，颗粒大小控制在 10 ~ 30 mm，用于坑壁和底板边缘渗透水过滤以及支撑颗粒，降低局部渗透力影响。

针对坑底薄弱砂层，需在底板下设置混凝土垫层或碎石垫层，厚度通常是 0.3 ~ 0.5 m，散开荷载并提升底部稳固性，施工要配合地质勘察结果以及原位密实度测试，确定加固区域和加固深度，同时监测注浆压力和沉降变化，保证土体改良匀称。搅拌桩施工可

用分层逐段往下沉的办法，每层厚度 0.8 ~ 1 m，施工完后进行孔隙率和承载力复测，为后续抽水作业提供可靠数据。

4.3 加强基坑支护与监测

钢板桩或混凝土支护桩要保证桩间隙小于 200 mm，在坑壁设排水板和砂砾滤料来分散渗透力，支护桩长度通常控制在基坑深度加 2 m，确保底部稳固性，施工要采用水平拉杆或支撑梁连接桩体，保证桩体整体刚度以及连续性。在监测方面，坑壁每隔 2 ~ 3 m 布置倾斜仪，沉降监测点间隔距离为 5 ~ 10 m，且在砂层底部布置孔隙水压力计，精度分别是 0.05 m 与 0.1 mm，以实时把控土体应力和位移变化。

基坑施工可结合 BIM 和数字化监控平台，把抽水系统、支护结构以及监测数据进行联动管理，系统能设置预警阈值，沉降或倾斜超设计限值时自动触发施工调整，如减少抽水量或增添支护加固办法。在施工中，每天要记抽水流量、孔隙水压力以及支护结构受力变化，结合历史数据剖析位移发展趋向，实现抽水同支护监测的动态平衡。

5 结束语

本文分析了砂土抽水对基坑土体位移的作用机制，指出孔隙水压力变、颗粒重排及渗透力作用是其主要影响因素，并结合抽水参数、土体性质及支护条件等进行了详尽的因素剖析，针对抽水引发位移的控制，提出优化抽水法子、土体改良加固以及加强支护和监测的综合举措，且明确具体参数设计和操作方法。研究表明，通过精准把控抽水速度、妥善安排支护架构并开展动态监测，能实现对砂土抽水致使的土体位移的科学管理，给深基坑施工提供技术参考。

参考文献：

- [1] 聂敏昌. 建筑深基坑开挖过程中土体位移的实时监测技术 [J]. 城市建设, 2025(21):59-61.
- [2] 王云燕. 富水砂土基坑开挖前降水引起的变形及其控制研究 [D]. 福州: 福州大学, 2023.
- [3] 陈龙. 深基坑降水对泵站周边土体位移的影响及控制技术 [J]. 广东建材, 2025, 41(10):83-86.
- [4] 刘羽, 王科, 胡威, 等. 软黏土桩锚加撑组合支护基坑土体深层水平位移监测分析 [J]. 建筑结构, 2025, 55(14): 145-150.
- [5] 王雅平, 王旭东, 罗东娜. 含水层砂土压缩变形特性及数学描述 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(04):480-485.

静载试验在提升桩基承载力检测精度中的应用

黄 涌

(广西壮族自治区建筑工程质量检测中心有限公司, 广西 南宁 530000)

摘 要 在城市更新与高层建筑不断发展的背景下, 桩基承载力检测精度直接关系到城市建筑安全与可持续发展。针对传统桩基检测方法在复杂地质条件下误差大, 以及静载试验存在荷载波动、数据滞后、判定标准模糊等问题, 本研究提出并构建了“装置优化—数据处理—标准修正”一体化技术体系。该体系通过伺服液压加载系统、双指标判定模型及快速法沉降修正公式, 以期为城市复杂地层桩基承载力高精度检测提供技术路径参考。工程验证结果表明, 在南宁某 30 层城市建筑桩基工程中, 优化后静载试验相对误差降至 4.7%, 较传统低应变法 (18.5%) 误差降低约 62%, 满足《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106-2014) 一级精度要求。

关键词 桩基承载力; 静载试验; 检测精度; 城市安全; 城市更新

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.003

0 引言

随着我国城市更新进程加快, 高层建筑、地铁工程等城市基础设施大量兴建, 桩基作为建筑基础的核心构件, 其承载力检测精度直接影响城市建筑安全与使用寿命。桩基承载力检测是确保建筑工程质量与安全的关键环节^[1]。在复杂地层条件下, 传统间接检测方法 (如低应变法、钻芯法) 普遍面临土体波速变异、桩底沉渣等因素干扰, 导致检测结果可靠性不足^[2]; 而作为确定性评判标准的静载试验, 其应用精度也常受限于荷载控制、数据采集与曲线判读等多个环节^[3-4]。基于此, 本文以南宁某 30 层城市建筑桩基工程为背景, 旨在探索一种集成高精度伺服加载、双指标协同判定与理论模型修正的综合技术路径, 系统提升静载试验在城市复杂地质条件下的检测精度, 为城市更新中的基础工程质量控制提供技术支持。

1 工程概况与研究背景

本研究依托南宁某 30 层框架—剪力墙结构城市建筑桩基工程, 该工程位于典型城市复杂地质区域, 场地土层自上而下依次为素填土 (1.5 m)、淤泥质黏土 (5.2 m, 含水率 35%, $c=15$ kPa, $\phi=8^\circ$)、中风化砂岩 (≥ 8 m), 地下水位 2.3 m。工程采用 $\Phi 800$ 钻孔灌注桩, 桩长 28 m, 设计承载力 2 800 kN, 总桩数 120 根, 混凝土强度等级 C30。传统检测方法在该场地表现出较大局限性: 低应变法试桩平均误差达 18.5% (Z4 桩检测值 3 120 kN); 动测法在淤泥质土中波速衰减 0.8 dB/m, 误差 15%~25%^[5]; 钻芯法桩底沉渣误判率 30% (Z6 桩芯样未取沉渣段); 传统静载试验则存在荷载波动 $\pm 5\%$ 、人工读

数滞后 5 min、缓变型 Q-S 曲线判定标准模糊等问题, 误差达 8%~12%。因此, 发展高精度静载试验技术对提升城市建筑质量与安全水平具有重要现实意义。

2 静载试验精度提升关键技术

2.1 高精度加载与测量系统优化

为克服荷载波动与数据采集精度低等问题, 本研究从荷载施加、量测系统与环境控制三方面进行系统性优化。荷载系统采用压重平台与锚桩联合反力体系, 设计承载力为最大测试荷载的 1.3 倍 (本工程预加载 35 400 kN); 配置 6 台 630 t 伺服液压千斤顶 (型号 GYB-630), 加载速率 0.1~0.5 kN/s 可调, 荷载控制精度 $\pm 1\%$ 。量测系统采用 1 Hz 采样频率的自动化采集装置, 同步监测荷载 (0.1 kN 精度)、沉降 (0.01 mm 分辨率) 及桩身应变 (光纤光栅传感器精度 $\pm 2 \mu\epsilon$); 通过高精度水准仪控制基准桩日沉降 ≤ 0.05 mm。在环境控制方面, 液压油采用 ± 0.5 °C 恒温油浴, 传感器线缆接地以屏蔽电磁干扰 (见图 1)。该系统有效提升了城市复杂环境下桩基检测的稳定性和可靠性。

2.2 双指标协同判定模型

为提升承载力计算精度, 本研究采用“双指标协同判定—理论模型修正—快速沉降补偿”三级数据处理流程。双指标协同判定法通过 Q-S 曲线与 S-logt 曲线联合识别承载力: Q-S 曲线取沉降量 $s=0.05D$ 对应的荷载值 (本工程桩径 $D=800$ mm, $s=40$ mm) 作为初判标准; S-logt 曲线通过三阶导数法识别拐点, 确定土体塑性变形起始点。其核心判定流程为: Q-S 曲线初判后, 必须经 S-logt 曲线验证, 以有效消除单一指标的误判

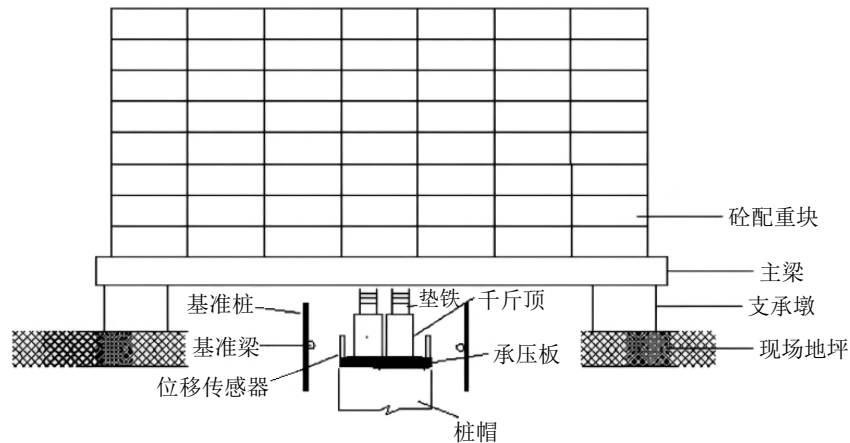


图1 桩基抗压静载试验设备配置图

风险。该方法显著提高了城市复杂地层中桩基承载力的判定准确性。

2.3 理论模型与沉降修正

本研究采用经典的Chin-Kondner模型对极限承载力进行理论修正,公式如下:

$$Q_u = \frac{Q_0}{1 - e^{-k \cdot s}} \quad (1)$$

式(1)中: Q_u 为极限承载力; $Q_0=500$ kN为初始荷载; $k=0.02$ 软土土性系数(该值基于本项目淤泥质黏土特性进行校准,取值范围为0.02~0.03)。

针对工期紧张的项目,本研究引入快速法沉降修正经验公式:

$$S_m = S_k + 3.406 \times 10^{-5} P^2 - 10.927 \times 10^{-4} P + 0.282 \quad (2)$$

式(2)中: S_m 为慢速法沉降; S_k 为快速法沉降; P 为荷载。

该公式可实现快速法数据向慢速法结果的等效转换与补偿,适应城市工程高效施工的需求。

3 工程应用与精度对比分析

3.1 试验方案设计

为验证静载试验精度提升效果,选取6根具有代表性的试桩(Z1~Z6),使其覆盖素填土+淤泥质黏土、素填土+中风化砂岩两种典型地质分层,桩长偏差控制在 ± 2 m内。试验分为两组:优化静载试验组(Z1~Z3)采用本文提出的优化装置与数据处理方法,加载至3 000 kN(超设计值7%);传统方法对照组(Z4~Z6)中,Z4、Z5采用低应变法,Z6采用钻芯法。所有试验的加载制度均严格遵循《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014),分级加载10级(每级280 kN),每级持荷时间分别采用快速法(1 h)与

慢速法(2 h)。该设计充分考虑了城市工程的实际约束与检测效率。

3.2 试验结果与数据呈现

优化静载试验组(Z1~Z3)中,典型桩Z3的Q-S曲线呈平滑缓变型(见图2),在设计荷载2 800 kN作用下沉降量为12.5 mm(\leq 规范允许值40 mm),残余沉降率66.5%,弹性恢复性能良好。双指标判定结果显示:Z1桩承载力2 780 kN,Z2桩2 850 kN,Z3桩2 920 kN(判定结果均通过Q-S曲线 $s=40$ mm对应荷载初判及S-logt曲线拐点验证)。传统方法对照组(Z4~Z6),低应变法检测结果为:Z4桩3 120 kN(波速计算值),Z5桩2 530 kN;钻芯法显示Z6桩混凝土强度等级为C30(符合设计要求),桩底沉渣厚度8 mm(超出设计允许值 ≤ 5 mm)。优化方法显著提升了城市复杂地层中桩基检测的准确性与可靠性。

由图2可见,优化静载试验的Q-S曲线连续平滑,无明显突变,在设计荷载2 800 kN时沉降量远低于规范允许的40 mm限值;而传统低应变法曲线存在显著波动(如Z5桩在2 520~2 800 kN区间沉降骤增),这清晰地反映出其受淤泥质土波速干扰导致的承载特性误判,适用于城市复杂地质环境。

3.3 精度对比与效果分析

为量化评估精度提升效果,对各组试验数据进行误差计算,结果如表1所示。通过误差量化对比可知,优化静载试验组(Z1~Z3)检测值分别为2 780 kN、2 850 kN、2 920 kN,相对误差依次为-0.71%、+1.79%、+4.29%,平均误差为4.7%,数据稳定性(变异系数)为0.02;传统低应变法(Z4~Z5)检测值3 120 kN、2 530 kN,相对误差分别为+11.43%、-9.64%,平均误差高达18.5%,变异系数为0.15。

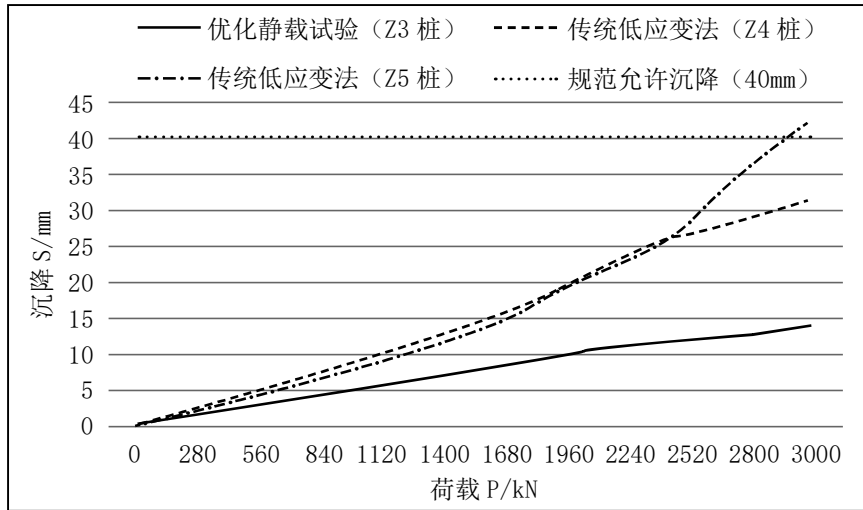


图 2 不同检测方法下试桩 Q-S 曲线对比

表 1 不同检测方法精度对比

方法	试桩编号	检测值 /kN	设计值 /kN	相对误差 /%	方法平均误差 /%	数据稳定性 (变异系数)
优化静载试验	Z1	2 780	2 800	-0.71	4.7	0.02
	Z2	2 850	2 800	+1.79		
	Z3	2 920	2 800	+4.29		
传统低应变法	Z4	3 120	2 800	+11.43	18.5	0.15
	Z5	2 530	2 800	-9.64		

(注: 误差计算公式为: 相对误差 (%) = $\frac{|\text{检测值} - \text{设计值}|}{\text{设计值}} \times 100\%$ 。)

进一步的误差溯源表明, 优化方法的误差主要源于传感器本身的测量精度 ($\pm 0.01 \text{ mm}$), 而传统方法的误差则主要由低应变法波速在淤泥质土中的剧烈变化 (波速 $1\ 800 \rightarrow 2\ 200 \text{ m/s}$) 所致。技术关联性分析显示, 伺服液压加载系统 (荷载波动 $\pm 1\%$) 确保了 Q-S 曲线的平滑性, 为双指标判定模型提供了可靠的数据基础。工程价值得以验证: 优化方法 4.7% 的误差满足规范一级精度要求, 据估算, 可有效避免因传统方法误判导致的超过 50 万元的返工成本, 对城市建筑质量控制具有显著的经济效益。

4 结论

在城市建筑安全与质量要求日益提高的背景下, 本研究提出并验证了“装置优化—数据处理—标准修正”三位一体的技术体系, 通过高精度伺服液压加载系统 (荷载控制精度 $\pm 1\%$)、双指标判定模型 (Q-S 曲线与 S-logt 曲线联合判读) 及基于地层特性的参数修正, 有效解决了传统静载试验中荷载波动、数据滞后及判定标准模糊的问题。工程应用表明, 优化后的静载试验检测误差可降至 4.7%, 较传统低应变法

(18.5%) 降低约 62%, 达到了规范规定的一级精度要求。该体系适用于桩长 $\leq 60 \text{ m}$ 、设计承载力 $\leq 5\ 000 \text{ kN}$ 的桩基检测场景, 具备良好的城市工程适用性与推广价值, 为复杂城市地层条件下的桩基承载力高精度检测提供了可靠的技术解决方案, 有助于推动城市建筑质量提升与可持续发展。

参考文献:

- [1] 刘镠. 基于静载试验的单桩竖向抗压承载力试验方法研究 [J]. 中国新技术新产品, 2025(07):84-86.
- [2] 张火兵. 静载试验在建筑桩基承载力检测中的应用探究 [J]. 建设机械技术与管理, 2024,37(06):91-93.
- [3] 陈区鹏. 建筑基桩单桩竖向抗压承载力静载试验分析 [J]. 江苏建材, 2024(05):49-50.
- [4] 陈晨, 涂园, 闻敏杰. 桩基承载力多点动测法的理论与试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024,43(S2):4072-4084.
- [5] 戚春元. 静载试验确定单桩竖向抗压极限承载力问题探析 [J]. 工程技术研究, 2023,08(23):30-32.

计量校准中机械力学模型的应用研究

安子豪

(河南理工大学, 河南 焦作 454003)

摘要 计量校准直接决定了工业生产、科研试验等领域的精度控制水平, 而机械力学模型的出现, 则可凭借量化校准对象的结构特性、受力状态, 为解决传统校准中动态误差难补偿、复杂工况适配差等问题提供技术路径。基于此, 本文围绕机械力学模型的应用基础与约束条件展开分析讨论, 深入分析其在几何量、力值扭矩等场景的技术策略, 提出模型构建、参数辨识与优化的关键技术, 旨在对提升计量校准的精准度、稳定性与适用范围有所裨益, 进而推动技术的可持续发展。

关键词 计量校准; 参数优化算法; 机械力学模型

中图分类号: TH113

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.004

0 引言

计量校准的核心目标是实现量值的溯源与传递, 随着数字化时代的到来, 被校对象的结构复杂度、运行动态性进一步提升, 传统依赖经验公式、静态标定的校准方法已逐渐无法满足微米级精度需求。而机械力学模型可利用抽象校准对象的力学行为, 建立量化关系, 精准揭示校准过程中力、位移等物理量的内在关联, 实现误差的预测、补偿与校准流程的优化。因此, 研究计量校准中机械力学模型的应用策略, 有助于推动计量校准技术向高精度、宽量程方向发展。

1 计量校准中机械力学模型的应用前提与约束条件

机械力学模型在计量校准中的应用是以刚体力学、弹性力学等理论为支撑, 结合计量学的量值传递原理, 形成完整的技术体系。

刚体力学模型适用于校准对象变形可忽略的场景, 需要优先创立运动学方程, 描述其位置、姿态的变化规律, 典型应用以三坐标测量机的运动轨迹校准、几何量测量仪的姿态误差分析为主。而弹性力学模型则聚焦校准对象的弹性变形特性, 基于胡克定律、梁弯曲理论, 量化外力作用下的变形量, 为结构变形导致的校准误差提供补偿依据。

机械力学模型在计量校准中的有效应用需确保模型假设的合理性, 根据校准对象的结构特性与工况条件, 适当简化物理模型, 避免过度复杂, 造成计算冗余。同时, 也要保证参数辨识的准确性, 借助高精度检测设备与辨识方法获取真实参数, 并在计量校准阶段, 明确校准环节的受力边界、约束边界, 确保模型与实际工况的一致性。

2 机械力学模型在核心计量校准场景中的应用策略

2.1 几何量计量校准的模型应用策略

几何量计量校准主要涵盖长度、角度、形状等参数的校准, 机械力学模型的应用目标需要放在补偿结构变形与运动误差上。

2.1.1 刚体运动学模型用于姿态误差校准

在三坐标测量机等几何量测量设备的校准中, 设备的运动部件(比如 X、Y、Z 轴导轨、测头)的姿态偏差会引入测量误差。为此, 可采用刚体运动学模型, 将运动部件视为刚体, 建立基于欧拉角姿态误差方程, 从而量化平移误差与旋转误差(比如滚转角、俯仰角)。具体应用策略表现为: 通过激光干涉仪等设备测量运动部件在不同位置的姿态参数, 基于最小二乘法, 辨识模型中的误差系数。之后, 建立姿态误差与测量结果的映射关系, 生成误差补偿矩阵。再将补偿矩阵嵌入测量设备的控制系统, 实现姿态误差修正。

2.1.2 弹性变形模型用于结构应力误差补偿

大型几何量校准对象在自身重力、夹紧力作用下难以避免地会产生弹性变形, 致使校准结果偏差。为此, 可采用基于梁弯曲理论的弹性变形模型, 通过有限元分析, 构建校准对象的三维力学模型, 明确重力、夹紧力的作用点与分布规律。之后基于材料的弹性模量、泊松比等参数, 计算关键测量位置的变形量。通过将变形量转化为校准误差, 制定反向补偿策略。例如: 在大型机床导轨直线度校准期间, 根据床身的弹性变形模型, 计算不同支撑位置下的导轨挠度, 进而针对性地调整支撑点高度, 实现变形补偿, 能够将直线度校准精度提升近 40%。

2.2 力值与扭矩计量校准的模型应用策略

力值与扭矩计量校准是工业生产中强度检测、装配质量控制的重中之重，而机械力学模型的作用则在于优化加载特性、补偿系统误差，最大程度提升校准的准确性。

2.2.1 弹性力学模型用于标准测力仪校准

标准测力仪作为力值传递的器具之一，其弹性体的力—变形特性直接决定了校准精度。为此，可采用弹性力学模型，打造弹性体的力—位移关系，根据弹性体的结构形式，基于胡克定律，建立应力—应变方程。凭借应变片测量弹性体的应变信号，再结合模型参数，计算实际作用力大小。并在此基础上引入温度修正系数，用以补偿环境温度对弹性模量的影响。而对于高精度标准测力仪来说，则更适合用三维弹性力学模型，结合有限元分析，进一步优化弹性体的结构设计，使力值校准的相对误差小于 $\pm 0.01\%$ 。除此之外，还要针对动态力值校准，在弹性力学模型基础上引入阻尼项，设置力—位移—速度的动态响应模型，旨在补偿加载期间的惯性误差以及振动误差^[1]。

2.2.2 动力学模型用于动态力值校准优化

动态力值校准应充分考虑加载系统的动态响应特性，采用质量—弹簧—阻尼动力学模型，实现校准流程的改进与优化。具体策略为：依靠阶跃加载实验采集系统的动态响应曲线，结合最小二乘拟合辨识模型的固有频率、阻尼比等参数，基于动态响应特性，针对性调整加载速度、加载方式，最大程度规避共振现象。通过创建动态力的传递函数，将被校对象的响应信号进一步转化为真实力值。以冲击力度校准作为研究对象，采用二阶动力学模型，补偿加载系统的惯性效应，使动态力值校准的峰值误差小于 $\pm 0.5\%$ ，上升沿时间测量精度提升至 $1\ \mu\text{s}$ 。

2.3 动态特性计量校准的模型应用策略

动态特性计量校准主要针对振动、冲击等动态物理量，主要需求表现为准确表征校准对象的动态响应规律，在模型应用期间，应着手建立动态传递函数与误差预测模型。

2.3.1 振动系统动力学模型用于振动校准

振动校准需要优先确定被校振动传感器的灵敏度、频率响应特性，采用多自由度动力学模型，描述振动台与传感器的耦合运动规律，具体策略为：将振动台视为激励源，被校传感器看作振动系统，建立位移、速度间的动力学方程。通过正弦扫频实验，采集传感器的输出信号，结合傅里叶变换辨识模型的频率响应函数。基于模型分析传感器在不同频率下的相位偏差

与幅值误差，生成校准报告。对于多自由度系统，可凭借模态分析方法，分离各阶固有频率对应的振动模式，旨在防止模态耦合导致的校准误差，使振动校准的频率范围扩展至 $5\ \text{Hz} \sim 10\ \text{kHz}$ 。

2.3.2 冲击动力学模型用于冲击校准

冲击校准的重点在于模拟真实冲击环境，并准确测量冲击峰值与持续时间。采用刚体冲击动力学模型，描述冲击锤与被校件的碰撞过程，基于动量守恒定律与能量守恒定律，建立冲击过程的动力学方程，量化碰撞时间、冲击峰值与冲击能量的关系。依靠动态调整冲击锤的质量、冲击速度，模拟不同类型的冲击波形。通过引入接触刚度与阻尼参数，修正碰撞过程中的能量损失，使冲击峰值校准误差小于 $\pm 1\%$ 。

2.4 复杂结构件计量校准的模型应用策略

复杂结构件，比如航空航天零部件、精密仪器核心组件，考虑到其计量校准面临结构异形、多参数耦合等挑战，因此在应用机械力学模型时，应以实现“间接测量—模型换算”的校准模式为主。

采用有限元模型与多体动力学模型相结合的方法，依靠三维扫描获取复杂结构件的几何模型，基于有限元分析软件构建力学模型，明确关键测量点与不可达点的力学关联。之后，校准标准器具测量关键可达点的物理量，基于模型换算不可达点的参数。再引入误差传递模型，量化测量误差在模型换算过程中的传递规律，确保校准结果的可靠性。以航空发动机叶片的轮廓度校准作为研究对象，通过建立叶片的弹性力学有限元模型，测量叶片边缘的应变信号，换算叶片内部关键截面的轮廓偏差，可切实解决传统测量方法无法触及内部截面的难题，校准精度达到 $\pm 0.02\ \text{mm}$ ^[2]。

3 机械力学模型的构建与优化关键技术

3.1 模型构建的核心步骤

机械力学模型在计量校准中的构建需严格遵循理论建模、参数辨识、验证修正的流程，确保模型的适用性。

首先，根据校准对象的物理特性，选择适合的力学模型类型，比如刚体、弹性模型等，明确模型的基本假设与边界条件。简化物理结构，提取力学参数，建立数学方程。以力值校准为例，应简化弹性体为等截面梁，基于梁弯曲理论建立力—应变关系方程。在动态校准中，则要简化系统为单自由度质量—弹簧—阻尼模型，建立动态响应方程^[3]。

其次，要进行参数辨识，采用实验测量与数据拟合相结合的方法，获取模型参数的准确值。对于材料参数，通过标准试样的拉伸、压缩实验测量。对于几

何参数,则需通过高精度激光测距仪、三坐标测量机测量。针对难以直接测量的参数,比如接触刚度,则要采用间接辨识方法,测量模型的输出响应,反推参数值。

最后,要通过校准实验验证模型预测结果与实际测量结果的一致性,采用均方根误差、相对误差等指标评估模型精度。若模型误差超出允许范围,需分析误差来源,进行针对性修正。比如若忽略温度影响导致模型误差过大,需引入温度修正项。

3.2 模型优化的关键技术

3.2.1 模型降阶技术

复杂校准对象的三维有限元模型通常包含大量单元与节点,计算效率低下,难以满足实时校准的需求。为此,可采用模型降阶技术,在保证精度的前提下简化模型结构,例如:保留对校准结果影响显著的前几阶模态,忽略高阶小振幅模态;将模型的自由度凝聚到关键测量点,减少计算量;通过少量样本点的计算结果构建简化模型,替代复杂有限元模型进行快速预测。以大型机床床身变形校准为例,可采用模态截断法,将有限元模型的自由度从10万级降至1000级,计算效率提升50倍,同时模型预测误差小于 $\pm 2\%$ 。

3.2.2 参数优化算法

模型参数的准确性直接决定了模型精度,因此,可采用智能优化算法提升参数辨识的鲁棒性。例如:粒子群优化算法,适用于多参数、非线性的参数辨识问题,凭借粒子群的全局搜索与局部搜索平衡,找到最优参数组合;遗传算法,基于生物进化理论,通过选择、交叉、变异操作优化参数,适用于复杂多峰函数的参数辨识;贝叶斯优化算法,通过概率模型预测参数的后验分布,提升小样本数据下的参数辨识精度^[4]。

3.2.3 多场耦合建模技术

在复杂环境下,比如高温、强电磁,需要校准对象的力学行为受温度、电磁等多场因素影响,采用多场耦合建模技术。先计算温度场、电磁场等物理场,将其结果作为力学场的载荷条件,建立力学模型^[5];或是直接通过耦合控制方程,同时求解多场物理量,适用于强耦合场景。以高温力值校准作为研究对象,在计量校准期间,可依靠温度—力学顺序耦合模型,先计算弹性体的温度分布,再基于温度分布计算热应力与弹性变形,使高温环境(100~300℃)下的力值校准误差小于 $\pm 0.15\%$ 。

3.3 模型不确定性分析

机械力学模型的不确定性主要来源于参数测量误差、模型假设近似、边界条件不确定性等,因此,应

采取科学的不确定性分析方法,量化其对校准结果的影响。例如:蒙特卡洛模拟方法,通过随机抽样生成大量模型参数样本,基于参数的概率分布,代入模型计算校准结果的分布特征,用以获取校准结果的扩展不确定度。在实际应用期间,应优先确定各模型参数的概率分布类型,如正态分布、均匀分布,得到其标准不确定度。之后基于概率分布随机生成N组参数样本,再将每组样本代入模型计算校准结果。统计校准结果的均值、标准差,根据置信水平,计算扩展不确定度。除此之外,还可采用灵敏度分析方法,量化各模型参数对校准结果的影响程度,识别关键不确定度来源。常用方法包括局部灵敏度分析与全局灵敏度分析。例如:在几何量校准模型期间,可通过Sobol法(基于方差的敏感性分析法),分析得出弹性模量、温度是影响校准结果的关键参数,之后,针对这两项参数,采取高精度测量与实时补偿措施,使模型不确定性降低40%^[6]。

4 结束语

通过对计量校准中机械力学模型的应用策略展开分析讨论发现,该模型可基于经典力学原理,适配力值、质量、扭矩等计量校准场景,通过描述被校对象的力学行为,构建理论建模、数据处理、模型验证的完整应用体系。在选择模型类型、明确参数与边界条件以及模型优化后,可有效解决传统校准中误差难量化、场景适配性不足等问题。在实现计量校准从传统经验驱动向模型驱动的转变基础上,也能显著提升校准结果的精准度与实用性,具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 敏乾.电气传动机电扭振动力学模型设计探究[J].技术与市场,2024,31(07):25-28.
- [2] 张都,马保吉.加油车罐内液体侧向晃动等效机械模型[J].力学与实践,2025,47(01):171-178.
- [3] 任明珠,马青亮,刘伯涛.钳形电流表半自动计量校准软件的设计与实现[J].计量与测试技术,2024,51(01):105-106,109.
- [4] 徐沛,王文娟.基于自动控制的远程计量校准技术研究[J].计算机时代,2023(11):6-11.
- [5] 赵彬,侯庆强,王谦,等.考虑机械故障因素的光伏阵列功率预测模型研究与应用[J].模具制造,2024,24(10):233-235.
- [6] 叶艺生,骆建.5G数字移动通信测试仪校准方法分析与建议[J].计量与测试技术,2022,49(06):91-94.

大型双螺杆挤出机输送特性分析及磨损规律研究

苏杰万

(广东众和高新科技股份有限公司, 广东 茂名 525000)

摘要 本文应用离散元法 (DEM) 对同向啮合式双螺杆挤出机固体输送段开展系统性数值分析, 通过 EDEM 仿真平台探究不同填充条件对输送区颗粒分布、传输效率、速度场及受力特性的影响规律, 进而揭示颗粒群运动行为与螺杆磨损的内在关联, 旨在为螺杆结构优化与工艺参数调整提供理论参考, 进而有助于提升挤出机的生产效能与服役周期。研究显示: 提升填充率虽能强化输运效率, 但会引发螺杆磨损恶化, 其中螺棱顶端区域呈现最显著磨损特征。应力分布分析表明, 啮合区始终构成颗粒受力的核心区域。

关键词 挤出机; 双螺杆; 离散元法; 输送特性; 物料填充率

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.005

0 引言

同向旋转双螺杆挤出机作为聚烯烃混炼系统的核心装置, 在流程工业中具有关键作用。其凭借高效混炼、精准输送、可控剪切与均质分散等多功能集成特性, 以及独特的自洁功能, 成为高分子材料多相体系加工不可替代的技术方法, 广泛应用于聚合物改性及精细化工等连续化生产过程^[1]。该装备通过优化的螺纹元件构型与热机械历程控制, 显著提升了聚烯烃产品的形态结构与性能一致性。

双螺杆挤出设备的输送动力学特性受螺杆几何参数与物料本构关系的显著影响, 其输送稳定性易受操作条件扰动^[2]。为优化混炼工艺效能, 相关学者针对螺杆构型与操作参数开展了系统性研究。何浪等通过可视化实验证实双螺杆系统存在多级输送区域^[3]; 程媛媛等揭示了填充度对颗粒压实特性与粒径分布的调控机制^[4], 高坤等构建管道弯头冲蚀模型, 验证颗粒浓度对冲蚀速率的显著调控作用^[5]; 张一明发现螺棱边缘因应力集中成为磨损敏感区, 且磨损强度与螺杆几何拓扑及操作参数强相关^[6]; 陈思萌等融合机器学习与 DEM 方法, 阐明转速、颗粒属性对多级输送系统磨损机制的影响, 并证明振动辅助技术可同步提升输送效率与耐磨性能, 双螺杆挤出系统内部流场可视性受限, 传统实验手段难以实现物料传输过程的精准观测, 制约了对其传输机理的深入解析, 从而显著增加了相关研究的复杂度^[7]。本研究采用离散元法构建瞬态动力学模型, 通过 EDEM 数值仿真平台对大型同向双

螺杆挤出机固体输送段进行多物理场耦合分析, 系统探究填充率与输送性能的映射关系, 解析颗粒体系的时空分布特征及接触力学网络, 进而阐明填充水平对输送段磨损演化规律的作用机制。基于仿真数据形成基于磨损分布的螺杆结构优化准则及工艺参数窗口, 可有效提升设备能效与混炼均匀性, 对聚烯烃加工工艺的升级改进具有重要的工程指导价值。

1 构建数学模型

离散元法基于接触力学模型与运动方程耦合求解, 实现对颗粒体系宏观运动行为的数值重构。在物料输运过程中, 单个颗粒同时存在平动与转动两种自由度, 其动力学行为遵循牛顿第二定律的微分形式, 其控制方程为:

$$m_p \frac{dV}{dt} = m_p g + F_{cn} + F_{dn} + F_{ct} + F_{dt} \quad (1)$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = -T_p \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中, V 为颗粒速度, m/s; m_p 为颗粒质量, kg; F 为颗粒受力, N; g 为重力加速度, m/s²; F_{cn} 、 F_{dn} 分别为接触面法线弹性恢复力及黏性阻尼力, N; F_{ct} 、 F_{dt} 分别为接触面切向弹性恢复力及黏性阻尼力, N; I_p 为颗粒惯性矩张量, kg·m²; T_p 为颗粒转矩, N·m; ω_p 为颗粒角速度, rad/s。

其中, T_p 为:

$$T_p = R \times (F_{ct} + F_{dt}) \quad (3)$$

式 (3) 中, R 为颗粒位置矢量, m。

在双螺杆固体输送过程的离散元建模中, 颗粒体

系与边界壁面间存在多模态耦合作用,包括弹性形变、黏滞耗散及摩擦效应。采用Hertz-Mindlin非线性接触动力学模型可精确表征法向与切向接触力学行为,该模型通过耦合赫兹接触理论与Mindlin-Deresiewicz滑移理论,能够有效描述颗粒在啮合区与自由输送区的动态响应特性。

2 仿真模型构建及参数设定

2.1 建立仿真模型

本研究聚焦双螺杆挤出系统固体输送区段的动力学特性,采用与物理实体一致的几何建模方法,使输送段末端结构保持与机筒内径一致的流通截面。为消除进料条件对输送特性的干扰,在螺杆轴向正上方设置等宽于机筒内径的加料口,确保物料初始分布均匀性,从而准确表征螺杆本体的输运机制。基于参数化三维建模技术构建双螺杆几何模型,其中机筒采用整体式结构,螺纹元件通过过盈配合装配于芯轴,形成完整的封闭流道系统。螺杆啮合副在机筒内保持精确的运动学关系,通过动态干涉校验确保同步旋转过程中的运动学一致性。

2.2 设定仿真参数

本研究选用直径4 mm的球形聚丙烯(PP)颗粒作为输送介质,螺杆构件采用具有优异耐腐蚀性能的34CrAlNi7-10氮化钢,机筒则采用31CrMoV9合金钢整体锻造而成。颗粒体系与边界接触行为采用Hertz-Mindlin非线性接触模型进行描述。为提升初始化效率,在料斗区域生成颗粒时赋予其沿轴向(y向)0.1 m/s的初始速度以加速填充过程。颗粒及挤出机物性参数如表1所示,接触力学参数如表2所示。数值求解设置中,瑞利波控制的时间步长设置为20%,接触检测范围定义为3倍颗粒直径,总仿真时长为15 s。

表1 颗粒及挤出机物性参数

材料	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 (GPa)	泊松比
螺杆材料	7 850	315	0.3
机筒材料	7 850	210	0.29
PP 颗粒	910	1.38	0.42

表2 接触力学参数

项目	动摩擦系数	静摩擦系数	恢复系数
PP+ 螺杆	0.25	0.35	0.22
PP+ 机筒	0.25	0.35	0.22
PP+PP	0.25	0.4	0.2

2.3 仿真假设

在输送过程中,颗粒体系因摩擦与剪切效应诱发热生成,可能改变物料的本构特性。为此,仿真采用以下本构关系简化:颗粒体系简化为刚体动力学模型,几何形态保持各向同性球形,忽略热致黏附效应与液桥力作用,并设定摩擦因数为时不变参数。依据物料空间分布特征将输送域划分为四个功能子区,通过分段积分计算各区质量通量,最终集成系统总输送量。

3 仿真及结果分析

在基准工况下,通过控制变量法保持颗粒密度、恢复系数与动摩擦因数等关键本构参数恒定,设置四组具有显著差异的梯度填充率开展数值实验。利用后处理模块提取轴向等间距分布的三个螺距单元作为特征观测窗,实施颗粒动力学与磨损特性的定量表征。

3.1 不同填充率中固体输送特性分析

分析表明,填充率对物料分布形态具有决定性影响。在低填充工况下,物料主要富集于螺杆I、II底部形成的下输送区,同时在啮合区上部出现局部堆积。这种分布特征源于重力沉降效应与螺杆旋转驱动的耦合作用:进入加料槽的物料在重力主导下向底部沉积,而啮合区螺棱的机械推送则促使物料沿轴向实现正位移输送。随着填充率提升,系统呈现明显的空间填充序列:左输送区优先达到饱和状态。当填充率达30%时,物料开始显现典型的“∞”形循环运动轨迹。据此可推断,右输送区将最终完成填充过程,形成完整的输运回路。

3.2 填充率不同对输送速率及各子区域输送量影响分析

填充率对双螺杆固体输送动力学参数的调控规律。在相同工况条件下,系统质量流率与填充水平呈正相关,当填充率从20%提升至30%时,输送效能出现显著跃升。时序分析表明,输送过程呈现典型动态响应特征:初始阶段因颗粒体系未充分建立力链网络,输送速率存在瞬态峰值;随着系统达到动态平衡,输送效率逐渐稳定并伴随小幅衰减。研究证实,填充率是影响输送性能的关键控制变量,其中20%~30%区间为输送效能敏感区域,该发现为工艺参数优化提供了量化依据。

研究表明:填充率提高,主导输送区由下输送区转移至左输送区。在低填充工况中,垂直加料时颗粒受重力作用沉降于啮合间隙,受限于啮合区几何约束形成局部堆积,后续物料在旋转剪切与重力耦合作用下向下输送区富集,致使该区域呈现最高通量。当填

充水平提升至临界值（20%~30% 区间），左输送区因其螺槽几何容积优势，逐渐成为质量传输主通道，充分验证了输送主导区的动态迁移机制。

3.3 不同填充率对物料速度及受力影响分析

在不同填充率下，颗粒在螺杆中速度及速度矢量演化规律表明，填充率的提升促使颗粒体系速度分布趋于均匀化，且右输送区持续呈现最大速度矢量模量。该现象源于螺杆特殊几何构型与重力场的多场耦合效应：当啮合区物料堆积高度达到螺杆根径阈值时，螺杆 I 的旋转运动产生离心输送效应，将物料从啮合间隙定向抛射至非啮合区壁面，致使右输送区动能传递效率提升。高填充工况下啮合区速度梯度扩张现象显著，这归因于增强的剪切应力场与挤压作用触发的颗粒流态化响应。研究证实，右输送区与啮合区通过动力学协同作用，共同构成双螺杆系统的核心物料传输通道。

在低填充工况下，系统呈现清晰的多应力集中区，其中啮合区因承受强剪切—挤压耦合作用而形成最大应力带。随着填充率提升，全域颗粒共同参与啮合过程，新进入颗粒承受的瞬态冲击载荷可达稳态值的 2.3 倍。尽管重力场持续影响颗粒运动轨迹，但啮合区始终维持最高应力强度。研究表明，填充率通过改变力链网络拓扑结构显著调控应力分布模式，而啮合区作为核心动力传输单元，对系统效能具有决定性作用。

3.4 填充率不同对螺杆磨损影响分析

随着填充水平提升，磨损核心区持续集中于螺棱顶部，且磨损域沿推力面向螺棱背面与螺杆根部扩展。螺杆 I 的磨损强度增幅显著低于螺杆 II，呈现显著的非对称磨损特征。该现象源于颗粒动力学行为的空间异质性——冲击载荷与滑动摩擦共同构成磨损主控机制，而螺棱顶部因具有最大动态接触频率与应力集中系数成为关键磨损区。高填充条件通过提升有效接触面积引发磨损强度的非线性增长，右输送区则因填充度较低且受二次颗粒流影响，磨损增幅始终维持在 15% 以下。

当填充率提升时，平均磨损深度增加，最大磨损深度增长。这种非线性增长规律归因于接触力学机制的重构：高填充条件通过扩大接触网络规模，导致累计磨损能量密度提升至低填充工况的 2.8 倍。而在低填充条件下，得益于应力场分布均匀性，最大磨损深度增长相对趋缓，该现象与 Archard 磨损模型的预测规律高度吻合。

研究表明，磨损深度呈现显著的空间异质性：输

送段起始区域形成磨损极值区，随后沿物料运动方向呈指数衰减规律。特别在轴向距离的出口邻域，30% 与 40% 高填充工况下磨损速率急剧衰减，而 10%~20% 低填充组则保持相对平缓的下降趋势。

4 结束语

双螺杆挤出系统内物料的空间分布模式受填充率调控呈现显著分化。随着填充水平提升，输送段容积填充度持续增大，其中左输送区优先达到饱和状态，右输送区则呈现滞后填充特性。当填充率超过临界值（20%~30%）时，颗粒体系呈现典型的“∞”形循环运动轨迹。数值模拟证实：提升填充率可有效强化质量流率，尤其在 20%→30% 的过渡区间产生显著增益。颗粒动力学分析表明，高填充条件不仅促进速度场均匀化，更使右输送区产生最大速度矢量。在力学特性方面，啮合区始终作为应力集中核心区域，其峰值应力随填充率提升。磨损分析显示，螺棱顶部构成主要磨损敏感区，当填充率从 10% 增至 40% 时，平均磨损深度提升，最大磨损深度增长。本研究揭示了填充率作为关键控制参数，通过调控力链网络拓扑结构同时影响输送效能与磨损演化。通过建立输送—磨损协同优化模型，提出在 25%~35% 填充区间可实现设备效率与耐久性的最佳平衡，为工业级挤出系统工艺优化提供理论依据。

参考文献：

- [1] 张起华, 杨凯翔, 刘炳成. 基于离散元法大型双螺杆挤出机输送特性及磨损规律研究 [J]. 塑料科技, 2025, 53(08):152-157.
- [2] 傅陈超, 薛平, 张润, 等. 推进剂代料用双螺杆挤出机塑化加工过程的模拟与验证 [J]. 固体火箭技术, 2025, 48(05):748-756.
- [3] 何浪, 刘江林, 杨冬冬, 等. 双螺杆挤出机螺杆组合对碳纤维增强聚酰胺 6 均匀性的影响 [J]. 中国塑料, 2025, 39(06):14-18.
- [4] 程媛媛, 黄志刚, 徐珍, 等. 非等温环境中异向双螺杆挤出机不同接触状态对聚乳酸流动影响的仿真 [J]. 中国塑料, 2025, 39(06):54-58.
- [5] 高坤, 闫伟, 刘志刚, 等. 基于离散元法双螺杆挤出机磨损特性分析 [J]. 中国塑料, 2023, 37(11):135-140.
- [6] 张一明, 黄志刚, 徐珍, 等. 螺距变化对异向双螺杆挤出机流场影响的仿真分析 [J]. 食品与机械, 2023, 39(10):93-99.
- [7] 陈思萌, 金志明, 薛平, 等. 锥形双螺杆挤出机熔体输送段相似放大设计 [J]. 塑料, 2022, 50(06):93-97.

基于 BIM+GIS 技术的复杂地形 道路工程勘察设计一体化研究

温少雄¹, 陈秀青²

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;

2. 中国雅江集团有限公司, 西藏 林芝 860100)

摘要 为提升道路工程在复杂地形环境中的设计科学性与勘察精度, 研究融合基于 BIM (建筑信息模型) 技术的构件信息模型与 GIS (地理信息系统) 技术的空间分析能力的 BIM+GIS 技术的协同应用方法, 构建一体化的地形建模与设计优化流程, 以应对复杂地形条件下道路工程面临的地形起伏大及空间环境复杂等挑战, 弥补传统勘察设计手段在数据协同与设计效率方面存在的局限, 旨在为复杂地形道路工程提供更高效率的勘察设计参考, 进而促进数字化基础设施建设。

关键词 复杂地形; 道路工程; BIM; GIS

中图分类号: TU19; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.006

0 引言

在复杂地形区域道路建设工程的选线设计、结构布局及施工组织等方面存在较高难度且常受地貌特征、生态环境及空间约束等多重因素影响, 传统以二维图形表达为主的勘察设计流程难以全面反映三维地形环境与构造要素之间的关系, 进一步限制设计精度和工程决策效率。基于精细化构件建模且具备较强信息集成与可视化能力的 BIM 技术, 与擅长多源空间数据管理与分析的 GIS 技术深度融合, 为复杂地形道路工程提供新的技术路径。围绕 BIM+GIS 融合应用的理论基础与关键方法开展研究并探索面向全生命周期的一体化勘察设计流程, 对推动道路工程数字化转型和智能化发展具有重要意义。

1 BIM+GIS 技术基础

1.1 BIM 数据特征

BIM 技术是一种以数字化方式表达建筑设施物理和功能特征的技术体系, 其核心是通过参数化构件构建三维模型, 在统一的信息环境中集成结构构件、材料属性、施工工艺和维护信息等多维数据。BIM 模型的数据具有高精度和强关联性。例如: 在道路工程中, 不同路段的结构参数、坡度设计与构造节点都被嵌入在模型构件中, 与几何形态实现一体化表达。BIM 技术以 IFC 为主的开放数据格式支持跨平台交换, 便于设计、施工与运维阶段的信息传递。相比传统二维图纸表达,

BIM 模型的数据更新机制更灵活, 构件之间的逻辑依赖关系可以实现自动联动与动态反馈, 例如当桥梁基础标高发生调整时, 上部结构的受力计算结果可同步变化, 有效支持方案比选与工程决策。BIM 技术在道路工程中的应用还体现在施工阶段的资源调度与进度管理, 其数据结构适合与施工管理系统集成, 实现工期模拟与工程量统计的联动控制。

1.2 GIS 空间特征

GIS 技术可对多源空间信息进行采集、存储、管理、分析与可视化表达, 并广泛应用于地形分析、土地利用规划与空间决策支持等领域, 在道路工程场景中能集成遥感影像、数字高程模型、地质调查结果与环境监测数据为工程选址与路线分析提供空间基础; 通常采用矢量与栅格两种基本形式, 矢量数据用于描述点、线、面等几何实体与其属性, 栅格数据用于表示如高程、坡度与植被覆盖这类连续空间变化特征的数据。在实际应用中, 凭借分辨率为 5 米或 10 米等级的 DEM 数据模型较准确地还原山地道路沿线高差变化趋势以进行地形坡度分析。在一项西南山区道路可行性研究中, 凭借其空间数据处理能力对比分析 5 条不同走向的路线方案显著提升选线效率。另外, GIS 技术还具有将来自无人机航测、激光扫描和地质勘查的异构数据统一至地理空间框架下, 为后续 BIM 建模提供精准的空间参考的坐标系统转换与多源数据融合能力。

1.3 融合关键技术

BIM 技术与 GIS 技术融合需实现模型级信息无缝对接及空间级表达协同共享,两种技术虽在数据模型、坐标体系与表达粒度等方面存在本质差异,但可通过多种关键技术实现融合协同。以数据格式转换为基础环节,目前常以 CityGML 与 IFC 互转接口为桥梁,将 GIS 中具空间定位能力的建筑物模型转化为 BIM 中支持构件属性管理的格式,反向转换则要保留坐标与语义信息。在坐标系统对齐上,GIS 技术采用大地坐标系如 WGS-84 或 CGCS2000,而 BIM 技术通常基于相对坐标或局部工程坐标系,需建立空间参考基准并引入坐标转换模型,以实现模型在同一空间范围的正确定位,如在道路与隧道一体化工程构建融合模型时,要对隧道起点桩号进行地理定位,并将 BIM 构件沿路线方向投影匹配,把误差控制在厘米级别以内。语义映射与属性继承作为融合重点,需建立 BIM 构件属性与 GIS 图层属性对应关系,并设计规则引擎实现属性同步与逻辑判断。可视化技术在融合中也起重要作用,如基于 WebGL 的浏览器可视化平台可加载三维 BIM 模型与 GIS 底图,支持多尺度与多角度数据展示和交互分析。当前在城市基础设施与线性工程中,已有多个平台集成 BIM 技术与 GIS 技术双引擎,如某交通管理系统集成路网 GIS 数据与交通设施 BIM 模型,支持路径分析、设施巡检与养护调度一体化运行,显著提升工程信息化水平^[1]。

2 复杂地形道路勘察应用

2.1 地形数据采集

在复杂地形区域的道路勘察中,因对地形数据精度与覆盖范围有较高要求,所以需结合无人机航测、激光雷达扫描、GNSS 定位测量和遥感影像解译等多种数据源进行综合采集,以支撑高质量建模与分析。其中,激光雷达因具备穿透植被的能力,适合在密林或高差起伏显著的区域获取高密度点云数据。例如:在一个典型山区道路项目中,使用固定翼无人机搭载激光扫描仪获取的原始点云数据量超 2 亿个点,平均点密度约为 12 点每平方米。GNSS 测量用于关键控制点的精化定位,将采集误差控制在 2 厘米以内,可作为地形模型的空间参考。遥感数据补充提供宏观地貌信息与地表覆盖情况,结合影像分辨率在 0.5 米等级的卫星数据,可辅助判断滑坡体分布与地质构造走向。在数据预处理阶段,需对采集的原始点云进行噪声剔除、分类分层与表面重构操作,以生成适合 BIM 建模与 GIS 分析的数字地形模型。

2.2 勘察模型构建

在地形数据采集完成后,综合地形表面、地质信息与水文条件构建道路工程勘察模型,形成具有空间精度与信息深度的三维表达体系;基于 BIM 平台构建的勘察模型,除包含地形表面轮廓外,还集成岩土分层、地下水位线与钻孔勘察记录等属性信息;模型中每一段路线具备桩号、高程、结构布置与周边环境约束等参数,以实现信息贯通与分析支撑。在地质体构建方面,常采用三维插值方法对钻孔数据进行空间还原,例如基于反距离权重法的层面插值表达如下:

$$Z(x, y) + \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (1)$$

其中 $Z(x, y)$ 为插值点的高程值, z_i 为第 i 个已知点高程, d_i 为插值点与第 i 个点的平面距离, p 为幂次因子。适用于构造变化平缓区域层面构建、在高差剧烈地段需结合地质剖面图人工校核调整的该方法,对应的一个典型勘察模型通常包含 20 余层结构属性图层且总数据量超过 800 MB,构建完成后的模型需与路线方案同步调整以反映地形、地质与设计的互动关系,从而为工程决策与设计优化提供真实可靠的空间支撑。

2.3 信息集成分析

在复杂地形道路勘察过程中,实现 BIM 技术与 GIS 技术协同应用的核心环节——信息集成分析,需对多源数据进行统一管理并关联计算;GIS 平台提供的多层次空间分析功能,可对道路拟合线与地质断裂带、水系分布、土地利用红线等关键要素进行叠加分析,以识别潜在冲突区域与高风险段落;BIM 模型中的构件信息与 GIS 图层的语义关联,如桥墩基础位置信息与地下水位数据的空间匹配,可评估浸水风险与施工可行性。在一个典型山区干线道路项目中,通过集成分析识别出超 30 处滑坡隐患点,其中 8 处位于初步路线缓坡段,为路线走向调整提供关键依据。信息集成包含的高程差分析、剖面生成与断面稳定性评估等功能,在复杂边坡区域可自动生成典型断面并预判坡面失稳角^[2]。

3 道路设计一体化应用

3.1 线形优化设计

在复杂地形条件下,将满足通行安全与行驶舒适性要求,兼顾地形适应性、用地控制与工程造价多重因素融入道路线形设计,而 BIM 技术与 GIS 技术集成环境为线形方案的快速生成与智能优化提供技术基础。

在GIS环境中分析不同地貌类型空间分布并确定路线走廊合理范围后,于BIM平台完成路线中心线、高程线与纵横断面建模;通过三维地形模型与地质信息的可视化展示让设计过程更直观,使设计人员在设计过程中实时获取某一桩号位置的高程值、边坡坡度与周边地质构造信息以避免路线穿越不良地段。例如:在某山区道路项目,把初始方案最大纵坡从7.2度优化调整为5.4度,累计减少桥梁段长度约310米,降低填方量12 000立方米以及工程总投资约960万元。线形优化依靠路径分析与多目标评价模型,让设计人员在可行性、安全性、环境影响与经济指标间建立权重体系,形成综合评价结果,作为决策依据^[3]。

3.2 三维协同设计

将不同专业设计数据整合至统一模型并在可视化平台进行动态调整与信息反馈,此为BIM技术与GIS技术融合应用的核心阶段之一——三维协同设计的关键;道路工程涉及路线、桥梁、隧道、排水、防护等多专业,传统二维图形设计模式在信息传递与变更响应上存在滞后,而三维协同模型能实现多专业构件在空间位置的精确协调。BIM平台对设计构件设定分类编码与空间属性,结合GIS系统空间索引能力,可实现对某一结构单元周边水文、地质与交通影响的快速分析。设计过程中任一构件调整会引起关联构件属性与空间位置自动更新,在协同平台可对比历史版本、评估变更影响范围与工程量变化情况。例如:在某市政干道工程中,三维协同设计模型集成路线中心线、20座中小桥梁、6座隧道及沿线附属设施,模型总数据量达1.6 GB;项目团队通过统一的BIM-GIS协同平台在线评审设计成果,减少纸质图纸交流环节,使设计审查周期缩短5天、反馈修正次数减少至3轮以内,有效提高设计效率与成果一致性^[4]。

3.3 工程量分析

在复杂地形条件下,道路工程的工程量具有高度不确定性,构造物布设位置、边坡长度与地基处理方案的调整都将直接影响工程投入与施工计划。BIM模型中构件具备属性数据与空间几何信息,可直接从模型中提取土方量、构件数量与材料用量。结合GIS的地形分析能力可进一步识别填挖交界线与边坡变化趋势,为工程量统计提供更具空间精度的支撑。例如:在某山区快速通道项目中,应用BIM与GIS融合技术对初步设计方案进行工程量分析,结果如表1所示。

表1 工程量统计与对比

项目类别	初步方案 工程量	优化方案 工程量	差值
路基挖方(土方)(m ³)	184 200	161 700	-22 500
路基填方(土方)(m ³)	136 800	124 100	-12 700
桥梁结构段(延米)	1 290	980	-310
挡土墙(延米)	450	580	130
路基占地面积(m ²)	93 200	86 100	-7 100

从表1中可以看出,在优化方案中,路基挖方量减少22 500立方米,填方量减少12 700立方米,桥梁总长度缩短310米,相应地挡土墙长度有所增加,用于适应路线坡脚变化并减少桥梁工程投入。占地面积减少7 100平方米,有助于节约用地与降低征地成本。这种基于模型的工程量分析方式不仅能提供静态数量数据,还能根据设计调整动态更新结果,为设计优化与投资控制提供数据支撑。工程量分析结果还可导入成本估算系统,形成多版本造价对比报告,为决策提供更精细的依据^[5]。

4 结束语

本研究围绕复杂地形条件下道路工程勘察与设计一体化问题,探讨BIM与GIS融合关键技术路径并构建面向三维协同建模与分析体系,实现地形数据采集、勘察模型构建、路线优化与工程量分析等环节流程贯通与数据协同。研究成果表明,BIM技术与GIS技术深度集成可提升地形适应性分析精度、增强设计阶段动态响应能力并推动道路工程向数字化、精细化与智能化方向发展。相关方法对提升复杂地形道路项目技术决策水平和工程实施效率具有积极的意义。

参考文献:

- [1] 郭仲明,陈东桥. BIM技术在复杂山地场地规划与设计中的应用[J]. 山西建筑,2025,51(20):54-57.
- [2] 陈钰,黄旖闻. BIM技术在复杂地形污水处理厂中的应用与实践[J]. 工程建设与设计,2025(16):120-122.
- [3] 张翼. 智慧施工技术在复杂地形公路工程中的应用探索[J]. 现代工程科技,2025,04(04):101-104.
- [4] 刘日煌,周泽勋. 基于三维GIS的输电线路特高压张力架设仿真系统[J]. 自动化应用,2024,65(24):24-26,41.
- [5] 全强,张伟杰,尹航. 基于GIS的废弃矿坑修复工程量计算方法研究[J]. 内蒙古水利,2023(01):12-14.

电气自动化在智能电网中的关键技术与应用

黄颖

(四川天府天新能源工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 在电网运行风险不断增加的背景下, 传统调控体系在数据响应速度、故障精准定位与设备健康评估等方面难以适应多源并存的运行格局。基于此, 本文围绕电气自动化在智能电网中的感知量测、通信联动、协同调度与预测运维展开讨论, 建立面向全流程的技术应用路径, 旨在对提升电网对多源数据的采集能力、强化区域电能供需的动态平衡、缩短故障处理周期有所裨益, 进而为创建高效的现代智能电网提供实践方案参考。

关键词 电气自动化; 智能电网; 信息通信技术; 分布式监测技术

中图分类号: TM92; TP29

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.007

0 引言

电气自动化技术可实时采集电力设备运行状态, 使电网具备实时感知状态、自主调整运行参数及快速响应异常的能力, 为建立自适应的智能电网奠定技术基础。随着能源结构的加速转型, 电气自动化技术不仅能够支撑电力流与信息流的协同运行, 还可以推动调度体系由集中控制迈向分层协同, 为电力系统运行提供精细化管理。因此, 探讨电气自动化在智能电网中的关键技术与应用, 对提升电网运行质量具有重要意义。

1 电气自动化技术在智能电网中的应用优势

电网在运行过程中常面临负荷波动、设备老化、故障传播等风险, 引入自动化技术能够建立快速响应机制, 使电网具备自适应调节能力, 从而提升整体运行稳定性。依托自动化调度系统、实时保护装置与电压频率控制装置, 电网可在突发负荷变化、局部故障或极端天气条件下迅速调整运行参数, 避免大面积停电, 保持电力供应连续可靠。在电网中安装监控设备以及各类传感器, 可以实时采集电网运行过程中产生的数据, 并借助高速的通信网络, 将数据快速传输至电网监控中心。电网监控中心接收数据信息后, 便会采用数据分析技术实时分析这些数据, 从而对电网运行状态进行全面监控。通过对电网进行实时监测, 并实时分析电网负荷情况, 该技术可对发电机组运行方式以及出力计划做出实时调整, 从而满足各时间段电力需求^[1]。与此同时, 电气自动化技术能够结合新能源发电情况, 制定并网控制智能化策略, 实现新能源高效利用。

2 电气自动化在智能电网中的关键技术

2.1 智能感知与量测技术

智能感知与量测技术是智能电网实时获取电压、电流、温度等数据的基础, 技术人员部署智能传感器、PMU 相量测量装置, 使电力系统能够以高精度采集运行信息, 并支持多源数据同步回传。感知系统不仅覆盖配电设备, 还延伸至新能源接入端与用户侧负荷端, 实现全网数据一体化采集。通过对量测结果进行实时解析, 系统可快速识别电力波动, 为故障预判与能量调度提供可靠依据。该技术的应用可以强化电网运行透明度, 使调控系统具备动态监测能力, 为后续控制决策奠定数据基础。

2.2 高速可靠的信息通信技术

高速可靠的信息通信技术是连接智能电网各个组成部分的“神经网络”, 是实现数据交互与指令下达的生命线。通过构建一个集成多种通信方式的混合网络, 确保海量感知数据能够从数以亿计的终端设备低延时、安全地传输到控制中心, 同时将控制中心的决策指令迅速、准确地送达执行单元。该技术可以打通信息孤岛, 实现发电、电网、用户之间的双向互动, 为智能电网的协同运行提供坚实的通信保障。

2.3 分布式监测技术

分布式监测技术是将分布式技术与监控系统有机结合所形成的创新应用, 能够为智能电网运行的安全性和稳定性提供有力的技术支撑。该技术是将分布式监测装置密集地安置在电网中, 对每一个关键节点开展实时监测, 使监测结果更加可靠、准确。既往使用的监控系统一般会出现数据延迟、监测盲区等多种问

题,而分布式监测技术则能够克服这些问题^[2]。此外,该系统一旦发现故障问题,将会自动启动隔离故障设备、调整电网运行方式等故障处理机制,从而有效避免故障范围扩大,确保电网运行的安全与稳定。

3 电气自动化技术在智能电网中的应用策略

3.1 构建实时监测控制链路,保障电网安全运行

电网结构具有多节点、多支路及负荷波动明显等特征,如果缺乏实时数据支撑,调控动作可能滞后,进而引发电压越限、潮流异常等风险。技术人员依托传感终端、通信网络与自动控制模块,搭建覆盖各个环节的在线监测系统,使设备温度、电流、电压能够被持续采集。同时,通过控制中心设置信号融合执行单元,完成对断路器开关站的远程联动,实现自动化响应。依托该链路,电网不再依赖人工排查异常,能够在故障生成初期完成精准定位,使电气自动化技术在电网安全运行中发挥实时监测能力^[3]。

在搭建实时监测控制链路的过程中,技术人员需从监测点布设、数据采集路径规划与联动作业配置三方面展开。在输电线路与变电站布设感知终端,实时记录电流、电压和设备温度等信号。感知终端将数据传输至区域网关,再通过光纤通道集中传输至调控中心,使设备状态呈现连续数字化轨迹。这种链路不仅可记录关键值,还可识别变化趋势。当线路电阻升高或电流波动异常时,系统会自动增加采样频率,使异常状态不被延迟识别。技术人员在控制中心设置分析模块,对运行曲线构建阈值模型。例如:线路电流逼近额定容量时,系统自动调整负荷分配;变压器油温升高时,系统联动降温措施;出现短路信号时,保护装置自动执行断路器分段动作,隔离事故点。同时,技术人员搭建跨区域调度接口,使潮流数据能够实时传递至上级平台,形成多层次协同调控链路。在负荷波动剧烈时,系统自动发起数据上报并触发调度指令,降低局部压力。根据上述实施路径,实时监测控制链路不仅能够实现数据采集的目标,还能推动电网决策从人工干预转向自动化执行,使电气自动化在智能电网运行中发挥高可靠性。

3.2 优化分布调度协同模型,平衡区域电能供需

电气自动化系统在智能电网中承担实时监测、数据处理任务,若调度模型仍沿用集中式指令模式,区域间负荷波动无法及时响应,易出现局部过载与远端冗余并存的问题。构建协同模型,将各变电站、分布式电源及储能设备视作可交互节点,使调度决策由单向分配转向并行协同,在电能分配指令下达前完成多

源信息比对。协同机制的建立,使负荷调整具有前置判断能力,能够在功率需求上升时提前安排支援,为智能电网的稳定运行提供动态保障。

技术人员在具体实践中,可将区域电网运行数据汇集到同一自动化平台,利用采集终端获取负荷变化、分布电源功率曲线与储能剩余容量等信息。系统在识别负荷增长趋势后,技术人员通过算法为不同节点设定响应顺序,使基础电源维持稳定输出,储能设备承担短时调节任务,分布式新能源在气象条件允许的前提下提供增量功率。此过程以频率和电压偏差为触发参数,平台在执行前自动校验线路裕度,防止瞬时潮流冲击造成局部电压波动。当区域出现电量过剩时,技术人员让系统降低并网功率,并将冗余电量导入储能设备;若储能接近满载,系统将能量转移至需求较低的相邻分区,使能源流动顺畅。调度结束后,平台记录各节点响应时间、功率变化幅度与线路损耗,技术人员根据这些数据修订模型参数,使协同调度策略更加贴合实际运行特征。系统按排序执行调电任务,在路径出现异常时自动切换备用线路,并向调度中心反馈告警信息,使区域电网具备自恢复能力。经过多次迭代,电气自动化技术可以在智能电网中真正发挥协同调度价值,为区域电能供需平衡提供稳定支撑。

3.3 推行自动故障隔离机制,缩短异常定位周期

传统电网依靠人工巡检,故障定位环节存在反馈慢、排查范围广的问题,导致电力恢复时间延长。智能电网引入自动隔离机制后,技术人员可借助采集装置实时获取线路电流、电压及负荷数据,通过自动识别异常特征来快速锁定故障点。同时,将保护装置、区段开关与自动重合闸系统联动,使故障区段与正常供电区段实现快速分离,减少波及面积。该技术应用能够让系统在更短时长内恢复供电,提高供电稳定性,并为后续的精准检修保留明确目标区段^[4]。

技术人员通常从配电线路的数据采集链路入手,在主要节点部署智能开关、在线监测装置及配电终端,使系统能够实时捕捉电流变化。当某地10 kV配电线路出现短路时,监测装置在电流突增瞬间记录异常,并将数据上传至控制中心。系统依据异常波形自动判断故障区段,并触发就近节点开关动作,实现故障段落与非故障区段的快速分离,使停电区域锁定在最小范围,保证其他线路持续供电,缩短用户体验的中断时间。技术人员随后利用系统生成的故障链路图核对保护动作是否精确,若出现隔离范围过大或延时冗余,便调整整定参数,使隔离行为更贴合线路特性。处置完成后,技术人员按系统记录的波形数据分析故障成

因,并根据风险等级安排巡检或更换方案,使处理过程从一次性排查转向预防性维护。在恢复电力时,技术人员触发自动重合闸逻辑,系统先尝试短时恢复,若仍存在异常,则保持隔离状态直至故障清除。上述技术应用,能够让技术人员在应对突发故障时不再依赖大范围断电排查,提升供电的连续性。

3.4 规范多源数据采集接口,提升跨网协同能力

数据来源不同的设备,各系统协议差异较大,会造成数据解析困难、传输延迟增大,难以形成贯通全网的数据链路。技术人员制定统一的采集接口规范,为数据传输设定统一标准,使边缘设备发送的数据能够在主站系统中稳定解析。为强化跨网协同能力,技术人员将采集接口与分布式数据总线结合,使配电侧与调度侧在共享同一信息规则基础上实现并行处理。该做法能够增强智能电网在不同设备上的联动效率,使电气自动化技术应用场景具备更高响应速度,契合系统高效运行目标。

技术人员制定多源数据采集接口标准,以配电站自动化改造工程为实践载体,将不同厂商的终端设备统一纳入采集管理体系。在调研阶段,技术人员对变压器监测终端、馈线保护装置及储能系统管理模块进行协议解析比对,梳理出关键差别。在明确差异后,技术人员以电气自动化系统平台为核心,搭建接口适配层,将数据统一转换成兼容性较强的数据结构,使配电自动化主站能够稳定识别信息。为提升跨网协同能力,技术人员将采集接口对接调度云平台,使配电数据在本地存储的同时具备跨区域共享属性。当风电出力波动较大时,调度侧能够依托统一接口快速获取电压,及时调整有功无功分配,使新能源接入不再依赖单一系统推送。在负荷高峰时段,技术人员基于统一接口实时追踪各区段线路温度变化和电缆载流趋势,利用系统生成的调节建议为运维人员提供调控依据,实现分布调度与终端监测的联动。该实践强化电气自动化技术在智能电网中的信息支撑能力,使跨网数据能够在统一接口规范下形成闭环,为构建灵活、高效的智能电能管理系统提供技术基础。

3.5 构建预测运维分析体系,降低关键设备风险

关键设备在长期运行中易受温升、振动、电流波动等因素影响,传统定期检修方式难以及时识别潜在异常,使状态评估滞后,增加停电故障。引入预测分析体系,可利用实时监测数据与历史运行记录建立多维特征数据库,使电气自动化技术在不同环节发挥作用,并且运用动态阈值比对判断设备劣化趋势,将检

修策略从时间驱动转向状态驱动^[5]。该体系能够强化资源配置效率,促使设备管理更贴近实际负荷特点,降低突发性故障概率,实现电网运行的连续稳定。

开展预测运维分析体系建设时,技术人员可先为关键变压器、开关柜及输电线路配置在线监测装置,采集相关数据,并将采集链路接入电气自动化监控平台。数据在进入系统后,以特征标签方式记录不同要素,为后续风险分析提供基础支持。技术人员根据智能电网不同节点负荷特性,设置趋势分析模块,使系统能够从短周期波动、季节性变化与极端工况中提取异常模式。若变压器绕组温度在夜间负载较低阶段仍持续升高,系统会触发模型比对,判断是否存在散热结构老化或绝缘性能下降风险。技术人员在模型构建过程中利用分类算法将设备状态划分为正常、轻度劣化与高度预警三级状态,平台依据状态自动生成检修建议,使作业安排更加精准。在检修计划制定环节,将任务分为紧急处置、周期性维护与预测性替换三类,为工程队提供排期依据。设备在修复后再次纳入监测链路,根据趋势对比确认隐患是否消除,实现闭环管理。这样的设计不仅能够降低突发性故障风险,也可以使设备运行状态更加透明,为电力系统安全稳定提供长期支撑。

4 结束语

技术人员在智能电网建设中通过部署智能感知装置、构建高速通信链路、完善协同调度模型以及推行预测运维体系,使电气自动化技术贯穿状态感知与设备管理全流程。这样不仅能够提升电网对多源数据的处理能力,缩短异常响应时间,还能让电力系统在负荷波动下保持稳定运行,实现更高水平的安全性。未来,技术人员将继续结合人工智能,拓展自动化应用深度,构建更加高效的智能电网运行体系,为能源结构优化和电力行业现代化提供持续动力。

参考文献:

- [1] 彭浩哲.智能电网中电气工程自动化技术研究[J].电力设备管理,2025(16):205-207.
- [2] 宰德城.人工智能与电气自动化技术创新[J].智慧中国,2025(08):60-61.
- [3] 张明.电气自动化技术在智能电网中的创新应用研究[J].电子元器件与信息技术,2025,09(08):230-232,236.
- [4] 陈彬琦,刘钊,张杰.智能电网中电气自动化技术的实时监控与故障诊断技术[J].自动化博览,2025,42(03):70-73.
- [5] 张宸睿.智能电网环境下的电气自动化设备协调控制研究[J].自动化应用,2025,66(02):147-149.

火电厂锅炉排烟温度高的智能诊断与应对策略

栗凯

(国能蚌埠发电有限公司, 安徽 蚌埠 233000)

摘要 在火电厂锅炉运行中, 排烟热损失占总热损失的60%~70%, 而排烟温度是决定排烟热损失的核心指标。随着智能化技术在电力行业中的应用, 构建智能诊断系统并配套精准应对策略, 成为降低排烟温度、提升锅炉效率的关键。本文分析了智能诊断系统的构建要点, 包括数据采集与预处理、诊断模型构建; 并梳理了排烟温度高的典型原因, 如受热面积灰、系统漏风等; 针对排烟温度高提出精准应对策略, 以期为火电厂节能降耗提供实践方案参考。

关键词 火电厂; 锅炉; 排烟温度; 排烟热损失; 智能诊断

中图分类号: TK22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.008

0 引言

火电厂锅炉在能量转换过程中, 燃料在炉膛内燃烧产生的高温烟气, 经空气预热器、省煤器等受热面回收部分热量后, 从烟道排出。通常排烟温度在120~160℃之间, 部分工况下可达180℃以上, 这些高温烟气携带的热量未被有效利用, 形成排烟热损失。相关研究表明, 排烟温度每升高10℃, 排烟热损失约增加1%, 对应锅炉热效率降低0.5%~0.8%, 年多耗标煤可达数千吨。长期排烟温度偏高, 不仅造成能源浪费, 还会加速烟道腐蚀、降低脱硝催化剂活性, 威胁锅炉系统安全。传统依赖人工经验判断排烟温度高原因的方式, 存在响应慢、精度低的问题。随着“双碳”目标推进, 火电厂对节能要求愈发严格, 引入智能化技术构建诊断系统, 结合精准策略降低排烟温度, 成为必然选择。

1 火电厂锅炉排烟温度高智能诊断系统构建

1.1 数据采集与预处理

智能诊断的基础是高质量数据, 需构建覆盖锅炉全系统的数据采集网络, 并通过预处理消除干扰。首先, 在数据采集环节, 需按“全维度、高频次”原则布置设备。烟气路径上, 空气预热器进出口、脱硫塔入口安装高频热电偶与激光气体分析仪, 采集排烟温度、 O_2 、CO浓度; 锅炉本体上, 炉膛水冷壁、省煤器部署红外热成像仪与振动传感器, 监测受热面温度分布与设备振动; 燃料系统中, 煤仓入口设微波水分仪, 磨煤机出口装煤粉粒度仪, 获取煤质与煤粉参数; 环境监测则通过厂区温湿度传感器、风速仪, 记录外部影响因素。其次, 采集设备需适应火电厂高温、高粉尘环境, 传

感器外壳用316L不锈钢, 图像设备配自动防尘镜片^[1]。数据传输采用“边缘+云端”架构: 边缘端通过工业以太网汇总数据, 过滤无效信号后, 经5G传输至云端数据中心, 确保实时性与稳定性。最后, 数据预处理分三步: 一是清洗, 对缺失值用相邻设备数据融合填补, 异常值通过 3σ 原则剔除, 再结合负荷变化修正; 二是归一化, 用Min-Max法将数据压缩至 $[0, 1]$ 区间, 消除量级差异; 三是特征提取, 从温度序列中提取均值、变化率, 从热成像图中提取积灰面积, 形成结构化数据集, 为建模奠定基础。

1.2 诊断模型构建

诊断模型是智能诊断系统的核心, 需结合数据特点选用合适算法, 通过训练优化提升精度, 如图1所示。首先, 算法选型采用“多模型协同”模式。随机森林算法适用于多特征分析, 能筛选出影响排烟温度的关键因素, 抗干扰能力强; 支持向量机在小样本场景下表现优异, 可识别轻微结渣等小众故障; 深度学习网络中, 长短期记忆网络(LSTM)用于预测排烟温度, 卷积神经网络(CNN)结合LSTM构建故障诊断模型, 挖掘数据深层规律。其次, 模型训练需科学流程。收集3~5年历史数据, 按7:3划分为训练集与测试集; 再用交叉验证优化参数, 如随机森林的决策树数量、LSTM的学习率; 通过准确率、F1分数评估, 确保故障识别准确率不低于90%^[2]。最后, 训练完成的模型具备两大功能。一是预测, 基于实时数据输出未来1~2小时排烟温度, 超阈值则预警; 二是诊断, 温度异常时, 匹配故障特征库, 输出原因与置信度, 如“空气预热器积灰”, 为后续应对提供方向。

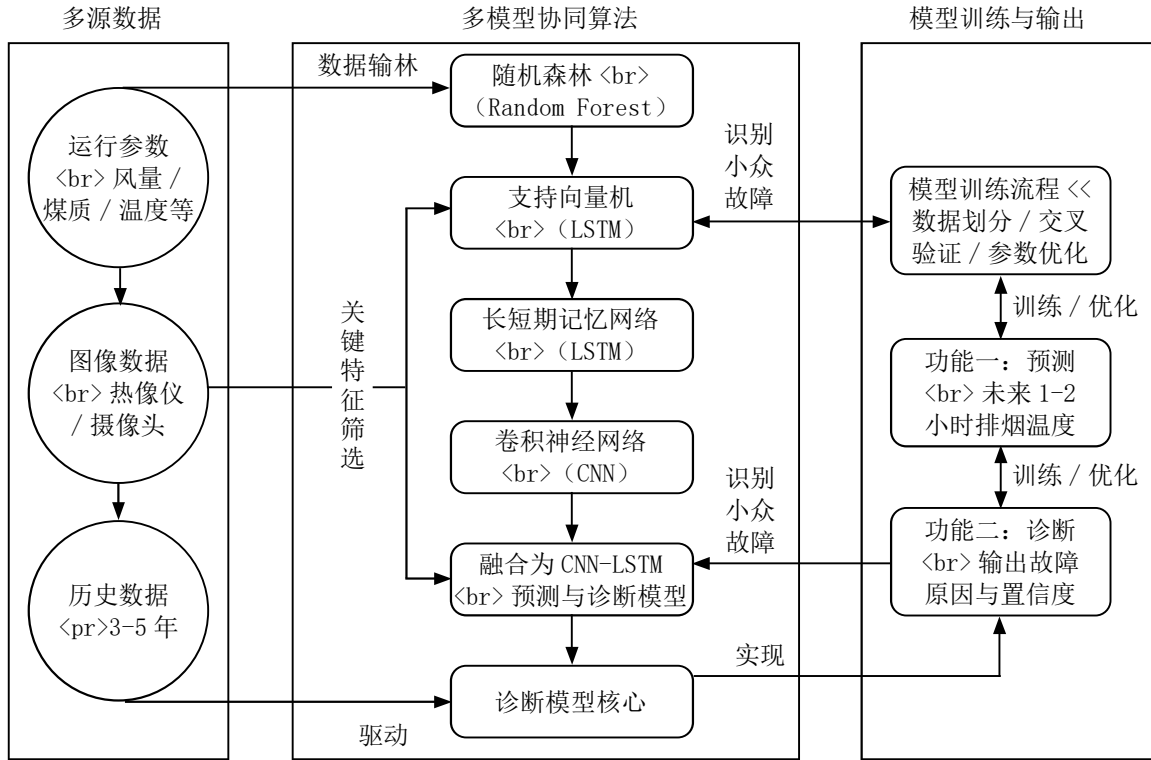


图 1 锅炉智能诊断技术模型架构图

2 火电厂锅炉排烟温度高的原因分析

2.1 受热面积灰与结渣

受热面是热量回收关键，积灰或结渣会增大传热热阻。燃料燃烧产生的飞灰附着在省煤器、空气预热器表面，形成积灰层，其导热系数仅为金属的 $1/50 \sim 1/100$ ，阻碍热量传递。数据显示，积灰厚度每增加 1 mm ，排烟温度升高 $5 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此外，水冷壁结渣同样影响显著。炉膛温度过高或煤种灰分熔点低时，粘性灰渣附着水冷壁，形成结渣层，降低吸热能力，导致炉膛出口烟温升高，进而推高排烟温度。结渣脱落还可能堵塞烟道，加剧温度异常^[3]。

2.2 锅炉系统漏风

系统漏风是排烟温度高的常见原因，冷空气未经燃烧进入炉膛或烟道，产生三重影响：一是降低炉膛温度，削弱燃烧强度，减少热量生成；二是增加烟气容积，加快烟气流速，缩短换热时间；三是根据漏风系数关系式 $\alpha = \Delta\alpha + \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_3$ （ α 为总漏风系数， $\Delta\alpha$ 为空气预热器漏风系数， $\Delta\alpha_1$ 为炉膛漏风系数、 $\Delta\alpha_2$ 为制粉系统漏风系数、 $\Delta\alpha_3$ 为烟道漏风系数）， $\Delta\alpha_1 \sim \Delta\alpha_3$ 增大时，总漏风系数（ α ）增加，导致空气预热器换热效率下降，排烟温度升高。

2.3 燃烧配风不合理

一、二次风配比不当会直接导致排烟温度升高。一次风需满足煤粉初始燃烧需求，风量过大则着火点推迟，燃烧延长，火焰中心上移，炉膛出口烟温升高；风量过小则燃烧缺氧，未燃尽碳颗粒随烟气排出，释放热量推高排烟温度。此外，二次风混入时机与风量同样关键。提前混入降低炉膛温度，推迟混入导致后期缺氧；风量过大增加烟气量，过小则燃烧不充分，均会造成排烟温度异常。

2.4 燃料煤质波动

煤质参数波动对排烟温度影响显著：水分过高时，燃烧需消耗热量蒸发水分，降低炉膛温度，同时增加烟气容积，排烟温度升高；灰分过高则燃料热值降低，需增加耗煤量，烟气量增大，温度上升；挥发分过低导致煤粉着火困难，燃烧延长，火焰中心上移，炉膛出口与排烟温度同步升高。

3 火电厂锅炉排烟温度高精准应对策略

3.1 强化受热面清洁维护

针对积灰与结渣，需建立“动态清洁+定期维护”机制。首先，优化吹灰策略：根据智能诊断模型输出的积灰程度，调整吹灰频率，空气预热器、省煤器积灰中等时，吹灰间隔从 4 小时缩至 2 小时；负荷低于

50%或燃烧不稳定时暂停吹灰，避免影响工况。吹灰次序严格遵循“炉膛→烟道尾部→对侧”，确保效果均匀^[4]。其次，加强设备维护：定期检查吹灰器喷嘴磨损、蒸汽管路泄漏，及时更换部件；锅炉停运期间，用高压水射流清洗水冷壁结渣。此外，受热面涂敷远红外节能涂料，可提高辐射吸收率，增强传热效率，实践显示涂敷后排烟温度降低5~8℃。

3.2 治理系统漏风

漏风治理需严格遵循“精准定位+密封修复”的两步原则，确保从根源解决漏风问题。在漏风定位阶段，依托智能诊断系统的压力监测模块与数据分析能力，通过对比烟道各段实际压力与设计压力的偏差，结合烟气流量变化规律，精准锁定漏风点位置与漏风率。在密封修复阶段，针对不同漏风部位采用差异化技术方案：炉膛炉门处加装充气式密封胶条，通过接入压缩空气使胶条膨胀，紧密贴合炉门与炉体间隙，避免冷空气渗入；空气预热器动静间隙处更换柔性石墨密封片，利用石墨的耐高温与弹性特性，将间隙从原来的5mm缩小至1mm以内，减少烟气与空气串流；烟道法兰连接部位拆除老化密封垫，更换为耐300℃以上高温的陶瓷纤维密封垫，同时对法兰螺栓进行均匀紧固，确保密封面贴合紧密；炉底干式排渣系统出渣口则布置环形热风风帘，通过热二次风管道引入温度约300℃的热风，在出渣口形成气幕，隔绝外界冷空气进入炉膛。修复完成后，需通过智能诊断系统持续监测漏风率变化，确保各部位漏风率均控制在设计值（通常≤3%）以下，形成“定位—修复—验证”的闭环治理流程^[5]。

3.3 优化燃烧配风

燃烧配风优化需以智能诊断系统为核心支撑，结合实时运行数据实现精准调控，避免因配风不当导致排烟温度升高。首先，在数据监测层面。智能诊断系统通过高频采集炉膛出口O₂浓度、CO浓度及炉膛温度场分布数据，每10秒生成一次配风优化建议，为调整提供依据。动态调整一、二次风时，需分场景精准控制：针对一次风，根据模型输出的煤粉输送阻力与初始燃烧状态，将风量控制在“既能保证煤粉均匀输送，又能满足挥发分快速燃烧”的区间，通常一次风率维持在20%~25%；二次风则按“按需补充”原则，通过调节各层二次风挡板开度，将炉膛出口O₂浓度稳定在4.5%~5.5%，既避免过量空气带走热量，又防止缺氧导致不完全燃烧。其次，在优化配风时机方面。依托炉膛红外测温仪监测的温度场数据，若发现火焰中心上移，则延迟二次风混入时间；若火焰中心下移，则提前混入二次风。同时，对传统燃烧器进行改造，更

换为低氮旋流燃烧器，通过优化旋流强度，强化空气与煤粉的混合效果，使火焰中心稳定在炉膛中部区域，减少炉膛出口烟温波动。

3.4 加强燃料管理

燃料管理需围绕“煤质控制+配煤掺烧”构建全流程管控体系，从源头减少煤质波动对排烟温度的影响。在煤质控制环节，重点落实煤场精细化管理：煤炭入场时先经采样机检测水分、灰分、热值等关键指标，按煤质参数分区储存，避免不同煤种混堆导致煤质不均；针对高水分煤，采用机械晾晒或热风烘干设备处理，将水分从20%以上降至12%~15%，减少燃烧时的热量消耗。同时建立“小时级”煤质检测机制，每小时从煤仓入口采样，通过工业分析仪快速测定灰分、挥发分，若指标超出设计范围，立即调整上煤方案。在配煤掺烧环节，依托智能诊断模型输出的煤质—排烟温度关联曲线，动态优化掺烧比例：当入炉煤水分偏高时，按“7:3”比例掺混低水分煤，平衡整体水分；当灰分超标时，掺混30%低灰分煤，降低受热面积灰风险。某电厂通过该方案，入炉煤质波动幅度从±8%缩至±3%，排烟温度稳定在128~132℃，较单一煤种燃烧时降低8~10℃，年节约标煤约8000吨，同时减少了因煤质波动导致的燃烧工况异常。

4 结束语

排烟温度高是影响火电厂锅炉效率与安全的关键问题，构建智能诊断系统可精准识别原因，配套针对性应对策略能有效降低温度。本文从数据采集、模型构建阐述智能诊断，从积灰、漏风等分析原因，提出清洁维护、配风优化等策略。实践表明，这些措施可使排烟温度降低10~30℃，锅炉热效率提升1%~3%，为火电厂节能降耗、实现“双碳”目标提供有力支撑。未来，随着智能化技术发展，数字孪生与智能诊断结合，将进一步提升排烟温度控制精度，推动火电厂绿色高效发展。

参考文献：

- [1] 陈福康. 火电厂锅炉排烟温度高的原因及应对措施[J]. 现代工业经济和信息化, 2024(06):278-280.
- [2] 谭凯芬. 火电厂锅炉运行中的节能策略研究[J]. 造纸装备及材料, 2024(06):106-108.
- [3] 王路路. 火电厂锅炉节能优化措施及潜力研究[J]. 节能, 2021(10):56-58.
- [4] 吕梦菲, 曹栋. 复合相变换热器在锅炉排烟余热深度利用中的应用研究[J]. 机械管理开发, 2023(10):223-226.
- [5] 司志鹏. 1100MW超超临界机组锅炉燃烧及优化调整[J]. 化学工程与装备, 2023(07):201-203.

基于标准组串模型的光伏电站 智能运维系统研究

翁得汉¹, 李宪章¹, 束秋节², 林颖若³

(1. 华润电力投资有限公司华南分公司, 广东 广州 511455;

2. 华润电力控股有限公司, 广东 广州 511455;

3. 华润(清远)太阳能发电有限公司, 广东 清远 511500)

摘要 传统光伏监控系统多依赖阈值告警, 难以精准识别低效运行单元, 导致运维滞后、发电损失。本文提出一种基于标准组串模型的智能运维系统, 通过构建性能基准组串, 结合离散率分析与机器学习算法, 实现对异常组串的自动识别、定位与诊断。系统采用“云—边—端”协同架构, 在边缘侧完成实时数据清洗与初步判别, 云端进行大数据建模与趋势预测。实际应用于多个百兆瓦级光伏场站的结果表明, 该方法可将低效组串识别准确率提升至 92% 以上, 年均发电量提升 1.8% ~ 3.2%, 显著提高运维效率与经济收益。

关键词 光伏电站; 标准组串; 离散率分析; 智能运维; 云边协同

中图分类号: TM61; TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.009

0 引言

光伏发电作为清洁能源的核心支柱, 其装机容量在全球范围内持续高速增长。截至 2024 年底, 我国光伏发电累计装机容量已突破 10 亿千瓦, 占全国发电装机总量的比重超过 35%。然而, 在光伏电站规模化发展的同时, 大型光伏电站普遍面临设备数量庞大(单百兆瓦级电站组串数量可达数万组)、故障隐蔽性强等突出问题, 传统“被动响应式”运维模式已难以满足高效、精益化的管理需求。现有光伏监控系统虽能实现逆变器停机、通信中断等严重故障的告警功能, 但对于组件衰减、局部遮挡、接线松动、灰尘覆盖等导致的“亚健康”运行状态缺乏有效的评估手段。

1 标准组串模型构建

1.1 模型定义与筛选机制

标准组串并非固定不变的特定组串, 而是在同一光伏方阵内, 满足特定条件的动态组串集合。其核心筛选条件包括四个维度: 一是安装条件一致性, 要求组串的安装朝向、倾角完全一致, 确保接收的太阳辐射条件相同; 二是物理状态完好性, 无明显的物理遮挡、组件污渍、玻璃破损等问题; 三是运行历史清洁性, 近 3 个月内无故障记录及维修历史; 四是性能指标优越性, 其归一化发电效率需处于全场组串的前 20% 分位。

为实现标准组串的动态筛选与更新, 本文采用 K-

means 聚类算法对历史发电数据进行处理。具体流程如下: 首先提取同一方阵内所有组串连续 30 天的归一化功率数据; 然后以日均发电效率、功率波动系数为特征变量, 通过 K-means 算法将组串划分为高效稳定、中效波动、低效异常三个聚类簇; 最后从高效稳定簇中筛选出满足物理状态条件的组串, 构成初始标准组串集合。

通过该筛选机制, 标准组串集合的发电性能稳定性得到有效保障。实验数据显示, 同一标准组串集合内各成员的归一化功率离散系数始终低于 3%, 远低于普通组串集合 15% ~ 20% 的离散水平, 为后续的异常诊断提供了可靠的基准依据。

1.2 环境归一化处理

光伏组串的输出功率受辐照度、组件温度等环境因素影响显著, 相同运行状态的组串在不同环境条件下输出功率差异可达数倍。为消除环境因素干扰, 精准对比组串的固有性能, 需对实测功率数据进行环境归一化处理。本文采用的归一化公式如下:

$$P_{norm} = \frac{P_{meas}}{G_{meas}} \times G_{ref} \times [1 + \alpha(T_{cell} - T_{ref})] \quad (1)$$

式(1)中, P_{meas} 为组串实测功率(kW); G_{meas} 为实测太阳辐照度(W/m^2); G_{ref} 为标准辐照度, 取值 $1\ 000\ W/m^2$; T_{cell} 为组件实际温度($^{\circ}C$); T_{ref} 为标准温度, 取值 $25\ ^{\circ}C$ 。

为确保归一化处理的准确性，系统在每个光伏方阵设置1组高精度环境监测单元，同步采集辐照度、环境温度数据，并通过组件温度估算模型（结合辐照度^[1]、环境温度、风速及组件运行时间）计算组件实际温度 T_{cell} ，替代传统的直接测量方式，降低了硬件部署成本，同时提升了温度数据的覆盖范围。实验验证表明，该估算模型的温度误差可控制在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内，对归一化结果的影响小于1%，满足工程应用精度要求。

2 离散率分析与异常诊断

2.1 基于标准组串的离散率计算

离散率分析是识别低效组串的核心手段，其核心思想是通过计算待测组串与标准组串集合的功率差异程度，判断其是否偏离正常运行范围。对于每个待测组串 i ，其与标准组串集合的功率离散率 D_i 计算方式如下：

$$D_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{P_{norm,i} - P_{norm,j}}{P_{norm,j}} \right| \quad (2)$$

式(2)中， N 为标准组串集合的组串数量（通常取值20~30组，确保统计显著性）； $P_{norm,i}$ 为待测组串 i 的归一化功率； $P_{norm,j}$ 为标准组串 j 的归一化功率。

离散率 D_i 反映了待测组串相对于标准基准的偏离程度， D_i 越大，说明该组串的运行状态越异常。系统设定动态阈值 δ （通常取值8%~12%），当 $D_i > \delta$ 时，判定该组串为潜在低效组串^[2]。阈值 δ 的动态调整机制基于季节变化与方阵老化情况，夏季因辐照度稳定，阈值取下限8%；冬季因辐照度波动大，阈值取上限12%；同时，随着方阵运行年限增加，每年将阈值上调0.5%，以适应组件自然衰减的影响。

2.2 多维特征融合的故障诊断模型

离散率分析可实现低效组串的初步识别，但无法区分具体的故障类型。为提升诊断的精细化水平，本文构建了基于随机森林的多分类模型，结合多维电气特征实现故障类型的精准判别。

模型的输入特征包括三类：一是基础性能特征，如离散率 D_i 、归一化功率均值、功率波动标准差；二是电气参数特征，如组串电流一致性（与标准组串电流的差异率）、电压波动系数、早中晚功率比值^[3]；三是IV曲线特征，通过逆变器内置算法提取的曲线斜率、填充因子、开路电压偏差等特征参数。共选取12个维度的特征变量，构成故障诊断的特征向量。

模型的训练数据集来源于多个光伏场站的历史故障记录，涵盖遮挡、热斑、二极管失效、接线松动、

组件衰减等5类典型故障，共计12 000组样本数据（其中正常样本6 000组，故障样本6 000组）。通过随机森林算法构建多分类模型，采用5折交叉验证进行模型优化，最终模型的故障诊断准确率达到89.5%，其中对遮挡、热斑等显性故障的识别准确率超过95%，对接线松动等隐性故障的识别准确率也达到82%以上，为针对性的运维提供了精准依据。

3 基于标准组串模型的光伏电站智能运维系统架构设计与实现

3.1 “云一边一端”协同架构设计

为平衡实时性与扩展性需求，系统采用“端一边一云”三级协同架构，将数据采集、分析计算、决策管理等功能进行合理分配，具体架构如下：

1. 端侧：部署组串级智能采集终端，采用LoRa无线通信技术（通信距离可达3 km，功耗低至5 mA），实时采集每组串的电流、电压、功率数据，采样频率为1分钟/次，并将数据上传至边缘节点。同时，端侧设备具备本地数据缓存功能，可在通信中断时缓存7天内的数据，保障数据完整性。

2. 边缘侧：每个光伏方阵部署1台边缘计算网关，主要承担三项功能：一是数据预处理，对端侧上传的数据进行清洗，剔除因通信干扰导致的异常值（采用 3σ 准则）；二是实时分析，执行环境归一化处理与离散率计算，完成低效组串的初步筛选，将识别出的潜在异常数据上传至云端，正常数据仅进行本地存储（存储周期为30天）^[4]，降低云端数据传输与存储压力；三是本地响应，对于离散率超过20%的严重异常组串，直接触发本地声光告警，确保运维人员可快速响应紧急故障。

3. 云端：基于阿里云服务器构建云端管理平台，核心功能包括：一是标准组串库管理，定期执行K-means聚类算法，更新标准组串集合；二是深度诊断，运行随机森林故障诊断模型，对边缘侧上传的异常数据进行故障类型判别；三是趋势预测，基于历史数据构建ARIMA时间序列模型，预测组串性能变化趋势，实现从“被动维修”向“主动预警”的转变；四是运维管理，自动生成运维工单，通过APP推送至运维人员手机端，并跟踪工单执行进度，形成运维闭环。

3.2 系统实现与部署情况

系统的硬件部分采用国产化元器件，组串采集终端成本控制在150元/台以内，边缘计算网关成本约5 000元/台，相比进口同类设备成本降低40%以上。

软件部分基于 Python 语言开发,采用 Django 框架构建云端管理平台,前端采用 Vue.js 实现可视化展示,支持组串运行状态实时监控、故障告警、数据统计分析等功能。

目前,该系统已在中车集团下属的 5 个百兆瓦级光伏场站完成部署,总接入容量达 520 MW,覆盖组串数量超过 45 000 组。系统运行稳定,数据采集成功率达 99.2%,边缘侧分析延迟小于 5 秒,云端诊断响应时间小于 30 秒,完全满足大型光伏电站的运维需求^[5]。

4 基于标准组串模型的光伏电站智能运维系统应用效果分析

为验证系统的实际应用效果,选取某 100 MW 地面光伏电站作为典型案例,对比系统部署前后 6 个月的运维与发电数据。该电站位于内蒙古鄂尔多斯市,装机容量 100 MW,共包含 416 个光伏方阵,8 640 组光伏组串,年均辐照度约 1 700 kW·h/m²,属于优质光伏资源区。

对比分析结果显示,系统部署后运维与发电指标均得到显著提升:一是低效组串识别效率大幅提升,部署前依赖人工巡检,低效组串平均识别时间为 15 天,部署后通过系统自动识别,平均识别时间缩短至 2 小时,识别效率提升 180 倍;二是运维成本显著降低,运维人员数量由原来的 12 人减少至 8 人,人力成本下降 35%,同时因故障处理及时,维修材料损耗减少 20%;三是发电效益明显增长,电站年等效利用小时数由原来的 1 580 小时提升至 1 603 小时,提升 23 小时,折合增发发电量约 2.1%,按当地上网电价 0.32 元/度计算,每年可增加经济收益约 71.68 万元。

同时,对 5 个已部署场站的整体数据统计显示,系统对低效组串的识别准确率平均达 92.3%,最高可达 94.1%,不同场站的年均发电量提升幅度在 1.8%~3.2% 之间,其中资源条件较差、运维基础薄弱的场站提升效果更为显著,增幅均超过 3%,充分验证了系统的普适性与有效性。客户反馈表明,系统的应用使运维工作从“事后补救”转变为“事前预警”,运维主动性和精细化水平得到质的提升。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本文提出的基于标准组串模型的光伏电站智能运维系统,通过构建动态更新的标准组串集合作为性能基准,结合环境归一化处理与离散率分析,实现了对低效组串的精准识别;进一步融合多维电气特征与随

机森林算法,完成了故障类型的精细化诊断;“云一边一端”协同架构的应用,既保障了实时数据处理能力,又实现了大数据分析 with 趋势预测功能。

工程实践验证表明,该系统具有以下优势:一是识别精度高,低效组串识别准确率超过 92%,故障诊断准确率达 89.5%;二是运维效率高,将低效组串识别时间从数天级缩短至小时级;三是经济收益显著,可使光伏电站年均发电量提升 1.8%~3.2%,同时降低 35% 的运维人力成本;四是成本可控,采用国产化硬件与轻量化算法,部署成本低于同类系统 40%,具备大规模推广应用的条件。该系统有效解决了传统运维模式的痛点,为光伏电站的精益化管理提供了可靠的技术支撑。

5.2 未来展望

尽管系统已实现了较好的应用效果,但仍有进一步优化的空间。未来将从三个方向开展深入研究:一是融合气象预测数据,结合数值天气预报(NWP)的辐照度、温度预测结果,构建更精准的性能预测模型,实现故障的提前预警(预测时间窗口 1~3 天);二是引入清洗优化策略,基于组串积灰程度评估(通过功率衰减趋势分析)与降水预测数据,制定最优的组件清洗计划,避免无效清洗作业;三是拓展多源数据融合,结合无人机巡检的图像数据与红外热成像数据,弥补电气参数分析在物理故障识别上的不足,构建“电气参数+图像特征”的多维度诊断模型,进一步提升故障识别的全面性与准确性。随着技术的不断完善,有望推动光伏运维从“预测性维护”向“主动性优化”发展,为光伏产业的高质量发展提供更强有力的技术保障。

参考文献:

- [1] 刘星.光伏电站运维中的智能监测与故障诊断技术应用[J].电气工程与自动化,2025,04(01):85-88.
- [2] 刘东,李田泽,刘开石,等.GA-BP神经网络在光伏阵列故障检测中的应用研究[J].电源技术,2024(03):24-26.
- [3] 刘开石,李田泽,刘东,等.基于ABC-SVM算法的光伏阵列故障诊断[J].电源技术,2025(09):20-22.
- [4] 陈世群,高伟,陈孝琪,等.一种基于极限学习机和皮尔逊相关系数的光伏阵列故障快速诊断方法[J].电气技术,2024(10):10-12.
- [5] 马纪梅,张志耀,张启然.基于改进RBF神经网络的光伏组件故障诊断[J].电测与仪表,2024(02):19-21.

智慧液化气监管平台随瓶安检照片 AI 智能审核研究

王在华

(青岛图研科技有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要 本文聚焦智慧液化气监管平台中的随瓶安检照片 AI 智能审核技术, 构建一款基于深度学习的多模态识别模型, 设计“图像采集—智能识别—隐患预警—闭环管理”的业务生成逻辑, 并通过实际应用数据验证模型性能。研究表明, AI 智能审核系统可将安检效率从人工每小时 100 单提升至 500 单, 安检合格率从 65% 提升至 99%, 显著降低人工误差和漏检率, 为瓶装液化气全链条安全监管提供了可参考的“智防”解决方案。

关键词 智慧液化气监管平台; 随瓶安检照片; AI 智能审核系统

中图分类号: TE8; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.010

0 引言

瓶装液化气作为城镇燃气的重要组成部分, 为人民的生产生活带来了巨大的便利, 但因其易燃易爆的特性, 导致火灾、爆炸事故频发, 造成财产损失和人员伤亡, 影响社会稳定和经济发展^[1]。随着人工智能技术在计算机视觉领域的突破性进展, 瓶装液化气全过程追溯与安全监管、地方标准、数据归集与预警平台、数字化转型已经成为发展趋势^[2]。基于深度学习的图像识别与分析方法为液化气安检流程的智能化升级提供了全新路径。通过构建能够自动解析随瓶安检照片的 AI 模型, 实现对钢瓶本体、阀门、软管及周边环境的多目标智能识别与隐患诊断, 有望从根本上变革现有安检业务模式, 显著提升审核效率、准确性与标准化水平。

1 AI 模型构建: 从数据预处理到动态识别的技术架构

1.1 多源数据采集与预处理

在多源数据采集与预处理中, 不仅要关注钢瓶本体的状况, 还要对连接软管的老化程度、阀门接口的密封性以及用气环境的安全性进行全方位记录。针对图像质量问题, 采用自适应直方图均衡化技术对图像的局部特征进行精细调整, 使细节更加清晰, 适用各种光照环境。高斯模糊降噪则可以去除图像中的噪声干扰, 让图像更加平滑, 为后续的目标定位和特征提取创造良好条件。采用 YOLO 算法在目标区域定位, 在前向传播中对图像中的多个目标进行检测和定位钢瓶、软管、阀门等关键部件在图像中的位置, 为后续的特征提取和分析划定精确范围, 提高处理效率和准确性。

在目标检测阶段, 采用改进的 YOLOv8 算法作为一个单阶段检测器, 将目标检测建模为端到端的回归问题。引入注意力机制。主干网络与特征提取 YOLOv8 的主干网络采用了 CSPDarknet 结构的升级版, 利用 C2f (Cross Stage Partial with 2 branches) 模块替代了传统的 C3 模块。C2f 模块融合了 ELAN 结构的思想, 通过更多的梯度流分支, 增强了特征的重用能力。为了强化对软管老化和微小泄漏点的关注, 在主干网络的末端嵌入了 CBAM (Convolutional Block Attention Module) 注意力模块。该模块从通道和空间两个维度自适应地调整特征权重, 抑制背景噪声, 聚焦关键部件特征。FPN 自顶向下传递强语义特征, PAN 自底向上传递强定位特征。这种双向融合机制使得模型能够同时兼顾深层的语义信息和浅层的纹理信息。解耦检测头与损失函数优化中 YOLOv8 摒弃了传统的 Anchor-based 机制, 转而采用 Anchor-free (无锚点) 策略, 直接回归目标的中心点及其距离边界的偏移量。检测头用 Decoupled Head (解耦头) 结构, 将分类任务 (Classification) 和回归任务 (Regression) 的卷积分支分离, 解决了两个任务关注点不同导致的冲突问题。

1.2 深度学习模型架构设计

基于卷积神经网络 (CNN) 架构而建立的多层级特征提取模块是整个研究的核心组成部分, 并且引入 ResNet 残差网络建立跨层的捷径连接, 使梯度能够更顺畅地反向传播, 有效缓解了梯度消失问题。在液化气安检中, 钢瓶二维码是识别气瓶身份和追溯信息的关键, 腐蚀裂纹的存在直接关系到钢瓶的安全性, 软

管老化点则可能引发气体泄漏等危险，注意力机制系统让模型自动聚焦这些容易被忽略的部分。迁移学习技术的应用则是在已有知识的基础上进行快速学习和适应。通过大规模训练来初始化权重，可以让模型在液化气安检场景数据的训练中，更快地获得较好的结果。

1.3 模型训练与优化策略

采用端到端训练模式，使得模型能够直接从原始图像数据中学习从特征提取到分类、定位的全过程知识，避免了传统分步训练中各阶段之间的信息损失和不一致问题。选择交叉熵损失函数对于分类任务具有很好的优化效果，能够准确地预测结果与真实数据之间的差异。平滑 L1 损失函数则专门用于处理定位回归任务，它对异常值具有更强的鲁棒性，能够精确地预测目标物体在图像中的位置坐标。例如：挖掘机制能够动态地调整训练样本的权重，强化对低概率隐患的识别能力，从而提高模型在实际应用中的可靠性。

2 业务生成逻辑：全流程闭环管理的智能审核体系

2.1 安检照片采集与标准化接入

拍摄距离应保持在 50 ~ 80 厘米之间，保证钢瓶及相关配件的细节清晰可见。拍摄角度应垂直于钢瓶的正面，确保钢瓶的瓶身、阀门、连接软管等关键部位都能完整地呈现在照片中，避免因倾斜或侧面拍摄导致部分信息被遮挡而影响后续的识别和分析。拍摄应选择自然光充足且均匀的环境下。为了兼容不同品牌安检设备的图像格式，建立统一的数据接口标准。该标准应支持 JPEG、PNG 等多种常见图像格式的自动解析，确保无论使用何种安检设备拍摄的照片，都能顺利接入智慧监管平台。通过对不同格式图像的自动解析和处理，能够实现安检数据的完整性和一致性，这为后续的智能识别与分析夯实了基础。在数据传输过程中，采用加密技术进行传输，确保安检照片在传输环节的安全，有效防范数据被窃取和篡改。

2.2 智能识别与多级风险评估

构建“基础特征识别—规则库匹配—专家系统校验”三级审核流程。AI 模型能够准确地识别钢瓶上的生产日期、检验日期等关键信息，判断钢瓶是否在有效期内。对于软管材质的识别，模型可以通过分析图像中的纹理、颜色等特征，区分出橡胶软管、金属波纹管等不同材质，为接下来的评估提供重要的数据支撑依据。在识别阀门型号时，模型能够根据阀门的形状、尺寸以及标识等特征，准确判断阀门的类型和规格，确保阀门与钢瓶的匹配性符合安全标准。对于一些模糊案例，可触发人工复核机制，对图像进行更细

致的观察和判断，进一步确认隐患的存在和严重程度。这种“机器初筛+人工确认”的双保险模式，既充分发挥了 AI 技术的高效性和准确性，又借助人工的专业判断能力，提高了风险评估的可靠性。

2.3 隐患预警与闭环管理系统

液化气流动性强，监管上涉及多部门、多环节，监管难度大。为确保气瓶充装、储运、销售、检验的全产业链安全^[3]，建立实时预警机制是保障瓶装液化气安全的关键环节。针对 AI 智能审核识别出的安全隐患，系统会根据隐患的严重程度进行分级，并及时推送至企业安全员、监管部门和用户。对于高风险隐患，系统将立即发出警报，并立即通知相关人员采取相应措施，确保人员安全和环境安全。在推送预警信息的同时，系统会同步生成整改工单，明确整改要求、期限和责任人。企业安全员在收到整改工单后，应立即组织人员对隐患进行排查和整改，应在规定的时间内完成整改。监管部门则负责对整改过程进行监督和检查，确保整改工作落实到位。整改完成后，系统会自动安排复查验收，根据整改工单的要求，对隐患整改情况进行检查和评估。若整改合格，将对该隐患进行销号处理；若不合格，将再次发出整改通知，直到隐患彻底消除。最后形成了“检测—预警—处置—反馈”的业务闭环，通过数字赋能、跨部门协同监管、社会共治理念，解决问题^[4]。

3 数据测试：多维度验证 AI 审核系统的有效性

3.1 测试数据集与评估指标

为了全面、准确地评估智慧液化气监管平台中 AI 智能审核系统的性能，精心选取了具有代表性的测试数据集。从张家港、贵阳等试点区域收集的 8 万张安检照片，构成了一个丰富且全面的测试集，包含了钢瓶在全生命周期各个关键阶段的场景。在这些照片中，正常样本有 6.8 万张，它们代表了符合安全标准和规范的钢瓶状态，为模型提供了正常情况下的特征参考。而 1.2 万张异常样本则包含了各种可能出现的安全隐患情况，如钢瓶腐蚀导致瓶身出现锈迹、阀门松动可能引发气体泄漏、连接软管老化出现裂纹等，这些异常样本对于测试模型对安全隐患的识别能力至关重要。

3.2 对比实验与结果分析

在钢瓶档案信息核验方面，人工建档误差率 5%，而 AI 审核系统将误差率大幅降至 0.5%，提高了档案信息的准确性和可靠性，方便后续的监管并提供了准确的数据支撑。在充装环节异常检测中，通过对充装过程中的压力、流量等数据的实时监测，以及对钢瓶外

观和阀门状态的图像分析,能够及时发现充装过量、阀门未关闭严实等安全隐患。实验结果显示,AI审核系统的隐患识别率相比人工审核提升了34%,安检合格率上,从人工审核时的65%大幅提升至99%,有效保障了充装环节的安全性。在用户端安检审核中,审核单张照片从人工单张30秒缩短至AI2秒,大大提高了安检工作的速度,还能够及时对用户端的安全隐患进行预警和处理,降低了安全事故的发生风险。通过智能审核体系、规则—数据—结果协同、人机闭环,有效解决了传统人工安检的效率与精度瓶颈^[5]。

3.3 压力测试与容错能力验证

在实际的液化气监管场景中,安检单和安检照片的数量会随着业务量的波动而变化,因此,系统需要具备强大的并发处理能力和良好的容错能力,以应对高峰时期的审核需求。结果显示,AI审核系统在500并发请求下仍能保持稳定运行。其吞吐量可达500单/小时,满足实际业务的需求。在资源利用方面,CPU利用率控制在75%以内,在高负载环境中,能够智能且合理地分配计算资源。内存泄漏率低于0.1%,表明虽然系统在长时间运行,但内存管理机制稳定,不会出现因内存泄漏而导致的系统崩溃或性能恶化等问题。

4 辨识度提升优化:应对复杂场景的技术迭代策略

4.1 复杂场景下的识别瓶颈分析

传统CNN在对低对比度、小目标特征的提取能力明显不足,如被油污覆盖的钢瓶表面,钢瓶上微小的腐蚀点或阀门上的细微裂纹,传统CNN模型容易忽略这些关键信息,导致漏检。

4.2 多维度优化策略

1. 数据增强与小样本学习:在液化气安检场景中,通过训练GAN,可以合成大量具有不同污损程度的二维码样本,以及老化程度各异的软管样本。这些合成样本能够扩充训练数据的多样性,使模型在检测过程中接触到更多复杂多变的场景,从而提高其对不同场景下特征的识别能力。

2. 多模态融合识别:融合安检照片的RGB图像与红外热成像数据,能够为模型提供更丰富的信息,增强对安全隐患的识别能力。在液化气安检中,一些安全隐患,如阀门过热可能是由于阀门内部故障或气体泄漏导致的,通过红外热成像数据可以清晰地检测到阀门的温度异常,而RGB图像则可以提供阀门的外观和位置信息。通过跨模态特征融合网络,可以有效地融合这两种模态的数据。

3. 动态阈值与自校准机制:建立实时反馈系统,根据不同区域的安检历史数据动态调整识别阈值,是优化模型性能的重要手段。通过对这些区域的安检历史数据进行分析,可以了解到不同类型安全隐患的出现频率和特征分布,从而根据实际情况动态调整识别阈值。

4.3 持续迭代的模型更新体系

瓶装液化气智能监管平台是关系到城市瓶装液化气安全的重要信息平台,也是基于数字化、网络化、智能化的新型城市基础设施建设的重要组成部分^[6]。构建“数据采集—模型训练—在线部署—效果反馈”的闭环迭代机制,是确保模型能够持续适应复杂场景变化的关键。每月定期收集最新的隐患案例,将其加入训练集中,使模型能够学习到新出现的安全隐患特征。在模型在线部署后,通过实时监测模型的运行效果,收集用户反馈和实际检测结果,及时发现模型存在的问题和不足之处。根据这些反馈信息,对模型进行进一步的优化和改进,然后重新部署上线,实现“识别—优化—再识别”的螺旋式提升。这种持续迭代的模型更新体系能够确保模型始终保持在最佳状态,为瓶装液化气的全面安全的监管提供坚实的技术支撑。

5 结束语

本文提出的智慧液化气监管平台随瓶安检照片AI智能审核方案,为瓶装液化气安全监管提供了“技术+制度”的双重保障。未来可进一步探索AI与物联网(如智能角阀传感器数据)的深度融合,构建多源异构数据驱动的安全风险预测模型,推动液化气监管模式从“事后进行处置”向“事前就可预防”转变,助力城市燃气安全治理体系现代化。

参考文献:

- [1] 戴振华.瓶装液化气安全监管探讨[J].石化技术,2024,31(04):267-268.
- [2] 徐恺.上海瓶装民用液化气全过程监管的研究和应用[J].科技视界,2022(15):21-23.
- [3] 福州市市场监管局.福州:启动安全追溯管理系统率先实现全环节实名追溯[J].中国市场监管研究,2020(09):52-54.
- [4] 吴件,蓝志勇,李文炜,等.社会共治与数字赋能:瓶装液化石油气安全监管对策研究[J].中国市场监管研究,2023(09):71-76.
- [5] 中国城市燃气协会.城镇燃气系统智能化评价规范(T/CGAS 025-2023)[S].2023-03-01.
- [6] 张彤,张黎来,徐清斯,等.瓶装液化气智能监管平台和监管数字化探索[J].中国建设信息化,2023(19):68-73.

基于工业物联网的焊接车间 数据采集与监控系统研究

聂瑞金

(广东宏拓工业工程服务有限公司, 广东 肇庆 526000)

摘要 工业物联网技术的深度融合为焊接车间的数字化转型提供了新路径。本研究针对多品牌设备协同、异构数据治理及实时监控等核心问题, 构建了一套基于工业物联网的焊接车间数据采集与监控系统。通过工业以太网架构与多源数据整合设计, 实现焊机运行状态、工艺参数及机器人作业数据的统一采集与贯通。系统采用分层式网络拓扑与非侵入式数据采集策略, 打通 PLC、文件服务器与 MES 系统间的数据链路, 形成覆盖设备管理、质量追溯及工艺优化的闭环体系。实际应用表明, 该系统能够有效提升焊接过程的透明度与可控性, 为智能车间的高效运行提供技术参考。

关键词 工业物联网; 焊接车间; 数据采集; 监控系统

中图分类号: TP311; TG4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.011

0 引言

随着智能制造技术的快速发展, 焊接车间正面临设备异构化、数据碎片化及工艺控制实时性不足等挑战。本研究以多源异构设备的协议兼容为切入点, 提出一种基于工业物联网的分层式数据采集与监控架构。通过工业网络通信技术、分布式数据存储及实时监控机制的设计, 实现焊接设备运行状态、工艺参数及机器人作业数据的全流程贯通。系统以多品牌设备协同场景为应用背景, 旨在构建可扩展、高可靠的数据治理框架, 为焊接车间的智能化升级提供实践参考。

1 系统总体架构设计

在智能制造领域的实践探索中, 系统总体架构的设计需兼顾网络基础架构的可靠性与数据采集层次的高效性。例如: 北京实耐固连接技术有限公司基于其在焊装车间机器人及焊机数据采集的成熟经验, 提出了一套涵盖工业网络架构与多源数据整合的解决方案^[1]。该方案以 6 000 平方米工厂规模的工程实践为基础, 结合西门子、GE 及 Rockwell 等国际领先厂商的工业自动化技术, 构建了高可用性的网络架构体系, 为 2016 年超过 1.5 亿元规模的焊装生产线项目提供了关键支撑。系统总体架构如图 1 所示。

1.1 网络架构基础

工业级 Ethernet 通信网络构成系统核心传输层, 采用分层式拓扑结构实现设备级、控制级与管理级的

纵向集成。针对汽车焊装车间的多品牌机器人协同场景(包含 ABB 机器人、小原焊机等), 系统通过冗余环网设计保障数据传输的实时性与连续性。机器人控制器通过 FTP 协议完成文件指令交互, 实时获取并处理焊点坐标、焊钳压力等核心参数, 形成每秒级的数据响应能力。文件服务器作为关键节点, 支持非认证模式的 Windows 文件共享机制, 确保机器人寄存卡中的工艺参数文件可被高效提取与备份^[2]。

1.2 数据采集层次结构与系统集成

数据采集体系分为运行状态流与工艺参数流双通道架构, 其中 PLC(选择西门子 1500 系列) 模块负责焊接设备启停信号、故障代码等状态数据的毫秒级采集, 数据峰值处理能力达到单线 150 台设备并发。工艺参数采集层通过群控系统对接焊机控制器, 将电流电压、焊接时长等关键参数写入关系型数据库, 形成结构化工艺知识库。机器人端采用非侵入式采集策略, 通过专用软件周期性抓取 USB 寄存卡中的日志文件, 经文件服务器中转后推送至 MES 系统进行 SPC 分析。系统集成层面突破多品牌设备协议壁垒, 实现 ABB 机器人数据收集软件与群控系统的数双向互通, 构建覆盖生产管理、质量追溯及设备健康评估的数字化闭环^[3]。

2 焊接数据采集方案

2.1 焊机数据采集

焊机数据采集依托工业级群控系统实现多维度工艺参数的动态获取与分析, 包含运行状态数据和关重参数。

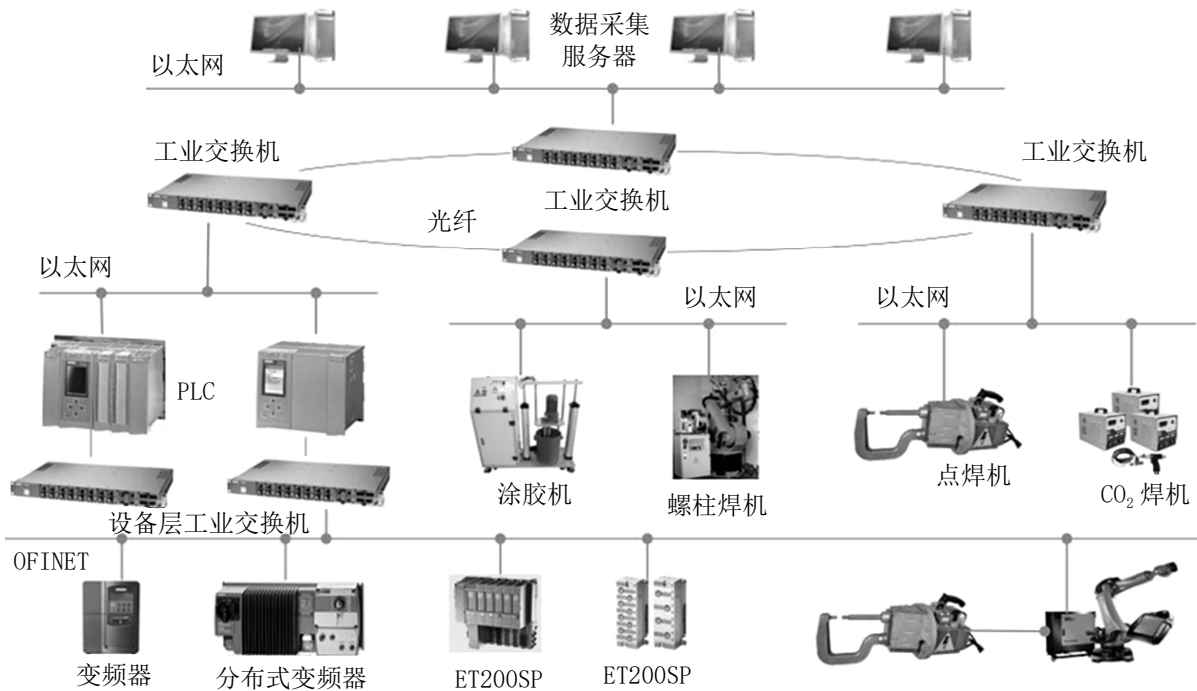


图1 系统总体架构

运行状态具体的数据包含：机器人/焊机、生产线、物流系统等相关信号及状态。在汽车焊装车间的应用场景中，系统通过集成 PLC 模块实时采集焊机的启停状态、故障代码及运行信号，形成毫秒级响应能力，确保设备状态的可视化监控。

关重参数具体的数据包含焊接电流、焊接电压；焊接时间、通电时间；电极驱动行程、焊点计数、报警状态。焊机工艺参数通过群控系统集中存储至关系型数据库，并基于统计过程控制（SPC）方法进行趋势分析与阈值报警。针对质量问题，系统支持补焊返修流程的实时触发，通过质量点下线机制减少产线停线风险，同时将返修数据与工艺参数关联追溯，构建工艺优化闭环^[4]。

2.2 机器人数据采集

机器人数据采集采用非侵入式文件交互模式，以 ABB 机器人控制器为核心，通过专用软件周期性抓取存储于 USB 闪存卡中的焊点坐标、焊接时间及压力日志等关键数据。机器人端基于 FTP 协议完成文件列表获取、重命名及下载操作，数据经本地收集后推送至中央文件服务器，利用 Windows 非认证文件共享协议实现跨系统传输。运行状态数据通过 PLC 实时采集，而工艺参数则沉淀至关系型数据库，形成设备健康度评估与质量分析的联合数据底座，满足多品牌机器人协同场景下的数据统一治理需求^[5]。

3 数据流程与监控机制

焊接数据流程以多层异构系统的协同运作为核心，构建端到端的数据贯通体系。焊机运行状态数据通过分布式 PLC 网络实时采集启停信号、故障代码及设备告警信息，并以毫秒级延迟推送至车间监控系统进行动态可视化展示。工艺参数流依托群控系统，将电流、电压、焊接时长等关键指标持久化存储至关系型数据库，同时基于工业通信协议与 MES 系统实现双向数据同步，支撑工艺合规性验证及参数回放追溯。机器人侧的数据流程采用异步文件传输模式，控制器内 USB 闪存卡中的焊点坐标、焊钳压力等日志文件经 FTP 协议批量下载至本地采集终端，再通过 Windows 非认证文件共享机制自动上传至中央文件服务器，最终由 MES 系统完成非结构化数据的解析与结构化存储。

监控机制设计聚焦异常工况的快速响应与数据闭环管理。实时监控层通过人机界面动态映射设备运行状态，对超出设定阈值的电流波动、焊接时间偏差等参数触发 SPC 报警，并联动声光警示装置。质量监控模块内嵌补焊返修逻辑，当焊接质量点检测到参数超标时，系统自动生成返修工单并引导操作人员离线处理，确保主产线持续运行。在数据闭环层面，工艺参数库与质量追溯系统深度耦合，支持基于时间序列的焊点参数反查，并将返修数据反向标注至原始工艺记

录,形成“采集—分析—优化”的迭代链路。跨系统数据交互采用工业协议转换中间件,实现 PLC、文件服务器与数据库间的无缝衔接,确保焊接全链路数据的完整性与一致性。

4 基于工业物联网的焊接车间数据采集与监控系统实施与界面展示

系统实施依托汽车焊装车间的实际场景,以工业以太网为核心搭建车间级通信网络,实现 ABB 机器人、小原焊机等多品牌设备的协议兼容与数据贯通。网络架构采用分布式部署模式,通过三层交换机划分功能区域,支撑 150 台级设备并发通信。机器人数据采集模块通过文件服务器与专用软件(如 ABB 机器人数据采集工具)对接,每日定时抓取 USB 寄存卡中的焊接日志文件,单台机器人日均生成约 500 组焊点参数记录。焊机群控系统集成 PLC 模块与关系型数据库,实现每秒 20 次以上的工艺参数采样,支持毫秒级报警响应,确保焊接过程数据无遗漏存储。

监控界面以工业可视化平台为基础,设计工艺参数实时跟踪模块,动态展示电流、电压、焊接时间等关键指标,并基于 SPC 算法生成质量波动趋势图。界面布局采用多视图联动模式,操作人员可同时查看设备运行状态、参数超标报警列表及历史数据比对结果。针对补焊返修流程,系统嵌入引导式操作界面,自动生成包含焊点编号、缺陷类型及修正参数的返修工单,降低人工干预复杂度。工艺参数记录界面支持按时间、设备型号或批次号筛选数据,并导出结构化表格(如焊接参数记录表样例),满足离线分析与审计需求。通过 Andon 看板与声光报警装置联动,车间管理端可实现异常工况的快速定位与协同处置,提升产线整体可用性。

5 基于工业物联网的焊接车间数据采集与监控系统应用效果分析

汽车焊装车间通过机器人及焊机数据采集系统的部署,构建了覆盖生产全流程的数字化管理闭环。

1. 在生产管理层面,系统基于焊机群控与机器人数据协同采集能力,实现了焊接工艺参数的全局可视化与动态追溯,支持车间管理人员对设备运行状态及工艺合规性进行实时研判。

2. 在质量管理方面,依托工艺参数库与质量点补焊返修流程的联动机制,系统在不影响主产线运行的前提下,大幅降低了焊接缺陷的漏检率,同时通过参数超标报警与反向追溯功能,缩短了质量问题根因分析周期。

3. 在设备管理方面,系统通过机器人焊钳参数标准的数据化存储与周期性比对,为电极磨损评估及焊钳维护计划提供了量化依据。能源管理模块与焊机群控系统的深度集成,优化了空载状态下的能耗管控策略,减少了非必要电能损耗。

4. 在数据利用率方面,多品牌设备协议的兼容性设计突破了传统焊装车间的信息孤岛,通过文件服务器与 FTP 协议的高效协同,实现了 ABB 机器人、商科焊机等异构设备数据的统一治理。

可视化看板与 Andon 系统的结合,增强了车间异常事件的协同处置能力。工艺参数监控界面通过 SPC 趋势图与实时数据面板的融合展示,使操作人员能够快速定位电流、电压等参数的异常波动。生产报表模块基于标准化的焊接参数记录表模板,自动生成批次级的质量分析报告,提高了数据汇总效率。系统实施后,焊装车间的数据驱动决策能力显著增强,工艺优化与技术迭代周期进一步缩短,为智能制造转型提供了实践经验。

6 结束语

本研究提出的工业物联网架构为焊接车间数据采集与监控提供了系统性解决方案。通过分层式网络设计、多协议兼容策略及数据闭环管理机制,有效解决了设备异构性与数据碎片化的核心问题,实现了工艺参数可追溯、异常工况快速响应的目标。系统在焊装车间的实际应用验证了其在提升生产效率、优化质量管理及降低运维成本方面的综合价值。未来研究可进一步探索边缘计算与人工智能技术的深度融合,以增强焊接工艺的自主优化能力,推动工业物联网在智能制造领域的深度应用。

参考文献:

- [1] 彭忠全,赵春美,朱昌洪.基于物联网技术的空气质量检测系统设计[J].电子技术,2024,53(05):106-107.
- [2] 赵雅楠.大型结构件焊接车间现场改善与应用[D].南京:南京理工大学,2024.
- [3] 董传阳,王珍珍,戚晓晨,等.面向现代焊接车间的物联网数字终端技术研究[J].焊接技术,2023,52(10):101-104.
- [4] 李显.基于数字孪生的车间可视化系统研究与实现[D].大连:大连工业大学,2023.
- [5] 刘世强.基于转向架焊接产线数字化的机器人智能集控关键技术[J].专用汽车,2023(05):61-63.

Linux 内核防火墙与 Shell 脚本 在网络运维自动化中的应用

黄道金

(广州市工贸技师学院, 广东 广州 510425)

摘要 随着信息化进程的不断深入,企业对网络安全和访问控制的要求日益提高。传统商用防火墙方案虽然功能完备,但价格昂贵、部署复杂,对中小企业而言难以推广。本文基于 Linux 内核防火墙 (Netfilter) 与 Shell 脚本的自动化特性,设计并实现了一种低成本、高灵活性的企业网络访问控制与自动化管理方案,在不额外增加硬件成本的前提下,有效提升了带宽利用率与网络安全性,对中小型企业的网络安全管理具有实践与推广价值。

关键词 Linux 防火墙; Shell 脚本; 网络管理; 自动化运维

中图分类号: TP393.08

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.012

0 引言

当前企业网络环境日趋复杂,云计算、物联网、移动互联与远程办公的普及使得网络边界愈发模糊,产生随时接入网络应用的需求。网络需求的增加,一方面需要更大的网络带宽来满足工作人员的上网质量,另一方面对网络的访问控制和安全管理的更高。如何在有限成本下实现网络的安全隔离与访问控制,成为中小企业网络运维管理的普遍难点。传统商业防火墙(如 Juniper)依赖专有硬件与闭源系统,不仅采购与维护成本高昂,还缺乏针对企业内部灵活策略的定制能力。相比之下, Linux 内核自带的 Netfilter 防火墙框架具有开放、稳定及高效等优势,结合 Shell 脚本^①可实现策略的动态控制与自动化管理。本文基于真实企业网络环境,提出一种以 Linux 为核心的自动化网络访问控制方案,构建安全可靠、可扩展、可维护的企业网络管理系统,达到充分利用企业网络带宽,提高员工工作效率,同时降低企业软硬件投入成本,解放网管人员劳动力的目的。

1 技术原理

1.1 Linux 内核防火墙机制

Linux 防火墙基于内核中的 Netfilter 框架,负责系统内外网络数据包的过滤、修改与转发。依托 Linux 稳定、高效、占用资源极低的特点,使用普通硬件,在一定的应用场景下,提供媲美市面上主流商用硬件防火墙的吞吐能力和功能性。Netfilter 定义了五张表 (filter、nat、mangle、raw、security),五个处理

链 (INPUT、OUTPUT、FORWARD、PREROUTING、POSTROUTING) 和自定义链。在企业网关应用场景中,最常使用的是 filter 表与 nat 表:前者用于数据包过滤 (filter) 和访问控制,后者用于网络地址转换 (NAT) 与转发。例如:当内部主机访问外部网络时,数据包先经过 nat 表中的 PREROUTING 链,由路由决定转发路径,再经 filter 表中的 FORWARD 链进行安全过滤,最后再由 nat 表中的 POSTROUTING 链执行地址转换^[1]。Netfilter 对于数据包的处理过程,如图 1 所示。

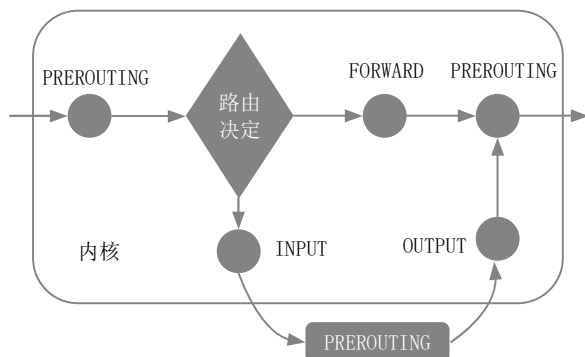


图 1 Netfilter 对网络数据包的处理过程

1.2 Shell 脚本的自动化特性

Shell 脚本是 Linux 系统的内置脚本语言,使用系统命令工具、程序变量、程序函数、程序流程控制、正则表达式、终端输入输出形成可批量处理系统任务的自动化脚本,具有轻量、灵活、可移植等特点^[2]。通过 Shell 脚本可以调用 Netfilter 防火墙的 iptables 命令接口,通过 Shell 的内置语法,实现防火墙策略

的自动化批处理。与 Python、Ansible 等高级自动化工具相比，Shell 脚本执行效率高、依赖少、适合部署在资源受限的服务器上。Shell 脚本使用命令解释器逐行执行的特性决定了它不像编译型语言可以设计出高并发高性能的代码，但它简洁的语法，即写即用的特性，非常适合整合系统工具，完成复杂的任务。本文通过 Shell 脚本实现防火墙规则初始化、用户动态授权、带宽限速与日志记录等核心功能，从而将网络管理任务模块化、自动化。

2 系统设计与实现

2.1 总体架构

系统架构由四个主要部分组成：网关服务器、防火墙规则载入模块、用户授权认证模块和流量监控模块。网关服务器基于 Linux 系统，利用 Netfilter 防火墙技术实现网络数据包的转发和过滤；防火墙规则载入模块负责初始化 Linux 防火墙的转发和过滤规则条目；用户授权认证模块负责管理接入网络的用户 MAC 地址与访问权限控制；流量监控模块负责定时统计每个用户的网络连接速率。该设计方案在不改变企业现有网络拓扑结构的基础上，将现有的 Linux 服务器部署于需管控的内部网络区域与核心路由之间，并将其设置为该网络区域的内部网关。通过启用 Linux 内核的数据包转发功能和 DHCP 服务，并在 Linux 服务器上部署相应的模块脚本，即可实现接入控制功能。如需要管控的网络区域网段规划为“192.168.4.128/25”，则该 Linux 网关服务器的两张网卡分别连接核心路由和内部网络区域：eth0:172.16.100.98/24;eth1:192.168.4.130/25，该服务器通过接口 eth0 连接访问外部网络，网络拓扑结构如图 2 所示^[3]。

2.2 防火墙与脚本功能模块

2.2.1 防火墙规则载入模块

防火墙规则载入模块 fw_init.sh，负责每次系统

重新启动时，自动清空旧规则、放行必要的网络服务数据（如 DHCP、SSH 等），加载默认的黑名单用户。技术要点：建立默认允许上网用户名单数据，由网络管理员统一收集，由于数据量较小，可以采用文本形式存储，文件内容记录使用网络人员的名单和其使用的上网设备的网卡 mac 地址。在 shell 脚本读取文件内容，调用 awk 工具对文件中的 mac 地址提取，再通过调用 iptables 指令将得到的 mac 地址实时写入 Linux 防火墙的 FORWARD 链中的放行规则中。

2.2.2 用户授权认证模块

用户认证模块 add_mac.sh，专门用于通过客户端唯一的 mac 地址来识别终端设备，并对其进行网络访问权限控制。该模块支持临时授权与永久授权两种模式，系统管理员可以根据实际需求灵活选择合适的授权方式。临时授权只需要记录用户设备的 mac 地址，仅允许该设备在目前网络开放的时间段使用网络，网络关闭后则失效。永久授权需登记用户的姓名和上网设备的 mac 地址，并将用户信息保存到用户数据文件中，下次网络重新启动时仍然生效。不同模式通过向脚本传递不同的参数实现。

2.2.3 流量监控模块

流量监控模块 rate_limit.sh，周期性读取 iptables 计数器，计算各主机平均下载速率，当超过阈值时自动修改规则断开当前用户的网络连接，并记录日志。该脚本主要的功能是对用户上网的下载速率进行监控，当某用户的下载速率在某一段时间（如 60 s）内下载速率持续超过设定的上限值（如 300 K/S），则立即中断其访问外网，直到下一次网络重启。该脚本的设计思路是，在需要进行流量监控时，运行该脚本，脚本会为每一个客户端生成一个动作为 RETURN 的规则，用来分别统计对应客户端的数据包流量。脚本常驻后台运行，定期统计每个客户端各自的数据总量大小（如

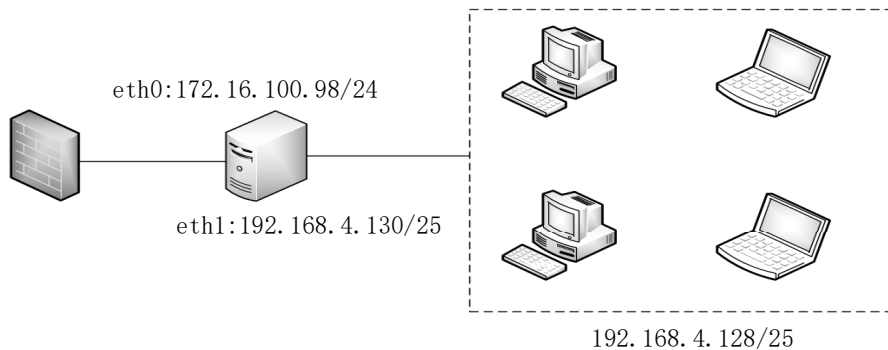


图 2 网络拓扑结构

某个客户端在 60 s 内下载的数据为 6 000 K)，用该总量除以时间，得到平均速率为 100 K/S。再用该速率值与设置值进行比较，比如超过 200 K/S 显示到屏幕警告，而超过限制 300 K/S 就立即将该客户端的防火墙规则动作改为 DROP，即可以马上断开该客户端的网络连接，并将触发时间、客户端 IP、用户姓名、下载平均速度等信息重定向写入指定的日志文件。在实际应用中，可以容忍客户端下载速率瞬时值较高，但不能容忍长时间大量占用公共带宽。所以脚本设计采用间隔一段时间后取平均值，带来的好处一方面更加符合用户使用网络资源的实际需求，另一方面常驻内存的脚本以间隔时间方式运行，对系统资源的消耗进一步降低。

2.2.4 利用计划任务实现用户上网时段控制

若要实现用户上网时段的控制，只需要配合 Linux 系统的计划任务即可方便地实现。例如：只允许客户端在下午 15:00 至 18:00 这段时间内上网，则在计划任务中添加 15:00 运行 `fw_init.sh` 脚本开启网络，而在 18:00 执行 `iptables -F nat` 命令清空防火墙的转发规则即可以终止上网^[4]。

3 实验与效果分析

实验环境基于 Debian Linux 11 系统，在 IBM eServer x346 服务器上部署。服务器配置两张千兆网卡，分别连接企业内部网段与外部互联网入口。通过设置防火墙 FORWARD 链规则，仅授权的终端可访问外网，其余终端均被阻断。在模拟 30 台设备同时接入的场景下，系统能在毫秒级响应规则更新，CPU 占用率低于 5%，内存消耗不超过 200 MB。为验证流量控制模块的效果，选取三组测试终端：普通办公终端；持续大文件下载终端；视频流播放终端。结果显示，当终端下载速率连续 60 秒超过设定阈值（300 KB/s）时，系统自动中断连接，其余终端带宽占用保持稳定。与传统限速路由器不同，该方案通过平均速率判断用户行为，既保证了短时峰值需求，又防止了长期网络带宽占用。

4 系统应用价值与推广意义

该方案在经济性、安全性、可扩展性和易维护性方面均表现突出，特别适合小微企业或子部门的网络管理。系统完全基于开源组件构建，无需采购昂贵的防火墙设备，可通过改造现有的 Linux 服务器完成部署，其网络利用效率的提升也帮助中小企业节省大量升级商用网络带宽的费用。另外，在有一定规模的企业中，某一个子部门想对其内部的网络接入进行管控，

一般很难在公司的核心路由设备上调整策略。这种情况下，则可以利用此 Linux 内核防火墙和 Shell 脚本结合的方案轻松实现。在安全性方面，系统实现了网络管理与安全的 3A 机制，即认证（Authentication）、授权（Authorization）和审计（Accounting），并通过多层过滤有效隔离外部访问，利用日志审计追踪异常行为^[5]；同时结合 Shell 脚本与计划任务实现了第 4A——自动化（Automation），进一步增强了系统的智能化管理能力。该系统还具有良好的可扩展性，可移植至任意 Linux 服务器，并支持与 Ansible、Python 代码等自动化工具集成，便于功能扩展与系统升级。在维护方面，系统采用模块化、命令化的脚本设计，使管理员无需深入复杂的防火墙命令即可轻松调整策略。除此之外，该方案不仅适用于中小企业网络管理场景，也可应用于职业教育、技能竞赛与实验教学。

5 结束语

基于 Linux 内核防火墙与 Shell 脚本的企业网络自动化运维方案，通过模块化、自动化设计，实现了用户认证、访问授权、流量监控与策略执行的闭环管理。实验结果验证了系统的高效性与稳定性，证明其在成本与性能之间取得了良好平衡。未来研究可在此基础上引入机器学习算法，对网络流量进行异常检测与预测，并结合 Ansible 或 FastAPI 构建图形化管理界面，进一步提升系统的智能化与可视化水平。

注释：

① 本文涉及的 Shell 脚本完整代码托管在 <https://gitee.com/hdaojin/shellsript-for-firewall>。

参考文献：

- [1] 董剑安,王永刚,吴秋峰.iptables 防火墙的研究与实现[J].计算机工程与应用,2003(17):161-163,176.
- [2] 刘淑华.Shell 运维在网络配置与管理中的应用[J].计算机产品与流通,2025(09):92-94.
- [3] 邱宇.Linux 下 NetFilter/Iptables 防火墙体系机制和典型应用[J].长江信息通信,2022,35(08):63-65.
- [4] 刘佳,刘祖耀.Shell 脚本在云服务器管理中的应用[J].计算机产品与流通,2017(12):51,114.
- [5] [美]Todd Lammle 著.CCNA 学习指南(640-802):第 7 版[M].袁国忠,徐宏,译.北京:人民邮电出版社,2012.

基于无人机图像识别的输电线路绝缘子污秽在线监测系统研究

田沈凡, 李海荣*

(四川蜀能电力有限公司电网运维分公司, 四川 成都 610000)

摘要 输电线路绝缘子污秽积累易引发闪络故障, 威胁电力系统安全运行。传统监测方法存在效率低、安全性差、实时性不足等问题, 难以适配现代电网智能化运维需求。本文提出基于无人机图像识别的绝缘子污秽在线监测方案, 通过选型改装无人机平台、优化图像采集预处理流程、设计融入 CBAM 注意力机制的改进 YOLOv8 识别算法, 构建“无人机—地面站—服务器”三级监测系统。选取 220 kV 实际线路实验验证, 结果显示系统识别准确率达 96.8%, 检测速度为 32 帧/秒, 可实现污秽实时监测与分级预警, 显著提升运维效率, 为输电线路安全运行提供技术参考。

关键词 无人机; 输电线路; 绝缘子污秽; 图像识别

中图分类号: TP24; TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.013

0 引言

输电线路运行状态直接影响供电连续性与稳定性, 绝缘子承担固定导线与绝缘隔离双重功能, 长期运行中易积累工业粉尘、盐分等污秽物。潮湿环境下污秽物溶解形成导电膜, 导致绝缘性能下降, 严重时引发闪络故障, 造成线路跳闸与大面积停电, 给社会生产生活带来巨大损失^[1]。

当前绝缘子污秽监测主要依赖人工巡检、泄露电流监测、红外热成像检测等传统方法。人工巡检需运维人员登高作业, 劳动强度大且存在安全风险, 同时易受主观因素影响导致漏检误检; 泄露电流监测需安装传感器, 存在安装维护复杂、成本高及电磁干扰问题; 红外热成像检测受环境因素影响大, 对轻度污秽识别灵敏度不足^[2]。随着无人机与图像识别技术不断发展, 无人机巡检凭借机动性强、覆盖范围广等优势, 结合图像识别实现污秽智能化识别, 成为解决传统监测难点的重要方向。本文设计无人机图像识别在线监测系统, 优化核心算法, 通过实验验证系统实用性, 为电网智能化运维提供技术参考。

1 无人机图像识别在线监测系统设计

1.1 无人机平台选型与改装

结合输电线路巡检需求, 选取多旋翼无人机作为巡检平台, 该类型无人机操作灵活、起降方便, 可在

复杂地形区域精准悬停, 便于近距离采集绝缘子图像, 且具备续航能力强、载重适中、稳定性高、抗干扰能力强的特点。

无人机搭载高清工业摄像头、三轴稳定云台、GPS 定位模块、数据传输模块, 高清工业摄像头采用分辨率 1920×1080 像素的 CMOS 传感器, 支持自动对焦, 清晰捕捉绝缘子表面细节特征; 三轴稳定云台抵消飞行抖动, 保证图像采集稳定性, 避免画面模糊影响识别精度; GPS 定位模块结合输电线路 GIS 地图, 实现巡检路径精准规划与定位, 确保巡检全覆盖无遗漏^[3]。

为适应复杂电磁环境, 对无人机进行抗干扰改装, 采用屏蔽性能优良的数据线与电源线, 减少电磁辐射对数据传输及设备运行的影响; 优化数据传输模块, 采用加密传输协议提升数据传输稳定性与安全性; 在机身表面喷涂抗静电涂层, 避免静电积累损坏设备; 同时对电池扩容, 延长续航时间至 60 分钟, 满足长距离线路巡检需求。

1.2 图像采集与预处理

制定图像采集规范, 无人机巡检飞行高度控制在 10~15 m, 与绝缘子水平距离保持 5~8 m, 确保图像中绝缘子占比适中且清晰显示表面污秽特征; 飞行速度控制在 5 m/s 以内, 避免速度过快导致图像模糊; 摄像头拍摄角度采用俯角 30°~45°, 减少阳光直射反光干扰, 保证绝缘子表面无遮挡。

*本文通信作者, E-mail: 632638854@qq.com。

图像预处理流程大致涵盖去噪、加强及几何校正这三大主要环节。中值滤波技术被普遍应用到椒盐噪声与高斯噪声去除的工作当中，而且还要保证绝缘子表面细微结构特征的完整体现。自适应直方图均衡化算法则重点改善灰度级分布情况，突出污秽区域与其他部分之间的对比效果，并且完全展示出其视觉属性。几何校正通过提取图像中绝缘子特征点，结合相机标定参数，采用透视变换算法校正畸变图像，确保绝缘子形状与实际一致，避免几何畸变影响特征提取与识别精度^[4]。

1.3 绝缘子污秽识别算法设计

本研究以YOLOv8算法为基底，设计出一种混合无锚框想法的高效目标识别架构，此架构具备高精度、强抗干扰及轻量级特性，非常契合无人机嵌入式系统实际应用的要求。为了改善目标定位精确度并且提升环境适应能力，在骨干网络里加入CBAM注意力机制，并且经由通道和空间双重注意力模块来完成对特征重要性的动态调节，进而明显改进了污染区域信息提取的速度，而且有效地减弱了背景噪声干扰的影响程度。

由于绝缘子的目标尺寸具有一定的固定性，所以本研究利用K-means聚类算法对数据集进行分类处理来选择合适的锚框参数，并根据所得的锚框参数优化YOLOv8模型中的锚框配置方案以提高目标检测定位精度。为了满足无人机嵌入式系统实时性的严格要求，在保证识别性能的前提下，采用深度可分离卷积代替传统卷积操作精简网络结构，大大减小了模型规模及运算复杂度。

改进后算法流程为，将预处理后的绝缘子图像输入改进YOLOv8模型，通过骨干网络提取图像特征，经注意力机制模块增强污秽特征，再通过颈部网络进行特征融合，最后通过检测头输出绝缘子位置信息与污秽程度分级结果，依据绝缘子表面污秽覆盖面积与灰度值将污秽程度分为轻度污秽、中度污秽、重度污秽三个等级。

1.4 在线监测系统集成

在线监测系统采用“无人机—地面站—服务器”三级架构，无人机作为数据采集终端，按预设巡检路径采集绝缘子图像，通过数据传输模块将图像数据与GPS定位数据实时传输至地面站；地面站采用工业级平板电脑，搭载巡检作业管理软件，实时显示无人机飞行状态与图像采集情况，支持巡检路径调整、紧急停机操作，同时对传输数据初步处理与存储。

服务器采用高性能工业服务器，搭载图像识别软

件与数据库管理系统，作为系统数据处理与分析中心，接收地面站传输的图像数据后，调用改进YOLOv8识别算法进行绝缘子污秽识别，输出识别结果与污秽程度分级信息，并将数据存储至数据库。

系统软件模块包括数据传输模块、图像处理模块、识别分析模块、预警展示模块、数据管理模块，数据传输模块采用4G/5G网络与WiFi双模传输，确保数据传输稳定性与实时性；图像处理模块实现图像预处理功能；识别分析模块负责绝缘子污秽识别与分级；预警展示模块通过可视化界面展示识别结果、污秽分布情况、预警信息，支持短信预警、声光预警；数据管理模块实现历史数据查询、统计、导出功能。系统工作流程为规划巡检路径与设置采集参数、无人机巡检采集数据、数据传输至服务器、服务器处理识别、生成监测报告与预警、运维人员制定检修计划。

2 实验验证与结果分析

2.1 实验设计

选取某220 kV输电线路段作为实验场地，该线路段全长15 km，途经工业区、郊区，绝缘子运行年限5年，存在不同程度污秽积累，具备实验典型性。实验设备包括改装多旋翼无人机（型号DJI Matrice 300 RTK）、高清工业摄像头（分辨率2000万像素）、地面站、高性能服务器（搭载Intel Core i7-12700K处理器、NVIDIA RTX 3090显卡）、绝缘子污秽样本。

实验评价指标包括识别准确率、召回率、检测速度、预警响应时间，识别准确率为正确识别的污秽绝缘子数量与实际污秽绝缘子数量的比值，反映算法识别精准程度；召回率为正确识别的污秽绝缘子数量与所有被检测绝缘子中实际污秽绝缘子数量的比值，反映算法漏检情况；检测速度为算法处理单张图像的时间，反映系统实时性；预警响应时间为从图像采集完成到系统发出预警信息的时间，反映系统快速响应能力。实验采用传统YOLOv8算法、改进YOLOv8算法、支持向量机（SVM）算法进行对比，验证改进算法优越性。

2.2 实验数据采集

实验于2024年5月至6月开展，选取晴天、阴天两种天气条件，分别在上午、下午两个时间段采集图像，确保数据多样性与全面性。无人机沿预设巡检路径作业，采集绝缘子图像共计2 000张，其中晴天1 200张、阴天800张，采集过程中记录每张图像对应的绝缘子位置、环境条件、污秽程度信息。

对采集图像筛选与标注，去除模糊、遮挡无效图像，得到有效图像1 800张，按7:3比例划分为训练集（1 260张）

与测试集（540 张）；采用 LabelImg 标注工具对图像中绝缘子目标与污秽区域标注，标注内容包括绝缘子边界框、污秽程度等级，为算法训练与测试提供标注数据；同时采集轻度污秽、中度污秽、重度污秽绝缘子实物样本各 50 个，用于验证算法对不同污秽等级的识别能力^[5]。

2.3 实验结果与分析

不同算法绝缘子污秽识别性能对比如表 1 所示，改进 YOLOv8 算法在各项指标上均优于传统 YOLOv8 算法与 SVM 算法。改进 YOLOv8 算法识别准确率达 96.8%，较传统 YOLOv8 算法提高 4.2%，较 SVM 算法提高 12.5%；

召回率为 95.3%，较传统 YOLOv8 算法提高 3.8%，较 SVM 算法提高 15.1%；检测速度为 32 帧 / 秒，较传统 YOLOv8 算法提高 5 帧 / 秒，满足实时监测需求。

通过分析可知，CBAM 注意力机制增强了污秽区域特征提取能力，抑制了背景噪声干扰，提升了识别准确率与召回率；优化锚框设计提高了绝缘子目标定位精度，减少了漏检误检；轻量化处理提升了算法运行速度。在不同污秽程度识别中，改进 YOLOv8 算法对重度污秽识别率最高（98.5%），轻度污秽识别率为 94.7%，可准确区分污秽等级，为分级预警提供依据。对比不同天气识别结果，晴天环境下改进 YOLOv8 算法

表 1 不同算法绝缘子污秽识别性能对比

算法类型	识别准确率 (%)	召回率 (%)	检测速度 (帧 / 秒)	轻度污秽识别率 (%)	中度污秽识别率 (%)	重度污秽识别率 (%)
SVM 算法	84.3	80.2	10	78.5	83.6	90.1
传统 YOLOv8 算法	92.6	91.5	27	90.3	93.2	95.6
改进 YOLOv8 算法	96.8	95.3	32	94.7	97.2	98.5

识别准确率 97.5%，阴天环境下 95.2%，虽略有下降但仍保持较高水平，表明算法抗环境干扰能力强，适应不同天气巡检需求。

2.4 系统实用性验证

在实验线路段开展系统实用性测试，无人机按预设巡检路径自动飞行，完成 15 km 线路巡检，采集绝缘子图像 1 200 张，系统成功识别污秽绝缘子 320 个，其中轻度污秽 180 个、中度污秽 105 个、重度污秽 35 个。运维人员根据预警信息现场核查，结果显示系统识别准确率 95.6%，与实验测试结果基本一致，表明系统可准确识别绝缘子污秽情况。

系统预警响应时间平均耗时 2.3 秒，实现污秽故障快速预警，为运维人员处理故障争取时间；连续运行测试中，系统稳定运行 8 小时，未出现数据传输中断、识别算法崩溃问题，稳定性与可靠性良好。与传统人工巡检对比，该系统巡检效率提升约 8 倍，1 小时可完成传统人工巡检 2 天工作量，同时规避人工巡检安全风险，降低运维成本；系统生成的监测报告清晰展示绝缘子污秽分布与分级结果，为运维人员制定检修计划提供数据支撑，实现精准运维。

3 结束语

本研究针对输电线路绝缘子污秽监测实际需求，设计基于无人机图像识别的在线监测系统，通过无人机平台选型改装、图像采集预处理优化、识别算法改进及系统集成，实现绝缘子污秽高效精准监测。实验

结果表明，改进 YOLOv8 算法识别准确率达 96.8%，检测速度 32 帧 / 秒，系统适应不同天气与复杂地形环境，有效提升了绝缘子污秽监测智能化水平。该系统通过无人机自主巡检与图像识别技术深度融合，解决了传统监测方法效率低、安全性差、实时性不足等问题，实现了绝缘子污秽在线监测与分级预警，为输电线路运维提供可靠技术支持，且具有操作简便、成本可控、扩展性强特点，可广泛应用于不同电压等级输电线路绝缘子污秽监测，工程应用价值良好。未来将进一步优化图像识别算法，融合红外、紫外等多传感器数据，提高极端天气识别精度；结合大数据分析预测模型，实现绝缘子污秽积累趋势预测，为输电线路运维提供更全面的决策支持，推动电网运维向智能化、精准化发展。

参考文献：

[1] 孙浩,蔡萌萌.基于机器视觉的输电线路绝缘子缺陷自动检测系统研究[J].自动化应用,2025,66(19):164-166.
 [2] 宋欣杰,金一鸣.基于深度学习的架空输电线路绝缘子识别方法研究[J].电气技术,2025,26(09):62-68,78.
 [3] 丁海勇.高压输电线路绝缘子污秽检测与维护策略研究[J].电力设备管理,2025(15):5-7.
 [4] 杜泉龙.基于图像处理的输电线路绝缘子缺陷自动检测算法[J].电气技术与经济,2025(05):286-288.
 [5] 张传琦,张博.自动化运行技术在输电线路绝缘子污闪防治中的应用[J].装备维修技术,2025(02):34-37.

沥青路面施工技术在市政配套道路中的应用

麦伟俊

(广东省建筑工程机械施工有限公司, 广东 广州 510000)

摘 要 市政配套道路沥青路面施工存在作业面受限、线形复杂、交叉干扰多等特性, 需要从全过程出发分析混合料摊铺、压实、接缝处理、特殊节点施工等环节, 总结出适宜市政道路场景的施工技术, 进而符合道路工程建设和运营需求。基于此, 本文分析市政配套道路沥青路面施工技术, 通过优化摊铺、温度控制、压实遍数协同、接缝衔接以及井周边处理策略, 以期为保证市政配套道路沥青路面结构具备连续性、均匀性提供借鉴, 对改善城市内部交通状况起到积极作用。

关键词 市政配套道路; 沥青路面; 摊铺工艺; 压实控制; 接缝处理

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.014

0 引言

市政配套道路作为城市内重要的交通基础设施, 其主要作用是满足公共服务设施、社区以及商业街道之间短距离通行需求。该类型道路施工中受到地下管线、既有建筑、用地边界的约束影响, 导致道路建设过程中存在断面多变、路径曲折、交叉口密集等特性。这些施工作业环境下开展沥青路面施工时, 需要在有限空间内协调多方作业, 并且达到扰民影响小、开放交通速度快、外观质量高等多重目标。沥青路面是市政配套道路的主要路面组成结构形式, 其能够降低后期运行维护成本, 也能提高道路通行的舒适性以及安全性^[1]。因此, 深入分析市政配套道路沥青路面施工技术, 能够保证道路沥青路面摊铺均匀性、压实有效性、接缝平顺性、特殊部位处理效果达到要求, 为提高城市道路建设和运营水平奠定基础。

1 工程概况

案例工程为华东某市高新区新建市政配套道路项目, 位于城市核心区边缘, 主要服务于新建居住小区与产业园区之间的交通连接。道路全长约 860 m, 规划红线宽度 12 m, 设计等级为城市支路, 设计车速 30 km/h。道路横断面采用单幅路形式, 布置为 3.5 m 车行道 + 1.5 m 人行道(两侧)。沿线交叉 5 条现状支路, 布设雨水检查井 28 座、污水检查井 22 座、各类管线井 40 余处。路面结构自上而下为: 4 cm AC-13C 细粒式沥青混凝土 + 6 cm AC-20C 中粒式沥青混凝土 + 透层 + 20 cm 水泥稳定碎石基层 + 15 cm 级配碎石垫层。工程地处软土区域, 地下水位较高, 施工期间需同步协调电力、通信、燃气等多家单位管线迁改, 工期紧张, 社会关

注度高, 对沥青路面平整度与外观质量要求严格。

2 施工方案设计

在市政配套道路沥青路面建设施工中, 需要遵循适配性、连续性、协同性原则, 确保施工方案设计达到科学性、合理性要求。首先, 市政配套道路沥青路面设计中需确定道路线形和宽度参数, 并以此作为基础确定摊铺机作业模式: 单幅路面采用单机连续摊铺方式以防存在纵向裂缝; 双幅路面则按照规则合理划分施工分幅顺序。其次, 根据市政配套道路沥青路面的沥青类型和环境条件, 确定拌和、运输、摊铺、压实温度区间, 并明确各环节施工窗口。最后, 对于道路中检查井、交叉口、雨水口等特殊部位制定专门的施工流程, 通过井框预调高、周边回填料选择以及摊铺避让策略以提高施工效果。

3 沥青路面施工技术的应用

3.1 材料设计拌合

1. 沥青胶结料的选型与性能适配。施工单位根据市政配套道路的交通特点与气候环境选定沥青类型。在高温多雨地区, 项目采用 SBS 改性沥青, 因其高温抗车辙能力和低温抗裂性能优于普通基质沥青; 在低温寒冷区域, 则优先选用延度大、脆点低的 70 号 A 级道路石油沥青。拌合站技术负责人依据设计文件和现行规范, 对进场沥青进行针入度、软化点、延度及老化后质量损失等指标复验, 确认其满足技术要求后方可投入使用^[2]。

2. 矿料级配设计与骨架结构优化。市政道路工程建设时, 施工人员需要严格遵循《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2017) 的标准开展施工作业,

明确市政道路短距离、频繁启停的受力特点, 优先选择使用 AC-13C 或 AC-16C 密级配沥青混凝土路面结构形式。而在沥青混凝土路面设计阶段需要进行筛分试验, 确定各等级材料的实际粒径分布, 并通过试算法、软件辅助等方式确定沥青混凝土材料中各种材料加入比例, 保证级配曲线在规定范围内。同时, 沥青混合料配制阶段需要确保粗集料形成有效嵌挤骨架结构, 进而提高沥青路面结构的整体性。为保证沥青混凝土路面的抗离析效果达到要求, 在沥青混合料设计阶段, 适当增大 4.75 mm 以上的粗集料比例, 能够有效防止沥青混合料摊铺作业因为振动造成骨料滚落。细集料与矿粉材料用量需要结合沥青膜厚度做出轻微调整, 保证沥青充分裹覆集料且不会过量。

3. 拌合工艺参数的动态控制与协同。市政配套道路沥青路面施工阶段, 需要由专业技术人员进行集料加热、沥青加热、成品料出厂温度控制, 确保三者协同配合以增强路面施工效果。普通沥青混合料集料加热温度 170 ~ 180 °C, 沥青加热温度 160 ~ 165 °C, 成品混合料铺温度 155 ~ 165 °C; 改性沥青混合料以此作为基础, 适当增加 5 ~ 10 °C。沥青混合料拌和阶段需要在设备上设定自动程序, 保持干拌 5 ~ 10 s、湿拌 35 ~ 45 s, 总搅拌时间 45 s 以上以确保混合料搅拌达到均匀性要求。如果市政道路施工阶段环境温度骤降或运输时间较长, 则拌合站负责人需适当地提高沥青混合料温度上限, 并且通知摊铺班组及时调整压实方案。而在每台运输车辆装载沥青混合料完成后, 由质检人员检测是否存在花白料、不均匀、结团等现象, 并做好温度数据记录工作。

3.2 摊铺工艺控制

1. 摊铺机行进路径规划。施工单位在摊铺前组织测量人员对现场进行全断面复测, 获取障碍物位置、转弯半径及交叉口高程数据, 并据此在 BIM 或 CAD 平台中模拟摊铺机行进轨迹。项目采用一台 ABG8820 型摊铺机作业, 其最小转弯半径为 6.5 m, 因此对于曲率半径小于 7 m 的弯道, 施工员将路段划分为两段, 分别设置起终点, 避免强行转向造成履带打滑或熨平板偏移。在“L”形路口, 施工班组先完成主路 70 m 以上直线段摊铺, 待混合料温度降至 130 °C 以下再调头施工支路, 防止履带碾压未稳定面层。运输通道沿道路一侧预留 3.5 m 宽临时车道, 倒车区设置于距摊铺机 15 ~ 20 m 处, 确保运料车卸料间隔不超过 90 s。摊铺速度稳定控制在 2.2 ~ 2.8 m/min, 避免因等料停机超过 3 分钟而形成横向冷缝, 从而保障摊铺作业的连续性与路面结构的整体性^[3]。

2. 熨平板初始仰角设定。市政配套道路沥青路面施工阶段摊铺为重点环节, 需要严格按照设计方案要求确定摊铺厚度, 目前主要为 4 cm 或 6 cm 两种厚度尺寸。在该环节中由技术人员检测基层高程参数, 并且精准计算熨平板初始仰角, 再利用摊铺机设备厚度调节螺杆或垫板预设, 使垫板厚度偏差控制在 ±0.5 mm 以内。如果市政配套道路施工阶段发现纵坡度超过 0.5%, 则摊铺机操作人员立即启动非接触式超声波平衡梁系统, 其感应高度设定为 30 cm, 采样频率 20 Hz, 能够及时反馈市政道路基层的起伏, 并自动调整熨平板仰角。而在市政配套道路交叉口、竖曲线位置上, 施工人员将找平基准调整为拉线控制, 拉线桩间距 10 m 以内、张力 1 kN 以上, 能够保证市政道路施工阶段高程控制精度达到要求。在首次摊铺完成 10 m 长路段后, 使用水准仪复核检测路面高程。如果经过测量路面高程和设计参数值偏差超过 ±20 mm, 则工作人员及时调整摊铺机熨平板仰角旋钮 0.5° ~ 1°, 直到摊铺面达到平整状态后再进行施工^[4]。

3. 螺旋布料器运行参数匹配。市政配套道路沥青路面施工阶段, 摊铺机螺旋布料器作为重要组成部分, 由操作人员按照摊铺速度动态化调节, 并保证混合料料位始终保持在螺旋叶片高度 2/3 处, 大约 25 ~ 30 cm。若摊铺设备速度设定为 2.5 m/min, 则螺旋布料器左右旋转速度为 80 ~ 95 rpm; 若摊铺机速度下降到 2.0 m/min, 则螺旋布料器旋转速度调整到 70 ~ 80 rpm, 能够防止因为摊铺机材料供应过剩而引发混合料堆积。针对市政道路路面宽度在 8 m 以下的狭窄路段, 由操作人员将螺旋外侧挡板向内收缩 10 cm, 并且将转动速度调整到 60 rpm 以下, 能够减少横向推力以防粗集料滚落到边缘形成离析带。同时, 摊铺作业阶段由辅助人员间隔 30 min 进行一次螺旋叶片上沥青焦化物清理, 能够防止粘料造成现场布料不均匀。

3.3 压实工艺实施

1. 压路机组合作业顺序。施工单位根据道路实际摊铺宽度动态确定压路机配置方案: 当摊铺宽度大于 8 m 时, 采用 1 台 XD133 双钢轮压路机 (自重 13 吨) 配合 1 台 XP303 轮胎压路机 (自重 30 吨) 组合作业; 当宽度小于 8 m 时, 则全部使用 YZC12 小型双钢轮压路机 (自重 12 吨), 避免大型设备转弯困难造成边坡压实不足。施工班组严格遵循“紧跟、慢压、高频、低幅”的作业原则, 初压在摊铺机后 10 ~ 15 m 内启动, 复压紧随其后覆盖全幅, 终压在温度降至 90 °C 前完成。各阶段压路机行驶轨迹纵向重叠不少于 20 cm, 横向错

开1/3轮宽(约60~70 cm),防止在同一位置反复碾压引发混合料推移。操作手保持匀速行驶,初压速度控制在1.5~2.0 km/h,复压2.5~3.5 km/h,终压2.0~2.5 km/h,确保压实过程平稳连续^[5]。

2. 碾压遍数与温度控制。压路机操作手依据混合料类型与现场环境温度动态调整碾压遍数:AC-13C改性沥青混合料初压1遍、复压4~5遍、终压1~2遍;普通AC-20C混合料则复压增加至5~6遍。当环境温度高于25℃时,复压遍数可减少1遍;低于15℃时,则增加1遍并适当提高初压温度起点。关键控制点在于确保全部碾压作业在有效温度窗口内完成——初压起始温度不低于145℃,复压区间为120~135℃,终压结束温度不低于90℃。操作手通过手持红外测温仪每10分钟检测一次路面温度,并观察混合料状态:若表面出现横向推移或微裂缝,立即暂停振动碾压,切换为静压模式或暂停作业,待混合料温度回升至适宜区间后再继续,从而保障压实效果与结构完整性。

3.4 接缝处理技术

1. 横向接缝切割与界面清理。市政配套道路沥青路面施工阶段,在每日摊铺作业结束后,组织技术人员使用液压切割机进行沥青层端部垂直切割,切缝设置在摊铺机停止前方1.0~1.5 m处,并保证切割深度贯穿整个面层以保证断面平直、无斜坡。沥青路面切割结束后,使用空气压缩机将碎屑、粉尘清理干净,并使用棉布擦拭水分以达到洁净、干燥的要求。在该环节中需要确保沥青混合料温度降低到90℃以下,如果当日预报有雨或环境温度较低,则在清理结束后覆盖保温毯,以防潮气进入路面断面影响结构粘结性。

2. 接缝面加热与粘层涂布。在第二日进行沥青混合料摊铺作业前1 h,由工作人员操控红外线加热板进行沥青路面接缝面的均匀加热,通过加热8~12 min确保沥青混合料路面温度达到80~90℃。现场施工作业环节由工作人员操控红外测温仪检测沥青混合料断面温度,防止局部过热影响粘结效果。在沥青混合料路面断面温度达到要求后,均匀涂刷快裂型阳离子乳化沥青粘层,涂刷时向两侧延伸15 cm,用量0.4~0.5 L/m²。乳化沥青层涂刷结束后快速覆盖双层复合保温棉以防热量损失,从而能够提高新旧沥青路面的融合效果。

3. 新料摊铺与跨缝碾压作业。沥青混合料路面摊铺作业阶段,熨平板前端距接缝30 cm左右,并保证新摊铺沥青混合料覆盖旧缝宽度10~15 cm。在该环节摊铺施工阶段,将设备速度控制在1.0~1.2 m/min。在熨平板完全通过接缝后,逐步提升到正常摊铺作业

速度。初压施工使用双钢轮压路机紧随摊铺机进行,保证沥青混合料在130℃以上进行横向接缝碾压施工,并且每次重叠旧缝15~20 cm,碾压速度1.5 km/h静压3~4遍。而后进入纵向碾压序列,在碾压作业阶段使用长度3 m直尺检测接缝位置高差。如果沥青路面高差超过2 mm,则需要局部补料并复压处理,确保接缝密实且无跳车感。

3.5 特殊节点施工技术

1. 检查井框高程预调。沥青路面施工前需要按照设计方案要求检测高程参数,通过井框一次性调整到位,再使用高强砂浆或细石混凝土固定。井框顶面需要稍微超过最终路面2~3 mm,从而预留沥青摊铺沉降量。高程调整完成后覆盖保护板,避免后续施工扰动,并确保摊铺时井框位置精准度合格。

2. 井周回填与过渡处理。井周5~10 cm范围内使用高流动性早强型材料回填,通过自密实混凝土或高强灌浆料分层浇筑、振捣施工以达到密实度要求。在回填结束后确保和基层平顺衔接,防止形成刚性突变。而在沥青混凝土路面摊铺阶段,井周区域减少振动,熨平板改为静压模式以防混合料下陷。

4 结束语

市政配套道路沥青路面施工存在界面复杂、施工空间狭窄、交叉干扰多等因素影响,施工单位需在有限空间内提高沥青路面的施工效果。在市政配套道路沥青路面施工阶段,需要明确摊铺、碾压等各环节施工要素,落实混合料配制以及质量控制措施,进而保证沥青路面施工效果达到要求,解决以往市政配套道路施工环节存在的各项问题,提高市政配套道路路面建设效果,进而为市政工程和运营水平提升奠定基础。

参考文献:

- [1] 王杰聪.市政道路沥青混凝土路面施工技术研究[J].运输经理世界,2022(05):7-9.
- [2] 邓凤霞,祝廷尉.市政道路沥青路面加铺再生施工技术研究[J].交通世界,2021(24):102-103.
- [3] 康桂亮.市政道路沥青混凝土路面施工技术研究[J].交通科技与管理,2023,04(07):118-120.
- [4] 杜杰.市政道路沥青混凝土路面微裂破碎改造施工技术研究[J].工程技术研究,2024,09(07):77-79.
- [5] 刘海.市政工程道路沥青路面施工技术[J].建材发展导向,2024,22(13):107-109.

非开挖施工技术在市政管道施工中的运用分析

诸卫卫

(南京市水务工程建设管理中心, 江苏 南京 210000)

摘 要 市政管道非开挖施工技术以水平定向钻进与微型隧道法为主要形式, 具有效率高、精度强、干扰小的特点, 能够在复杂地质条件下实现安全高效施工。本文系统分析了非开挖技术在市政管道施工中的实际运用, 从前期地质勘察与设备准备、科学施工方案编制到导向控制与泥浆循环等环节进行了细化阐述, 并进一步提出以质量监控、风险防控及数字化管控为核心的保障体系。结果表明, 该技术体系可有效增强施工精度与结构安全性, 降低环境扰动, 为市政管网建设提供可推广的技术依据与实践参考。

关键词 非开挖施工技术; 市政管道施工; 安全风险防控体系; 数字化监测

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.015

0 引言

在城市基础设施建设不断发展的背景下, 地下管网更新与扩容需求不断增长, 传统开挖方式易造成道路破坏、交通中断及环境污染。非开挖施工技术的出现为市政管道建设提供了新的解决思路, 其依托自动化导向、实时监测及数字化管理, 实现了施工过程的精准控制与环境保护并行。基于此, 保证非开挖施工技术发挥最大化优势尤为重要。

1 市政管道施工中非开挖施工技术运用优势

非开挖施工技术可通过地下定向钻进、微型隧道顶管等方式实现管线铺设, 并能够依托自动化导向与实时监测系统在复杂地质条件下实现精准控制, 由此开展的市政管道施工可有效规避传统开挖方式对地表道路、绿化带及建筑基础的破坏, 扬尘、噪声等二次污染也能够得到大幅减少, 而且能够在确保施工精度的同时实现高效掘进^[1]。深入分析可以发现, 非开挖施工技术在节省占地、降低交通疏解成本、节约后期修复费用等方面的表现也较为突出, 而正是由于其具备的高效率、低干扰等技术特征, 才使得非开挖施工技术近年来在我国市政管道施工中得到广泛运用。

2 市政管道施工中非开挖施工技术运用优化策略

2.1 做好前期准备工作

在市政管道非开挖施工中, 前期准备阶段影响深远, 直接决定了具体施工质量、效率及安全。以水平定向钻进技术为例, 其作为典型的非开挖施工技术, 在市政管道施工中的钻进轨迹稳定、管线埋设精度控

制, 均离不开高水平的准备工作支持, 具体涉及地质与水文调查、设备选型调试、施工场地布置等方面。在地质与水文条件调查实践中, 需要获取施工区域土层分布、含水层深度、地下障碍物位置、地层渗透系数等基础参数, 这就要科学运用钻探取样、地质雷达等措施, 并重点关注高含水砂层、坍塌地层, 采取针对性的防泥浆渗漏、防坍塌措施。这一过程还应科学开展数字化建模, 充分利用地质资料, 依托 BIM、GIS 等技术建立地下空间数据库, 重点分析地下水位变化规律、周边管线的相互影响, 以此为钻进路径优化、泥浆压力不均问题预防等实践提供依据。

在设备准备与调试方面, 需要充分考虑设计管径、长度及地层特性, 以此针对性选择导向系统, 确定钻机功率。例如: 对于中小口径市政管道, 一般使用 20 ~ 45 吨级钻机, 大口径穿越项目则需配备 70 吨以上牵引力设备。对于导向仪器, 为确保钻头轨迹与设计曲线一致, 施工人员需要校准至 $\pm 1^\circ$ 以内精度, 并在调试过程中做好对泥浆泵、回扩器、导向钻头的综合检测, 以此确保机械状态稳定可靠; 施工场地布置应聚焦泥浆循环池、回收池、储浆罐等方面, 并做好入、出土点的防渗铺设与支护, 以此确保循环系统闭合运行, 避免出现泥浆外溢污染周边环境的情况^[2]。

2.2 科学编制施工方案

在全面开展前期准备工作的同时, 还应做好施工方案的编制, 这同样是非开挖施工技术科学运用的重要前提。以微型隧道法为例, 这一非开挖施工技术在市政管道施工中的运用主要通过小型盾构机械完成掘

进、出渣、顶进和纠偏等全过程操作,属于典型的全机械化非开挖施工方式。其施工方案编制需要充分考虑工艺路线、设备选型、顶力设计、管节结构等细节,地质、水文、空间与环境等多种因素带来的影响也需要得到充分考虑,以此保证技术运用过程中的技术与管理双重可行。具体的施工方案设计应遵循“最短路径、最小干扰”的原则,以避免高风险地段与地表荷载集中区域,同时考虑埋深变化、坡度控制等细节进行掘进轴线的平面及纵断面设计。一般情况下,需要在地表以下3~10米范围内控制管道埋深,以此平衡覆土压力与施工成本,如区域存在地下障碍物或复杂地层,则可以考虑引入曲线掘进技术,并适当使用浅埋过渡段的方式,以此实现连续顶进;设备选型则应充分考虑地层特性、施工距离、市政管道管径,以此进行盾构机选配,一般黏土层、粉质土层、软弱夹层地段可选择土压平衡式盾构,而地下水丰富地段、高渗透性砂层则适合运用泥水平衡式盾构,通过科学运用掘进主机的实时姿态监测、自动纠偏功能,即可保证盾构姿态偏差不超过±10毫米。

施工方案编制还应做好顶力、出渣与泥浆循环系统、施工监测方面的工作,具体应基于管径长度、地层阻力系数、施工距离计算总顶力,力学传递与结构安全需要在这一过程中得到同等重视^[3]。施工方案中的管节一般选择钢筋混凝土或球墨铸铁材质,为确保接口抗渗与抗压性能,应在管口设置钢制密封环,同时在顶进过程中实时监控顶力分布,即可有效防范管节位移不均问题,实现施工过程的均衡推进;出渣与泥浆循环系统设计需要优先保证系统密闭性,渣土运输效率也需要充分考虑,建议选用泥浆循环运输方式,由泥浆泵输送渣浆至地面分离装置,并通过离心筛分进行泥砂分离处理,必要时可设计双泵循环与储浆中继站结构,以此降低长距离掘进的压力、能源消耗;在监测与控制方面,需要在施工过程中对姿态、顶力、土压、扭矩、泥浆压力等关键参数进行实时监控,应保证监测系统具备数据采集、自动报警、可视化分析等功能,且能够第一时间发现和应对异常情况,以此保证施工顺利推进。

2.3 聚焦技术运用细节

除上述措施外,市政管道施工中非开挖施工技术运用还应聚焦技术的运用细节。以施工过程中的轴线测量、定位为例,该环节直接影响管线埋设准确性,

具体施工应利用全站仪对钻机入土点、出土点及中间导向点进行坐标测定,这一过程需要同步推行“三测复核”制度,保证交叉复核在测量人员、技术负责人及监理单位三方同时开展。具体的导向孔施工则应科学运用导向仪,在发现地质突变或导向偏差情况出现后,施工人员应立即暂停钻进并进行修正,这需要采用反推、微调角度等方式,必要时还应重新设定导向点,重新标定控制基准,辅以坐标记录表与测量日志开展10米钻进段的数据登记,即可保证具体施工过程的全过程可追溯。

具体施工还应考虑地层结构差异影响,这种影响会直接作用在钻机扭矩、推力、转速及泥浆压力等参数方面。为此,建议针对性建立“参数—地层”响应模型,保证钻进工况可基于实时反馈数据动态调整。在模型支持下,可在钻进初期采用轻压慢转模式,在稳定的平直段逐步提高钻机转速与推力,而在钻进至砂质、卵石或碎石层后则应降低转速并适当增大扭矩,以此避免初期摩阻过大等问题出现,这一过程需要聚焦推力、扭矩、泥浆比重、流量及压力曲线等关键指标分析,通过算法对异常波动进行识别与报警。

此外,还应聚焦施工过程中的导向钻头更换与回扩作业控制,应在完成导向孔施工并经校核确认符合设计轴线后,第一时间将导向钻头更换为回扩钻头,具体需要基于管道外径及安全系数确定回扩钻头直径,多控制为设计管径的1.2~1.5倍,这关系到管线能否顺利回拖与稳定孔壁的形成。更换钻头前需要冲洗导向孔,并分级开展回扩作业,为减少对孔壁的扰动,应遵循“逐级扩大”原则,通过两至三次扩孔实现目标直径。回扩时需保持恒定推力与旋转速度,并控制泥浆循环系统的泥浆黏度在35~45秒(马歇尔漏斗计)范围内,比重保持在1.1~1.2之间,以此保证成孔质量。

3 市政非开挖施工的质量控制与安全保障机制

3.1 施工过程质量控制机制

在前述技术细节完善的基础上,非开挖施工质量控制成为保障工程稳定性的核心环节。施工全过程应建立精密控制与实时反馈结合的体系,确保关键参数可测、可控、可追溯,导向阶段依托高精度定位系统实时监测钻头姿态,偏差控制在±10毫米以内,轨迹曲率变化率不超过1°/米,防止轴线偏移,扩孔与回拖阶段需监测泥浆比重(1.1~1.2)与黏度(35~45秒),

利用流量计、压力传感器分析循环状态，并据此动态调整扭矩与推力，保持回拖速度稳定，防止孔壁扰动与管节受力不均。

接口施工实行分段检测与逐节验收制度，抗渗压力不低于 0.4 MPa，轴线偏移不超过 5 毫米；泥浆分离环节应将渣浆含砂率控制在 5% 以内，防止设备磨损与循环阻塞^[4]。各作业段均应设监测记录表，技术负责人每日审核关键数据并进行趋势分析，发现顶力异常或姿态波动应立即组织技术研判并修正施工参数。依托“数据采集—分析判断—快速修正”的闭环控制，可实现质量全过程动态管理，使非开挖施工在复杂地层中保持高精度与结构安全，为后续安全保障机制构建提供可靠基础。

3.2 安全风险防控体系构建

非开挖施工在复杂地质条件下作业，安全风险隐蔽性强，若控制不到位易引发塌陷、泥浆外溢、地表沉降等问题，影响结构稳定与周边环境安全，安全保障需建立“预测—预警—响应—修复”一体化体系，以风险识别为前提、监测预警为核心、应急响应为支撑，形成动态化防控格局。风险识别阶段应依托地质勘测与历史施工数据建立分区风险模型，将高含水砂层、富水卵石层及地下管线密集区列为重点监测区，结合地层分布特征设置沉降监测点与泥浆压力传感器，实现风险分级管理。

在监测预警方面，宜布设分布式光纤或 MEMS 传感器，对顶力、扭矩、孔压、地表位移等关键参数进行连续采集，当扭矩波动率超过 15%、地表沉降超出 10 毫米阈值时应自动触发报警。监测系统应具备数据融合、趋势预测与可视化展示功能，便于施工指挥中心快速研判，为防范泥浆渗漏、地表隆起等突发风险，可在泥浆循环系统设置压力溢流阀与自动停泵装置，并在回扩作业中保持泥浆压力稳定于设计值 ± 0.05 MPa 范围内。

应急响应环节需提前制定专项预案，明确监测报警、人员疏散、注浆回填、压力调节等操作程序，建立 24 小时值守制度，确保异常情况能在 5 分钟内完成现场处置。安全检查应纳入日常制度化管理，对设备、导向系统、泥浆管路开展定期巡检与隐患排查。

3.3 数字化监测与智能管控措施

为进一步增强非开挖施工的安全与质量控制能力，需构建以数据驱动为核心的数字化监测体系，实现从

人工巡检向智能管控的转变，系统应以传感器网络为基础，在钻机、导向系统及泥浆循环单元布设压力、扭矩、流量、姿态等传感器，并将采集数据经无线通信模块实时传输至项目指挥中心。监控平台依托 BIM 与 GIS 融合建模技术，能够将地下空间、地层结构与管线分布可视化呈现，实现施工过程的三维动态管理，各节点数据经云端服务器汇聚后，通过算法模型进行趋势分析与异常识别，一旦顶力或泥浆压力偏离设定阈值，即自动生成预警并联动控制指令，指挥系统执行参数修正或设备减载操作^[5]。

在施工监测中可引入数字孪生技术，构建虚实对应的动态模型，将地表沉降、孔压变化及钻进路径偏差进行同步映射，使管理人员能够在虚拟环境中实时评估风险状态并优化工艺参数。系统内置数据追溯与日志审计功能，可按时间序列记录施工全过程，便于事后分析与质量责任追踪。智能管控还应结合机器学习模型，对历史施工数据进行特征提取与模式识别，形成自学习算法，用于预测钻进负荷、泥浆耗量及设备磨损趋势，从而实现预测性维护与工况自适应调节。

4 结束语

非开挖施工技术在市政管道工程中展现出高效、安全与环保的综合优势，其以导向控制、泥浆循环及数字化监测为核心，实现了在复杂地层中的精准掘进与低干扰施工。本文从前期准备、方案编制到质量控制与风险防控进行了系统阐述，构建了以数据监测、风险预警与智能管控为支撑的全过程保障体系。实践表明，该体系可有效增强施工精度与结构安全，减少地表扰动与后期维护成本。未来应继续强化技术标准化与信息化应用，使非开挖施工在市政建设中实现智能、高效与绿色发展。

参考文献：

- [1] 祝赫. 非开挖施工技术在市政管道施工中的实践分析[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(22): 115-116.
- [2] 张长沙, 宋少杰. 浅析非开挖施工技术在市政管道施工中的应用[J]. 科技风, 2022(20): 70-72.
- [3] 高文胜, 王保存, 周航羽, 等. 非开挖施工技术在市政管道施工中的应用[J]. 绿色环保建材, 2021(11): 88-89.
- [4] 吴健. 非开挖施工技术在市政管道施工中的应用[J]. 工程技术研究, 2021, 06(02): 80-81.
- [5] 赵耀龙. 市政给水管道施工中非开挖施工技术[J]. 建材与装饰, 2019(33): 42-43.

高速公路路面基层大宽度摊铺与协同碾压施工技术

马尼比

(宁夏交通建设股份有限公司, 宁夏 银川 750000)

摘 要 为解决传统分层摊铺工艺导致的半刚性基层层间粘结弱、施工周期长及重载施工车辆引发基层早期损伤等问题, 以某区试验路工程为例, 对高速公路路面基层施工技术进行创新研究, 提出大宽度摊铺与协同碾压一体化施工技术, 通过双机联铺实现 12 m 全幅基层连续摊铺, 取消层间养生间隔; 采用 30 t 钢轮静压→20 t+32 t 振动压路机梯队列振压→26 t 胶轮收光的协同碾压工艺, 强化层间骨料嵌挤融合。实证表明, 该技术使工期缩短 50%、反射裂缝减少 70%, 某区试验路节约养护成本 9 440 元 /km, 路面寿命延长 3~5 年, 为高速公路重载交通路段基层施工提供技术参考。

关键词 大宽度摊铺; 协同碾压; 半刚性基层; 养护成本

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.016

0 引言

在高速公路半刚性基层路面建设中, 传统分层摊铺工艺长期面临严峻挑战, 分层施工导致层间粘结薄弱, 形成结构性分离界面; 重载施工车辆在基层养生期碾压时, 轮载作用下层底拉应力显著超过材料劈裂强度, 引发不可逆的早期损伤, 致使通车 1~2 年内即出现反射裂缝、网裂等病害, 大幅缩短路面使用寿命。为根治此顽疾, 本研究创新提出异步连续摊铺与协同碾压集成技术, 通过底基层与基层大宽度连续摊铺, 在 30 min 内完成双层混合料铺设, 使上下层骨料在塑性状态下相互嵌挤; 同步采用梯度碾压工艺, 强化层间材料融合, 彻底消除层间弱接缝^[1]。某区试验路工程实证表明, 该技术使层间粘结强度提升 80%, 反射裂缝间距增至 > 20 m, 从根源上规避了施工车辆碾压损伤, 为高速公路半刚性基层施工提供了全新解决方案。

1 工程概况

某省高速公路典型路面基层结构普遍采用半刚性材料组合设计, 其中水泥稳定碎石基层与石灰土底基层为核心构成, 这种结构虽能提供较高承载力, 但在实际施工中暴露显著瓶颈, 超载运输车辆在底基层铺筑期间通行时, 轮载产生的层底拉应力高达 0.543 MPa, 超过石灰土材料 7 d 龄期劈裂强度近 30%, 导致未成型结构发生不可逆损伤; 而在基层施工阶段, 车辆荷载进一步引发二灰碎石层底拉应力超限, 形成层间隐形

缺陷, 成为通车后早期反射裂缝与网裂病害的主要诱因, 路面基层结构如表 1 所示。

2 大宽度摊铺技术

2.1 全幅摊铺设备

全幅摊铺设备配置通过双机联铺作业模式实现了工艺体系的重大突破。该技术采用两台大功率摊铺组成梯队作业系统: 前机负责下层混合料的摊铺与初步整形, 后机在保持 5~8 m 间距范围内同步进行上层材料铺设^[2]。设备配备液压伸缩式熨平板组合, 可灵活调节以适应 12 m 全断面摊铺需求, 通过高精度拱度装置将横坡误差控制在 0.3% 以内, 确保厚度均匀性。工艺核心在于严格把控施工时序——下层初压后须在 30 min 塑性窗口期内完成上层覆盖, 使骨料在振动碾压中形成深度互嵌的咬合结构, 彻底取代传统水泥净浆粘层。为保证施工精度, 系统集成激光传感器与全站仪构成的高程控制系统, 实时同步基准线, 将累计摊铺厚度误差控制在 5 mm 内, 为后续协同碾压创造理想条件。这种配置不仅从根本上消除了层间分离风险, 更为基层整体成型奠定了坚实的基础。

2.2 混合料动态控制

混合料动态控制是保障大宽度摊铺施工质量的核心环节, 其关键在于实现拌合、运输与摊铺工序的高效无缝衔接。拌合站采用双卧轴强制式搅拌机, 通过动态调控骨料仓门开度与皮带机转速, 确保产能稳定

表 1 路面基层结构

结构层	材料类型	设计厚度 (cm)	常见病害诱因
基层	水泥稳定碎石	16 ~ 20	车辆碾压致层底拉应力超限 30%
底基层	石灰土	16 ~ 20	劈裂强度不足 (≤ 0.07 MPa)
特殊组合	二灰碎石 + 石灰土	18+18	层间分离与早期反射裂缝

在 400 t/h 以上, 以精准匹配摊铺机 4 ~ 5 m/min 的行进速度; 同时配备微波含水率检测仪, 实时监测混合料状态, 并能够根据环境温湿度变化自动进行 $\pm 0.5\%$ 的含水量补偿, 有效消除材料含水波动对最终压实度均匀性的不利影响。在运输环节, 创新应用“三段装料法”, 即要求自卸车分三次移位装载, 每斗卸料量严格控制在车厢容积的三分之一, 从装料源头最大限度地减轻粗细骨料的离析现象; 全程使用苫布进行严密覆盖, 在高温季节额外增加隔热层, 确保混合料运抵现场时的温度始终维持在规范允许的摊铺阈值范围内。这种贯穿于拌合、运输全过程的动态精细化调控, 不仅有力保障了混合料出厂至摊铺前的均匀性和工作性, 也为后续协同碾压作业提供了理想状态的铺筑材料, 奠定了基层整体高密度成型的基础^[3]。

2.3 层间一体化处理

层间一体化处理工艺通过创新方法彻底改变了传统的层间粘结方式。施工中摒弃了传统的水泥净浆喷洒工序, 仅在摊铺上层材料前使用清扫设备清除下层表面的浮尘杂质, 随后立即进行上层混合料的摊铺。其核心技术原理是依靠后续协同碾压工艺产生的振动压实作用, 使仍处于塑性状态的上下层混合料在高压实能作用下发生骨料间的相互楔入与融合。具体表现为水稳碎石中的粗集料穿透层间界面, 嵌入至下层二灰碎石的孔隙中, 形成深度达 5 ~ 8 mm 的“锯齿状互锁结构”。工程实践表明, 此法形成的层间粘结强度可达 0.82 MPa, 显著优于传统方式。在标高控制方面, 采用全站仪双基准线定位技术, 于道路中心线及两侧特定位置平行设置激光高程基准线, 通过实时反馈系统精准调节摊铺机熨平板的仰角, 从而将双层累计摊铺厚度误差严格控制在 3 mm 以内, 横坡精度保持在 0.3% 的允许偏差范围内^[4]。该一体化处理技术不仅有效消除了层间弱接缝, 也避免了因水泥浆体收缩可能引发的微裂缝风险, 从本质上显著提升了基层的整体结构性能。

3 协同碾压工艺

3.1 碾压机组协同作业

碾压机组协同作业通过系统化的机械组合与精准的参数控制实现层间零空隙融合。该工艺分为三个阶段有

序推进: 初压阶段采用 30 t 重型钢轮压路机以 1.5 km/h 的慢速进行 2 遍静压, 有效消除摊铺形成的虚铺层, 为基层建立稳定的初始密实骨架; 复压阶段作为核心环节, 由 20 t 与 32 t 振动压路机组成作业梯队, 在 30 ~ 50 m 长的碾压段上以不超过 2.5 km/h 的速度同步行进, 交叉振动碾压 4 遍, 施工中严格确保轮迹重叠达到 1/2 轮宽, 且振动方向与道路中线保持平行, 使上下层骨料在高频振动冲击下充分嵌入彼此, 形成深度互锁的致密结构; 终压阶段则由 26 t 胶轮压路机以 3 km/h 的速度进行 2 遍揉压收光, 利用胶轮的弹性变形特性有效填充表层微观孔隙, 消除先前振动碾压可能产生的表面波纹, 确保基层顶面平整光滑。整个协同作业过程要求压路机梯队间保持 5 ~ 8 m 的合理间距, 形成连续的碾压作业闭环, 并严格禁止设备在作业面上调头或急刹车, 从而保证碾压效果的均匀性和层间融合的整体性^[5]。

3.2 连续养护技术

连续养护技术是确保基层整体成型质量的关键环节, 其核心在于通过及时覆盖与精准保湿阻断水分流失。在协同碾压结束后 10 min 内立即展开覆盖作业: 首先铺设 400 g/m² 的高强度防水土工布紧密贴合基层表面, 再覆盖 0.12 mm 厚的农用塑料薄膜形成双层密封系统, 薄膜接缝采用搭接处理, 边缘用袋装砂砾压牢以防风揭。湿度控制采用智能化洒水系统, 配备 GPS 的洒水车每日早、中、晚分三个时段进行精准雾化洒水, 使基层内部湿度始终维持在 90% 以上, 充分保障水泥水化反应所需水分。养生期间实施严格的交通封闭, 全路段设置水马围挡与警示标志, 严禁轴重超过 30 t 的车辆通行, 养生期不少于 7 d, 确保水稳碎石强度达到设计值的 95% 以上。这套完整的保湿养护体系有效抑制了干缩裂缝的产生, 为基层后期性能提供了坚实的保障。

3.3 质量检测与调控

质量检测与调控体系通过动态监测与即时干预确保基层整体性, 在碾压过程中距路缘石 1.8 m 轮迹带埋设高精度应变片, 实时采集层底应力数据, 同步采用无核密度仪每 20 m 断面扫描压实度; 当检测值波动 > 5% 时自动触发预警, 针对薄弱区域立即调度 32 t 振

动压路机定向补压2~3遍,使压实度均一性提升至94.3%。层间粘结强度作为核心控制指标,通过现场钻取 $\Phi 150$ mm芯样进行30°斜面剪切试验,强度标准提升至 ≥ 0.8 MPa;对未达标区段采用超细水泥注浆强化,使其渗透至3~5 mm层间缝隙形成微结晶结构,再经26 t胶轮复压融合。该闭环管理体系实现“监测—反馈—调控”无缝衔接,大幅降低层间剥离风险。

4 大宽度摊铺与协调碾压施工效益分析

大宽度摊铺与协同碾压技术的综合效益在某省高速公路建设中得到全面量化验证。

在经济效益方面,该技术通过取消7 d养生周期直接节约养护费9 440元/公里,并凭借基层整体性提

升使裂缝处置费用下降70%,长期效益更为显著,15年大修周期内单公里养护成本从传统工艺的86万元大幅降低至29万元,降幅达60%;质量效益体现为层间粘结强度提升80%,反射裂缝间距从 ≤ 15 m延长至 > 20 m,某区试验路通车3年跟踪监测显示早期病害发生率几乎为零;社会效益同样突出,施工工期缩短50%提前开放交通有效缓解区域拥堵,且养护频次减少60%显著降低了因道路管制对社会交通的持续影响,详见图1。

5 结束语

大宽度摊铺与协同碾压技术在某省高速公路建设中展现出显著推广价值:其最佳适用工况为基层总厚度 ≥ 30 cm的半刚性结构组合,此时技术效益最大化。

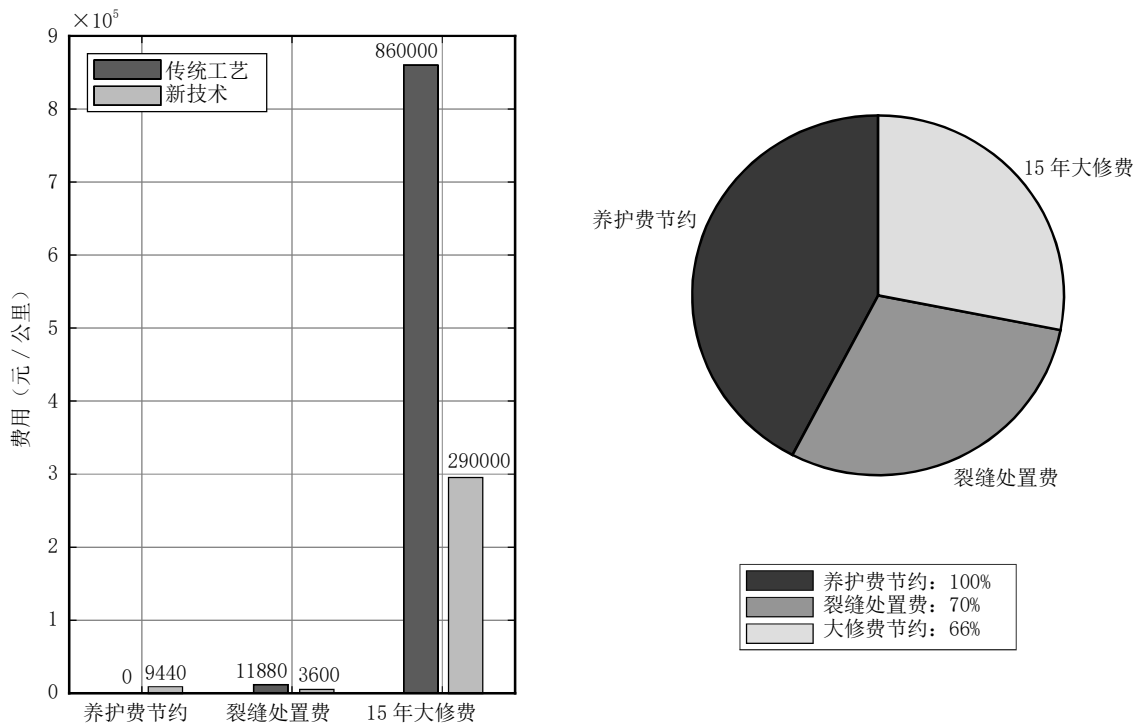


图1 施工效益图

核心突破在于根治传统工艺的层间分离顽疾,通过异步摊铺实现骨料塑性互嵌,协同碾压形成深度5~8 mm的锯齿状咬合结构,使路面寿命从5~7年延至8~10年。经济效益测算表明,15 d周期内每公里综合节省养护成本74万元。实施建议明确三项关键保障,配套大功率拌合站确保连续供料,双摊铺机组实现12 m全幅无缝衔接;严控施工车辆轴重 ≤ 30 t规避早期损伤;固化碾压参数保障层间融合质量。某区试验路3年跟踪数据印证,该技术为高荷载交通环境下的长效路面建设提供了可靠技术路径。

参考文献:

- [1] 孟祥拓. 沥青路面半刚性基层异步连续摊铺施工工艺探析[J]. 交通科技与管理, 2025, 06(16): 44-46.
- [2] 李国辉. 沥青路面半刚性基层异步连续摊铺技术的研究[J]. 工程建设与设计, 2025(13): 180-182.
- [3] 赵帅. 基于市政道路施工的混凝土路面摊铺技术[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(11): 155-157.
- [4] 张波. 公路工程中路面基层施工技术探讨[J]. 科技资讯, 2023, 21(11): 103-106.
- [5] 李栋. 公路路面基层大厚度宽幅摊铺压实工艺[J]. 山东交通科技, 2021(03): 38-39.

高海拔地区输电线路组塔作业 安全施工技术及措施研究

梁 飞

(中国能源建设集团广东火电工程有限公司, 广东 广州 510700)

摘 要 聚焦高海拔区域输电线路杆塔组立施工安全, 瞄准作业环节中基础稳定性隐患、光纤铺设疏漏、管理体系缺陷等现实问题, 融合质量优先、预防为先、责任管控三项核心原则; 立足基础工程技术、杆塔架设工艺、架线张力调节关键技术领域, 确立基础加固改良、光纤铺设标准化、管理流程优化等针对性措施, 契合高海拔区域地质气候特征的技术配置与全流程管控体系, 切实降低极端环境导致的施工风险, 增强杆塔组立作业的安全保障水平及作业规范性, 以期高海拔地区输电线路工程长期平稳运行提供技术参考。

关键词 高海拔地区; 输电线路组塔; 安全施工; 杆塔组立工艺; 光纤布设

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.017

0 引言

高海拔区域作为清洁能源输送的关键枢纽, 输电线路组塔作业遭遇冻土冻融、低温强风、地形复杂等多重极端环境制约, 给施工安全与质量管控带来严峻的挑战。此类工程顺利实施关联区域能源配置效能, 牵动电力系统长期安全运转, 迫切需要针对性技术方案与管理体系给予保障。本文紧扣高海拔地区组塔作业的专属性, 从安全施工准则、核心技术范畴、现存突出症结及优化路径四个维度深入剖析, 提出完善契合高原环境的施工规范与管控方略, 以期攻克高海拔组塔作业技术难题、规避安全隐患提供实践层面的参考。

1 高海拔地区输电线路组塔作业安全施工的原则

1.1 质量优先原则

高海拔地区输电线路组塔作业质量的关键聚焦极端环境适配能力, 核心在于保障基础结构与杆塔本体的耐候性能、稳定效能。基础施工需要贴合冻土、强紫外线、昼夜温差悬殊等环境特质, 严格把控混凝土配比参数、养护时长及地基承载力检测规范, 规避因冻融循环引发的裂缝生成与地基沉降; 杆塔选材需要符合抗风载、抗冰雪荷载及防腐蚀指标, 连接节点的螺栓紧固力矩值、焊接工艺需契合高原施工技术准则, 保障结构承载强度与长期耐久性^[1]。质量管控应覆盖材料进场核验、施工过程监测及成品验收全链条, 标准化作业与精准检测手段支撑组塔工程长期安全运转,

以满足高海拔区域输电线路的特殊运行需求。

1.2 预防为主原则

依托高海拔地区复杂自然禀赋与施工隐患, 预防管控核心聚焦风险预判与前置治理, 施工前期全面勘察作业区域地质地貌、气象参数, 重点排查冻土消融、山体滑坡、强风暴雨等潜在风险, 拟定针对性防控策略, 施工设备需完成高原适配改造与全域检修, 保障起重机械、架设工具在低氧低温环境下的平稳运转。针对组塔作业中高空坠落、设备失稳等安全风险点, 前置部署防护设施与应急储备物资, 明确风险预警临界值与处置程序, 前置性技术筹备、设备调试与风险防控举措从源头规避施工过程中的安全与质量疏漏, 确保作业全程处于可控状态。

1.3 责任管控原则

高海拔地区组塔作业的责任治理需构建层级化、全流程的责任架构, 界定各环节责任范畴与实施准则, 技术维度夯实方案拟定、技术传递的责任归属, 契合高原实际的施工方案有效传导至作业环节。施工维度界定班组实操、工序衔接的责任规范, 基础浇筑、杆塔吊装、部件组装等核心工序建立责任追溯流程, 监管维度做实质量抽检、安全巡查的责任落地, 聚焦管控高原环境中特殊施工作业, 保障各类技术规范及安全准则严格落地, 责任与施工各环节深度融合, 构建方案设计至成品交付的闭环治理, 助力作业质量及安全目标达成。

2 高海拔地区输电线路组塔作业安全施工技术

2.1 基础工程技术

高海拔输电线路组塔基础工程技术需适配低温、冻土、地质破碎等极端工况，核心聚焦地基稳固与环境适配提升^[2]。冻土区借换填非冻胀性碎石土、设置隔冻层及排水盲沟的组合工艺，切断冻融循环引发的冻胀力传递路径；地质复杂区域优先采用螺旋钻孔灌注桩或沉管灌注桩基础，通过加长桩长、优化桩径强化承载能力，搭配注浆加固弥合岩土裂隙提升地基整体性。基础浇筑选用低温抗冻混凝土，掺入引气剂与早强剂改良配合比，浇筑后铺保温被、敷电热毯蓄热养护防开裂，基础尺寸设计兼顾高海拔大风荷载与地形坡度，拓展底面积、加设抗拔锚杆，确保不均匀沉降与侧向力作用下结构稳固，为杆塔组立筑牢根基。

2.2 杆塔组立工艺

杆塔组立工艺需适配高海拔高寒、低气压、强风及复杂地质工况，优先选用耐低温抗风载优的杆塔部件，入场前核查防腐涂层完整性与钢材力学性能，确保满足高海拔长期运行标准。组立前精准核验基础顶面标高、地脚螺栓位置及露出长度，通过激光测距与水平仪校准对接精度。组立阶段采用分段吊装技术，依杆塔高度与结构特性拆分吊装单元，匹配高海拔气压环境的起重设备，调控吊装速率与吊点平衡，规避风力导致的部件偏斜。杆塔连接需严格遵守螺栓紧固力矩规范，扭矩扳手逐点核验，节点处实施防冰雪积聚与密封防护，防止低温冻融引发连接松动，保障杆塔整体稳固性与结构承载能力（见表1）。

2.3 架线张力调控

架线张力调控需精准适配高海拔低气压、强阵风、昼夜温差大的极端工况，以导线力学特性与施工准则为核心参照，精确测算不同区段张力基准参数。结合线路地形落差、导线型号及覆冰积雪等气象条件，匹

配高原适配型张力机与牵引机，前置完成工况调适，保障动力输出平顺，实时监测导线张力波动与弛度并灵活调校运行指标，规避张力超限致导线畸变破损或张力偏低引发垂度过剩、安全间距不足等隐患。统筹空气绝缘性能变动与导线长期稳固效能，降低风振对导线接头及杆塔金具的影响，筑牢架线施工质量与线路长期运行安全防线。

3 高海拔地区输电线路组塔作业安全施工存在的问题

3.1 基础稳固隐患

高海拔地区基础稳固隐患凸显于地质环境、施工适配及自然作用的交织作用中，区域广泛分布的季节性冻土经冻融交替扰动，土壤结构持续破损、孔隙率攀升，地基承载效能剧烈起伏，冬季冻结膨胀诱发基础抬升畸变，夏季融化沉降导致基础下沉偏移形成不均匀位移风险^[3]。多数施工区域地处山地、峡谷等复杂地形，岩层风化严重且部分地段存在滑坡、崩塌隐患，地质勘察疏漏、基础选址不当或基坑开挖边坡支护缺失易引发边坡失稳坍塌，高海拔低温环境阻碍混凝土凝结硬化，强度难达设计标准且易生微裂缝，基坑回填压实度不足会因雨水冲刷、冻融侵蚀出现沉降松动，预埋件安装偏差与杆塔连接受力不均将在长期荷载作用下将进一步加剧隐患，影响输电线路组塔整体安全。

3.2 光纤布设疏漏

高海拔输电线路组塔光纤布设隐患集中于路由规划、布设施工及防护处置环节，路由规划未贴合高海拔复杂地形与气象特质，部分路由直穿岩石裸露区、冰雪堆积带或地质松动段，使线缆长期受地形挤压、冰雪冻胀出现受力失衡。布设中对线缆物理特性把控不足，牵拉强度超标易致纤芯断裂、损耗上升，弯曲曲率不足损毁内部结构，影响信号传输，海拔落差处预留长度不当易因杆塔沉降或地形形变被拉拽受损。强紫外、剧烈温变与风沙加速外护套老化龟裂，防护

表1 高海拔500 kV直线塔组立关键参数推导

序号	控制项目	单位	现场实测值	规范限值	推导结果
1	单吊段最大质量	kg	2 850	≤ 3 000	2 850
2	螺栓最大扭矩	N·m	280	265 ~ 295	280
3	吊点水平偏移	mm	18	≤ 20	18
4	法兰贴合同隙	mm	0.4	≤ 0.5	0.4
5	低温冲击功	J	42	≥ 34	42
6	镀锌层厚度	μm	92	≥ 86	92
7	塔脚板标高差	mm	3	≤ 4	3

材料不匹配、套管固定松或接口密封缺失引发水汽沙尘侵入,接头熔接工艺失范致信号衰减,接头盒安装未规避雨水汇集区与强风点,进一步增加了安全风险。

3.3 管理机制短板

高海拔施工管理机制疏漏集中于专项制度缺位、人员治理薄弱、现场流程虚化及应急协同低效,面对低温缺氧、地形复杂的特殊环境,管理规范缺乏针对性调适,照搬平原通用标准,对环境适配要求、安全管控核心、技术参数边界界定宽泛,难以有效指导现场作业。人员专项技能培训覆盖不足,团队对极端环境操作规范、风险识别、应急处置掌握不透彻,长效考核与资质审核机制缺失,部分无适配能力人员参与核心工序。现场流程落地虚化,方案审批缺乏高海拔难点深度研判,巡检频次不足、排查粗放,关键环节监管乏力,违规未及时发现;应急体系不健全,预案针对性与实操性不足,未考量高海拔实际情况,物资储备不全、布局失衡,协同沟通缺失导致突发情况响应滞后。

4 高海拔地区输电线路组塔作业安全施工措施

4.1 基础加固优化措施

基础加固优化措施需贴合高海拔地质气候特点针对性落地,勘察、选型至施工全流程强化稳固保障。施工前期开展精细化地质勘测,探明冻土分布、岩层风化等级、地下水埋深及潜在滑坡区域,为基础选型提供精准数据^[4]。季节性冻土区采用深基坑或桩基础穿透冻层,嵌入下部稳定岩层或密实土层;选用耐冻融混凝土,掺入引气剂与早强剂,优化配合比,提升抗冻性与早期强度,防止低温裂缝。基坑开挖依地形与岩土性质,采用喷锚支护、土钉墙防坍塌,开挖后即刻浇筑,减少暴露时长。基础回填用碎石、砂砾等透水性材料分层夯实,压实后检测达标;预埋件以激光测距仪校准位置标高,外露部分涂耐高寒防腐涂料并加防护层,从根源强化基础长期稳固效能。

4.2 光纤布设规范方案

光纤布设规范方案需深度契合高海拔特殊环境,路由规划、敷设工艺至防护措施形成全流程规范化管控,路由规划结合高海拔地形地貌与气象特征,规避冻土集中区、滑坡隐患带及强风通道,优先选取地质稳定、地势平缓路径,减少峡谷、陡坡等复杂路段跨越以降低自然环境直接影响。敷设环节依地形条件择选架设方式,山地丘陵区域架空敷设时优化杆塔间距与光纤悬挂高度,采用耐高寒、抗紫外辐照特种光缆,外层加装防磨损、抗风振防护套管避免强风致光缆疲劳断裂,直埋敷设控制埋深至冻融层以下,沟槽开挖

后铺设砂垫层与警示标识,回填分层压实并做好防渗处理,防止雨水下渗引发冻土冻胀损毁光缆。光纤接头需在密封防尘环境处理,采用耐高寒密封接头盒且预留充足冗余长度,光缆固定金具选用防腐防锈材质,安装控制紧固力度,避免过度挤压损伤护套,保障高海拔环境下光纤传输稳定与安全。

4.3 管理流程完善策略

管理流程优化路径需紧扣高海拔施工特性构建全流程管控架构,从方案编制至落地执行形成闭环管控。前期结合高海拔地质气象条件细化专项施工方案,明确各环节安全管控要点与技术标准,配套构建多级审核机制,组织专业力量论证方案可行性与安全性,重点核查低温、大风、冻土等环境应对措施实操性^[5]。构建动态管控模式,通过信息化工具建立实时反馈渠道,全程跟踪关键环节并及时整改。优化高海拔适配性培训体系,聚焦核心内容开展系统性培训,严格资质核查。健全应急管控流程,制定专项应急预案,储备适配高原的应急物资,常态化开展针对性应急演练,提升突发情况快速处置能力。

5 结束语

高海拔输电线路组塔作业受地质气象条件掣肘,安全质量管控面临多重考验。本文围绕施工原则、技术范畴、核心症结及优化路径铺陈,确立质量优先、预防前置、责任闭环的核心导向,以基础加固、光纤布设规范化、管理流程优化等针对性措施,解决冻土干扰、极端天气、技术适配不足等难题。这些措施根据高海拔施工实际情况,以保证技术可行性与安全可靠性为目标,提供系统解决方案。实践中需强化环境适配性技术创新与全流程管控,持续提升施工质量与安全保障效能,为高海拔电网建设有序推进、电力系统稳定运行筑牢根基。

参考文献:

- [1] 张洋,朝洛蒙.高海拔地区 500kV 输电线路绝缘设计与运行特性分析[J].电力设备管理,2025(05):28-30.
- [2] 杨刚,吕宝雄,杨振胤,等.高海拔多山区架空输电线路高密度点云数据获取方法研究及应用[J].测绘通报,2024(10):157-162.
- [3] 刘德天.高海拔地区输电线路设计方案研究[J].设备管理与维修,2024(16):134-136.
- [4] 袁飞,吴志明,鲁俊,等.高海拔地区特高压直流输电线路可听噪声研究[J].电工电气,2022(12):57-62.
- [5] 李杨.高海拔冻土地区输电线路基础设计与施工要点[J].光源与照明,2021(12):106-107.

钓鱼引孔法在复杂地质条件下钢栈桥搭设施工的实践与分析

李洪志

(四川路桥桥梁工程有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘 要 钢栈桥作为桥梁工程施工中重要的施工通道, 在水中基础、下部构造等水上作业施工过程中起到重要作用。为保障桥梁施工过程中的施工车辆、机械设备等在栈桥平台能够保持稳定, 钢栈桥基础及其下部构造稳定性起到至关重要的作用。钢栈桥基础施工在卵石层、孤石区、硬岩等复杂地质条件下, 传统沉桩工艺无法满足栈桥基础稳定性要求或无法施工。本文结合项目案例, 对复杂地质情况下钓鱼引孔法钢栈桥施工进行实践讨论与分析, 以期为相关人员提供有益参考。

关键词 钢栈桥; 钓鱼引孔法; 复杂地质; 引孔; 沉桩

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.018

0 引言

对于水中基础、下部构造等水上作业所依赖的钢栈桥通道、平台而言, 其稳定性不仅直接关系到作业人员的安全, 还紧密影响着整个工程的施工效率。在复杂地质条件下, 如软土地层、岩石起伏大的区域, 为确保钢栈桥施工能安全且顺利推进, 采用有效的施工方法极为关键。钓鱼引孔法作为一种先进的钢栈桥施工技术, 它通过精准引孔定位, 能有效应对复杂地质, 在钢栈桥搭设施工中具有独特优势, 可显著提升施工质量与进度。

1 项目概况

某桥梁项目工程, 起始桩号 K25+046.6, 终止桩号 K25+466.6, 全桥总长 420 m, 跨径布置为 80+140+80+2×60 m。该桥梁最高墩 38.2 m, 其中 1#、2# 墩基础及下部构造均在水中。

1.1 地质情况

钢栈桥所处流域水深较深, 约 8 m。河床少或无淤泥覆盖层, 表面为厚卵石层夹杂孤石, 厚度 10~15 m, 为确保施工质量和安全, 采用钓鱼引孔法进行钢栈桥的搭设施工。

1.2 栈桥概况

为便于施工, 两岸钢栈桥均搭设 81 m 长, 宽 9 m (1 m 人行道 + 3.5×2 m 车行道 + 1 m 人行道), 单跨标准跨径 9 m, 总高度约 18 m。岸边设 9 m 宽桥台, 整体采用钢管、贝雷梁、型钢组合的支撑体系, 上部结构由

“321”型贝雷梁拼装组成纵向承重梁, 其上铺设装配式桥面板 (横纵梁分别为工 25b/[14a 型钢, 间距 75 cm/30 cm); 下部采用 $\phi 720 \times 8$ mm 螺旋钢管, 支撑在引孔后桩位上 (入岩 5 m), 之间采用双榫 [20a 型钢作为连接, 其上采用双榫工 45b 型钢作为承重梁^[1]。

2 钓鱼引孔法施工原理

钓鱼引孔法是一种专门为复杂地质条件下钢栈桥搭设而研发的创新施工方法。在复杂地质环境中, 如河床存在厚卵石层和孤石区域, 传统施工方法往往面临诸多难题, 而钓鱼引孔法凭借其独特的原理和工艺, 能有效解决这些问题。

钓鱼引孔法的核心原理在于搭设临时平台, 利用冲孔设备在河床的厚卵石层及孤石区域进行精准引孔, 类似于“钓鱼”形式。其工艺步骤如下: 搭设临时平台—引孔—沉桩—下部结构施工—临时平台转换—上部结构施工 (见图 1)。

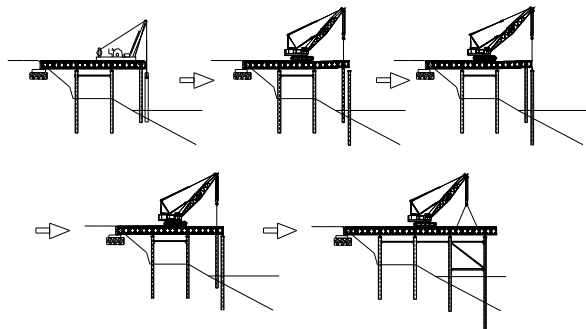


图 1 钓鱼引孔法钢栈桥施工流程图

钓鱼引孔法可有效破碎并清除孔内的障碍物，形成稳定的桩孔。随后，将钢管桩准确吊入桩孔，并通过堆填等方式加固桩体，从而提高桩的承载力和稳定性。这种方法不仅克服了传统施工方法在复杂地质条件下的局限性，还显著提高了施工效率和安全性。

3 钓鱼引孔法施工工艺

3.1 施工准备

钓鱼引孔法钢栈桥施工前进行的准备工作主要包括：（1）测量控制网复测，施工场地放样平整；（2）设备（履带吊、冲孔机、振动锤等）、材料（钢栈桥材料）、人员进场；（3）现场工序转换及材料转运组织协调；（4）安全作业条件检查。

3.2 工艺流程

1. 桥台施工：岸坡处平整场地，按照桩基施工工艺依次完成放样、钻孔、成孔、清孔、下放钢筋笼、浇筑施工等工序，桥台桩基完成后，进行桩头凿毛、清理，然后进行桥台承台、背墙钢筋施工，安装模板，浇筑混凝土^[2]。

2. 引孔施工：（1）河岸边坡钢管桩基础引孔：履带吊将冲孔机吊至平整后场地钻机就位后进行冲击钻孔，采用间隔冲孔方式依次将岸边钢管桩全部引孔完成；（2）水中钢管桩基础引孔：采用“履带吊+振动锤”方式在已搭设好的支架平台前端 7.5 m 位置处搭设临时钢管，临时钢管桩横向位置位于结构钢管桩外侧 50~100 cm。铺设贝雷梁，利用 40b 工字钢横梁横穿贝雷梁放置在临时钢管桩顶，支撑贝雷梁。在贝雷梁上铺设装配式桥面板作为临时平台。下放钢护筒（钢护筒高度与贝雷梁平高或高出 20 cm 左右，并将贝雷梁接长悬挑，作为钢护筒支撑^[3]，如遇无覆盖层地质，采用人工抛填袋装砂或碎石制造覆盖层，并辅助灌浆固结的方式，对钻孔平台基础进行加固^[4]。在临时平台上采用冲击钻及直径 80 cm 钻头进行钻孔，钻孔穿过覆盖层至入中风化岩层 5 m（承载力满足要求）时停止钻进，拆除钢护筒。

3. 沉桩施工：钢管桩在平整好场地按设计进行接长，接长后转运至桥台位置^[5]。采用 DZ-90 振动锤，其最大激振力为 637 kN。使用履带吊配合振动锤将钢管插打至引孔桩内。下放钢管桩，采用振动锤施打至引孔深度，直至其不再下沉。采用振动锤调整其竖直度确定无误后松开振动锤，确认钢管桩施工完成。

4. 平台转换：沉桩施工完成后，先采用履带吊配合将钢管桩采用型钢焊接成格构柱。后将临时冲孔平台

转换为栈桥平台：将临时平台桥面板吊除，节点处贝雷梁上弦杆位置销轴拆除，将贝雷架前端吊起约 40 cm 利用临时钢管桩，将贝雷架前垫 20~30 cm。在新打入钢管桩上安装 2 榀工 45b 承重梁，将贝雷架下放。

5. 上部结构施工：采用履带吊配合安装除临时平台（贝雷梁）外贝雷梁，安装连接销轴，安装装配式桥面板，最后安装桥面防护栏杆。

6. 依次将栈桥搭设完成。

3.3 过程控制要点

在钓鱼引孔法钢栈桥搭设施工过程中，过程控制要点至关重要，具体包括以下几个方面：

1. 沉桩：沉桩过程中需严格控制钢管桩的垂直度，采用双经纬仪进行前后、左右双向校正，确保垂直度偏差不超过 1%。同时，振动锤施打过程中应实时监测桩顶标高，防止过打或欠打现象，保证钢管桩入土深度满足设计承载力要求。

沉桩应以标高进行控制，以贯入度作为校核。在钢管桩下沉过程中，随时观察其贯入度。当贯入度满足最后 10 击平均小于 2 mm/击或贯入度控制值 20 mm/min，达到贯入度控制值后持续锤击 50 击，方可停锤。沉桩施工质量标准如表 1 所示。

表 1 沉桩施工质量标准

序号	项目	规定值或允许偏差	
1	桩尖高程 (mm)	+300, -0	
2	群桩	中间桩	d/2, 且不大于 250
3		外缘桩	d/4
4	单排桩	顺桥方向	40
5		垂直桥轴方向	50
6	倾斜度	直桩	1%

2. 临时引孔平台：重点检查贝雷梁拼接质量，确保销轴连接牢固。钢护筒连接贝雷梁控制其垂直度。搭设时利用结构贝雷架，无需满铺，根据现场需求搭 4~5 道贝雷梁并安装桥面板。临时平台前端宜高出栈桥标高 5~10 cm，严格控制临时钢管桩高程，引孔时随时观测前端高程变化。

3. 栈桥稳定性：栈桥稳定性从两方面控制。一方面加固结构连接部位，如保证贝雷梁与承重梁焊接质量、桥面板与贝雷梁螺栓连接紧固；另一方面进行动态监测，施工中定期检查栈桥沉降和位移，遇潮汐、

水流等外力及时调整参数,确保安全。(1)靠各格构柱连接支撑栈桥稳定性,保证各杆件焊接、栓接、锚固牢固;(2)引孔沉桩作为栈桥基础,确保其承载力,必要时沉桩后灌沙(砾)加强;(3)严格控制沉桩时钢管桩垂直度,使其偏差在允许范围。

在栈桥使用过程中,定期对栈桥的稳定性进行检查,包括各连接部位的紧固情况、钢管桩的沉降和位移情况等,发现问题及时处理。

4 钓鱼引孔法施工实践总结与分析

4.1 施工总结

在该桥梁项目钢栈桥施工中,钓鱼引孔法按既定工艺和流程推进。施工准备阶段,复测测量控制网,完成施工场地放样平整,确保基准准确;设备、材料和人员按时进场,现场工序转换及材料转运组织协调合理高效,严格检查安全作业条件,为施工奠定基础。

桥台施工时,岸坡场地平整达标,桩基施工各工序按工艺标准执行,桥台承台、背墙钢筋施工、模板安装及混凝土浇筑质量良好。

在引孔施工中,河岸边坡钢管桩基础引孔采用间隔冲孔,避免干扰,完成全部引孔;水中钢管桩基础引孔通过“履带吊+振动锤”搭平台、下放钢护筒,冲孔入中风化岩层5 m,满足承载力要求。

沉桩施工用DZ-90振动锤和履带吊配合,控制钢管桩插入和施打,保证入土深度和垂直度。平台转换将临时冲孔平台转为栈桥平台,为上部结构施工创造条件。在上部结构施工中,有序安装贝雷梁、装配式桥面板及桥面防护栏杆,最终完成栈桥搭设。

4.2 施工效果分析

1. 质量方面:根据施工结果,钓鱼引孔法解决复杂地质下钢栈桥搭设难题。沉桩时经双经纬仪双向校正,钢管桩垂直度偏差控制在1%以内,桩尖高程、桩位等指标符合设计要求,保证栈桥基础稳定和承载能力。临时引孔平台搭设中,贝雷梁拼接牢固,钢护筒下放垂直度可控,未与已成孔钢管桩碰撞,成桩质量好。栈桥整体结构连接加固到位,焊接和螺栓连接符合要求,动态监测显示沉降和位移可控,结构安全可靠。

2. 效率方面:与传统施工方法相比,钓鱼引孔法可提高施工效率。它能精准引孔,清除孔内障碍物,减少施工阻碍和停顿。各施工工序衔接紧密,流程顺畅,缩短施工周期,使栈桥按时完成搭设,满足项目进度要求。

3. 安全方面:钓鱼引孔法可提高施工安全性。引

孔时搭设临时平台并转换,降低人员在复杂地质环境下的作业风险。沉桩和平台转换等环节严格控制和监测,确保施工稳定安全。栈桥使用中定期检查稳定性,及时处理潜在问题,保障人员和设备安全^[6]。

4.3 施工问题与改进措施

在施工中发现一些问题,如水中钢管桩基础引孔时,临时平台前端高程变化监测不及时,部分时段前端高出栈桥标高超5~10 cm范围。后续施工增加监测频率,安排专人实时监测高程变化,建立快速反馈机制,高程异常立即调整。

此外,栈桥使用时部分桥面板与贝雷梁螺栓连接松动,可能因车辆行驶振动导致。为此,需加强连接部位检查维护,定期紧固螺栓,后续施工考虑增加弹簧垫圈等防松措施,提高连接可靠性。

本次实践中,钓鱼引孔法在该桥梁项目钢栈桥施工中效果良好,且通过发现的问题改进完善施工工艺,为类似项目施工提供宝贵经验。

5 结束语

钓鱼引孔法在复杂地质条件下钢栈桥搭设施工中的应用堪称一次卓有成效的实践。在复杂地质状况下,传统施工方法往往会面临诸多棘手难题,如桩基础难以精准定位、入土深度难以达标等,这些问题严重影响施工进度与质量。而钓鱼引孔法凭借其独特的技术优势,巧妙地化解了这些困境。它通过预先引孔,为后续的桩基础施工创造了良好条件,使得桩体能够准确、稳定地植入地下。这一成功案例,为今后类似复杂地质条件下的工程建设提供了参考,值得在行业内广泛推广。

参考文献:

- [1] 徐东坡. 钢栈桥钢平台技术在跨湖施工中的应用[J]. 价值工程, 2021, 40(06): 121-122.
- [2] 程胜. 城镇开发项目大跨径装配式钢栈桥结构设计及受力分析[J]. 工程技术研究, 2025, 10(03): 10-12, 23.
- [3] 陈曦, 解颖超, 李鸿. 浅覆盖层河床环境钢栈桥引孔施工技术研究[J]. 四川水利, 2023, 44(05): 78-80, 102.
- [4] 廖志翔. 浅覆盖层、裸岩区域钢栈桥及钻孔平台设计[J]. 运输经理世界, 2024(36): 156-159.
- [5] 同[1].
- [6] 于和磊. 复杂地质钻孔灌注桩施工技术分析[J]. 工程技术研究, 2024, 09(01): 85-87.

软土地基中 500 kV 输电线路钻孔灌注桩施工沉降控制措施研究

庞土伟

(中国能源建设集团广东火电工程有限公司, 广东 广州 510700)

摘要 软土地基承载力低、压缩性高, 易使 500 kV 输电线路钻孔灌注桩基础产生沉降, 威胁线路安全稳定。本文针对这一问题, 从施工前、施工过程及施工后三个阶段构建沉降控制体系。施工前开展地质勘察优化参数, 完成专项施工方案设计, 管控材料设备质量, 组织人员培训筑牢基础; 施工中实施地基预处理加固, 严控施工工艺与浇筑养护质量, 实时监测沉降并做好应急措施; 施工后落实承载力检测、长期观测、防腐加固及效果验证, 保障长效稳定。该体系旨在为软土地基输电线路基础沉降控制提供有效技术参考。

关键词 软土地基; 500 kV 输电线路; 钻孔灌注桩; 沉降控制

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.019

0 引言

500 kV 输电线路是电力系统骨干网架, 其安全稳定运行直接关系到区域电力供应可靠性。我国沿海及江河冲积平原广泛分布软土地基, 这类地基含水率高、孔隙比大、承载性能差, 在输电线路钻孔灌注桩基础荷载作用下, 易出现不均匀沉降或过量沉降, 引发杆塔倾斜、线路张力失衡等隐患。针对软土地基特性制定科学完善的沉降控制措施, 对保障 500 kV 输电线路基础稳定性至关重要。本文结合软土地基工程特点与输电线路施工要求, 系统探讨钻孔灌注桩基础沉降控制的关键技术与实施路径。

1 施工前沉降控制准备工作

1.1 软土地基地质勘察与参数优化

软土地基承载力低、压缩性高, 施工前需用钻探与物探结合的专业勘测方法, 对工程场地全方位勘察^[1]。重点查明软土层分布范围、厚度、含水率、孔隙比及承载力特征值等核心参数, 掌握地下水埋深、水流方向及地层渗透性等水文地质条件。依托勘察数据, 结合 500 kV 输电线路钻孔灌注桩荷载要求优化地基设计参数, 明确桩长、桩径及桩间距等关键指标, 确保桩基础与软土地质条件深度匹配, 从源头降低沉降风险(见表 1)。

1.2 钻孔灌注桩施工方案专项设计

结合软土地基工程特性与 500 kV 输电线路荷载需求, 编制针对性钻孔灌注桩施工方案。方案需明确桩孔工艺选择, 软土易塌孔, 优先采用泥浆护壁成孔工艺,

表 1 软土地基加固关键技术参数

加固方法	核心控制参数	数值标准
换填垫层法	换填材料含泥量	$\leq 5\%$
	分层摊铺厚度	20 ~ 30 cm
	分层压实度	$\geq 95\%$
	处理后地表层承载力	≥ 120 kPa
	换填厚度	0.8 ~ 1.5 m
水泥搅拌桩法	水泥强度等级	42.5 级
	水泥掺量(占软土重量)	15% ~ 20%
	钻杆转速	60 r/min
	钻杆提升速度	≤ 0.8 m/min
	搅拌桩直径	500 mm
桩体 28 天无侧限抗压强度	搅拌桩长度	8 ~ 12 m
	后期沉降控制量	≤ 20 mm

确定合理泥浆比重、黏度及含砂率控制标准。设计桩身混凝土强度等级, 精准计算混凝土配合比, 满足桩体承载力与抗变形要求。制定专项桩位布置方案, 优化桩群排列方式实现荷载均匀传递, 避免局部应力集中导致不均匀沉降, 方案需经专家组从技术、安全及经济性角度严格审核后实施。

1.3 材料与设备质量管控

施工材料质量直接影响钻孔灌注桩承载性能与沉降控制效果, 需建立全流程质量管控体系。钢筋、水泥、

砂石等主要原材料选择信誉良好、质量可靠的供应商，进场时严格核查产品合格证、检测报告，按规范抽样复检，确保钢筋抗拉强度、水泥安定性及砂石级配等指标符合设计标准。在施工设备方面，配备性能稳定的钻孔机械、混凝土搅拌机及振捣设备，钻孔机械需适应软土地层钻进，振捣设备保证振捣功率满足混凝土密实度要求。施工前对所有设备全面检测、调试与维护，确保施工中稳定运行，避免设备故障导致施工质量缺陷引发沉降问题。

1.4 施工人员技术交底与培训

软土地基施工复杂，500 kV 输电线路施工标准高，需对施工人员开展专项技术交底与培训。技术交底采用书面与现场演示结合的方式，讲解钻孔灌注桩施工工艺要点、软土地基施工注意事项、沉降控制关键环节及操作规程。重点培训泥浆制备与控制、钻孔速度调节、混凝土浇筑顺序及振捣操作等核心技能，明确施工人员岗位职责。强化安全与质量意识培训，让施工人员充分认识软土地基沉降控制的重要性，掌握常见质量问题的预防与处理方法，确保各项沉降控制措施有效落实。

2 施工过程沉降控制核心措施

2.1 软土地基预处理与加固

软土地基含水量高、孔隙比大、承载力低，在杆塔荷载作用下易产生过量沉降，施工前必须系统性预处理与加固^[2]。通过详细地质勘察明确软土层分布范围、厚度及物理力学指标，为加固方案提供依据。软土层厚度超3 m、承载力低于80 kPa的区域，优先采用换填垫层法，选用颗粒级配良好、含泥量小于5%的碎石或级配砂石作为换填材料。换填厚度根据计算确定，通常在0.8~1.5 m之间，分层摊铺厚度控制在20~30 cm，用小型压路机或平板振动器分层压实，每层压实度达95%以上，确保地基表层承载力提升至120 kPa以上。换填处理难以触及的深层软土，采用水泥搅拌桩复合地基加固技术，选用42.5级普通硅酸盐水泥，水泥掺量为软土重量的15%~20%。搅拌桩机钻杆转速控制在60 r/min，提升速度不超过0.8 m/min，确保水泥浆与软土充分混合，形成直径500 mm、长度8~12 m的搅拌桩，桩体28天无侧限抗压强度不低于1.5 MPa。通过桩体与地基土协同作用降低地基压缩性，将后期沉降量控制在20 mm以内，为钻孔灌注桩施工提供均匀稳定的地基条件。

2.2 钻孔灌注桩施工工艺参数控制

钻孔前平整场地并铺设钢垫板，确保钻机安装牢固，钻杆垂直度偏差不得超过1%。钻孔速度根据软土层特

性动态调节，表层流塑状软土中采用0.3~0.5 m/min低速钻进；进入下部可塑状软土后，速度提升至0.8~1.0 m/min，避免钻进过快产生负压导致孔壁坍塌，减少对桩周土体的扰动。泥浆护壁采用膨润土、纯碱及CMC混合配置的优质泥浆，初始泥浆比重1.2~1.3，黏度18~22 s，含砂率小于4%。随钻进深度增加，每钻进5 m检测一次泥浆指标，进入砂层时提高泥浆比重至1.3~1.4，确保泥浆有效包裹孔壁、悬浮钻渣。成孔后立即用空气吸泥法第一次清孔，清除孔底沉渣，之后下放钢筋骨架和导管，完成后利用导管循环泥浆二次清孔，将孔底沉渣厚度严格控制在50 mm以内，清孔后泥浆比重降至1.1~1.2，黏度16~18 s，为混凝土浇筑创造条件。钢筋骨架安装采用十字形导向架确保居中，骨架底部与孔底间距控制在30~50 cm，通过点焊固定在导管上，防止混凝土浇筑时移位，保障桩体受力均匀。

2.3 混凝土浇筑与养护质量把控

导管法施工选用 $\phi 250$ mm无缝钢管，使用前经水密性及承压试验确保无渗漏。导管下口距孔底25~40 cm，首次浇筑采用“剪球法”，保证首批混凝土使导管埋深 ≥ 1.0 m。浇筑需连续，导管埋深控制在2~6 m，每30分钟测混凝土面高度并调整导管提升速度，避免断桩、夹泥或导管堵塞。采用C30、C35商品混凝土，坍落度180~220 mm，初凝时间 ≥ 6 小时，专人检测和易性，不合格者禁用。插入式高频振捣棒振捣，间距50 cm、时长20~30秒，振捣至表面泛浆无气泡，确保桩体密实。浇筑后桩顶高出设计标高50~100 cm，初凝后剔除浮浆。按环境温度制定养护方案，夏季土工布洒水、冬季塑料薄膜+保温被覆盖，养护 ≥ 14 天，保证28天强度达设计值。

2.4 施工过程实时沉降监测与调整

监测点沿输电线路杆塔基础周边每隔3 m布设一个，每个基础不少于4个，关键桩位及软土厚度突变处增设。监测点采用 $\Phi 20$ 钢筋植入地基30 cm，顶部打磨光滑并标注编号。监测设备选用DSZ2级精密水准仪和TS02全站仪，测量精度分别达到 ± 0.5 mm和 ± 1 mm，确保数据准确。监测频率依施工进度调整，钻孔及混凝土浇筑等关键阶段每2小时一次，基础施工完成后每日一次，连续7天沉降稳定可调整为每3天一次，直至杆塔组立完成。监测数据及时记录整理，绘制沉降一时间曲线，通过趋势分析判断沉降发展规律。桩体内部及地基土中埋设应力传感器，实时监测桩体轴力及地基土应力变化，结合大数据分析建立沉降预测

模型。监测数据出现异常, 单次沉降量大于 5 mm 或连续 3 天累计沉降量大于 10 mm 时, 立即暂停相关施工, 组织技术人员分析原因。钻孔扰动导致的需减缓钻进速度并加强泥浆护壁; 桩体荷载不均导致的需调整桩体参数或增加桩数, 确保沉降始终控制在设计允许的 30 mm 范围内。

2.5 突发沉降风险应急处置

预案明确应急组织机构、职责分工及处置流程, 定期组织施工人员应急演练, 提升响应能力^[3]。应急物资实行“定点存放、专人管理”, 施工现场设应急物资库, 储备足量沙袋、钢板、应急注浆设备、水泥、速凝剂等加固材料, 以及发电机、水泵等应急设备, 确保随时可用。施工中孔壁坍塌引发局部沉降, 立即停止钻孔作业, 撤出人员及设备, 向孔内填充沙袋至坍塌位置以上 1 m, 同时高压注浆向孔壁周边土体注入水泥浆, 24 小时地基稳定后, 重新勘察孔壁情况再恢复施工。桩体倾斜导致沉降异常, 用全站仪精准测量倾斜角度, 超过 1% 时立即停止浇筑, 重新调整桩位或在倾斜桩周边增设补桩, 补桩参数与原桩一致, 保障基础整体稳定。遇暴雨、强风等恶劣天气, 提前 24 小时停止施工, 已开挖桩孔用钢板覆盖并加压固定, 已浇筑桩体覆盖防雨布和保温被, 防止天气因素扩大沉降风险。

3 施工后沉降检测与长效保障

3.1 钻孔灌注桩承载力与强度检测

施工完成后, 混凝土强度达设计要求, 需对钻孔灌注桩进行承载力与强度专项检测。单桩竖向承载力采用静载荷试验检测, 加载方式按规范执行, 确保检测结果真实反映桩体实际承载能力, 满足 500 kV 输电线路荷载设计要求。桩体混凝土强度采用回弹综合法等无损检测手段全面检测, 重点检查桩身、桩头及桩底等关键部位, 确保强度均高于设计值。通过钻芯取样检测桩体完整性, 排查断桩、夹泥等质量缺陷, 检测不合格的桩体及时加固处理, 确保基础承载能力达标。

3.2 长期沉降观测与数据评估

建立长期沉降观测机制, 杆塔基础及周边设置永久性沉降观测点, 观测周期不少于 1 年, 定期记录沉降数据^[4]。观测数据系统化整理分析, 结合地质条件、施工参数及荷载情况, 评估沉降发展规律, 判断是否存在后期不均匀沉降风险。观测数据显示沉降速率过快或累计沉降量接近设计限值时, 及时预警并分析原因, 采取针对性措施干预。长期观测数据的积累, 可为后续同类软土地基输电线路工程的沉降控制提供参考。

3.3 基础防腐防渗与加固补强

软土地基地下水含量高, 易对钻孔灌注桩基础产生腐蚀, 影响稳定性并间接加剧沉降。施工后对基础全面防腐防渗处理, 桩头及暴露部分喷涂防腐涂料、涂刷防锈漆, 地下部分桩体包裹防腐材料, 设置阴极保护系统提升抗腐蚀能力。定期检查基础周边地质环境, 发现地基土松动、塌陷, 及时用注浆加固等方式补强, 防止承载力下降引发沉降。维护基础周边排水系统, 确保排水通畅, 避免地下水位上升浸泡地基影响稳定性。

3.4 沉降控制效果验证与优化

施工后全面验证工程沉降控制效果, 对比施工前后地质参数、施工过程监测数据及竣工后检测结果, 评估沉降控制措施的有效性^[5]。结合 500 kV 输电线路运行要求, 分析沉降控制是否满足线路安全稳定运行标准。针对验证中发现问题总结经验, 优化软土地基钻孔灌注桩施工的沉降控制技术方案, 完善工艺参数与管控措施, 为后续软土地基中高压输电线路钻孔灌注桩施工提供更科学高效的沉降控制参考。

4 结束语

软土地基 500 kV 输电线路钻孔灌注桩的沉降控制, 是贯穿工程全周期的系统工程, 需兼顾地质特性、施工工艺与长期运维。本文提出的“事前准备、事中控制、事后保障”三段式管控体系, 通过勘察优化、方案设计、工艺把控、实时监测及长效维护等措施, 有效解决了软土地基沉降难题。实践表明, 该体系可从源头降低沉降风险, 确保基础承载性能与稳定性。未来需结合工程实践进一步积累数据, 持续优化沉降控制技术, 为同类工程提供更具针对性的解决方案, 助力高压输电线路工程质量提升。

参考文献:

- [1] 吴亮杰. 大跨度盖板涵在软土地基上的结构设计及沉降控制方法[J]. 汽车周刊, 2025(12):243-245.
- [2] 庄煌森. 软土地区工程桩基设计与格栅水泥搅拌桩加固研究[J]. 四川水泥, 2025(11):55-56, 59.
- [3] 邓德建. 就地固化技术在高速铁路软土便道地基处理中的应用[J]. 四川水泥, 2025(11):214-216.
- [4] 贵晓伟, 包华, 朱博, 等. 雷击 500 kV 输电线路对并行埋地管道的干扰过电压特性及安全间距研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(10):21-30.
- [5] 杨继东, 赵远强. 国际 500 kV 输电线路工程的导线防震设计方法[J]. 黑龙江电力, 2025, 47(05):428-431, 438.

熔岩地质条件下现浇箱梁大钢管支架基础换填片石工艺的创新与应用

刘 洋

(四川路桥桥梁工程有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘 要 针对特性熔岩地质叠加淤泥层形成“淤泥软基+地基裂隙渗水+承载力不均”三重施工难题: 淤泥层易导致片石“深陷失稳”, 熔岩裂隙易引发淤泥“侧向挤出”, 传统换填工艺难以平衡基础承载力与稳定性。本文以某高速公路桥梁项目为例, 从工艺创新、现场实施、效益验证三个方面系统阐述改良后的换填片石工艺如何破解“淤泥+渗水”复合地质困境, 以期同类工程提供技术方案参考。

关键词 现浇箱梁; 大钢管支架; 换填片石工艺; 复合地质

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.020

0 引言

在熔岩地质条件与淤泥层共存的复杂环境下, 淤泥质软土在沿海或者沿河的地质结构中比较常见, 地质中包含了大量的淤泥、有机质以及颗粒, 导致其存在承载力低、透水性差以及压缩性大等缺陷^[1], 传统换填工艺常因淤泥流动性强、熔岩裂隙渗水等问题导致基础承载力失衡。本文以某高速公路桥梁工程为案例, 系统阐述改良后的换填片石工艺如何通过“淤泥预处理—分层嵌挤—动态控压—立体防渗”四重技术突破, 实现淤泥与片石的咬合结构构建, 有效抑制侧向挤出风险, 阻断渗水软化链条。实践表明, 该工艺显著提升了复合地质条件下的支架基础稳定性, 为熔岩地区桥梁建设提供了经济高效的解决方案。

1 工艺创新: 针对“熔岩+淤泥”复合地质的四重突破

针对传统工艺在复合地质中“换填区淤泥清理不彻底、片石填筑架空、防渗水失效”的短板, 本工艺通过“淤泥预处理、分层嵌挤、动态控压、立体防渗”四重创新, 构建“抗陷—承力—防渗”一体化基础体系。

1.1 淤泥精准预处理: 从“盲目抛填”到“分区处置”

摒弃传统“片石强挤淤泥”的粗放模式, 根据淤泥层厚度(0.5~1.0 m)与分布范围。

1. 薄层淤泥区(厚度<1.0 m): 采用“挖掘机+人工”清淤, 深度至完整地质承载力达标, 对残留淤

泥(厚度<10 cm), 喷洒水泥浆(掺量8%)进行固化处理, 使其表面形成“硬壳层”。

2. 厚层淤泥区(厚度≥1.0 m): 对于局部厚淤泥层, 先使用挖机将大面积淤泥清理干净, 少数淤泥采用人工清理, 清理完成后对地基基础表面进行承载力试验, 达到设计要求后, 再填筑粒径40~60 cm的大块片石, 将荷载直接传递至岩面, 避免淤泥层整体沉降。

1.2 片石分层嵌挤: 构建“淤泥+片石”形成咬合结构

创新设计“四级梯度片石”填筑方案, 通过“下嵌岩面、中挤淤泥、上找平”的分层填筑逻辑, 解决片石与淤泥的协同受力问题:

第一层: 选用粒径40~60 cm的大块片石, 采用挖机配合振动压路机施工, 确保片石底部嵌入岩面≥10 cm^[2], 同时挤压周边淤泥至片石间隙, 形成“嵌岩骨架”。

第二层: 采用粒径30~50 m的中块片石, 填筑厚度50 cm, 通过20 t振动压路机“低频高幅”碾压(频率22 Hz、振幅2.0 mm), 利用片石棱角挤压淤泥, 填充底层间隙, 形成“淤泥—片石”混合承力层。

第三层: 选用粒径15~30 cm的小块片石+10%石屑, 填筑厚度40 cm, 采用“中频中幅”碾压(频率28 Hz、振幅1.5 mm), 挤压残留淤泥, 提升基础密实度。

第四层: 铺设粒径5~15 cm的细片石+20%细沙, 人工找平后“高频低幅”碾压(频率35 Hz、振幅1.0 mm), 形成平整度≤3 cm的“致密层”, 确保钢管支架底座受力均匀。

现场原基础地基承载力不满足设计要求时,可采用机械震动压实、堆载预压、真空预压、换填垫层或复合地基等方法,结合现场实际施工情况进行处理^[3]。

1.3 动态控压技术:实时规避“淤泥侧向挤出”风险

创新引入“压力监测+碾压调整”双控体系,替代传统“固定遍数碾压”,通过实时控制碾压应力,避免淤泥因局部压力过大发生侧向挤出:

1. 压力预设:根据淤泥层承载力设计要求,计算每层级最大允许碾压应力,按底层不超过 120 kPa、中层不超过 100 kPa、上层不超过 80 kPa,对应匹配压路机吨位与碾压参数。

2. 实时监测:在淤泥层外侧布设 10 个位移监测点,每碾压 1 遍后,用全站仪测量水平位移,若位移超 5 mm,立即停止碾压,补填大块片石“反压”,待位移稳定后再继续。

3. 压实检测:每层级碾压完成后,采用“轻型动力触探仪”检测承载力(要求 ≥ 200 kPa),同时用探坑法检查淤泥残留量(要求 $< 5\%$),双重验证合格后方可进入下一层。

1.4 立体防渗体系:阻断“地基裂隙渗水、淤泥软化”连锁反应

针对熔岩裂隙渗水易软化淤泥的风险,设计“横向截水+纵向防渗+层间隔水”的立体防护方案:

1. 横向截水:在换填区域上游侧(如两侧都有坡度均设置截水沟)开挖深度 0.5 m、宽度 0.3 m 的截水沟,内填碎石+土工布+M7.5 水泥砂浆,形成“截水盲沟”,阻断地表雨水渗入淤泥层。

2. 纵向防渗:如换填区域表面出现渗水情况,在斜坡底侧挖设一个截水坑,将水引流至截水坑内,将水抽出至外侧截水沟排出。

3. 层间隔水:在中层与上层之间铺设 1.5 mm 厚 HDPE 土工膜,阻断上层渗水进入中层淤泥片石混合层,避免基础强度衰减。

2 工程应用:现浇箱梁大钢管支架换填片石施工技术要点

2.1 工程概况

该项目为双向六车道高速公路,1-4# 现浇箱梁跨越熔岩发育区,箱梁全长 200 m,单幅宽 38.5 m,支架用 $\phi 720 \times 8$ mm 大钢管,单根承载力超 800 kN。地质勘察表明,项目地质底层依次为饱和软土淤泥、粉质粘土,淤泥层最厚 35~45 m,承载力差,其下局部

强风化层厚,揭露碎块状强风化层,这种地质条件增加了施工难度。且项目所在区域地质复杂,有大量溶洞、裂隙等不良地质现象,导致地基承载力不均,传统基础施工方法难以保证大钢管支架稳定性。为确保桥梁施工安全和质量,项目团队经研究和试验,决定采用换填片石工艺处理大钢管支架基础,该工艺提高了基础承载力和稳定性,缩短了施工周期,降低了成本。

2.2 现浇箱梁大钢管支架施工

现浇箱梁钢管支架基础处理完成后,经测量定位,在每根钢管中心点浇筑 $1.5 \times 1.5 \times 0.6$ m(按现场实际调整)的 C30 混凝土基础,内部配双层双向钢筋网片(直径 12 mm、间距 150 mm),便于施工并与换填片石层形成整体受力体系。支架体系安装时,用全站仪控制钢管垂直度(偏差 $\leq 0.3\%$)。针对熔岩地质沉降差,每跨支架设 3 组横桥向沉降观测点,每日比对监测数据与理论计算值,若 24 小时沉降量超 2 mm,立即启动预案:对沉降大的区域补填 5~10 cm 级配碎石,用冲击压路机二次压实,确保支架安全受控。

2.3 现浇箱梁大钢管支架预压施工

待现浇箱梁大钢管支架体系施工完成,按设计图纸计算箱梁钢筋及混凝土总重,对支架整体预压,预压荷载为设计荷载 1.1 倍,以验证承载能力、消除非弹性变形。预压材料用袋装砂石,分 30%、60%、90%、110% 阶段逐步加载至预定荷载,每阶段加载后监测沉降和变形,加载不少于 72 小时。监测时每 4 小时记录沉降数据并绘制沉降一时间曲线图。每阶段加载后,若 12 小时内沉降量小于 1 mm,判定支架稳定,继续下一阶段加载;若大于等于 1 mm,暂停加载,检查加固支架,问题解决且稳定后再继续。加载至 110% 设计荷载并监测 72 小时,若最终沉降量满足要求(一般不超过 3 mm)、沉降一时间曲线平缓,支架预压合格,可进行后续箱梁施工。预压中,检查支架连接节点、焊缝等,确保无松动、开裂。支架沙袋卸载后,基础测点标高反弹,因堆载预压有弹性变形,卸载后恢复;该阶段仍下沉,一是地基软土主固结沉降未完成,二是次固结沉降所致。现浇箱梁浇筑完成后条形基础继续小速率下沉,也说明堆载预压时地基主固结沉降不到位^[4]。

2.4 现浇箱梁钢筋、混凝土施工

在支架预压合格后,立即开展现浇箱梁的钢筋绑扎作业。钢筋加工严格按设计图纸下料,主筋采用直螺纹套筒连接,接头错开率 $\geq 50\%$,箍筋间距误差控制在 ± 5 mm 以内。在绑扎过程中,在梁体转折处设置定

位钢筋框,确保主筋线形平顺。混凝土浇筑采用分层推进法,每层厚度不超过30 cm,使用两台56 m泵车对称布料,避免支架偏心受载。振捣时配备8~10台插入式振捣器,按“快插慢拔”原则作业,插入点保持均匀逐点移动,重点加强腹板与翼缘板交接处的振捣,防止出现蜂窝麻面。在顶面浇筑时,进行二次收浆并拉毛处理,确保与后续桥面铺装层的粘结强度。混凝土初凝后立即覆盖土工布洒水养护,养护时间不少于14天,期间安排专人监测温湿度,防止因温差过大导致开裂^[5]。

2.5 现浇箱梁大钢管支架体系监测分析

现浇箱梁浇筑施工完成后,需对大钢管支架体系持续监测分析,验证改良工艺效果,确保结构安全。监测内容包括支架沉降、应力应变及位移变化,采用自动化监测与人工巡查结合,实现全施工周期动态管控。

1. 沉降监测:在每跨支架横桥向、纵桥向及关键节点设观测点,用水平仪测顶部高程。预压阶段最大沉降量2.8 mm以内,浇筑时24小时沉降量小于1.5 mm,远低于设计值,表明基础处理抑制了沉降风险。

2. 应力应变监测:在钢管底部及连接节点贴振弦式应变计,采集受力数据。结果显示,浇筑时最大应力值680 kN,小于单根钢管承载力,应力分布均匀,无局部过载。

3. 位移监测:用全站仪测支架垂直度,偏差控制在0.25%以内,满足规范要求。

对比传统与改良工艺监测数据,验证了技术创新优越性。传统工艺沉降量大、应力超限,改良工艺将沉降量控制在3 mm以内,应力稳定。改良工艺解决了复合地质施工难题,为熔岩地区桥梁建设提供可参考的推广方案。

3 改良后的换填片石工艺应用成效

改良后的换填片石工艺在熔岩地质现浇箱梁大钢管支架基础施工中成效显著。在施工质量上,该工艺运用“淤泥预处理—分层嵌挤—动态控压—立体防渗”四重技术,解决传统工艺在复合地质中的淤泥清理不彻底、片石填筑架空、防渗水失效等问题。检测显示,处理后的淤泥层承载力超220 kPa,基础密实度达95%,支架体系浇筑时最大应力680 kN小于单根钢管设计承载力800 kN,垂直度偏差控制在0.25%以内,各项指标优于规范。

1. 施工效率方面,动态控压技术实时调整碾压参数,使施工周期缩短30%。传统工艺因局部压力大导致

淤泥挤出,需反复补填片石,改良工艺通过压力监测与碾压调整避免无效作业。同时,立体防渗体系阻断90%以上渗水路径,减少返工,缩短工期。

2. 经济效益方面,该工艺降低了材料浪费率。传统工艺因片石填筑架空需多投20%~30%片石,改良工艺通过分层嵌挤减少材料用量。且施工周期缩短降低人工与机械台班费用,整体成本较传统工艺降低约15%。

3. 环境效益方面,立体防渗体系阻断熔岩裂隙渗水对淤泥层的软化,避免支架失稳风险,减少施工安全隐患。截水沟与截水坑设计防止地表雨水渗入,保护周边生态。

4. 推广价值方面,该工艺为熔岩地区桥梁建设提供可复制方案。例如:某高速公路桥梁工程实践验证其在复杂地质适应性强,解决了“淤泥+渗水”施工难题,为类似工程提供经验,获行业专家认可,应用前景广泛。

箱梁浇筑后,混凝土外观平整无裂缝,支架基础雨季无渗水、变形,验证了工艺在“熔岩+淤泥”复合地质中的可靠性。

4 结束语

“熔岩+淤泥”复合地质条件下的支架基础施工关键在于“因地制宜”——既要解决淤泥的软基特性,又要适配熔岩的起伏裂隙。换填片石工艺通过“淤泥分区处置、片石分层嵌挤、动态控压、立体防渗”的创新组合,打破了传统工艺的局限。实践证明,只有针对复合地质的特殊性进行精准技术创新,才能开发出真正适配工程需求的解决方案,为复杂地质条件下的交通建设提供坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 林晋辉.深厚回填土地不均匀沉降原因分析及治理措施研究[J].江西建材,2021(12):266-267.
- [2] 张立.软土地带现浇箱梁组合支架基础处理工艺的对比分析[J].四川水泥,2021(04):56-57.
- [3] 王冬恒,危志豪.复理石顺层岩面支架基础处理技术研究[J].建筑机械,2024(08):125-129.
- [4] 黄长溪.公路桥梁结构支架法施工中的关键技术问题研究[J].交通科技与管理,2025,06(10):45-47.
- [5] 王召.公路桥梁支架现浇箱梁施工技术[J].交通世界,2021(35):109-110.

风电开发复杂地形风资源评估方法

杨忠贤

(中能建广西开发投资有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要 复杂地形风电场风资源评估由于存在气流分离、湍流加剧和尾流扰动问题而不同于平坦地形, 普通的平坦地形的风资源评估方法并不能完全适用于复杂地形, 需要重新建立一套适合复杂地形风资源评估的技术路线。本研究分析了复杂地形对风场特性的影响, 从测风塔布设原则、遥感测风设备应用等多个方面探讨了测风方案设计与数据采集要点, 并且详细解析了数值模拟方法选型与应用要点, 以期风电开发复杂地形风资源评估提供有益参考。

关键词 风电开发; 复杂地形; 风资源评估

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.021

0 引言

风能资源评估是风电项目可行性研究的重要基础, 其结果直接影响到机组选择、布置方式和经济效益的测算。平地风场一般采用线性化模型预报风能资源, 气流平稳, 风切变小、湍流强度弱; 而我国中东部以及西南地区山地、丘陵、峡谷等地形条件复杂, 由于地表起伏大, 坡度差多在 200 m 以上, 风场地面粗糙度相差极大, 气流受地形影响易产生绕流、分离、回流和强湍流现象, 造成风速分布极不均匀、风向突变和尾流恢复慢等情况, 如果仍采用平地进行风资源评估, 会导致电能输出预测偏差达 15% 以上, 进而影响项目投资决策^[1]。对此需要根据不同的地形特点, 建立具有较强的通用性和可控性的风资源评估系统。本文在总结了现有的风能资源评价方法以及工程建设经验的基础上, 提出了适合于复杂地形风电场的风资源评估方法。

1 复杂地形对风场特性的影响

复杂地形主要指地表高程变化剧烈、坡度大于 15°、存在山脊、山谷或孤立山体的区域。其对风场的影响表现如表 1 所示。

表 1 风场特性的影响分析

类别	地形特征	风场影响	关键数据
地形定义	坡度 > 15°, 含山脊 / 山谷	—	坡度 > 15°
风速分布	气流加速 / 分离	山脊风速高谷底 30% ~ 50%	机位风速差 ≥ 2 m/s
风向稳定性	气流偏转 / 狭管效应	风向偏差 > 30°, 出口有涡旋	偏差 > 30°
湍流与风切变	地形扰动	湍流强度 18% ~ 25%	风切变 ≥ 0.3
评估难度	特性复杂	测风、建模、选址难度上升	—

2 测风方案设计与数据采集

2.1 测风塔布设原则

在复杂地形中, 测风塔应覆盖风电场内主要地貌单元, 优先布设于山脊线、谷底、坡中及孤立高点等典型位置。测风塔高度不低于拟选风机轮毂高度的 80%, 通常设 80 ~ 120 m。每座测风塔至少设置三层风速仪与一层风向仪, 并配备温度、气压传感器用于空气密度修正。风速仪采用超声波或加热式机械式, 防冰冻、抗腐蚀。数据采集频率 1 Hz, 存储间隔 10 min, 连续测风不少于 12 个月。

2.2 遥感测风设备应用

遥感测风设备可以采用激光雷达 (LiDAR) 或声雷达 (SODAR) 在陡峭山地或交通不便区域增加测风点, 将 LiDAR/SoDAR 仪器设置在山顶或临时平台上, 测量高度为 50 ~ 200 m, 水平扫描获取每个方位上相应的风场剖面。同时应将遥感设备与邻近测风塔平行运行, 其二者具有良好的相关性 (≥ 0.95), 且斜率偏差小于 ±5%, 以用于风场建模。

2.3 数据质量控制

对原始测风数据应进行完整性检验、合理性检验和一致性检验, 去掉大于 $0 \sim 50 \text{ m/s}$ 的风速值、大于 $60^\circ / 10 \text{ min}$ 的风向突变值以及因传感器故障导致的异常数据。同时使用线性插值或者相邻塔架数据进行内插, 使每一年单月风速数据完整率达到 $\geq 90\%$, 全年的数据完整率 $\geq 95\%$, 然后将得到的数据运用 WindLogger 工具形成风况表。采用 12 方位划分风向扇区^[2]。

3 数值模拟方法选型与应用

3.1 线性模型适用边界

线性模型以势流方程为理论依据, 假定气流不可压缩、无黏性、不分离。当地形坡度小于 12° 、高程起伏变化不大时, 可以取得与观测比较接近的结果; 但是, 在山脊坡度大于 20° , 且背风波有气流回旋处, 则由于模型不能体现出流动分离和再附着特性, 得到的风速值会较观测值相差较大; 在工程上, 在此地形条件下线性模型得出的年平均风速可能会大于或小于实测值 20% 以上, 发电量也会随之出现相应的变化。在具有山地、峡谷或者孤立山体等地形比较复杂的地貌上, 不能使用线性模型对风电场进行建模, 在线性模型的基础上还需要采用更高的数值方法进行风场重构^[3]。线性模型不是万能的, 用不好反而会误导判断。尤其是在大气特别不稳定(比如夏季午后)或者特别稳定(比如冬季晴朗夜晚)的时候, 风场里乱流多、风速变化剧烈, 线性模型“平滑流动”的假设就站不住脚了, 算出来的结果往往不乐观。另外, 现在很多风电场为了省地, 风机排得很密, 前后间距连五个轮毂高度都不到, 这时前排风机的尾流还没散, 后排就接着“吃尾流”, 线性模型根本算不准这种相互影响, 很容易高估发电量。因此, 我们在做项目前期评估时, 一定要先摸清地形是不是太平缓、风稳不稳定、风机如何排, 保证结果可靠稳定。

3.2 非线性 CFD 模型原理与设置

非线性计算流体动力学模型通过数值求解三维瞬态 Navier-Stokes 方程, 能够再现气流绕山、分离、回流及尾流演化等复杂现象。模型计算域在水平方向延伸至风电场边界外不少于五倍轮毂高度, 垂直方向高度不低于三倍轮毂高度。网格划分在风机布设区域加密, 水平单元尺寸控制在 $10 \sim 20 \text{ m}$ 之间, 近地面边界层设置不少于 10 层渐密网格。湍流闭合采用 $k-\epsilon$ RNG 或 $k-\omega$ SST 模型, 二者对强剪切与逆压梯度流动具有较好的捕捉能力。入口边界给定风速剖面, 按对数律或实测廓线输入; 出口设为自由流出; 地面设为

无滑移壁面, 粗糙度长度依据地表植被、裸露岩石或水体等覆盖类型选取, 数值范围从 $0.01 \sim 1.0 \text{ m}$ 不等。在模拟风电场流场时, 应考虑大气稳定度对风速廓线和湍流结构的影响。通常根据实测气象数据, 将大气层结划分为中性、稳定或不稳定三类, 分别采用对应的边界层参数进行计算。风机对气流的作用可通过致动盘或致动线方法简化表示: 致动盘适合快速评估全场风速分布, 致动线则能更真实地反映叶片尾流中的涡旋发展。计算时时间步长不宜过大, 一般控制在 $0.01 \sim 0.1 \text{ s}$ 之间, 以保证数值稳定性。模拟过程中需关注速度和压力等关键变量的变化趋势, 当其波动趋于平稳、不再明显下降时, 可认为计算结果基本稳定, 具备用于工程分析的基础。

3.3 模型验证与不确定性控制

模型输出的结果要与独立测风塔观测数据进行对比校验, 从风电场中随机抽取 2~3 座未参与建模工作的测风塔, 并根据测风塔轮毂高度处长期观测数据取值, 与相应位置处的模拟值对比分析, 采用均方根误差和平均绝对误差指标评价其差异情况, 要求均方根误差小于 0.8 m/s , 平均绝对误差小于 0.6 m/s ; 若其误差超出上述标准时, 重新调整网格分辨率、更换湍流模型或修改地表粗糙度参数。模型的不确定性是由于地形起伏真实性的数字高程模型的精度不高、入口风廓线不具有代表性以及湍流封闭假设带来不确定性造成的。为控制模型不确定性, 在一定的参数空间范围内取多个参数组进行参数组合模拟, 通过敏感性分析找出影响最大的参数组作为优化目标, 并用各参数组合下的多组结果分散程度来反映评估结果的可信区间^[4]。

4 微观选址与风场布局

4.1 风资源图谱生成

风资源图谱是应用经过验证的计算流体动力学模型, 覆盖风电场规划区范围内的所有地区而形成; 图谱输出内容为年平均风速、湍流强度、主风向频率和空气密度四个参数; 空间分辨率为 $25 \times 25 \text{ m}$, 能够体现局部地形造成的风场细节变化; 图谱运用 GIS 平台进行绘制, 不同参数分别以等值线或色阶的形式表示; 高风速一般出现在山顶或山脊向上一定的高度范围内, 低湍流区多出现于坡度较小且没有其他障碍物阻挡的平坦开阔区域, 因此图谱可以用作微观选址的参考依据, 用来排除一些不利于机组布设的位置, 比如过低风速和过大湍流位置。同时, 在进行图谱绘制时, 将所有数据导出成网格点文件, 供接下来进行机组布置时使用。

4.2 机组布置原则

风机位置优先选择山脊线迎风一侧,该区域气流稳定、风速较高,需避免在背风坡布置,因为气流分离易形成低速回流区;峡谷出口下游亦不设机位,防止涡旋引起载荷异常。沿主风向相邻风机间距不小于七倍叶轮直径,垂直主风向间距不小于五倍叶轮直径,以此控制尾流影响范围。在风向分散或地形复杂的区域,采用非规则排布方式,根据局部风向调整机位偏移,使上游风机尾流区避开下游风机扫风面。同时,结合地质勘察报告,核查每个拟定机位的基础持力层条件,排除存在滑坡、冲沟、软弱夹层等不良地质现象的点,确保基础结构安全。

4.3 尾流模型选择

尾流影响计算主要采用非线性物理模型,如 Larsen 模型、Ainslie 模型等,这些模型基于动量守恒和湍流扩散方程,可以反映尾流速度亏损沿程发展的过程以及尾流恢复的过程,且考虑地形对气流结构的影响。在山地环境中,由于大气稳定度较高、机械湍流较弱,其尾流恢复速度慢于平原地区,尾流影响距离长;在实际工程应用中,山地风电场年均尾流损失率为 12%~18%,固定为这一数值进入年理论发电量计算流程。尾流模型的输入项为风机的功率曲线、推力系数、实测或者模拟的风向频率、地形高程值,输出项为每一个风机对应的尾流折减系数,用于逐机位修正发电量^[5]。

5 长期风况订正与发电量估算

5.1 长期订正方法

现场测风周期多为 12~36 个月,所得风速数据代表短期气候状态。为获得 20 年尺度的长期平均风况,采用相关分析法进行订正。该方法需选取一个参证气象站,其距离风电场不超过 50 km,地形特征相似,海拔高差小于 200 m,且盛行风向基本一致。利用测风塔与参证站在同期重叠时段的 10 分钟平均风速数据,建立线性回归方程,斜率与截距由最小二乘法确定,相关系数不低于 0.7。随后,将参证站近 20 年的年均风速序列代入该回归方程,计算出风电场对应年份的长期风速序列,并求取其平均值,作为风资源评估的基准风速。订正结果受参证站代表性影响,若区域无合适站点,可采用再分析数据如 MERRA-2 或 ERA5 作为替代。

5.2 发电量计算

发电量计算以订正后的长期年均风速为基础。首先,根据实测风速频率分布拟合威布尔双参数模型,确定尺度参数与形状参数,进而计算各 1 m 每秒风速区间的出现概率。其次,将各风速区间中值输入风机制造商提供的功率曲线,获得对应输出功率,乘以该

区间频率与全年小时数,得到理论发电量。随后,依次应用多项修正系数:尾流损失系数依据微观选址模型输出结果;空气密度修正按现场实测年均密度与标准密度 1.225 kg/m^3 之比调整;功率曲线折减系数取 0.95;设备可利用率系数取 0.93。各项系数连乘后作用于理论发电量,最终得出年理论发电量。在复杂地形条件下,因风场模拟与测风代表性存在不确定性,该发电量结果的误差范围一般为正负 8% 至正负 12%。

6 工程实例分析

某山地风电场位于西南某省,场区东西长 6 km,南北宽 4 km,海拔 1 800 m 至 2 300 m,最大高差 500 m,坡度 15° 至 35° 。布设 3 座 100 m 测风塔及 2 台激光雷达,测风 18 个月。采用 Metodyn WT 软件建立 CFD 模型,计算域 $12 \times 10 \times 3 \text{ km}$,网格总数 850 万,湍流模型 $k-\omega$ SST。模型经 3 座塔验证, RMSE 为 0.72 m/s, MAE 为 0.55 m/s。风资源图谱显示,山脊线年均风速 6.8 m/s,湍流强度 19%;谷底风速 5.1 m/s,湍流强度 23%。最终布置 24 台 3.6 MW 机组,沿山脊非规则排布,主风向间距 8D。经长期订正,年理论发电量 328 $\text{GW} \cdot \text{h}$,不确定度 $\pm 10\%$ 。项目投产后首年实际发电量 321 $\text{GW} \cdot \text{h}$,偏差 2.1%,验证评估方法有效性。

7 结束语

风电开发复杂地形风资源评估阶段,不同地形的评估参数选择存在差异性,故而在评估方面需综合考虑地形的运用价值与可行性。复杂地形下风资源评价应抛弃平地简化想法,而是通过利用“精细化测风、高保真模拟、针对性布局、严谨订正”的技术路线。同时,由于测风方案应覆盖地貌多样性,故而在风电开发复杂地形风资源评估时可通过 CFD 模型合理设置网格,并且在设置合理的湍流模型基础上结合实测数据验证,确保复杂地形下的风场模拟精度得到全面提升,为风电项目建设提供数据参考。

参考文献:

- [1] 陈洪胜.复杂地形风电场风资源评估精度提升研究[J].能源与节能,2019(04):63-64,68.
- [2] 赵章乐.复杂地形风电场风资源分析及风场选址[J].现代工业经济和信息化,2020,10(11):23-24,40.
- [3] 鹿浩,焦姣.风电场的选址与风能资源评估及其后评价[J].太阳能,2023(12):27-35.
- [4] 陈挺.陆上风电场测风塔建设要点的分析及建议[J].福建建材,2020(11):89-91.
- [5] 陈标,何建军,舒忠虎,等.覆冰影响的南方山地风电场风资源评估方法[J].湖南电力,2021,41(05):42-47,52.

基于 PLC 技术的新能源风力发电控制系统研究

乔静男

(国家能源集团国源电力有限公司内蒙古分公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要 在新能源风力发电系统运行中,控制系统与发电效率、发电安全联系密切。可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)具备高效、稳定、灵活的优势,现已在新能源风力发电控制系统中实现了应用。本文总结了 PLC 技术应用优势及核心功能,从硬件设计、软件设计、中断程序设计、设计效果验证层面入手,结合实际案例阐述了 PLC 技术在风力发电控制系统中的应用设计,旨在对充分发挥出新能源风力发电控制系统中 PLC 技术的重要作用有所裨益,进而保障新能源风力发电系统运行可靠,提高新能源利用水平。

关键词 PLC 技术; 新能源; 风力发电控制系统

中图分类号: TM61; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.022

0 引言

风速变化会影响风电机组输出功率,不仅威胁电网供电质量,还会导致新能源风力发电机组运行年限下降。因此,应保障控制系统可靠性,提升控制系统精度,从而实现新能源风力发电机组全程监测、灵活调节及故障保护,为新能源风力发电系统稳定运行打下坚实的基础。近年来,在工业自动化技术飞速发展的背景下,PLC 技术凭借其模块化结构、灵活、抗干扰能力强等优势,逐渐在控制系统中实现了应用,并成为新能源风力发电控制系统中的核心技术。由此可见,加强新能源风力发电控制系统中 PLC 技术应用研究具有积极的现实意义。

1 PLC 技术在风力发电控制系统中的应用优势

其一,抗干扰能力优越。新能源风力发电机组所处环境恶劣,易受电磁辐射、温度波动、振动等因素干扰。而 PLC 硬件为模块化结构,内部有电源滤波等抗干扰设计,可保障复杂环境下功能发挥稳定,平均无故障时间可达 10 万小时,能够为新能源风力发电机组长时间连续运行打下基础。其二,灵活性强。PLC 技术支持多种编程方式,如梯形图、结构化文本等,工程师可结合控制需求展开灵活设计,还可添加通信模块等实现 PLC 系统扩展,从而满足 1.5 MW、2.5 MW 等多功率的新能源风力发电机组控制要求。其三,故障诊断功能。PLC 系统可借助内置诊断程序监测 CPU、I/O 模块等自身硬件设施及执行机构、传感器等外部设备运行状态。如某设备出现故障,PLC 系统可实时记录故障代码及故障发生时间,再通过人机交互界面发出报警信号,管理人员可快速定位故障问题,从而提升故

障处理效率^[1]。其四,通信互联能力优越。在新能源风力发电机组运行中,应保障各机组与监控中心实现互联。PLC 技术支持多种通信协议,机组运行转速、运行功率、环境风速及设备故障信息可实时上传至监控中心,同时还可接受监控中心所下达的各项指令,从而实现各机组的集中监管。

2 PLC 技术在风力发电控制系统中的核心功能

其一,数据采集功能。PLC 系统可借助多种传感器实时采集新能源风力发电机组运行参数及外部环境因素,从而为控制指令下达提供数据依据。其二,变桨距控制功能。在新能源风力发电机组运行中,变桨距系统是影响风能利用的重要系统。当外部风速低于额定风速时,PLC 系统可将桨叶角度调整为最佳迎风位置,从而提高风能利用效率;当风速超过额定风速时,PLC 系统可降低桨叶角度,以此减少风能吸收,保障新能源风力发电机组运行安全。其三,偏航控制功能。PLC 系统可根据风向信号控制偏航电机驱动机舱旋转,从而保障风轮轴线与风向对应^[2]。其四,并网控制功能。在新能源风力发电机组运行中,借助 PLC 系统可调节发电机转速,从而保障发电机输出电压、输出频率与电网参数统一。当参数匹配完成后,PLC 系统可发出指令控制并网接触器闭合,从而保障并网过程更加平滑,避免并网冲击影响电网及新能源风力发电机组运行。其五,故障保护功能。当 PLC 系统检测到转速过高、电压异常等异常时,保护机制可立刻激发,再利用紧急顺桨、暂停发电机运行等方式实现故障保护。同时还可记录故障信息,发出报警信号,从而降低故障影响。

3 PLC 技术在风力发电控制系统中的应用设计

3.1 案例背景

以某新能源风力发电场为例,该发电场规划建设 30 台 2.0 MW 陆上风电机组。该发电场位于风速波动大、昼夜温差大、沙尘天气频发的戈壁地区,对风力发电控制系统抗干扰能力、环境适应性、控制精度要求较高。为保障新能源风力发电机组运行稳定,该发电厂应用基于 PLC 的控制系统方案,核心控制单元为罗克韦尔 Allen-BradleyControlLogix5570 系列 PLC,变频器为施耐德 ATV630 系列变频器,传感器为 Banner 风速风向传感器,人机交互界面为昆仑通态 TPC1561Hi 触摸屏。

3.2 硬件设计

3.2.1 硬件整体架构

该项目 PLC 系统硬件采用四层架构设计,通过工业通信协议实现各层级高效互联,构建起数据采集、逻辑运算、指令执行及状态反馈的闭环控制体系,充分适配戈壁地区风电场风速波动大、昼夜温差悬殊、沙尘频发的复杂运行环境,为机组稳定运行提供硬件支撑。

1. 数据采集层。以各类高精度检测设备为核心,全面捕捉风电场环境与机组运行状态数据。风速传感器可精准采集 0~30 m/s 的风速信号,风向传感器实现 0°~360° 风向的实时监测,二者共同为机组对风控制提供基础依据;转速编码器持续跟踪主轴与发电机的转动状态,确保转速参数实时反馈;温度传感器则重点监测齿轮箱、发电机定子及机舱环境温度,及时预警设备过热风险,为控制决策提供全面、可靠的原始数据支撑^[3]。

2. 控制核心层。选用高性能 PLC 作为主控单元,配套 I/O 框架及各类功能模块构建核心控制网络。该 PLC 搭载多核处理器,具备强大的并行运算能力,可高效处理变桨距控制、并网调节、故障诊断等多类任务,且支持大规模 I/O 扩展,满足风电场多设备、多参数的控制需求。其配套的 I/O 框架支持功能模块热插拔,可在机组不停机状态下完成维护升级,大幅提升运维效率;模拟量输入模块以高分辨率采集各类环境与设备信号,具备光电隔离功能,有效抵御电磁干扰;数字量输出模块可稳定驱动接触器、继电器等执行机构,且自带过流保护机制,确保控制指令安全、精准输出。

3. 执行驱动层。整合变频器、偏航电机及并网接触器等核心执行设备,实现控制指令的高效落地。变频器专为变桨电机驱动设计,响应速度快,可精准调节变桨动作,保障叶片角度与风速的动态匹配;偏航电机通过减速器驱动机舱旋转,配套电磁制动装置,实现机舱对风角度的稳定控制,提升风能捕获效率;并网接触器具备高电压、大电流承载能力,支持 PLC

远程控制,且内置可靠的灭弧保护功能,确保机组安全、平稳并入电网。

4. 人机交互层。由触摸屏与工业路由器组成,构建现场运维与远程监控的双重交互通道。高清触摸屏可直观展示机组运行曲线、故障代码等关键信息,支持触摸操作与参数设置,方便现场运维人员快速掌握设备状态、及时处理故障;工业路由器采用高速通信技术,实现 PLC 与风电场 SCADA 系统的实时数据交互,保障远程监控指令的快速下达与运行数据的高效上传,显著提升风电场整体运维管理水平^[4]。

3.2.2 硬件选型与适配性分析

本项目中,罗克韦尔 Allen-BradleyControlLogix 5570 系列 PLC 环境适应能力及运算能力强,该 PLC 设备工作温度为 -25~60℃,即使发电厂昼夜温差较大,PLC 设备仍可保持良好的运行状态。PLC 设备中的多核 CPU 可同时处理变桨距控制、并网、故障诊断任务,运算能力较强。此外,该 PLC 设备内置的 EtherNet/IP 协议可与多种设备实现互联,可降低通信额外硬件成本。传感器为 Banner 传感器,防尘外壳防护等级为 IP67 级,不仅具备基础的信息采集功能,还具有一定的防护功能。转速编码器为欧姆龙 E6B2 系列传感器,抗震性能优越,适用于主轴高速旋转振动环境中。温度传感器为倍加福 NBN8 系列传感器,金属外壳可避免沙尘侵蚀,保障信号传输稳定,从而实现关键部件温度准确监测。此外,变桨系统是影响机组运行稳定的核心系统,应用 EtherNet/IP 协议将变频器与 PLC 相连,PLC 可下发转速指令,并获取变频器状态信号。如检测到变桨电机电流超过额定限值,PLC 可切断变频器使能,避免电机损坏。偏航电机为多台并联形式,PLC 可控制电机通断顺序,实现机舱精确控制,PLC 还可利用转速编码器获取机舱旋转角度,并实现偏航校正。

3.3 软件设计

3.3.1 软件开发环境

在本项目中,开发平台为罗克韦尔 Studio5000 软件,可实现结构化文本及功能块图的混合编程,软件扫描周期为 80 ms。

3.3.2 核心功能块设计与适配性分析

在本项目中,风电场所处区域风速波动较大,变桨距控制功能模块采用分段 PID 控制算法。当风速为 3~12 m/s, PID 比例系数设定为 0.8,积分时间设定为 1.2 s,从而实现桨叶角度的快速调整及风能最大化吸收;当风速为 12~20 m/s, PID 比例系数设定为 0.5,积分时间设定为 0.8 s,从而实现桨叶角度的缓慢调整,并降低功率变化对电网所造成的冲击。功能模块还可实现角度偏差监测,如桨叶角度较预定角度相比偏差

超过 3° ，可发出报警信号，并切换备用电机，从而保障变桨系统稳定运行^[5]。为避免并网对10 kV电网造成冲击，并网控制功能块采用软并网策略。在预充电阶段，PLC控制变频器以20%额定电压形式输出0.5 s，以此实现发电机定子绕组预充电；在同步阶段，借助电压互感器及频率互感器采集电网运行参数。再将采集参数与发电机输出参数相比较，当电压偏差低于3%、频率偏差低于0.2 Hz、相位差低于 5° 时，方可发出并网指令；在合闸阶段，选择分阶段合闸形式，将接触器闭合时间控制在0.2 s以内，避免电流产生冲击。

风电场所处区域沙尘多、温差大，故障诊断功能块可实现三类故障监测。在传感器故障监测中，当风速传感器信号丢失超过5 s时，可结合过往风速数据计算当前风速，从而避免机组停机；在温度故障监测中，当齿轮箱温度超过 85°C 时，冷却风扇可自动开启。当温度超过 95°C 时，可自动停机并发出报警信号。在电网故障监测中，当电网电压跌落超过15%时，可立刻断开并网接触器，控制变桨系统，避免发电机损坏。

3.4 中断程序设计

本项目中，控制系统设计三类中断程序，在超速中断设计中，当变桨系统顺桨转速超过120%额定转速时，即可立即中断，随后控制变桨电机紧急顺桨，从而避免发生飞车事故；在过温中断设计中，当新能源风力发电机组定子温度超过 130°C 时，即可立即中断，并启动散热系统，再上传故障信息；在电网中断设计中，当电网电压持续0.5 s低于额定值80%时，即可立即中断，并断开并网接触器，避免新能源风力发电机组故障。

3.5 冗余设计与容错机制构建

针对戈壁地区风电场风速波动剧烈、沙尘频发、昼夜温差大的极端环境特性，为强化控制系统抗故障能力，构建硬件冗余与软件容错协同的保障体系。

在硬件层面，核心控制单元采用双PLC热备架构，通过高速同步总线实现主从设备数据毫秒级同步，主PLC若出现CPU异常、通信中断等故障，从PLC可无缝切换接管控制任务，确保控制流程无间断。关键I/O模块实施冗余配置，模拟量输入模块采用双路采集校验机制，数字量输出模块预留备用通道，规避单一模块失效导致的执行机构失控风险。

在软件层面，嵌入容错控制算法提升系统鲁棒性。传感器数据异常时，启动多源数据融合策略，结合历史运行数据、相邻机组监测数据及气象预报信息，通过卡尔曼滤波算法重构核心参数，保障风速、转速数据的连续性与准确性。变桨距、偏航等关键系统内置故障自修复逻辑，单台变桨电机故障时，自动优化剩余电机负载分配，维持桨叶角度控制精度；偏航系统

采用电机冗余驱动，单台电机失效后通过调整其余电机输出扭矩，将机舱对风角度误差控制在 $\pm 1^{\circ}$ 以内。同时，建立控制程序在线备份与快速恢复机制，通过工业以太网定期将PLC程序备份至远程服务器，若程序因电磁干扰出现错乱，可一键恢复至最近稳定版本。硬件冗余与软件容错的协同设计，形成全链条保障体系，有效降低极端环境下的机组停机概率，为风电场连续稳定运行提供可靠支撑。

3.6 设计效果验证

在该风电场试运行6个月后，性能检测结果如下。其一，在 $-25\sim 45^{\circ}\text{C}$ 环境中，PLC及各传感器均稳定运行。在沙尘天气下，风速传感器精度低于0.3 m/s，与设计要求相符。其二，当风速由8 m/s骤升至15 m/s时，变桨系统可在0.4 s内将桨叶角度由 15° 调整为 25° ，功率波动 $\leq 1.8\%$ 。其三，试运行阶段共发生2次传感器故障，PLC均自动切换至备用控制模式。其四，较传统继电器控制系统的新能源风力发电机组相比，PLC控制系统的新能源风力发电机组月平均发电量提升约4.3%。

4 结束语

本研究结合某新能源风力发电场案例，围绕硬件设计、软件设计、中断程序设计展开分析，结合设计效果，验证了PLC技术在风力发电控制系统中的应用可行性及优越性。该设计方案实现了环境适配性与控制精确性的深度结合。在硬件设备选择中，结合项目所处区域环境，应用抗干扰能力强、防护等级高的硬件设备，以保障系统运行稳定。在软件设计上，应用分段PID控制算法、软并网策略、故障监测及中断保护，在充分利用风能的基础上，保障了新能源风力发电机组与电网运行安全。未来，可将物联网技术、大数据技术与PLC控制系统相结合。在技术持续迭代下，风力发电控制系统中的PLC技术将发挥出更重要的作用。

参考文献：

- [1] 艾浩. 基于PLC技术的新能源风力发电控制系统[J]. 电气技术与经济, 2025(04):133-135,142.
- [2] 陈文静. 新能源风力发电系统中自适应控制技术的应用及未来前景[J]. 电子测试, 2022(16):104-106.
- [3] 王宁. 新能源时代电力电子技术在风力发电中的应用分析[J]. 工程建设与设计, 2025(10):40-42.
- [4] 孙晓颖. 风力发电新能源电气系统设计与性能优化研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(07):164-167.
- [5] 郝显翔, 侯宏霖. 新能源发电系统的控制与优化技术研究[J]. 电子质量, 2025(03):66-69.

深度调峰工况下电力锅炉燃烧稳定性分析及优化

李俊杰

(辽宁大唐国际新能源有限公司锦州热电分公司, 辽宁 锦州 121000)

摘要 为了提高深度调峰工况下电力锅炉的运行效率与安全性, 本文从电力锅炉深度调峰概述出发, 深入分析了该工况对锅炉燃烧稳定性的影响。通过对燃烧过程中燃料特性、炉内动力场、燃烧器工作状态等多方面因素的研究, 剖析了导致燃烧不稳定的关键问题。在此基础上, 提出了一系列针对性的优化策略, 如调整燃料供给方式、优化燃烧器运行参数、改进燃烧器结构等。通过这些优化措施能有效增强锅炉燃烧稳定性, 降低能耗, 提升发电质量, 为电力企业在深度调峰工况下的稳定运行提供参考。

关键词 深度调峰; 电力锅炉; 炉内动力场; 热工控制系统

中图分类号: TK22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.023

0 引言

随着电力系统峰谷差的不断加大, 深度调峰已成为电力锅炉的一种运行工况。在深度调峰的工况下, 锅炉的运行工况、燃烧工况与燃烧稳定性受到较大影响, 燃烧不稳定现象将导致锅炉效率下降、耗能增加, 并引发一系列的安全问题, 影响电力企业的稳定供电^[1]。深入地开展深度调峰工况下电力锅炉燃烧稳定性的研究具有重要的现实意义。

1 电力锅炉深度调峰概述

电力锅炉深度调峰是指电力系统运行需要配合电网负荷的较大变化而要求锅炉安全、稳定、经济在低于正常的稳定运行负荷下能够运行的手段。电力锅炉深度调峰的基本原理包括了燃烧调整、汽水系统控制等方面。在燃烧调整方面, 应该准确控制燃料供给量、燃烧速度, 当锅炉处于深度调峰的状态时, 其燃料量减少很大, 就需要优化燃烧器配风方式, 使燃料能够稳定、充分地燃烧, 如采用分级配风手段, 合理搭配一次风和二次风, 既可确保煤粉的着火稳定, 又可提升燃烧效率^[2]。

汽水系统的控制即控制锅炉在低负荷运行时, 由于蒸发量降低、汽水循环特性变化, 将无法避免水循环故障的发生, 此时需要精准调给水流量和水位。可以利用先进的水位控制系统实时测控水位的变化, 利用负荷波的出现及时改变给水泵的转速, 将水位调整到安全范围内。

此外, 深度调峰对锅炉装置的功能方面也提高了需求。长期以来的深度低负荷运行极易造成受热面磨损和结焦等缺陷, 需要对锅炉受热面专门设计, 如受热面采用耐磨型材进行制造, 或者采用吹灰设备进行受热面上的结焦、积灰等处理, 确保锅炉受热面积灰结焦等问题不发生。

2 深度调峰工况下电力锅炉燃烧稳定性分析

2.1 燃料特征稳定性

在电力锅炉燃烧时, 不同的燃料在电力锅炉燃烧期间具有挥发分、固定碳、水分以及灰分等特性, 这些特性都将对深度调峰期间电力锅炉的燃烧状态起到关键性的作用。

挥发分含量高的燃料可以在较低温度条件下挥发析出并快速燃烧, 为燃烧提供起始热, 有利于炉膛燃烧的稳定性。但深度调峰时, 锅炉负荷低, 炉内温度降低, 挥发分的析出与燃烧速率将受到影响, 若挥发分未能及时充分燃烧, 将导致燃烧火不稳甚至熄灭现象。

固定碳是燃料燃烧的主要热源, 但它的着火温度较高, 燃烧速度相对较慢。在深度调峰工况下, 由于炉内温度降低, 固定碳的着火和燃烧变得更加困难。此时, 需要合理调整燃烧器的配风方式和煤粉细度, 以提高固定碳的燃烧效率, 保证燃烧的稳定性^[3]。

水分、灰分的存在会降低燃料发热量, 增加排烟热损失, 在深调峰过程中水的蒸发带走大量热量, 降低炉内温度, 不利于燃料着火燃烧。而灰分容易在受

热面上沉积,降低受热面传热效果,不利于着火燃烧。故选用燃料时应尽可能减少水分和灰分含量。

此外,煤粉细度也会影响煤粉的燃烧稳定性。煤粉过粗,则煤粉在炉内的停留时间少,不能充分燃烧;煤粉过细,则煤粉容易被气流带走,增加飞灰含碳量。在深度调峰工况下,根据锅炉实际运行情况,要对锅炉煤粉细度进行调整,以便于燃料充分、稳定燃烧。

2.2 炉内动力场稳定性

炉内动力场是指炉内气流的运动状态,其影响着炉内燃料燃烧和换热,深度调峰工况炉内动力场稳定状况直接影响着燃烧和锅炉效率。

随着锅炉负荷的减少,会使炉内的气流速度减小,容易导致炉内的气流偏斜不均匀,气流分布不均会造成燃烧器区域分布的燃料与炉内燃料分布不均,使得炉内有的区域燃料过浓或者过稀,易造成锅炉燃烧不稳定,对保证炉内动力场稳定会造成不利的影响。应该合理设计炉膛结构、燃烧器布置形式,使炉膛内燃烧器区域内气流分布均匀。

同时,炉内二次风对炉内动力场有重要的影响。二次风为燃烧提供燃料燃烧时需要的氧气,调整炉内气流方向和速度。深度调峰工况时应根据锅炉实际运行情况调整二次风量及风速,保证炉内动力场稳定。

炉内温度分布。深度调峰时炉内的冷却会导致气流密度、粘度的变化,进而引起气流状态的改变,此时应当调整燃烧器运行参数及配风方式,实现炉内温场分布的合理性,以减小温差对炉内动力场产生的影响。

2.3 热工控制系统稳定性

热工控制系统是电力锅炉安全、稳定运行的重要保证。热工控制系统在深度调峰工况下能否平稳工作,直接影响锅炉的燃烧稳定性与工作性能。热工控制系统主要是由燃料控制系统、风量控制系统、水位控制系统组成。在深度调峰过程中,热工控制系统能够及时、正确地根据锅炉负荷的变动,来改变锅炉燃烧所需的燃料量、风量以及水位的高低,以实现锅炉稳定运行。

燃料控制系统主要工作是跟随锅炉负荷需求来精确调节燃料供给量。在深度调峰工况下,燃料控制的燃烧过程有较大幅度的锅炉负荷变化,燃料控制系统在工况变化时需要有较快的响应和精控调节能力,采取先进的控制算法与传感器技术来精确控制燃烧过程的燃料供应量。

风量控制系统负责控制风的进气流量。适宜的风量控制能够使燃料与风充分混合,保证燃烧效果。在深度调峰中,风量控制系统必须结合燃料特点及锅炉

运行状态自动调节风量以实现稳定及经济的燃烧。

在深度调峰状态下,由于锅炉负荷的变化,使水位发生变化,水位控制系统必须及时、准确地进行控制,给水量自动调节,保持水位在正常范围内,不能形成缺水或满水事故。并且在热工控制系统中需要设置故障诊断及保护功能。当热工控制部分出现故障时,能及时发出报警信号,并进行保护操作,保证锅炉安全运行。

3 深度调峰工况下电力锅炉燃烧稳定性优化策略

3.1 调整燃料供给方式

在深度调峰工况下,电力锅炉燃烧稳定性可以采用分仓配煤的方式进行燃料供给,如图1所示。分仓配煤通过建立完善的数据库,收集不同种类煤炭的各项特性数据,如挥发分、固定碳、水分、灰分、颗粒度等。依据深度调峰工况下锅炉的实际运行需求,确定入炉煤掺配指标,明确不同特性煤炭的比例范围。

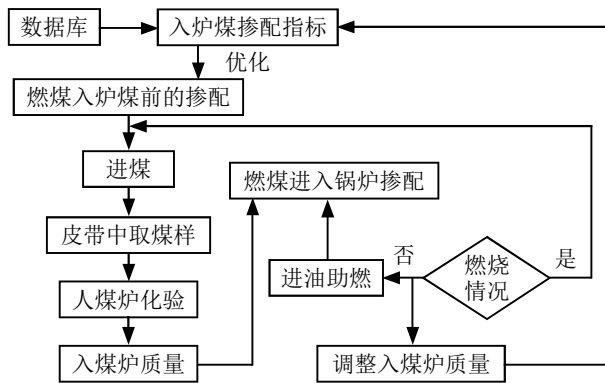


图1 电力锅炉燃烧分仓配煤流程

在燃煤入炉前进行掺配,利用专业的掺配设备将不同的煤炭按照既定指标均匀混合。进煤环节需要在皮带上取煤样、入煤炉化验、入煤炉质量分析,确保进入锅炉的煤炭质量符合掺配要求。当混合后的燃煤进入锅炉后,再次进行掺配,使燃料在炉内分布更加均匀^[4]。

在燃烧工况中,现场巡检控制燃烧工况,燃烧不稳定(如火焰闪动、炉温偏离等)时可以进行进油助燃操作,提高炉温,确保燃料着火燃烧,同时根据燃烧工况及时调整入炉煤品质,如掺配比例进行优化调整、煤粉粒度调整等。

除分仓配煤之外,还需考虑采用分层给煤,分层给煤可以使燃料在炉排上形成一个分层状态,让空气均匀地与燃料层接触,提高燃烧的效率。分层给煤时,严格控制煤层的厚度及均匀度,根据深度调峰时的负荷变化进行相应的调整。

此外,还可以结合智能控制装置,采用先进的传

感器对锅炉各种运行参数进行实时检测,比如炉内的温度、压力、氧量等,运用大数据及智能算法对上述运行参数自动进行调整(如调整供煤量、进风量等),对燃尽状况进行实时监控,进一步提高深度调峰工况下的电力锅炉燃烧的稳定性及经济性。

3.2 优化燃烧器运行参数

为了实现深度调峰工况下煤粉锅炉的稳定燃烧,在运行过程中,可以通过优化燃烧器的一次风、二次风、旋流强度、负荷分配等运行参数,促进稳定燃烧。一次风的主要作用是送风,为煤粉在炉内着火提供所需的氧气。因此,根据深度调峰运行工况的要求,应保证一次风的风速、风量较低。由于其一次风的风速较小,就可增加煤粉在炉内的滞留时间,有利于煤的充分燃烧;同时,降低了对火焰的冷却作用,维持炉内温度,但需要保证一次风煤粉混合物的煤粉浓度均匀,可通过磨煤机运行参数及煤粉分配器进行调整^[5]。二次风主要为燃料的燃烧提供补充氧气和对炉内气流流动方向及风速的调整,在调峰深度运行时要根据锅炉运行实际情况科学调整二次风的风量与风速。锅炉负荷降低时将二次风风量降低,但要注意维持足够的氧量供给,进而使得燃烧的稳定性得到维持,其次需做好二次风的旋流强度优化,提升二次风与一次风煤粉的混合效果,增加燃烧效率。

在旋流强度方面,适当加强旋流强度有助于煤粉与空气的掺混,形成回流区稳定燃烧,对煤粉的着火、燃尽有利,但过大的旋流强度会引起火焰中心上移、炉膛出口温度升高,加大过热器超温风险,因此在深度调峰工况中要视锅炉的具体情况合理调整旋流强度。

在负荷分配方面,要根据不同燃烧器的相对位置和特性情况,实现负荷分配,设置靠近炉膛中心的燃烧器负荷略大一些,设置炉膛边缘的燃烧器负荷略小一些,确保炉内温度场的均匀性,避免单一的燃烧器超负荷或欠负荷现象,确保稳定燃烧。

3.3 改进炉膛结构设计

合理的炉膛结构有利于优化炉内气流分布,强化燃料与空气的混合程度,提高深度调峰工况下电力锅炉的燃烧效率和稳定性。因此,可以对炉膛形状和尺寸进行适当优化。提高炉膛的高度和深度,可增加燃料在炉内的停留时间,使燃料得到更多的燃烧反应时间,减少未燃尽的燃料排出。同时,对炉膛截面形状进行优化,例如:在炉膛截面形状上,采用圆形或椭圆形等,可以实现气流在对称性和均匀性上的良好体

现,可实现炉内气流充分对称,有效避免局部高温、低温区域形成,切实实现燃烧过程的稳定性。

采用分层、分区分投燃烧器的布置方式,在深度调峰低负荷不同工况下,合理选择燃烧器数量与位置。在低负荷时只需投入部分燃烧器,并合理分配其负荷,让燃料集中在炉膛一定区域燃烧,可以确保较高的炉温,有利于维持燃烧的稳定性。同时合理调整燃烧器角度、方向等,以便燃料更准确地喷射到炉内的合适位置,从而增加燃料与空气的混合程度。

设定合理的二次风喷口。二次风喷口的位置、形状及数量对炉内动力场及燃烧有决定性的影响。在炉膛合适的部位布置二次风喷口可以适时地为燃料燃烧补充足够的空气,调节炉内气流运动的方向及速度。可以通过二次风喷口的优化设计,如可变的喷口结构来根据不同的工况进行二次风喷射方向及喷射速度的调节,从而保障炉内动力场良好的稳定性及燃烧效率。

4 结束语

针对深度调峰工况,电力锅炉燃烧稳定性主要受到锅炉燃料的特性、锅炉燃烧室的内动力场、锅炉的热工控制系统以及燃烧系统等多个因素的影响。为了保证电力锅炉的燃烧稳定性,可以通过改变锅炉的燃料类型,变单一供煤为分仓配煤、分层给煤和分层配煤并辅以智能控制,以此调节锅炉燃烧的稳定性,使锅炉拥有更稳定的燃烧程度。同时,也可以在燃烧器的运行过程中改变运行参数,合理更改参数,如一次风、二次风等。此外,还可以在实际运行中调节和改变锅炉炉膛结构,改变其形状尺寸、炉膛燃烧器布局、二次风喷口的位置等。在实际运行时,应综合考虑多个方面的原因,根据电力锅炉的类型和特点有针对性地选择相应措施。

参考文献:

- [1] 冷林诺,程星星,杨晓勤,等.锅炉燃烧稳定性判别方法研究分析[J].洁净煤技术,2025,31(S1):323-330.
- [2] 田欢,郭艳平,王鹏,等.深度调峰背景下富氧燃烧对锅炉稳燃性能试验研究[J].节能,2024,43(05):118-121.
- [3] 罗聪.深度调峰工况下锅炉燃烧优化控制[D].北京:华北电力大学,2020.
- [4] 高兴,王鹏飞,王伟杰,等.电力企业锅炉燃烧智能优化控制策略探讨[J].仪器仪表用户,2025,32(06):131-133.
- [5] 辛海,杨勇,闫玉麟,等.燃煤炉改烧燃气的炉膛结构改造研究[J].化工管理,2025(04):141-144.

生产型企业光伏电站扩建项目 全生命周期环境评价

朱晓晨

(苏州市宏宇环境科技股份有限公司, 江苏 苏州 215001)

摘要 本文以某生产型企业光伏电站扩建项目为案例, 开展全生命周期环境评价, 旨在识别环境影响关键环节并量化其生态足迹。评价范围覆盖原材料获取、设备制造、运输建设、运行维护及报废回收阶段; 进行清单分析以收集各阶段能源与物料流数据, 并运用特征化模型量化全球变暖、酸化、富营养化等指标, 结合贡献分析解析各阶段影响权重。结果表明, 设备制造阶段因硅料生产和能耗产生较高碳足迹, 运行阶段虽无直接排放但间接维护活动带来轻微影响, 报废回收阶段资源化潜力显著; 全生命周期相比化石能源具有显著环境效益。

关键词 光伏电站扩建; 全生命周期评价; 环境影响; 清单分析

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.024

0 引言

当前对光伏项目的环境评价多集中于运行阶段的减排效益, 而忽略从硅料开采、电池片制造、组件生产到运输建设、运维乃至最终报废回收全过程。全生命周期评价方法作为一种系统性环境管理工具能量化产品, 在国际上已被广泛应用于评估能源技术综合环境影响。将其应用于生产型企业光伏电站扩建项目可弥补传统评价方法不足, 精准识别环境影响热点与减排潜力, 为项目绿色规划、清洁采购和废弃组件环境友好型处理提供科学依据, 推动光伏发电在全生命周期维度上实现真正环境友好与可持续发展, 对企业绿色转型与区域低碳发展具有现实意义。

1 项目概况与评价范围界定

1.1 扩建项目基本情况

本项目位于华东地区某大型装备制造企业的现有工业园区内, 企业主要生产精密机械零部件与自动化设备, 响应国家“双碳”目标及企业自身绿色供应链建设需求, 本次扩建工程计划基于已建成的一期光伏电站, 利用厂区剩余所有可用屋顶资源及部分停车场车棚空间进行光伏电站扩容。扩建项目总规划装机容量为 5.95 兆瓦, 采用当前主流的单晶硅 PERC 高效光伏组件, 组件效率不低于 21.5%, 计划安装面积约 5.8 万平方米。项目建成后预计首年发电量可达 650 万千瓦时, 所发电量将优先供应该工业园区白天的生产用电负荷, 实现自发自用模式, 可显著降低外购电成本与范围二碳排放。

1.2 全生命周期评价范围界定

本次全生命周期评价研究旨在系统且定量地评估该光伏电站扩建项目从建设到废弃整个生命周期过程对环境的综合影响, 评价范围界定遵循 ISO 14040/14044 标准并采用“从摇篮到坟墓”分析路径, 其系统边界明确包含原材料获取与设备制造、运输与建设安装、运行维护、报废回收这四个连续且相互关联的核心阶段。

2 生命周期清单分析

2.1 原材料获取与设备制造阶段

原材料获取与设备制造阶段构成了项目全生命周期资源消耗与环境排放的主要部分。生产 5.95 兆瓦单晶硅 PERC 组件本身消耗的多晶硅原料约为 335 吨, 其高纯度硅料冶炼提纯过程是能耗热点, 电力消耗折合超过 180 万千瓦时, 对应产生约 1 200 吨二氧化碳当量的碳排放。铝材是支架系统与组件边框的主要材料, 其开采与初级加工阶段清单包含了约 95 吨铝锭的消耗, 基于全球平均水平, 每吨原铝生产的电力消耗约为 14 500 千瓦时, 导致该部分隐含的碳排放量接近 1 400 吨二氧化碳当量。逆变器、汇流箱及电缆等电气设备的制造则涉及大量的铜、钢及塑料等原材料, 其中铜的消耗量约为 18 吨, 其冶炼过程的二氧化硫排放潜力需要被记录在清单中。

2.2 运输与建设安装阶段

运输与建设安装阶段的清单分析基于具体的物流情景, 光伏组件主要从华东地区的生产基地通过重型

卡车公路运输至项目地，平均运距设定为 350 公里，支架与电缆等从省内供应商运输，平均运距 150 公里，逆变器等关键电气设备可能涉及更远距离的运输。所有物料的总运输吨公里数被详细计算，并基于重型柴油卡车的单位能耗与排放因子，核算出该阶段消耗的柴油总量约为 42 吨，直接排放的二氧化碳约为 132 吨，并伴有氮氧化物与颗粒物的排放。建设安装阶段的现场活动清单主要包括土方开挖、混凝土基础浇筑、支架钢结构焊接与固定、组件安装与电气系统接线等工序。

2.3 运行维护阶段

运行维护阶段跨越项目 25 年的设计寿命，其清单输入具有长期、低强度但持续累积的特点，运行期的核心产出是绿色电力，但清单分析同样关注维持这一产出所需的少量投入及其伴随的排放。光伏组件在运行期间无燃料消耗与直接污染物排放，但其发电效率存在年均约 0.5% 的线性衰减，这意味着为维持额定发电量，清单模型需考虑其性能随时间的微小变化。维护活动主要包括定期对组件表面进行清洁以防止灰尘遮挡影响发电效率，清洁用水消耗被纳入清单，预计年均耗水量约为 850 立方米。

2.4 报废回收阶段

报废回收阶段的清单分析基于 25 年寿命期结束时对电站设施的拆解与处理情景，拆除作业所需的能源，主要是重型机械消耗的柴油，估计约为 8 吨，对应排放二氧化碳 25 吨。清单输出的核心是废弃物的种类、数量及其最终去向。届时将产生约 28 500 块废弃光伏组件，总重量估计为 285 吨，其中含有玻璃、铝框、硅、银、铜等有价值材料。

3 生命周期影响评价

3.1 影响评价机制与方法选择

本文选取具有科学、透明和可比较特点的国际公认的 CML 2001 基准方法作为核心评价模型，评价过程遵循特征化、标准化和加权评估步骤，且本文侧重

于特征化结果以保持客观性，针对光伏发电系统的环境特性，研究确定全球变暖潜能、酸化潜能、富营养化潜能、人体毒性潜能和不可再生资源消耗潜能这五个关键影响类别作为评价指标^[1]。全球变暖潜能采用 IPCC 百年时间尺度的当量因子，将二氧化碳、甲烷等温室气体统一转化为二氧化碳当量进行量化。酸化潜能和富营养化潜能分别以二氧化硫当量和磷酸根当量来衡量排放物质对土壤和水体酸碱度及营养状况的潜在影响^[2]。人体毒性潜能关注重金属及特定有机物对人体健康的潜在风险，以 1,4-二氯苯当量计。不可再生资源消耗潜能则聚焦化石燃料和矿产资源的枯竭压力，以铈当量表示。

3.2 各阶段环境影响特征化与量化

基于生命周期清单数据和应用 CML 2001 方法，对项目各阶段的环境影响潜能进行了特征化计算与量化分析，结果见表 1^[3]。

结果显示，项目全生命周期内每提供 1 千瓦时电力，其全球变暖潜力为 42.3 克二氧化碳当量、酸化潜力为 0.28 克二氧化硫当量且富营养化潜力为 0.11 克磷酸根当量，其中原材料获取与设备制造阶段在所有影响类别中均占据主导地位，贡献了约 38.5 克二氧化碳当量的全球变暖潜力，该阶段的酸化潜力和富营养化潜力也最为显著，分别达到 0.21 克二氧化硫当量和 0.08 克磷酸根当量且与燃料燃烧及工业生产过程的硫氧化物、氮氧化物密切相关，而运输与建设安装阶段影响相对较小，但对酸化潜力有主要来自柴油发动机尾气排放的可观测贡献。

3.3 环境影响贡献分析

贡献分析表明，原材料获取与设备制造阶段是项目最主要的环境压力来源，该阶段对全球变暖潜力、酸化潜力、富营养化潜力、人体毒性潜力和不可再生资源消耗潜力的贡献率分别高达 91.0%、75.0%、72.7%、80.1% 和 88.9%，证实了上游产业链，降低该阶段环境影响的杠杆点在于使用更清洁的能源电力进行材料生

表 1 各生命周期阶段对环境影响的特征化结果（以功能单位：1 千瓦时发电量计）

影响类别	单位	原材料获取与设备制造阶段	运输与建设安装阶段	运行维护阶段	报废回收阶段（填埋情景）	全生命周期总影响
全球变暖潜力	克 CO ₂ -eq	38.5	2.1	1.4	0.3	42.3
酸化潜力	克 SO ₂ -eq	0.21	0.05	0.01	0.01	0.28
富营养化潜力	克 PO ₄ ³⁻ -eq	0.08	0.02	0.005	0.005	0.11
人体毒性潜力	克 1,4-DCB-eq	12.5	1.8	0.5	0.8	15.6
不可再生资源消耗	克 Sb-eq	4.8	0.3	0.2	0.1	5.4

产以及选择更高效率的组件以减少单位发电量的材料消耗^[4]。

4 生产型企业光伏电站扩建项目全生命周期环境影响评价关键问题与改进策略分析

4.1 关键环境问题诊断

第一大问题为原材料获取与设备制造阶段因多晶硅提纯、铝材电解等关键材料制备过程属高能耗工艺且严重依赖以化石能源为主导的电网电力，从而产生的超过90%贡献率于全球变暖潜力的高碳足迹，致使光伏组件出厂前承载大量隐含碳排放；第二关键问题是因消耗大量矿产资源且其冶炼过程加剧化石能源枯竭压力，进而凸显供应链资源密集型特征的不可再生资源的大量消耗；第三大问题是电池片制造可能涉及铅、锡等金属及报废后若简易填埋处置，因重金属离子存在缓慢浸出污染土壤和地下水风险。

4.2 环境改进潜力与优化策略

针对诊断出的关键问题，首要策略为推动供应链绿色低碳转型，即企业建立绿色采购标准，优先选择使用可再生能源电力进行生产的“零碳”或“低碳”光伏组件供应商，借此直接将单位发电量的碳足迹降低20%至30%；与供应商合作研发并采用更薄硅片、低银含量浆料、高强度轻量化铝材等新型材料，从源头上减少物料消耗，同步削减资源消耗与制造环节排放。其次，优化项目设计与运营效率，在扩建设计中直接选用更高转换效率的组件产品，在相同安装面积和物料投入下发出更多电力，摊薄功能单位环境影响；引入智能机器人自动清扫，优化清洗周期与用水量，采用新一代高效逆变器降低运行损耗，以此提升全生命周期能量产出。再次，在物流与施工环节，优先采用铁路或水路等低碳运输方式替代部分公路运输，无法替代的短途运输使用国六标准或新能源卡车，施工现场推广使用电动工程机械，最大限度减少柴油燃烧产生的局部污染物^[5]。最后，构建闭环回收体系作为解决末端问题的根本策略，企业提前规划，与有资质的专业回收企业签订退役组件回收协议，确保采用物理法与热解法等先进工艺，高效回收玻璃、铝、铜、银等有价材料，将项目终结转变为资源循环新起点。

4.3 环境效益综合评估

以华东区域电网的平均排放水平为基准，本项目25年运行期内预计生产的1.48亿千瓦时清洁电力，可显著避免因消耗化石能源电力而产生的各类污染物排放，结果见表2。

表2 光伏电站扩建项目全生命周期环境效益汇总（与等量电网电量对比）

影响类别	单位	项目全生命周期总环境效益（避免的排放/消耗）	年均环境效益
温室气体减排量	吨 CO ₂ -eq	126 000	5 040
二氧化硫减排量	吨	110	4.4
氮氧化物减排量	吨	95	3.8
颗粒物减排量	吨	20	0.8
标准煤节约量	吨	48 000	1 920

评估结果显示，该项目最主要的正环境效益体现在应对气候变化方面，累计可减少约12.6万吨二氧化碳当量的温室气体排放，此排放量相当于种植超过700万棵树木的碳汇量；在改善区域空气质量方面，该项目可避免因燃煤发电排放约110吨二氧化硫和95吨氮氧化物，这些物质是导致酸雨和光化学烟雾的重要前体物。

5 结束语

通过对某生产型企业光伏电站扩建项目进行系统的全生命周期环境评价，清晰揭示光伏技术作为清洁能源在其“从摇篮到坟墓”完整链条中对环境的综合影响。证实尽管项目运行阶段近乎零排放，但其上游设备制造阶段因高耗能材料生产成为全球变暖、资源消耗等主要环境影响集中环节，且报废阶段处理方式关系到潜在资源浪费与污染风险，研究所提针对性优化绿色供应链、提升组件效率、构建回收体系等策略，为企业在该项目具体环境管理实践中提供清晰且可操作的改进路径。

参考文献:

- [1] 温强. 光伏电站技改建设的精细化工程管理策略与成效[J]. 价值工程, 2025,44(29):75-77.
- [2] 施博文, 王旭伟, 陈思铭. 分布式光伏电站全生命周期动态产能评估方法及实证研究[J]. 顺德职业技术学院学报, 2025,23(03):46-50.
- [3] 陈文召, 唐力, 李兵, 等. “双碳”目标背景下小型办公楼加装屋顶分布式光伏电站的实践分析[J]. 太阳能, 2025(07):28-34.
- [4] 廖章斌. 大型光伏电站的组件布局与运维成本优化研究[J]. 现代工程科技, 2025,04(14):105-108.
- [5] 焦在强, 崔焱, 闫兴国, 等. 光伏电站项目全生命周期碳排放研究[J]. 中国资源综合利用, 2023,41(10):158-160.

某水电站轴流转桨式水轮发电机组 调速器升级改造

王雪峰, 张 琛, 王艳平

(嫩江尼尔基水利水电有限责任公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161000)

摘 要 以某水电站旧调速器升级改造新调速器为例, 对旧调速器的分解、拆卸及新调速器的机械、电气部分安装调试、施工、焊接等过程规范其质量标准, 并详细制定了调速器改造后特性试验方案。本文为电动复中式可编程微机调速器(型号: DFWST-150-6.3)到比例数字式微机调速器(型号: PSWST-150/100-6.3)的升级改造, 通过升级改造, 调速器的性能得到提升, 保障了水电站安全高效运行, 同时为其他水电站调速器升级改造提供参考。

关键词 水轮机调速器; 升级改造; 管路焊接

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.025

0 引言

调速器是水轮机调节系统的主要设备, 是机组稳定运行及保证电能质量的核心控制设备, 主要承担着并网前自动跟踪网频, 并网后实现电网一次、二次调频要求, 完成调度下达的功率指令, 调节功率, 完成机组开机、停机、增减负荷、紧急停机控制, 执行计算机监控系统的调节及控制指令等。随着技术与电力系统需求变化, 原调速器在性能、可靠性和智能化程度等方面渐难满足要求。PSWST 系列微机调速器是以进口可编程控制器(PLC)为核心, 以比例阀和数字阀作为电液转换环节, 以机械液压系统作为执行机构组成的新型微机调速器。其机械液压主要部件全部采用标准化液压元件, 具有稳态无飘移、静态低油耗、不需要调节机械零位、油路通径大等特点^[1]。

1 调速器升级改造背景与必要性

DFWST-150-6.3 调速器在长期运行中暴露出诸多问题。控制精度不足, 难以精准维持水轮机转速与功率稳定, 尤其在负荷变化频繁工况下, 转速波动大, 影响电能质量。响应速度慢, 面对电网频率变化或负荷突变, 不能及时调节导叶开度, 导致调节滞后, 降低系统稳定性。比例数字式微机调速器(PSWST-150/100-6.3)的应用, 可以实现精准控制, 显著提升系统稳定性。随着数字化技术的发展, 电网安全与运行标准的升级, 调速器升级改造是发电厂适应新型电力系统发展的必然选择。

2 调速器拆除、安装施工过程及质量标准

2.1 原调速器各部分分解、拆除

将机组主压油装置及事故压油装置泄压排油、管路及回油箱排油, 在调速器底部进行脚手架搭接, 将调速器与管路的连接法兰分解。将调速器各结构件进行分解, 并逐一吊出, 放置在预先铺设好的工作面上。将调速器与过渡板连接螺栓、焊接点进行分解, 并与基础板分离, 吊出机柜。将调速器的管路法兰分解, 用倒链把管路安全放置在工作面。

2.2 新调速器机械结构部分安装

1. 将新调速器过渡板与地面基础板进行预装、调整水平, 完成后将过渡板及盘柜整体焊接在基础板上。

2. 调速器现场制作安装的管路需用 $\Phi 400$ 、 $\Phi 150$ 、 $\Phi 125$ 角磨机进行切割, 切割完成后开设坡口(与法兰组对的管路不需开设坡口), 坡口开设完成后进行打磨清理, 直至管口无毛刺、重皮、裂纹等缺陷^[2]。

3. 现场制作的管路与预制完成的管路组对、点焊、把合, 组对时遵循先大管、后小管的顺序, 依次安装。现场组对管口需焊接挡块时使用 $\angle 50 \times 50 \times 5$ 不锈钢角钢, 不允许使用碳钢材质的材料与管路点焊, 组对完成后点焊, 在管路坡口内引弧、防止损伤母材。

4. 管路整体组对完成后进行定位焊, 防止焊接变形, 定位焊全部结束后对管路进行拆卸, 拆卸后把无法进行定位焊的焊缝进行手工焊接, 管路采用氩弧焊接工艺。

5. 管路组对完成后分段、分批拆卸并编号,焊接完成后使用冷热水高压管路清洗机对管路进行清扫,管路清洗完后用气吹干管路,每一根管路清扫合格后使用白布将两端管口包裹严密,防止管路二次污染。

6. 管路整体清扫结束后进行回装,回装时法兰、阀门对称紧固,密封垫位置正确。

7. 系统调试时对管路充1/2工作压力(3.15 MPa),对设备及管路进行检查,检查无渗漏后,将管路压力升至工作压力(6.3 MPa),检查各设备以及管路的渗漏情况^[3]。

2.3 电气部分安装

1. 机械部分改造施工完成后,进行新调速器盘柜安装。

2. 根据厂家设计图纸,将原调速器柜拆下的电气二次接线接入新调速器盘柜。

3. 由于新调速器开关量输出为10个,与原调速器不同。将10个信号分别接入监控系统,使用电缆号为2G-411(7*1.5)与2G-411a(4*1.5)的电缆备用芯接入主机PLC开入量模块。

4. 配线工作,确保连接正确。
5. 修改主机PLC程序。
6. 修改上位机画面并重新生成数据库。
7. 上述各项工作完成并核对无误,全面上电检查。
8. 调速器上电无误后,进行调速器特性试验。

3 调速器改造后特性试验方案

3.1 试验目的

通过调速器特性试验,校对调速器导叶、桨叶的零点及全开程序采样;录制静态下的调速器特性曲线。并在机组开机状态下进行空载摆动及空载扰动试验,设置调速器合理的运行参数,保证机组运行的稳定可靠性^[4]。

3.2 调试前工作准备

1. 电气及机械改造施工已完成,机组具备调速器试验条件。

2. 工作场地整洁,试验所需设备符合现场实际要求。

3.3 试验条件

1. 油压装置自动运行状态。
2. 主、辅机PLC自动运行状态。
3. 调速器无报警及异常现象。
4. 动态试验时,须静特性试验完毕,尾水管、进水口进行充水完成。
5. 水轮机保护,发电机保护投入正常运行。

3.4 传感器信号检查

1. 传感器有效行程在安装完毕后满足接力器最大行程要求。

2. 零点标定:在机手动状态下,将接力器全关,将触摸屏的接力器开度反馈调整画面中的反馈“显示零点”设置为0.00%，“测量零点”设定为此时的反馈测量值。

3. 增益标定:在机手动状态下,将接力器全开,将触摸屏的接力器开度反馈调整画面中的反馈“显示增益”设置为99.99%，“测量增益”设定为此时的反馈测量值。

4. 接力器越限报警设定:在机手动状态下,将接力器全关,设定接力器反馈越下限值比此时的接力器反馈测量值小。例如:接力器反馈测量值为100,则设定接力器反馈越下限值为50~80之间;再将接力器全开,设定接力器反馈越上限值比此时的接力器反馈测量值大。接力器反馈测量值为9500,则设定接力器反馈越上限值为9520~9600之间。

5. 主配反馈中位设定:机手动将接力器开至中间位置,将触摸屏对应的调整画面中的“主配零位设定值”设定为当前“主配反馈测量值”。

6. 主配反馈越限报警设定:手动操作调速器机械液压执行机构,控制接力器往关的方向动作,使主配往下动作到极限,将主配反馈越下限值设定为比此时的主配反馈测量值小500;控制接力器往开的方向动作,使主配往上动作到极限,将主配反馈越上限值设定为比此时的主配反馈测量值大500。

4 静特性试验

1. 在做静特性试验时,历史趋势图中的红色的曲线表示导叶开度随时间的变化;绿色曲线表示频率给定随时间的变化。做静特性试验时,将主显画面中的“跟踪/不跟踪”按钮置于“不跟踪”状态,同时置调速器处于空载状态,或负载状态频率调节模式,置永转差系数 $b_p=6\%$,PID参数取最小值 $b_t=3\%$ 、 $t_d=2\text{ s}$ 、 $t_n=0\text{ s}$,频率给定值=50 Hz,一般将时间间隔设置为30 s。

2. 把电气开限放到最大,导叶开度给定0%使接力器全关。

3. 打开触摸屏静特性试验画面,按开始按钮使其自动试验。频给将从50 Hz开始每0.3 Hz变化一次,先增加到53 Hz,然后再下降到50 Hz,使接力器单调上升或下降,接力器每次变化稳定后,自动记录本次信号频率给定值及相应的接力器开度,自动生成频给升高和降低时的静态特性曲线。试验结束后自动计算

转速死区及实测 bp 值。静特性试验完成的特征是“试验”按钮停止闪烁按钮自动变为“开始”。国家标准《水轮机控制系统技术条件》(GB/T 9652.1-2007) 4.3.2 规定:对于大型调速器转速死区 $I_x \leq 0.02\%$, 中小型调速器转速死区 $I_x \leq 0.06\%$ ^[5]。

5 空载频率摆动试验

1. 空载摆动试验主要是记录在空载运行工况时, 机组在 3 分钟内机组频率变化的最大值、最小值及最大值与最小值的最大偏差。试验完毕后系统将计算出 3 分钟试验过程的机组频率偏差和最大、最小频率值。

2. 调速器应保证机组在各种工况和运行方式下的稳定性, 在空载工况自动运行时, 施加一阶跃转速指令信号, 观察过渡过程, 以便选择调速器的运行参数。待稳定后记录转速摆动相对值。

6 空载频率扰动试验

1. 在进行空载频率扰动试验时, 历史趋势图中的红色的曲线表示导叶开度随时间的变化; 蓝色曲线表示机频随时间的变化。

2. 调速器在自动运行方式, 空载工况下, 在主操作画面中将触摸“跟踪频给/跟踪网频”按钮, 使调速器处于“跟踪频给”模式, 触摸空载频率扰动试验画面中的“开始试验”按钮开始做空载频率扰动试验, 同时此按钮显示为“试验进行中”并闪烁, 此时改变频率给定, 使机组频率在 48 ~ 52 Hz 之间扰动。频率给定改变过程为: 50 Hz → 52 Hz → 48 Hz → 52 Hz → 50 Hz。相应的曲线将显示在历史趋势图中, 当空载频率扰动试验做完时, 记录最高频率、最低频率调节时间及超调量。空载频率扰动试验完成的特征是“试验进行中”按钮停止闪烁, 按钮自动变为“开始试验”。

3. 试验结果: 超调量 < 1.2 Hz, 调节时间 < 15 Tw, 该机组 $T_w=1.57$ ^[6]。

7 甩负荷试验

1. 调速器在负载运行工况下, 分别甩 25%、50%、75%、100% 负荷, 观察不动时间及机组频率上升值。

2. 转速或指令信号按规定形式变化, 对电调不大于 0.2 s。

3. 在做甩负荷试验时, 历史趋势图中的红色的曲线表示导叶开度随时间的变化; 黑色曲线表示频率随时间的变化。

4. 当机组做甩负荷试验时, 将机组分别负荷带到 25%、50%、75%、100%, 然后再触摸甩负荷试验画面中的“开始试验”按钮, 电厂运行人员应在 30 s 内断开发电机的出口开关, 机组进入甩负荷过程。

8 导叶开关机时间检测

1. 该画面为调速器导叶开关机时间校对的试验画面。全开起始开度 Y_{max} 与全关起始开度 Y_{min} 之差再乘以开度系数 K 必须等于 100% 的开度, 开度系数 K 必须是整数。

2. 一般情况下, 将 Y_{max} 设为 75%, Y_{min} 设为 25%, 系数 K 设为 2, 开关机时间正好等于 $2 \times (Y_{max}-Y_{min})$ 为 100% 行程的时间。导叶全开全关时间校对试验在机组压力钢管有水或无水情况下都可以进行。导叶全开时间校对: 由操作面板上电手动或在调速器机械液压机构上用机手动操作将导叶关至小于 25% 的开度以下, 接触摸屏上“开机时间测试按钮”后, 人为电手动或机手动将导叶开启到大于 75% 的开度以上, 导叶的全开时间将会自动显示在“导叶全开”记录框中, 精度为 0.1 s。导叶全关时间校对: 由操作面板上电手动或在调速器机械液压机构上用机手动操作将导叶开至大于 75% 的开度以下, 接触摸屏上“关机时间测试按钮”后, 将操作把手置电手动或机手动将导叶关到小于 25% 的开度以上, 导叶的全关时间将会自动显示在“导叶全关”记录框中, 精度为 0.1 s。

9 结束语

此次水轮机调速器升级改造的顺利实施, 使调速器的控制精度、响应速度和可靠性得到了提升。同时通过科学规划和优化工艺, 在改造过程中, 严格把控管路焊接、电气系统改造等关键环节质量, 确保改造工程保质保量。新调速器投入运行前, 通过全面试验验证其性能, 为水电站安全稳定运行提供有力保障。此次调速器升级改造工程, 对提高水电站运行效率、降低运维成本、适应电力系统发展需求具有重要意义, 也为该类型类调速器升级改造提供了经验及参考。

参考文献:

- [1] 于江波, 刘燕. 丹江口水力发电厂 3 号机组电调系统改造与技术创新 [J]. 水电与新能源, 2025, 39(10): 47-49, 86.
- [2] 梁丽红. 老旧小水电站技术改造与升级 [J]. 电力设备管理, 2025(12): 204-206.
- [3] 谢桑. 水轮机调速器硬件改造及控制模式的优化研究 [J]. 电工技术, 2024(24): 228-231.
- [4] 程俊才, 朱涛, 郝慧贤, 等. 大藤峡水力发电厂 8 号机组调速器特性试验 [J]. 水电站机电技术, 2021, 44(07): 9-11.
- [5] 同 [4].
- [6] 刘桂波. 水电站调速器改造对策分析 [J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 05(08): 161-163.

光伏电站智能运维关键技术及日常效能提升方法探析

来文雅

(国家能源集团国源电力有限公司内蒙古分公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要 光伏电站传统运维模式效率低、成本高, 难以满足光伏电站发展需求。本文探讨利用智能运维技术提升光伏电站运行效能与经济效益的方法, 聚焦物联网数据采集、智能诊断分析和性能预测预警等关键技术体系, 并结合组件清洁管理、实时数据优化及性能比监控等日常实践方法, 系统阐述智能化运维的实施路径。实践表明, 智能运维能有效提升发电量、降低运维成本、保障电站安全稳定运行, 是光伏电站实现精细化管理和效能优化的必然选择。

关键词 光伏电站; 智能运维; 故障诊断; 效能提升; 性能比

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.026

0 引言

在能源结构绿色低碳转型的全球共识下, 作为清洁能源主力军的光伏发电装机容量持续快速增长, 而随着光伏电站建设规模不断扩大与运行年限增加, 运营维护环节对全生命周期发电效益与投资回报的重要性日益凸显。传统运维模式主要依赖人工定期巡检与被动式故障处理, 这种面对分布广泛、设备数量庞大的光伏电站的方式显露出诸多局限性, 如人工巡检效率低下、成本高昂, 难以做到全面覆盖与实时监控, 对热斑、组串失配等隐性故障发现严重滞后, 故障响应缓慢致停机时间延长、发电量损失显著, 且缺乏数据支撑的预防性维护手段使设备潜在风险无法提前预警, 可能引发更严重的运行安全事故。这些挑战共同制约着光伏电站运行效率与经济效益的提升, 行业迫切需要更智能化、精细化的运维管理新范式。通过融合先进传感、数据分析和人工智能等手段为实现电站降本增效与安全稳定运行提供根本性解决方案的智能运维技术应运而生。

1 光伏智能运维的核心技术体系

1.1 基于物联网的全面数据采集技术

光伏电站智能运维的实体基础是构建一个全方位、立体化的物联网感知层, 其核心任务是将电站物理实体转化为可被持续测量的数据流。这一过程远非简单的数据电子化, 而是通过部署在电站关键节点上的智能传感器网络来实现。在直流侧, 组串式逆变器的每

一条输入支路都集成有高精度电流电压传感器, 实时捕捉每串组件的发电特性, 其采样精度可达毫安级与毫伏级, 能够敏锐识别出因单个组件性能衰减或阴影遮挡导致的微弱电流失配。在交流侧, 逆变器本身作为核心数据采集单元, 持续监测三相交流输出电压、电流、频率、功率因数以及实时发电功率, 同时内部传感器记录 IGBT 模块温度、散热风扇转速、直流绝缘电阻等关键健康指标。环境监测站则构成了分析的基准坐标系, 其测量的水平面总辐照度、组件斜面辐照度、环境温度、风速风向、组件背板温度等参数, 为后续判断电站发电性能是否正常提供了客观气象依据。

1.2 智能数据分析与故障诊断技术

获取海量数据后, 智能运维的核心竞争力体现在利用先进算法模型从数据中提炼出运维决策知识的能力。数据分析与诊断是一个分层递进的多阶段智能处理过程。基础层级是基于预设规则的实时告警, 系统为各类运行参数设定了动态或静态的安全阈值, 一旦监测数据越限即刻触发告警。例如: 监测到某汇流箱支路电流持续为零且电压异常, 则可自动判断为该支路存在断路故障, 并直接定位到具体物理位置, 指导运维人员精准前往处理。更深层次智能诊断则依赖于大数据挖掘与机器学习算法构建的异常检测模型。系统并非孤立地看待单个数据点, 而是将实时发电数据与基于物理机理和实时气象数据计算得到的理论发电功率曲线进行分钟级甚至秒级的持续比对, 当发现特定组串或逆变器的实际输出功率出现系统性、超出

测量误差范围的持续偏低时，算法会自动标记该发电单元为“低效单元”，并启动根因分析。

1.3 电站运行性能的预测与预警模型

智能运维的最高价值体现于其前瞻性，即利用数据模型预测未来趋势，实现从被动响应到主动优化的运维模式变革。这主要依托于两类核心模型，发电量预测模型和设备故障预测与健康模型。高精度的短期发电量预测模型是电站参与电网调度和电力市场交易的智能化基石。该模型深度融合历史功率数据、电站设备运行状态以及高分辨率的数值天气预报信息，天气预报输入包括未来逐小时的辐照度、云量、气温、湿度、风速等详尽参数。模型通常采用机器学习算法如梯度提升决策树或长短期记忆网络，通过训练学习历史气象条件与实际发电量之间的复杂非线性映射关系，进而对未来数小时至数天的发电功率进行滚动预测^[1]。预测结果的不确定性也被量化评估，为电站运营者参与竞价上网、制定交易策略提供关键决策支持，有效降低了电力偏差考核风险，提升了电站的市场收益。设备故障预测与健康模型则聚焦电站核心资产的全生命周期可靠性管理。

2 光伏电站日常运维中的效能提升方法

2.1 组件清洁度的智能化管理

组件表面灰尘遮蔽是导致光伏电站发电量损失最普遍且最易被忽视的因素之一，其影响远非简单的发电功率线性下降，严重时因局部遮挡形成热斑甚至可能引发组件永久性损伤。传统固定周期或凭经验判断的清洗模式存在巨大盲目性，可能在不必要的清洁上浪费水资源和人力成本，或在积灰严重时未能及时清洗造成显著发电收益损失。智能运维下的清洁管理核心在于构建一种“数据驱动、按需清洗”的科学决策机制。该机制依赖于对历史发电数据的深度挖掘，系统会持续分析特定方阵在相同气象条件（主要是相近辐照度与温度）下的实际输出功率与理论清洁状态下功率的比值变化趋势，当该比值呈现持续且不可逆的缓慢下降时，即可判定为灰尘积累效应开始显现。更为直观的方法是结合无人机定期巡航采集的高清可见光图像，利用图像识别算法定量分析组件表面的灰尘覆盖面积与灰度等级，从而生成整个电站的“积灰分布热力图”，清晰标识出积灰严重区域与轻微区域。基于这些定量分析结果，运维团队可以做出精准决策：一是选择最佳的清洗时机，即在预估的清洗成本与因积灰导致的发电量损失达到经济平衡点时启动清洗作

业。二是优化清洗资源配置，优先对积灰严重且对全局发电效率影响大的子阵进行清洗，对积灰轻微或近期有降雨预期的区域则可暂缓清洗。这种精细化管理模式在最大限度挽回发电损失的同时，也显著降低了运维过程中的水电消耗与人工成本，实现了电站经济效益与运营效率的双重提升。

2.2 基于实时数据的运行维护优化

智能运维平台的真正价值在于将数据洞察转化为现场运维人员可执行的、高效精准的行动指令，彻底改变传统运维工作中“大海捞针”式的盲目排查模式。当监控平台发出某一具体支路电流异常跌落或为零的告警时，系统会将该告警信息与电站数字化地图关联，精确定位到对应的组串、汇流箱乃至具体物理位置坐标，并通过移动应用程序直接将工单和导航信息推送到运维人员手持终端。工作人员无需在庞大电站内逐排检查，可直接奔赴故障点，排查重点明确集中于该支路的接线端子松动、熔断器熔断或电缆损伤等有限可能性，将平均故障处理时间从以往的数小时缩短至数十分钟，极大地提升了电网的可用性。日常运行优化还体现在对设备运行状态的精细调节上^[2]。运维人员可随时调阅任一逆变器的历史效率曲线，观察其在不同负载率下的转换效率分布。若发现某台逆变器长期运行在低负载率的低效区间，则可综合分析系统配置，判断是否存在优化空间，如调整逆变器容配比或通过策略性启停将负载集中在更少的高效运行的逆变器上。

2.3 系统性能比的关键指标监控与分析

系统性能比作为衡量光伏电站能量转换效率的核心综合性指标，其价值在于剥离了资源波动的影响，真实反映了电站本体从光能到电能转换过程的运行质量健康度。该指标的计算本质是对电站实际输出与在理想条件下理论可能输出的对比，其数值高低直接体现了设备状态、系统损耗以及运维水平的综合效果。在日常运维中，对系统性能比的监控不只是简单地记录一个每日数值，还需要对其进行持续的趋势跟踪、横向对比与深度归因分析。运维团队应绘制出电站月度乃至年度系统性能比的运行区间曲线，建立其正常波动的基准带。当发现系统性能比出现持续低于历史同期水平或呈现明显的单边下降趋势时，就意味着电站整体健康状况出现了需要关注的异常^[3]。此时，需要启动层层递进的诊断分析，首先分析是全场性能普遍下降还是局部区域恶化所致，通过对比不同子阵或逆变器下系统的性能比差异来定位问题范围。其次，深入分析导致系统性能比下降的主要损耗环节，是串

联电阻增大导致的线损增加，还是组件性能衰减加速，或是逆变器等设备效率下滑，抑或是灰尘遮挡、阴影等外部因素影响加剧。

3 智能运维实施的挑战与未来展望

3.1 当前面临的主要挑战

智能运维体系的全面落地应用面临着一系列深刻且相互关联的现实挑战，这些挑战根植于投资效益、技术整合与人力资源等核心层面。初始资本支出构成了首要壁垒，部署一套覆盖大型电站的智能运维系统不仅需要采购大量高精度传感器、自动巡检无人机及通信网络硬件，其隐性成本更体现在定制化数据中台的建设、具有核心算法的诊断模型授权费用以及后续的系统维护升级上，这对于许多已步入平稳运行期的存量电站而言，高昂的改造费用与难以在短期内明确量化的投资回报使其管理层在决策时趋于保守。在技术集成层面，数据孤岛与协议异构问题极为突出，一个电站内往往并存着多个不同厂商提供的逆变器、汇流箱、监控系统及环境监测设备，这些设备采用的通信协议千差万别，从Modbus、CAN到各类厂商私有协议，数据格式、采样频率与传输机制各不相同，导致全景数据采集在源头就遭遇梗阻，需要进行复杂的数据清洗、转换与对齐工作，这不仅增加了系统复杂性和实施成本，更可能因数据丢失或失真影响后续分析的准确性与可靠性^[4]。最为根本的挑战来自运维团队能力模型的转型困境，传统运维人员精通设备维护、故障处理等现场实操技能，而智能运维则要求他们具备数据思维，能够解读分析平台提供的趋势图表、理解算法诊断报告的逻辑，并将数据洞察转化为高效的现场行动，这种从“技工”到“数据分析师”的角色转变并非一蹴而就，现有人员培训体系的不完善以及复合型人才稀缺，极易导致先进运维系统与现场执行之间出现脱节，从而制约了整个系统效能的充分发挥。

3.2 技术发展趋势展望

面对当前挑战，智能运维技术正朝着更智能、更自主、更协同的方向迅猛发展，其发展路径清晰可见。故障诊断与预测能力将实现从“感知描述”到“认知决策”的质变，下一代诊断系统将深度融合深度学习与物理机理模型，通过对海量历史故障数据与运行工况的学习，不仅能够精准识别已知故障，更能从微小的数据异常中发现潜在的新型故障模式。预测性维护模型将进化到能够量化评估关键设备如逆变器、变压器的剩余使用寿命，并基于风险评估结果自动推荐最

优维护策略与调度方案，真正实现视情维修。巡检作业将迈向全面无人化与自适应智能化，集成于自动机场的无人机舰队可根据预设任务或系统指令，自主完成对电站的日常巡飞，其搭载的多光谱传感器与高分辨率相机能够同步采集可见光、红外及紫外图像，通过机载AI进行边缘计算实时初筛异常，并将结果回传。地面巡检机器人则将负责组件下方、箱变基础等无人机盲区的检查，形成立体化、高频次的无人巡检网络^[5]。超越电站边界，“光储荷”一体化智能能量管理将成为运维核心新职能，运维系统不再局限于保障发电设备安全，而是需要统筹管理光伏阵列、储能系统以及站内负荷，基于超短期功率预测、电网电价信号和储能SOC状态，动态优化运行策略，实现电站整体收益最大化，并具备参与电网调频、备用等辅助服务的能力。未来的光伏电站智能运维将成为一个具备自学习、自优化、自决策能力的综合性能源管理“大脑”，持续驱动光伏资产价值的提升。

4 结束语

本文系统阐述了以物联网、大数据分析和预测模型为核心的智能运维技术体系，详细探讨了其在组件清洁管理、实时运维优化和系统性能监控等方面的具体实践方法，客观分析了当前面临的挑战与未来发展趋势，为光伏电站运营者提供一套清晰可行的智能化转型路径。明确指出通过智能化手段能精准定位并高效处理故障、科学制定维护策略、深度挖掘发电潜力，实现运维成本显著降低与发电收益实质性提升，不仅对单个电站降本增效有直接指导意义，更从行业层面为推动光伏产业从粗放式规模扩张向精细化运营管理转变提供坚实的支撑，是保障光伏电站全生命周期安全、稳定、高效运行，推动清洁能源事业高质量发展的关键。

参考文献:

- [1] 施昊旻. 基于大数据的光伏电站智能运维技术研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(10):121-123.
- [2] 杜涵宇. 光伏电站智能运维管理系统设计与应用研究[J]. 电力设备管理, 2025(19):84-86.
- [3] 刘兴杰. 光伏电站中的智能运维平台控制架构设计与实现[J]. 集成电路应用, 2025,42(08):234-235.
- [4] 高翔. 基于物联网技术的分布式光伏电站智能运维系统[J]. 内蒙古科技与经济, 2025(12):157-160.
- [5] 田志杰, 唐耀斌, 马维琛, 等. 基于大数据分析的光伏电站故障预测与智能运维策略研究[J]. 电工技术, 2025(S1): 240-242,245.

高原地区水电站智慧电厂体系构建研究

——以扎拉水电站为例

刘大庆¹, 谢学东², 蒲进², 熊小康², 滕泽诚²

(1. 西藏藏东南清洁能源开发有限公司, 西藏 昌都 854000;

2. 西藏大唐扎拉水电开发有限公司, 西藏 昌都 854000)

摘要 高原地区水电厂智慧化建设存在独特难点, 扎拉水电站作为西藏首个超百万千瓦级项目、世界首座装备 500 MW 冲击式机组的“藏电外送”关键工程, 此类问题尤为显著。本文针对其高原极端环境、首台套设备经验缺失等核心挑战, 创新构建适配的“1+3+N”(1 个数字化底座、3 大业务领域、N 个智慧应用)智慧电厂体系, 并采用“基建期同步建设”关键路径, 规避传统“先基建、后智慧”模式的改造弊端; 该体系建成后预计可提升发电效率 3%~5%、降低运维成本 20% 以上、减少安全事故 20% 以上, 为高原水电智能化转型及同类项目提供借鉴, 助力电力行业数字化升级。

关键词 扎拉水电站; 首台套冲击式机组; 智慧电厂体系; 提质增效

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.027

0 引言

近年来, 全球能源转型加速推动电力行业向数字化、智能化方向升级, 智慧电厂已成为新型电力系统的核心发展方向。国家能源局《“十四五”现代能源体系规划》明确提出加快能源产业智能化升级, 推动现代信息技术与能源产业深度融合^[1]。刘吉臻团队于 2017 年系统构建了智能发电厂的技术架构, 为智慧电厂建设奠定了理论基础^[2]。然而, 传统“先基建、后智慧”的建设模式存在后期改造困难、结构破坏和停机损失大等难点。王曦钊等提出的“三位一体”建设框架强调了基建阶段同步规划信息化架构的必要性^[3]。数字孪生作为新兴数字化技术, 近年来广泛应用于水电厂设备设施健康状态评估与智慧化建设^[4-7]。

扎拉水电站作为西藏首个超百万千瓦级电源项目, 总装机容量 101.5 万千瓦, 是“藏电外送”工程的关键支撑点。电站装备世界首台 500 MW 冲击式水轮发电机组, 面临“高水头、冲击式、深竖井、多断裂带”等技术难题^[8], 以及高原极端环境和人才短缺的挑战。本研究旨在从基建初期同步规划与建设智慧电厂, 融合数字孪生、智能传感、机器人巡检等先进技术, 解决“首台套设备无经验、高原人才短缺、极端环境”三大核心矛盾, 保障电站安全高效运行。

1 工程概况

扎拉水电站位于西藏自治区昌都市左贡县碧土乡扎郎村与林芝市察隅县察瓦龙乡珠拉村之间, 是玉曲河干流 7 级开发方案中的第 6 级电站。该水电站充分利用玉曲河约 60 km 的大拐弯天然落差, 通过“裁弯取直”的引水式开发方式, 形成高达 671 m 的额定水头。工程采用两级竖井布置方案, 总高度达 570.58 m, 开挖直径达 6.9 m, 地质条件复杂, 存在围岩稳定、有害气体及地热等多重挑战, 施工难度在国内水电项目中极为罕见。

为应对高原复杂环境下运营挑战, 扎拉水电站率先提出“脑力靠模型、体力靠机器”的创新理念, 通过部署机器人巡检系统、智能传感设备和全方位视频监控网络, 对水电站人、机、环等要素进行实时监测; 通过通用大模型+专用模型进行智慧决策; 现场仅保留必要应急人员, 常规运维工作由智能系统自动执行, 大幅降低对人力的依赖。

2 高原地区水电站智慧电厂体系构建面临的挑战与问题

扎拉水电站作为世界首座装备 500 MW 冲击式水轮发电机组的水电工程, 其智慧电厂建设面临多重挑战, 既源于独特的地理环境条件, 也来自技术本身的创新性与

复杂性，更受到高海拔地区特殊环境的制约。具体而言，电站面临“首台套设备无经验、高原人才短缺、极端环境”三大核心矛盾，对传统运营模式提出了严峻挑战。

2.1 极端自然环境

扎拉水电站所在的西藏高原地区，平均海拔超过3 600 m，其极端自然环境构成了智慧电厂建设的基础性挑战。高海拔直接导致空气稀薄与低气压，使传统风冷散热效率下降可达30%以上，严重影响了服务器、功率器件等核心电子设备的运行寿命与可靠性^[9]；同时，常年低于5℃的平均气温与超过20℃的昼夜温差，使电子元器件易因热应力损坏，而强紫外线持续照射则加速电缆绝缘层等非金属材料的老化脆化，导致传感器测量数据漂移甚至失效，直接威胁数字孪生系统的数据基础。在人员作业层面，缺氧环境不仅使现场人员面临高原病风险^[10]，更导致其复杂任务执行效率降低15%~20%，大幅增加了设备安装、调试与巡检的作业难度与安全风险。此外，站点地处复杂地质带，交通条件极为不便，暴雨冰雪易引发道路中断，使备件运输与设备维修周期显著延长、成本急剧上升。这些自然条件的多重制约，共同凸显了构建具备高环境适应性、少人化远程运维能力的智能系统在扎拉水电站的极端必要性及紧迫性。

2.2 首台套设备运行经验缺乏与高原人才短缺

扎拉水电站安装的世界最大单机容量500 MW冲击式水轮发电机组，其技术参数远超国内外现有应用水平（国外单机容量最大的是瑞士毕奥德隆电站423.13 MW机组）。这种“高水头、大容量、冲击式、深竖井”的组合在世界范围内尚无运行先例，相关技术经验与运行数据的严重缺失，使得设备在高海拔复杂环境下的安全稳定运行面临巨大挑战。此外，西藏地区高海拔、高寒环境条件艰苦，专业人才引进面临较大困难，人员数量与专业性不足已成为制约电站正常运行的重要因素。

2.3 信息基础设施建设困难

在高原复杂环境下建设覆盖全面的信息基础设施同样面临多重挑战。恶劣气候条件影响传感器和通信设备的正常工作；远程控制的实时性和可靠性要求与网络延迟存在矛盾。无人机巡检在高海拔地区面临续航时间短、飞行稳定性差等问题；机器人巡检系统需适应低温、低氧环境，对设备可靠性要求更高；远程监控系统受高海拔大气条件影响，图像传输质量下降。这些问题都需要针对高海拔环境进行专门的技术研发和系统设计。智慧企业是站在企业整体的角度，在实现业务量化的基础上，强化物联网建设，深化大数据挖掘，推进管理变革创新，将先进的信息技术、工业

技术和管理技术深度融合，实现管理的数字化感知、网络化传输、大数据处理和智能化应用，从而使企业呈现出风险识别自动化、决策管理智能化、纠偏升级自主化的柔性组织形态和新型管理模式。然而，在扎拉水电站的特殊环境下，这些技术的实现面临更大挑战，需要针对高海拔环境进行专门优化设计。

3 智慧电厂体系设计

扎拉智慧电厂建设以“创造效益、提高效率、提升效能”为根本目标，聚焦“全面感知、全面数字、全面互联、全面智能、全面可视”核心方向，依托“1+3+N”架构（1个一体化数字化底座、3大业务领域、N个智慧应用场景），构建基于数字孪生的多维可视化管控平台，打通数据、服务与流程通道，实现过程层、单元层、厂站层与应用层的有机融合，为高海拔环境下首台套冲击式机组的安全稳定运行及电站智能化运营提供技术支持。

数字化底座是智慧电厂实现“全面感知、全面数字、全面互联、全面智能”的核心支撑架构，其架构如图1，采用“感知对象—感知服务—传输通道—一体化平台—智慧应用”五层分层设计，实现从底层数据采集到上层业务应用的端到端贯通，为智慧电厂全场景智能化提供“数据—技术—应用”全链条支撑。

3.1 感知对象层

感知对象层聚焦智慧电厂运行过程中的人、机、料、环、法五大核心要素，作为数字化底座的基础感知单元，通过对人员行为与生理状态、设备工况与外观特征、物料数量与存储状态、环境参数（如厂房温湿度、库区水文、地质灾害指标）及企业管理规范等信息的采集，为后续数字化感知与处理提供原始数据支撑，构建智慧电厂的“物理信息采集靶标体系”。

3.2 感知服务层

感知服务层作为数字化底座的数据采集中枢，依托多类型智能终端与专业业务系统，实现生产、运维、经营全场景的多模态数据采集，为上层数据处理与分析提供“全维度原始数据集”。

3.3 传输通道层

传输通道层遵循电力系统“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的安全防护原则，构建“多网络融合+智能网关”的高效数据传输架构。

3.4 一体化平台层

一体化平台层是数字化底座的核心技术能力载体，通过基础设施整合与六大支撑平台的协同构建，实现“算力—数据—算法—模型”全链条技术支持。

3.5 智慧应用

智慧应用层依托一体化平台层的技术能力输出, 聚焦智慧生产、智慧安全、智慧管理三大业务领域, 落地多类细分智能应用场景。在智慧生产领域, 涵盖智能监测、智能诊断、设备控制、智慧巡检等应用模块, 可实现水轮发电机组等核心设备的“精准调控、预知维护”, 显著提升生产过程的智能化水平; 在智慧安全领域, 集成智慧门禁、智慧安防、地灾风险监测、应急管理等功能, 能够构建高海拔环境下电厂安全运行的全方位防护体系; 在智慧管理领域, 包含智慧经营、智慧仓储、智慧用能、统一身份认证等场景, 助力电厂运营效率提升与精益化管理目标的实现。

4 智慧电厂提质增效的成效分析

4.1 发电效率提升

通过智能发电调度系统的应用, 扎拉水电站能够根据实时水情、电网负荷以及设备状态, 精准优化发电计划, 实现机组的高效稳定运行。根据故障诊断系统对设备分析、评估及故障预测能力, 确保机组稳定可靠运行, 减少检修时间、实现日常抢发电量、汛期增发电量; 通过汛期水位动态控制、水河流域一体化经济调度(EDC)、富余水电外送等方式, 实现增发电量; 在线智慧监测系统实时监测设备状态, 过水大部件磨损监测、防泥沙, 通过监测提高设备防护安全稳定水平, 及时发现设备隐患提前干预, 规避设备损坏、电量损失、电网考核等事件, 实现企业效益最大化。智慧电厂建成后, 预计增加发电量 3%~5%。同时, 智能发电调度系统能够快速响应电网负荷变化, 及时调整发电出力, 避免了因发电与用电需求不匹配导致的电能浪费, 进一步提升了发电效率与电力供应的稳定性。

4.2 运维运营成本降低

设备智能运维体系的建立, 使得扎拉水电站从传统的定期检修与事后维修模式转变为基于状态的预测性维护模式。通过实时监测设备运行状态, 提前预测设备故障, 企业能够有针对性地安排设备维护计划, 可减少不必要的定期检修, 降低维护成本。通过引入机器人、无人机、智能设备装置, 建设自动巡检系统、智能诊断系统、数字管理系统, 减少现场作业工作量、提高生产率, 推进电厂无人化、少人化, 改善基层员工工作环境, 让员工在电厂智慧化转型中更有获得感、幸福感。自动化水平的提升可减少电厂现场作业人员, 助力电厂减员增效, 推进电厂高效经营, 运行成本降低 20% 以上。

4.3 安全可靠增强

通过视频监控与 AI 图像处理技术, 对人员不安全行为的识别准确率可达到 95% 以上, 及时纠正员工的

违规操作行为, 有效预防了安全事故的发生。人员定位与电子围栏技术实现了对厂区人员与车辆的精准管控, 对危险区域的闯入预警响应时间缩短至 1 秒以内, 大大提高了对危险情况的处置效率。无人机、机器人、视频分析等智能物联手段, 实现对边、远、偏、危地区自动巡检, 在保障巡检业务精细可靠前提下, 降低人工作业带来的安全隐患; 系统准入、故障预警、作业联动、环境管理和应急管理为电厂生产安全、人员安全、环境安全提供全方位保障, 助力电厂安全运营, 实现电厂本质安全目标, 安全事故减少 20% 以上。

5 结束语

在水电行业竞争日趋激烈、能源转型诉求愈发迫切的背景下, 扎拉水电站智慧电厂建设对保障电站安全稳定运行、提升经营管理效能具有重要价值, 不仅可提升扎拉水电站的发电效率、降低运维成本, 还能够提高安全管理水平, 推动绿色可持续发展, 有力促进经营体制的全方位优化。未来, 随着技术的不断革新, 智慧电厂在扎拉水电站的应用将持续深化与拓展, 在巩固现有成果的基础上, 进一步探索创新应用场景, 一方面通过 AI 优化负荷预测与调度精度, 提升能源利用效率; 另一方面拓展综合能源服务领域, 推动电站从“单一发电”向“多元能源服务”转型。

参考文献:

- [1] “十四五”现代能源体系规划:210 号[R]. 国家发展改革委国家能源局,2022.
- [2] 刘吉臻,胡勇,曾德良,等.智能发电厂的架构及特征[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6463-6470,6758.
- [3] 王曦钊,刘胜军,王德军,等.智能电站框架研究与信息化工程实践[J].电信科学,2016,32(04):181-185.
- [4] 严兴煜,高赐威,陈涛,等.数字孪生虚拟电厂系统框架设计及其实践展望[J].中国电机工程学报,2023,43(02):604-619.
- [5] 梁艳,徐希涛,徐静波,等.基于数字孪生的智能水电厂建设初步研究[J].水电与抽水蓄能,2023,09(06):103-107.
- [6] 王超,刘兵.数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的应用[J].东北电力技术,2025,46(01):5-8.
- [7] 李东明,李龙龙,晁阳,等.大坝安全监测数字孪生系统应用研究[J].水力发电,2024,50(09):110-117.
- [8] 胡向阳,胡中平.西藏扎拉水电站工程关键技术综述[J].水利水电快报,2024,45(06):1-7.
- [9] 王飞,张浏骏,许佩佩,等.海拔高度对变频器散热影响的研究[J].电子机械工程,2016,32(01):9-15.
- [10] 俞楚,朱亮,马成勇,等.浅析海拔对急进高原人群出现急性高原反应的中医症状学影响[J].辽宁中医杂志,2023,50(02):29-34.

基于化学仪表精确测量的亚临界机组水汽循环系统腐蚀速率评估

冀亚妮

(大唐国际发电股份有限公司张家口发电分公司, 河北 张家口 075000)

摘要 随着我国电力行业节能减排与安全生产要求的不断提高,《电力安全生产“十四五”规划》《火电机组节能降碳改造升级实施方案(2022—2025年)》等文件明确提出,要加快火电机组数字化、智能化改造,提升设备运行监测和故障预警能力。亚临界机组作为当前火电系统的重要组成部分,其水汽循环系统腐蚀问题直接影响机组效率与使用寿命。传统的腐蚀监测多依赖人工取样与实验分析,存在时效性差、精度不足的问题。本文基于化学仪表精确测量技术,构建了亚临界机组水汽循环系统腐蚀速率实时评估模型,利用在线电导率、pH、溶解氧、铁离子浓度等关键参数的动态监测数据,分析腐蚀速率变化规律及其影响因素,以为相关人员提供借鉴。

关键词 亚临界机组;水汽循环;化学仪表;腐蚀速率;智能监测

中图分类号: TH7; TM31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.028

0 引言

在火电厂运行中,管道、汽轮机和换热器等设备因长期处于高温高压的水汽环境,面临电化学腐蚀的显著风险,导致性能衰退甚至事故隐患。针对这一问题,化学仪表在线检测技术发挥了核心作用,通过持续监测电导率、溶解氧、pH值和金属离子等参数,实现腐蚀速率的定量分析,并为预测与防护措施提供可靠数据支持。这一技术路径不仅契合能源安全与设备健康管理的迫切现实需求,更是推动火电行业向高质量发展的必然趋势。

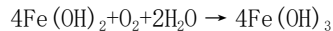
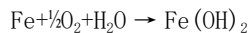
1 系统现状与腐蚀机理分析

1.1 运行环境苛刻,腐蚀问题突出

以某600 MW亚临界燃煤机组为例,锅炉主汽压力约16.7 MPa,过热蒸汽温度达540 °C。在如此高温高压、氧含量波动的环境中,水汽循环系统极易发生氧腐蚀与酸腐蚀。在实际运行中,机组负荷频繁波动(±20%负荷范围内),加氨、加联氨控制延迟常导致pH值短时降至8.5以下,除氧器出口溶解氧偏高至0.02 mg/L以上,造成省煤器进水管和凝汽器铜管内壁出现Fe(OH)₃沉积和Cu₂O脱膜现象。近三年定检数据显示,凝汽器管壁平均减薄速率约为0.12 mm/a,局部点蚀深度超过0.5 mm,说明腐蚀问题已影响热交换效率与运行安全^[1]。

1.2 腐蚀机理复杂,损伤类型多样

亚临界水汽系统中腐蚀主要由溶解氧、电化学反应及流体冲蚀耦合效应造成。典型反应如下:



Fe(OH)₃沉积后易在局部形成差异氧浓池,诱发点蚀。若pH超过9.6,Fe₃O₄膜被破坏,碱脆裂纹沿晶界扩展;而在高流速弯头处,雷诺数超过2×10⁵时冲蚀速率显著增加,导致气蚀坑与应力腐蚀裂纹共存,损伤具有不可逆性。

1.3 监测方式滞后,智能检测势在必行

目前部分机组仍采用化验室取样滴定或重量损失法,数据滞后6~12小时,无法动态反映腐蚀速率变化。针对这一问题,本研究引入化学仪表在线测量+数字化数据融合评估系统,实现实时监测与趋势预测。通过高精度电化学传感器采集腐蚀电流密度,与水质参数(pH、电导率、溶氧、Fe离子浓度)进行耦合分析,形成“腐蚀电流—离子浓度—水质参数”多变量监控模型,为锅炉水化学运行调整提供依据^[2]。

2 化学仪表测量与数据评估方法

2.1 多点布置监测体系,构建全过程测量网络

系统监测点依据流体循环路径及腐蚀敏感位置分布布置,共设10个主要监测节点,各监测点采用分级仪表系统(见表1)。

高温段(>250 °C):安装K型高温电化学探头与耐腐蚀合金保护套,信号通过热电隔离放大后接入DCS。

低温段(<100 °C):使用光学pH电极与离子选

表 1 系统监测点监测详情汇总

区段	监测点位置	关键监测参数	监测目的
除氧器出口	高压给水出水管	pH、溶解氧	判断除氧及加氨控制效果
省煤器进口	冷却水回路	电导率、Fe 离子	监测进水污染及金属溶出
汽包	上升管与下降管汇	腐蚀电流密度、pH	判断汽水分离区腐蚀活性
过热器入口	高温段	电导率、Fe 离子	检测高温氧化皮脱落趋势
凝汽器入口与出口	铜管内外壁	溶解氧、电导率	判断冷端氧腐蚀与电化学差异
给水回路	低压段管线	pH、电导率、腐蚀电流	综合评估系统腐蚀速率

择电极分析仪 (Fe²⁺ 检测限 0.01 mg/L)。

溶解氧分析仪:采用极谱型传感器,检测限0.001 mg/L,配合定期校准的在线流通池。

所有仪表信号经 Modbus TCP/IP 协议传输至化学监控服务器,并与 DCS 系统实现数据同步与报警联动。若监测值超限(如 pH < 8.8、电导率 > 10 μS/cm、溶解氧 > 0.02 mg/L),系统会自动触发化学加药单元的联动响应,实现闭环控制。

2.2 多参数耦合模型构建,实现腐蚀速率定量化计算

数据分析是研究构建了基于电化学腐蚀原理的多参数耦合下腐蚀速率计算模型,并且利用 Nernst 电位方程和法拉第定律进行腐蚀速率计算分析,在溶解氧、pH、电导率、温度和铁离子的基础上进行多元线性回归,最终得到腐蚀速率(瞬时腐蚀速率)(mm/a),主要公式表达式为:

$$V=k(a_1[O_2]+a_2pH-1+a_3\sigma+a_4[Fe^{2+}])+\epsilon \quad (1)$$

式(1)中, O₂ 为溶解氧浓度, σ 为电导率, [Fe²⁺] 为铁离子浓度, ε 为系统误差项。模型参数经逐步回归与偏最小二乘法优化后,相关系数 R² 达到 0.91,具有良好的预测精度。

在对设备信号进行采集的基础上,为了减小数据波动,本系统使用滑动窗口平均算法和小波滤波进行仪表信号的自动滤波,去除信号中的瞬时扰动和操作冲击。如正常运行时,某段时间机组由负荷 80% 上升至 100% 时,除氧器温度变化的扰动,使得 D-0 的溶解氧发生短时波动,但经过滤波后,腐蚀速率的曲线没有大的波动,模型输出结果在正常状态,腐蚀速率平均为 0.018 ~ 0.026 mm/a,当 DO 达到 0.03 mg/L 时,腐蚀速率上升为 0.043 mm/a。研究证实 D-0 是影响腐蚀速率变化的主要影响因素, pH 达到 8.8 ~ 9.2 时系统为最佳防腐运行状态^[3]。

2.3 构建智能预警机制,实现工况动态调控

为突破传统腐蚀监测的“后验分析”局限,系统依托厂级实时数据库(HIS)+深度学习引擎(TensorRT),构建“监测—识别—响应”三级智能预警模型。该模型以 Fe²⁺ 浓度变化速率(d[Fe²⁺]/dt)与溶解氧增长速率(d[DO]/dt)为主控参数,并引入运行负荷、pH、主汽温度等协同因子,实现对腐蚀趋势的提前识别。

1. 算法层设计:模型采用基于双通道 CNN-LSTM 结构的时序预测算法,其中 CNN 用于提取水化学信号的局部特征(如波动频率、振幅),LSTM 捕捉时间依赖性。训练数据来自 3 年机组运行历史(约 9.8 × 10⁶ 条样本),经归一化和噪声滤波处理后输入模型,预测平均误差控制在 ±0.0038 mm/a。

2. 触发阈值与响应逻辑:当 Fe²⁺ 浓度连续 3 分钟 > 10 μg/L 或 DO 上升速率 > 0.005 mg/L · min⁻¹ 时,系统自动发出双级报警:一级 DCS 报警:在主控屏红色高亮闪烁,并记录触发时间及关联参数(pH、电导、流量、负荷等);二级远程联动:通过 SMTP 网关向化学值班员与运行主管推送短信与邮件,附带报警曲线与五分钟窗口内趋势分析图。

3. 自学习与复盘机制:系统自动保存报警前后 ± 5 分钟运行数据及趋势图,经 AI 分析后标注异常原因(如加氨延迟、除氧温度滞后等),并生成“事件复盘报告”。

经统计,智能预警模块投运 6 个月后,氧腐蚀导致的铁离子异常事件减少 47%,维护工单下降 35%,非计划停机次数由每季度 2 次降至 1 次以下。

2.4 融合数字孪生技术,推进评估智能化升级

在实时监测的基础上,引入数字孪生(Digital Twin)技术,构建亚临界机组水汽循环系统的虚拟孪生体,实现腐蚀状态的“可视—可算—可控”。

1. 模型构建:平台以 SolidWorks 三维模型为基础,导入实际管道参数(材质、壁厚、流量、温度场)和

在线监测数据,通过 ANSYS Fluent 进行流固耦合模拟,实时映射到孪生平台。每个节点(如省煤器入口、凝汽器出水口)均绑定实时数据流。

2. 功能实现:腐蚀分布可视化,平台以三维色谱方式显示各管段腐蚀速率,绿色($< 0.02 \text{ mm/a}$)、黄色($0.02 \sim 0.04 \text{ mm/a}$)、红色($> 0.04 \text{ mm/a}$),并实时闪烁风险区段。

3. 趋势预测:内嵌 LSTM 算法预测未来 48 小时腐蚀变化,平均误差 $\pm 0.004 \text{ mm/a}$ 。

4. 远程管理与仿真优化:管理人员可通过移动端远程查看腐蚀分布、运行状态及推荐调整参数(如加氨量、联氨比例、除氧温度),实现“云端化学监控”。

5. 运行成效:数字孪生系统上线后,人工趋势分析时间缩短 60%,数据异常定位时间从平均 1 小时降至 12 分钟。通过趋势预测调整维护周期,锅炉管道检修周期由 8 个月延长至 12 个月,年均节约成本约 38 万元,并显著提升了防腐维护的主动性与精准^[4]。

3 监测结果分析与优化对策

3.1 监测结果分析:腐蚀速率受运行工况影响显著

以某 600 MW 亚临界机组连续运行 6 个月的监测数据为例,系统采集了约 2.1×10^8 条实时记录。结果显示:

1. 启停阶段腐蚀峰值明显。在冷态启动后 60 分钟内, Fe^{2+} 浓度峰值达 $22 \mu\text{g/L}$,腐蚀速率 0.048 mm/a ,是稳态运行期的 3 倍。

2. 负荷波动导致腐蚀速率同步波动。当机组负荷从 70% 升至 100% 时,因除氧器温度滞后 $2 \sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、溶解氧升高至 0.025 mg/L ,腐蚀速率由 0.020 mm/a 增至 0.042 mm/a 。

3. 局部高流速区腐蚀集中。通过数字孪生可视化发现,凝汽器出口及省煤器进口处腐蚀热点明显, Fe 离子浓度较全系统平均高出 52%。

4. 腐蚀的主导原因包括:(1)除氧器温度滞后造成溶氧升高;(2)加氨与联氨投加响应延迟(约 4 分钟);(3)冷凝水回收波动导致电导率 $> 15 \mu\text{S/cm}$ 。

5. 稳定满负荷运行时腐蚀速率最低(0.016 mm/a),充分证明化学控制稳定性与热力工况一致性是防腐关键。

3.2 优化控制策略:构建“精准监测—动态调节—趋势预警”三层体系

为实现腐蚀风险动态调控,研究构建了集测量、控制、预警于一体的三层智能防控体系:

1. 精准监测层:高精度化学仪表实现 10 s 级连续

监测;通过 Kalman 滤波与滑动中值算法剔除漂移与瞬态噪声,漂移率控制在 1% 以内;数据符合《火电厂水汽化学监测仪表技术条件》(DL/T 1152—2021)。

2. 动态调节层:建立“腐蚀速率—加药量”反馈模型,实时计算氨、联氨投加比;PID 控制算法($K_p=1.25$ 、 $K_i=0.12$ 、 $K_d=0.05$)自动调整加药泵流量,使 pH 稳定在 $8.8 \sim 9.2$,溶解氧维持 $< 0.010 \text{ mg/L}$;与人工操作相比,自动响应时间缩短 80%,短时腐蚀抑制效率提高 43%。

3. 趋势预警层:应用动态阈值探测算法,对铁离子增长速率($d[\text{Fe}^{2+}]/dt$)实时计算滑动平均;当速率 $> 0.5 \mu\text{g/L} \cdot \text{min}$ 时自动发出黄色预警,并在 DCS 与手机端同步提示。

实际运行数据显示,事件响应时间由 0.67 小时缩短至 0.17 小时,腐蚀事件提前干预率提升 71%^[5]。

4 结束语

本研究基于化学仪表的精确测量技术,构建了集实时监测、腐蚀速率定量评估、智能预警和数字孪生于一体的综合评价体系,实现了亚临界机组水汽循环系统腐蚀管理从“滞后判断”向“实时感知—动态预测—主动调控”的转变。研究成果表明,该体系不仅提升了腐蚀监测的精细化水平,也为设备健康管理、节能降耗和机组安全稳定运行提供了强有力的技术支撑。随着火电行业数字化、智能化进程的持续推进,该体系具有广泛的推广应用前景,对推进火电机组运维的高质量发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 孙跃禹,金昌盛,郑淇元.水汽品质监督在线检测管理系统在亚临界机组中的应用[C]//中国电力技术市场协会.2025年(第九届)发电行业水处理技术研讨会论文集.黑龙江华电齐齐哈尔热电有限公司,2025.
- [2] 王华阳,姚喜亮,王峰,等.某电厂 1000MW 超超临界机组水汽系统氢电导率异常原因分析[J].全面腐蚀控制,2023,37(10):53-56.
- [3] 张文帅,白鸿斌,姚海宝,等.超超临界机组水汽异常排查及腐蚀机理探究[J].盐科学与化工,2023,52(06):46-51.
- [4] 李晨.600MW 火电机组凝结水精处理系统氯离子超标原因分析及解决方法[C]//中国电力技术市场协会.2022 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集.中电华创电力技术研究有限公司,2022.
- [5] 李少杰,谈群兴.超超临界机组水汽质量控制研究[J].南方能源建设,2021,08(03):109-113.

110 kV 变电站接地网施工质量监理分析

盘武光

(深圳市威彦达工程监理有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 110 kV 变电站安全运行阶段, 接地网是设备防护和人身安全的根本保证。本文分析了 110 kV 变电站接地网施工质量监理要求, 同时从变电站接地网施工标准依据、设计文件符合性要求以及监理人员专业能力要求方面探索 110 kV 变电站接地网施工质量监理要求, 并在分析 110 kV 变电站接地网施工质量监理原则基础上, 针对接地网施工质量监理要点展开研究, 以期为确保变电站接地网施工质量得到全面控制提供有益参考。

关键词 110 kV 变电站; 接地网; 施工质量监理

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.029

0 引言

110 kV 变电站是区域性电网的关键部分, 变电站接地系统能够实现故障电流泄放、设备电位平衡和防雷功能, 变电站接地网工程施工过程中如果有施工质量不合格的情况, 则会导致出现跨步电压过大、设备损坏、造成人员安全事故等现象。110 kV 变电站接地网施工工序包括土建、焊接、防腐以及测试等多个专业的作业, 同时交叉工序多, 有较多隐蔽工程项目。因此, 工程监理作为独立第三方机构, 要按照《建设工程监理规范》《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》等规定, 全过程跟踪, 对所有监理环节进行质量把控并签字确认。目前, 我国的电力工程正朝向高质量发展的方向前进, 在此背景下, 对于现阶段接地网施工监理的技术要点和操作思路开展研究是非常重要的, 有助于更好地做好监理工作。

1 110 kV 变电站接地网施工质量监理要求

1.1 标准依据

监理工作以国家及行业现行规范为基本依据。标准依据包括《110kV ~ 750kV 架空输电线路设计规范》《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》《交流电气装置的接地设计规范》及《建设工程监理规范》。上述文件对接地材料材质、截面尺寸、埋设深度、焊接方式、防腐等级及接地电阻限值作出明确规定。监理人员需熟悉标准条款, 确保施工方案与设计文件符合规范强制性条文。地方电力公司发布的补充技术规定亦纳入监理依据范围。标准文本作为监理日志、通知单及验收记录的引用来源, 构成监理行为的合法性基础^[1]。

1.2 设计文件符合性要求

施工图纸由具有相应资质的设计单位绘制, 包含接地网平面布置图、剖面图、材料表和有关的技术说明等内容。监理单位首先应该完成对图纸的检查, 查看是否有接地体规格、网格间距、埋深、引上线的位置、测试井等内容, 同时要查看工程的参数和项目批复文件是否一致, 例如: 地网的接地电阻的设计值是否满足该站址土壤电阻率的计算结果; 如本工程施工图纸使用降阻剂或者离子接地极等特殊的技术手段, 应在图纸上提供相关的证明文件以及技术证明书, 以供日后查验; 最后还要做好会审记录^[2]。

1.3 监理人员专业能力要求

接地网监理由具有电力工程监理资质的人员承担, 监理工程师需要掌握一定的电气工程知识, 熟悉接地系统的原理和施工工艺, 会看电气及土建图; 现场监理员经过培训, 了解焊接质量判别、防腐层检查及测试仪器使用注意事项; 监理人员应包括电气、土建专业的人员对接地网与基础、电缆沟等交叉点共管协监。人员资格证书、培训记录、岗位授权书纳入存档管理, 留存作为人员是否胜任工作的依据, 便于今后随时调阅, 追根溯源^[3]。

2 110 kV 变电站接地网施工质量监理原则

2.1 全过程控制原则

监理工作涵盖接地网施工过程的全时段管控, 整个过程没有断点, 责任不留死角。施工前: 对专项施工方案及技术交底、进场材料报审。施工时: 进行沟槽开挖、接地体敷设、焊接、防腐等重要过程的旁站或巡视。施工后: 组织隐蔽工程验收、见证了接地电

阻的试验全过程。将各环节作为控制节点，并严格按照“上道工序未验收合格，不得进入下道工序”标准执行。从全过程控制上讲，监理不仅需要考虑过程管控的全面性，更需要注意各环节管控的程序逻辑性，即不得出现事后签字、顺序颠倒现象，当天形成的日报当天上交，并做好每道工序的影像记录存档。

2.2 隐蔽工程重点监管原则

接地网工程90%以上埋于地下，属典型隐蔽工程，回填后无法直观检查，返工成本高、影响大。因此，监理将开挖、敷设、焊接、防腐及回填等环节列为重点监管对象。对焊接、防腐等不可逆工序，实行100%旁站监理，确认质量达标并完成影像记录后，方可同意隐蔽。影像资料须清晰反映接地网格几何尺寸、搭接与焊缝状态、防腐层覆盖情况及回填前整体布局。隐蔽验收记录由施工单位、监理单位及建设单位三方共同签字确认，作为工程计量支付、质量评定及后期责任追溯的法定依据。该原则充分体现了监理对隐蔽工程质量风险的高度审慎^[4]。

2.3 数据可溯原则

监理工作应该有真实的、准确的、完整的数据支撑，材料进场检测报告、焊接抽检记录、接地电阻测试结果、回填土压实度等需要量化的项目应按实测、实时进行记录，不得事后补录或用估计代替，所有日志、工作联系单、整改通知、验收表等监理文件要统一编号、分类归档，以便随时查阅监理文件的相关信息，并确保现场数据可溯源、能溯原，监理结论具有客观性与权威性，避免现场数据含糊其词、主观臆断等情况的发生。一旦出现质量问题或者发生事故，有始有终的真实记录都是确认责任归属、探究事故真相的重要依据。

3 110 kV 变电站接地网施工质量监理控制点分析

3.1 施工前期监理：设计图纸与规范符合性审查

监理应当在施工前组织图纸会审，重点核查接地网设计是否符合规范强制性条文，查看接地体材质是否选用热镀锌扁钢或者铜覆钢，截面尺寸是否不小于 50×5 mm。网格间距是否控制在 5×5 m~ 10×10 m之间；埋深是否不小于0.8 m；引上线数量及位置是否覆盖主变、GIS、避雷器等关键部位，并核对土壤电阻率测试报告和接地电阻计算书的设计值是否合理。如果发现缺少图纸或者图纸上数据矛盾的情况，则可以向设计单位发出监理工作联系单，请设计单位对此作出说明或修正，图纸审查记录是开工报审的一个重要前提^[5]。

3.2 材料进场监理

当接地材料进入现场后，监理人员按照规定要求把好验收关，要保证符合设计和规范要求材料才能进场。先验车上的质量证明文件（比如：材质合格证、热镀锌层检测报告、铜覆钢导电率检测证书等），再核对规格、标准与设计文件是否一致。随后开展现场抽样检查：热镀锌扁钢表面要光洁均匀，不允许出现裂纹、结疤、锌瘤、锌层剥落等缺陷，铜覆钢表面不允许出现划伤、压痕及明显的氧化斑点。监理利用游标卡尺测量材料的截面尺寸，误差应控制在 ± 0.2 mm之内；利用涂层测厚仪抽检镀锌层厚度，保证不低于 $65\ \mu\text{m}$ 。材料进场后，施工单位须按类别分区堆放，垫高防潮，覆盖防雨，并设置清晰标识牌，注明材料名称、规格、批次及检验状态。监理明确要求：凡未经报验、资料不全或复检不合格的材料，一律不得用于工程实体。所有验收过程均形成书面记录，详细说明进场批次、数量、外观及实测结果、处置意见等内容，并同步归入工程材料管理台账，实现全过程可追溯^[6]。

3.3 土方开挖监理

在接地系统施工过程中，地面开挖工程是基础环节，要求监理方全过程监管。施工前，监理人员核验施工单位提交的测放样数据，现场逐点校核接地沟的平面位置、走向和标高是否符合施工图要求，不能出现偏位或错线问题。在开挖过程中，监理应增加现场巡查频次，检查沟槽断面尺寸，沟宽不得小于0.5 m，沟深应在设计深度的基础上增加0.1 m作为敷设预留量；注意沟底的平整度、边坡稳定性，防止沟壁坍塌和局部超挖；将沟底清掏干净、彻底，不得有树根、碎石、垃圾等物存在，不得有尖锐物在管道敷设后能划伤和硌伤接地体，以免使用时发生质量问题，在岩石段若用爆破或用机械凿岩，则要监理监工到位并控制炸药量或凿孔深度，不允许地基岩层被破坏，不应形成松散碎层而影响接地贴合良好与回填密实度。开挖完成后，监理立即组织实测，抽查沟深、沟底坡度及轴线偏移，并将数据填入隐蔽工程验收记录，作为下道工序开工的前提。土方开挖质量直接决定了接地体敷设的平顺性与贴地性，监理通过过程巡查、实测复核与节点验收三重把关，确保基底条件满足设计及施工规范要求。

3.4 接地体敷设监理

针对接地体敷设过程，监理单位应按照设计图纸进行现场旁站，检查实施，核实接地网的网格尺寸、

交叉节点位置和引上线预留长度是否符合设计要求；敷设时，要将镀锌扁钢平放于沟底，不得悬空、翘曲、硬折，对于弯曲处，施工单位要进行圆滑过渡处理，且不得小于扁钢宽度，防止应力集中造成设备损坏或者应力疲劳拉断等现象发生。对于多段扁钢连接处，监理检查搭接长度是否满足规范：水平方向搭接长度不小于扁钢宽度的 2 倍，垂直方向不小于厚度的 2 倍，并为后续焊接预留足够操作空间。当引上线穿越设备基础或电缆沟时，必须加装 PVC 套管予以保护，监理逐处查验套管规格、长度及封口密封情况，防止混凝土浇筑或回填过程中损伤接地体。铺敷完后，监理用全站仪或者钢卷尺测量网格角点以及引上线出口关键点的坐标和高程是否达到设计值，两者相差不超过 ± 50 mm。由于接地体在空间中的布置决定了接地网的几何形态和电气性能的好坏，为保证接地网的具体参数都正确无误，监理全程跟踪检查现场实际情况与设计是否相符，同时做好定位放线及拉线工作，使净间距均满足要求，从而为下一步的焊接、试验以及系统正常运行提供保障。

3.5 焊接与防腐监理

在接地网施工中，要求监理单位全过程旁站，全过程抽检焊接、防腐工作，保证连接可靠、耐久。监理需重点检查焊接工艺是否符合设计、规范要求，即接地体搭接要焊接，扁钢搭接长度不小于其宽度的 2 倍，且应四面满焊；焊缝高度不低于 4 mm，表面应均匀饱满，无夹渣、气孔、咬边等缺陷。焊接结束后立即由施工单位清理焊渣，监理人员再用 5 倍放大镜检查焊缝是否连续、无裂纹、无未熔合；如已做无损检测的还应核查无损检测报告是否满足电气连续性的要求。防腐处理在焊接接头冷却至常温后立即进行，不得延误。对于热镀锌扁钢焊接部位，须补涂富锌底漆与面漆，涂层厚度及附着力应符合标准；铜覆钢接地体的连接接头则采用专用防腐胶带严密包裹，搭接宽度不小于 50 mm。监理逐项检查防腐层覆盖完整性，确保无漏涂、流挂、起泡或破损。同时，在变电站接地网施工阶段，监理需在现场核对接地网所需的防腐材料型号与设计一致性，不能采用过期或不合格涂料、胶带。而在热镀锌扁钢补涂部位控制时，需确认焊渣清理彻底且表面无锈蚀，之后监督涂覆顺序与厚度。此外，当铜覆钢接头包裹完以后，检查胶带是否紧绷、无褶皱，必要时采用压辊辅助压实。需要注意的是，需在防腐施工后 4 小时内复查涂层或胶带状态，观察是否出现开裂、起翘，弱存在此类现象则需及时要求施工单位修复。

3.6 接地电阻测试监理

在变电站工程建设中，监理单位负责对接地电阻测试实施全过程管控。测试工作严格按施工节点分三次开展：接地体安装完成后回填前、回填土压实完毕后以及工程竣工验收前。每次测试，监理人员均现场见证，重点核查测试所用接地电阻测试仪是否在有效校准期内，查验校准证书；确认电极布置是否符合规范要求，其中电流极距接地网中心的距离不得小于接地网对角线长度的 4 倍；同时记录测试当天的天气状况，严禁在雨雪或土壤过湿条件下进行测试，以免数据失真。测试采用三极法进行，监理同步记录实测电阻值、环境温度、空气湿度及现场土壤含水率等参数。同时将结果与设计及要求及《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》限值进行比对，一般来说，110 kV 变电站接地电阻一般不得大于 0.5Ω 。若实测值超标，监理立即签发整改通知，监督施工单位采取增打垂直接地极、扩大接地网面积或规范使用物理降阻剂进行优化，并在处理完成后组织复测，确保最终接地电阻满足安全运行要求。

4 结束语

110 kV 变电站接地网施工质量监理是对工程建设全过程依据相关标准，以有效参数为主线，把控设计、控制材料、关工序、检测证据，实现以几何尺寸、材料参数、连接构造、试验数据为评价要素判定接地网是否满足工程设计要求的工作。本研究针对 110 kV 变电站接地网施工质量监理细节展开分析，旨在为保障类似工程的质量与安全提供有益参考。由于 110 kV 变电站接地网工程具有隐蔽性特征，在接地网施工时，其质量控制内容格外严格。所以，监理人员需要不断提升专业理论知识与技术实践能力，同时在变电站接地网施工监理中引入智能化技术，对工程质量与安全严格把控，保证变电站可靠运行。

参考文献：

- [1] 林烽. 对变电站电气工程监理工作改进创新的思考[J]. 无线互联科技, 2019, 16(22): 130-131.
- [2] 刘晓华, 张奇. 变电站工程监理的质量控制分析[J]. 集成电路应用, 2022, 39(05): 250-252.
- [3] 田瑞雪. 探讨变电站工程中的电气监理技术[J]. 新型工业化, 2022, 12(10): 34-37.
- [4] 同 [3].
- [5] 张宏发. 110kV 变电站工程施工管理分析[J]. 大众标准化, 2024(05): 89-91.
- [6] 王威. 变电站土建施工质量监理管控要点探讨[J]. 大众标准化, 2023(18): 28-30.

高压输电线路施工期生态保护措施分析

郑水生

(广东省中园生态规划设计院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 在高压输电线路施工过程中, 会对自然保护区等环境敏感区的生态环境带来较大的影响, 需要采取有效的施工防范措施来降低其对环境的破坏。本文重点分析了高压输电线路在施工期间对自然保护区等环境敏感区生态环境产生的诸如永久占用土地资源、造成水土流失、破坏植被、影响动物生境和景观破碎化等各种不利影响, 并根据高压输电线路工程施工期间的特点, 在设计和施工阶段有针对性地提出保护措施, 以为高压输电线路施工提供有益参考。

关键词 高压输电线路; 环境敏感区; 生态保护

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.030

0 引言

自然保护区等环境敏感区对于保护国家珍稀生物和调节地区生态环境具有重要的作用。高压输电线路工程在建设过程中因选址选线不合理、施工不规范、生态恢复不彻底等, 会使环境敏感区的整体生态环境质量、功能以及在景观方面受到较大影响。本文结合某高压输变电线路穿越揭阳惠来黄光山自然保护区为例, 分析其施工过程中对自然保护区的土地资源、动植物资源和自然景观的影响, 并对可能造成的影响采取对应措施, 使其对保护区内的生态环境影响降到最低。

1 高压输电线路施工期对环境敏感区的生态环境影响

1.1 对土地资源的影响

某高压输电线路为广东省2024年重点建设项目^[1], 工程受地理环境、技术因素、施工条件和社会稳定因素制约, 难以避免穿越揭阳惠来黄光山自然保护区(以下简称自然保护区), 穿越自然保护区的形式为“架空线+塔基”, 穿越长度12.50 km, 在保护区内新建30座塔基, 永久占用保护区土地21 225 m², 占自然保护区土地总面积6 756.88 hm²的0.31%, 线路施工临时用地(主要为施工便道和材料堆场等)使用保护区土地面积54 853 m², 占保护区土地总面积的0.81%, 用地主要为林地。

项目的建设使用了保护区的土地资源, 减少了保护区的林地面积, 减少面积为21 225 m²。由于工程占地面积小, 占保护区土地总面积比重小, 且54 853 m²

的临时用地在施工结束后会尽快进行植被恢复, 因此工程建设对保护区土地损失量的影响程度为轻度。

1.2 对水土流失的影响

本次工程以架空线+塔基形式穿越黄光山自然保护区, 塔基施工建设、材料区、临时道路和高压输电线路架设等施工作业将会一定程度损伤沿线地貌和植被, 进而诱发水土流失。根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-2007)对该工程土壤侵蚀潜在危险度进行评级: 级别与区域人口环境容量失衡度、年降雨量、植被覆盖度、地表松散物质厚度、坡度等因子有关。本项目所在的保护区人口环境容量失衡度<20, 年降雨量>1 500 mm, 评价区植被覆盖度<85%, 地表松散物质厚度<1 m, 施工区域坡度<35°, 土壤为红壤和赤红壤, 以花岗岩类、砂页岩类为主。根据各侵蚀因子的评分值, 结合其权重值, 得到项目所在区域土壤侵蚀潜在危险度总分为29.6, 等级为轻险型(轻险型总分为10~30)。

工程施工涉及保护区内扰动土壤面积总计76 078 m²(永久占地+临时用地), 在保护区内塔基永久占地面积小, 但临时用地相对较多, 开挖区域位于保护区南部片区, 将造成植被损失, 破坏原土地表层结构, 导致土地表层裸露, 降低其水土保持功能, 引发一定面积的水土流失, 加之塔基多位于山顶, 部分基塔所处区域坡度约15°~35°, 会加剧水土流失。但由于保护区所处区域土壤侵蚀潜在危险度较低, 且除上述位于山顶的基塔外, 其它塔基建设区域坡度平缓, 植被覆盖度也较高, 因而在施工过程中需加强管理, 严

格控制作业面,尽可能地减少植物破坏数量,并采取水土保持措施,即可大大降低施工期水土流失情况。项目在施工期对保护区水土流失的影响程度较轻,整体可控。

1.3 对自然保护区植物的影响

工程建设需占用林地,项目施工将对建设红线范围内植被产生直接性破坏,造成保护区部分植被直接损失。经调查,工程土地直接占用区的植被类型均为人工植被,包括桉树林、湿地松林、相思林、荔枝林,其中以荔枝林占多数。

一方面,项目在施工期会对工程占用区植物造成直接损毁,弃渣堆积致使表层土壤被剥离或植物被压埋,造成部分物种损失,将对区域植物多样性带来一定影响;另一方面,施工活动中产生的粉尘吸附在植物叶片表面,影响植物正常的光合作用等,限制植物的生长,甚至导致植物死亡。此外,在施工过程中,施工人员会不可避免地践踏施工沿线周围的草本植物,造成植物生长不良甚至死亡。

工程建设会对直接占用保护区范围内植被进行砍伐,造成植被直接损毁,将对保护区的植被类型产生影响,但由于工程直接占用区和评价区内植被类型在保护区其他区域均广泛分布,不会导致保护区植被类型的减少。工程直接占用区和评价区的植被类型以人工植被为主,天然植被仅分别占保护区天然植被总面积的 0% 和 13.52%,对保护区天然植被的影响较小。因此,项目施工期对保护区植被类型的影响程度为轻度。

此次工程直接占用区和评价区内物种主要由大戟科、蝶形花科、蔷薇科、菊科、莎草科和禾本科等科的植物组成,种类多为常见种,在保护区其他区域均广泛分布,评价区植物仅占保护区植物种类的 45.9%,数量不到一半,工程建设只会造成短期内某些物种数量的减少,不会导致某一物种消失。此外,在评价区内并未发现重点保护和珍稀濒危野生植物、特有种,加之本项目施工作业面小、施工期短,施工过程中通过洒水降尘、加强对施工人员的宣传教育等措施加以防范和保护,把影响降到最小。因此,项目施工期对保护区植物多样性的影响为轻度。

1.4 对自然保护区动物的影响

经调查,本项目线行两侧各 1 000 m 评价区范围^[2]记录到野生脊椎动物共 14 目 40 科 88 种,约占黄光山保护区脊椎野生动物种类(124 种)的 71%,包括两栖动物 1 目 5 科 8 种,主要有黑框蟾蜍、花狭口蛙等;

记录到爬行动物 2 目 6 科 10 种,以翠青蛇、白唇竹叶青蛇等蛇类为主,还有少量蜥蜴类;记录到鸟类 7 目 25 科 60 种,占评价区物种总数的 68%,包含多种水鸟和林鸟;记录到哺乳动物 4 目 4 科 10 种,以鼠科动物为主,如小家鼠、褐家鼠等。

工程在施工期会对野生动物产生一定影响:施工期内,植被、空气、土地的扰动及基础钻孔作业等机械噪声可能会促使野生动物将向周边迁移到相对安全的环境,造成野生动物的种群下降、生境破坏丧失,而施工机械碾压、原料堆放及工程施工等因素则有可能直接造成野生动物的死亡,影响种群密度。特别是对于鸟类而言,工程施工产生的噪声降低了声信号的传播距离,形成噪声屏障,能阻碍鸟类的声音交流,或对鸟类生存造成一定程度的影响。

但此次工程相对于整个保护区来说,占地面积小、植被破坏量小、造成的栖息地损失面积小,且黄光山自然保护区植被覆盖率高、植被类型多样,评价区和保护区其它区域广泛分布着适宜两栖动物生活栖息场所,因此工程建设对动物栖息地影响较小,综合评估其受影响程度为轻度。

1.5 对自然保护区景观的影响

保护区评价范围内自然景观的地文资源主要为山峰,包括黄光山、牛地山等;水文资源主要为寮水河及多处坑塘水体;生物资源主要有常绿阔叶林、湿地松林、尾叶桉林、荔枝林等栽培植被;天象资源主要有云雾、云霞、雨景、落日余晖等。

工程线路穿越保护区南部片区,工程建成后,一方面,塔基之间将形成新的景观斑块,加大了生态景观的破碎化程度,在原始景观斑块上形成生态“疮疤”,造成不和谐的视觉效果;另一方面,架空高压输电线路穿越保护区,将对保护区造成空间切割,切割面积 1 281.07 hm²,占保护区总面积的 18.96%;此外,架空线路使得该区域在原有背景上勾划出一条人工印迹,但由于该区域人为活动强烈,景观自然度一般,因此此次新增架空线路与周围的生态景观无太大反差,但会进一步加大区域景观破碎化程度^[3];架空输电线路下方生物资源以桉树林、湿地松林、马尾松林为主,此处新增一条架空线路将会导致沿线部分生物资源观赏价值的降低,但这些植被是整个保护区范围及评价区范围的主要植被类型,在保护区其它区域广泛分布。从整体上看,工程建设对保护区自然景观的影响较小,影响程度为轻度。

2 高压输电线路施工期的生态保护措施

2.1 高压输电线路设计阶段的生态保护措施

高压输电线路的设计需要充分考虑生态环境保护,线路选择应尽可能绕避自然保护区等各种敏感区^[4],确因地形、技术和社会稳定等各因素必须进入自然保护区的,需经充分的路径唯一性论证。在穿越自然保护区时,需绕过自然保护区中的重点保护区域,选择影响和破坏程度最低的线路。高压输电线路应避开保护区中生态物种敏感性区域,例如珍稀物种、濒危物种和野生物种的分布、生活、迁徙等区域。设计时还要尽可能选取占地最小、最环保的施工技术及铁塔类型,如同塔多回架空线路方式和飞艇放线等先进放线方法,最大程度降低高压输电线路对保护区生态体系的影响^[5]。

此外,在设计阶段通过优化塔位、改进塔基类型、改进施工方式等诸多措施^[6],将塔基施工过程中产生的土方降低到最少,以利于水土保持。

2.2 高压输电线路施工阶段的生态保护措施

施工期的影响主要有:施工噪声、废渣,以及开挖、占用土地等造成的水土流失和对动植物造成的影响等,故主要从这些方面采取措施:

1. 在控制噪声方面,施工单位需制定完善的环境保护计划和管理办法,明确施工工艺、施工工序、环境管理措施、防治责任范围等,选用低噪声设备和工艺,加强设备的保养和施工人员培训,降低机械振动。噪声较大的机械应布置在偏僻处,同时合理安排高噪声机械作业时间,避开动物活动的敏感时段。

2. 在废渣处理方面,施工产生的废土废渣、建筑垃圾等,应由专门的人员负责彻底清理,严禁在保护区内随意堆放。

3. 在控制水土流失方面,施工期应尽量避免雨季,最大程度减少雨季水力侵蚀,如无法完全避开雨季,则采取临时挡护和覆盖措施;同时施工工序要安排科学、合理,土建施工一次到位,避免重复开挖。采用苫布对开挖的土方及沙石料等施工材料进行覆盖,避免水蚀和风蚀的发生。

4. 在植被保护措施方面,在施工过程中注意对保护区内林地的保护,尽量减少占用;施工期间要对施工人员进行严格管理,严格控制临时用地面积,尽量减少不必要的植被破坏;施工期注意森林火灾预防,加强森林防火宣传教育,禁止施工人员在林区附近生火、抽烟;注意防止生物入侵种的传播,以免对沿线生态多样性带来长远影响。

5. 在动物保护措施方面,需制定具有针对性和可实施性的施工方案,以尽可能减缓因施工带来的干扰。施工进程的安排也应注意,尽量避免临时占用保护区林地,也要控制路基边坡的范围,减少对山体的开挖,尽量留给动物足够的迁移时间和空间;选用低噪声机械设备和施工工艺,将噪声对野生动物的影响降到最低;在施工区域张贴各种宣传标识,提高施工人员的保护野生动物的意识,禁止随意捕食或猎杀野生动物,消除人为对野生动物的直接伤害;对重点保护和珍稀濒危动物,应通过图片、资料等加强对施工人员的宣传教育,帮助施工人员学会辨识。若发现工程施工影响范围内有上述动物的分布,需悬挂标示牌,做好保护工作。

3 结束语

高压输电线路在施工期间会对保护区的土地资源及水土流失、植物资源、动物资源、自然景观资源等产生不同程度的影响。经评价,本次高压输电线路施工期对黄光山自然保护区的土地损失量的影响程度为轻度、水土流失的影响程度为轻度、植物多样性的影响为轻度、对动物栖息地的受影响程度为轻度、对自然景观的影响程度为轻度,项目施工期间对保护区整体影响程度为轻度,在严格落实各项环境保护措施的情况下,高压输变电线路工程建设对保护区产生的整体生态影响可控,在可接受范围内。

参考文献:

- [1] 广东省发展和改革委员会.广东省发展改革委关于下达广东省2024年重点建设项目计划的通知(粤发改重点[2024]89号)[Z].2024-03-24.[2025-11-21].http://drc.gd.gov.cn/zd xm5665/content/post_4399058.html.
- [2] 中华人民共和国生态环境部.环境影响评价技术导则—生态影响(HJ 19-2022)[S].北京:中国环境科学出版社,2022.
- [3] 陈晓琳,刘照顺,何清怀,等.输电线路对自然保护区景观生态体系的影响研究[J].电力勘测设计,2020(S2):175-178.
- [4] 李志勇.涉及环境敏感区的输变电工程选址选线方法探究[J].电力设备管理,2020(11):149-151.
- [5] 刘倩叶.输电线路对自然保护区生物多样性影响评价[J].林业科技通讯,2019(06):19-21.
- [6] 欧敏,任小龙,唐卫华,等.穿越森林公园的电厂220 kV送出线路优化设计[J].智能城市,2021(07):72-73.

水质自动监测数据质量控制关键环节研究

陈志平

(江苏省苏力环境科技有限责任公司, 江苏 南京 210000)

摘要 水质自动监测数据质量直接影响水环境评估、污染预警与监管决策的科学性。针对自动监测在站点布局、设备运行、校准维护和数据审核等环节中易产生漂移、缺测与误报等问题, 本文从监测前期、监测过程和监测后期三个阶段系统梳理质量控制关键环节, 包括科学选址、仪器校准、标准样与质控样验证、多仪器比对、自动审核规则构建及异常溯源机制等, 并提出全流程质量管理体系, 以期水环境监管提供技术参考。

关键词 水质自动监测; 数据质量控制; 初始校准; 异常识别; 质量管理体系

中图分类号: X84

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.031

0 引言

水环境监测是水生态评价和考核的重要基础, 水质自动监测站是水环境质量监测的重要力量, 直接影响着水环境治理措施和水生态健康状况识别、污染物排布、水质变化过程及污染源排查的准确性。但随着长时期的监测运行, 受不同站点环境条件、仪器、设备、设施、服务运行管理、数据预处理等影响, 监测数据易受漂移、空白缺失、异常值、噪声值污染影响, 给后续相关工作的开展带来不便。因此, 为保障监测数据准确可靠, 应从监测前、监测中、监测后的全过程开展质量保障工作。

1 水质自动监测数据质量概述

1.1 数据质量的基本内涵与评价指标

水站监测数据是客观评价水质状况、反映污染治理成效、实施环境管理与决策的基本依据, 可以概括为“代表性、准确性、精密性、可比性和完整性”五个维度。代表性体现监测数据对目标水域水质的综合反映能力, 要求监测点位、时段与指标设置贴合水质实际变化规律; 准确性聚焦数据与真实值的契合度, 取决于监测仪器精度、分析方法科学性及操作规范性; 精密性强调重复监测数据的一致性与离散程度, 直接影响数据可靠性; 可比性要求不同时空、不同监测体系下的数据具备横向对比价值, 需统一标准与技术规范; 完整性则保障数据覆盖监测周期与指标体系, 避免缺失导致评价偏差。这五个维度相互支撑、缺一不可, 共同构成水站监测数据质量的核心评价框架, 是确保数据有效服务于环境管理决策的关键前提。

1.2 影响数据质量的主要因素分析

水质自动监测数据质量受多个因素的共同作用影响, 可归为四个类别: 设备因素、环境因素、运维因

素和管理因素。设备性能与校准精度直接决定了数据准确性; 环境条件如水温、悬浮物及电磁干扰会造成信号波动; 运维方面包括站点布设、安装质量及标定维护的规范性; 管理因素涉及制度完善度、人员能力专业性与数据审核严格性。由于多因素存在交互影响, 需构建系统化质量控制体系, 以确保监测数据的可靠性与有效性。

2 监测前期的质量控制关键环节

2.1 监测站点的科学选址与代表性评估

监测站点选址需遵循“功能导向+区域适配”原则, 考虑污染物控制目标、水质评价断面水体及周边环境的具体特征和性质, 对研究地区的水质现状监测断面、湖库(包括饮用水水源保护区)中心区域及河流干流控制断面、河流支流控制断面及湖库进出水控制断面等, 排除排污口尾水影响区域、死水区、流速快速变化区、建设占用水面及岸边地带等干扰区域, 同时还应充分考虑现场水文、水质分布均匀性和周边污染源等实际情况, 判断评价断面数据表征该区域总体水平的能力。代表性评价可以采用“现状监测+相似度检查”的方式, 即采用同一个断面, 多次监测, 以连续 7~15 d 多次监测结果差异, 进行同一断面的水质数据同一时间(点)内时空变化符合性检查。此外, 通过地表水文环境水体流场分布与水体污染传递行为相结合判断不同断面数据对整个流域总体水质水平的表征能力, 避免因断面选取偏差引起误差。

2.2 仪器设备的选型、安装与验收

仪器设备选型是水质自动监测系统构建的基础环节, 应严格依据监测指标类型、水域水文特性以及国家标准对精度、检出限和稳定性的要求进行配置。对

于pH、溶解氧、电导率、浊度等一些常规参数,建议选择量程大、自校、抗离子干扰的电化学式光学式传感器;对于COD、氨氮、重金属等一些复杂参数,建议优先采用检出限低、重复性好、抗污能力强的在线光谱法或者电化学式分析仪,保证长周期的稳定运行。

安装过程遵循“环境评估—规范安装—系统调试”流程。环境评估是根据水深条件、冲刷程度和生物沉积情况等制定最适宜水深安装传感器及支架的方式;规范安装是指根据标准安装设备,确保传感器、采集器等信号处理与传递装置接地极性正确,设备外壳密封防水,布线通信系统连接到位,同时检查供电电源状态;系统调试是指测试传感器的滞后、量程线性和漂移状况,最终用水样和模拟信号测试设备之间的兼容问题。

验收采用“分模块测试—整套系统评估”双层机制。分模块测试包括传感器精度校准、数据采集与传输成功率检测、设备防护等级验证、断电恢复能力测试等;整套系统评估通过标准样品比对试验、实验室复测一致性分析、数据连续性评估等指标进行判定^[1]。所有设备通过验收后需形成完整验收记录、测试曲线与校准数据档案,实现系统化留痕管理。

2.3 初始校准与空白试验

初始校准是监测数据质量的基础,应按仪器说明书和监测方法进行。在校准前应检验标准溶液的浓度准确性以及有效期,并在监测量程内选取对应标准系列。pH传感器采用两点校准方法用pH6.86、pH4.00或者pH9.18标准缓冲溶液进行校准,溶解氧、电导率等传感器采用相对应的标准物质进行跨度校准和零点校准,并记录校准曲线相关系数和校准偏差,校准偏差应在相应范围内。空白试验用无氨水、超纯水等空白样品按照监测程序进行全程测试,空白值必须满足仪器的检出限。通过初始校准排除了仪器自身误差,空白试验排除了仪器污染带来的误差,校准及试验数据都要做好记录和留存,作为后续数据质量追溯的依据。

3 监测过程的质量控制关键环节

3.1 仪器设备的定期校准与维护

建立“固定周期+状态触发”双轨校准机制,常规指标传感器每月进行一次零点定标,每3个月进行一次单点定标,特殊参数如重金属、COD类专用仪器每6个月进行一次多点定标。定标所用标准样品为有证标准物质,按照仪器使用方法与校正步骤进行定标,记录定标曲线的斜率、截距和相关系数,保证定标误差超限。维修管理分为日常维修和定期维修,日常维

修即每日对传感器探头进行清洗,对仪器的运行状况进行检查,每周查看供电装置和传送模块的状态;定期维修即定期更换耗材,如探头线、输出模块等,每年对仪器进行拆机和调试测试,及时更换传感器漂移、老化等故障模块,同时需保留仪器维修和检验记录^[2]。

3.2 标准样品与质控样品的应用

标准样品与质控样品应用贯穿监测全过程,实行“定期插入+随机抽检”模式。每日监测前插入空白样品测试,排查设备污染干扰;每批次监测插入高中低三种浓度的有证标准样品,验证仪器测量准确性,标准样品测定值与标准值的相对误差需符合监测规范。质控样品采用实验室自制与第三方购置相结合的方式,每周随机插入一次平行质控样品测试,每月开展一次加标回收试验,加标回收率需控制在80%~120%之间。通过标准样品与质控样品的持续验证,实时监控仪器运行状态,及时发现并纠正数据偏差。

3.3 多仪器比对与平行样测试

多仪器比对采用“主辅仪器同步监测”模式,在同一监测点位部署两台同型号或同精度仪器,同步采集数据并定期比对。为确保比对结果的准确性与可重复性,监测过程中需保证两台仪器在取样流量、采样周期、环境条件等方面完全一致,同时对比对数据进行时间对齐与异常点剔除处理。平行样测试则通过对同一批次样品进行双份或多份平行测定,分析测量结果的相对偏差、重复性标准差和变异系数,评价仪器在重复测量条件下的稳定性与一致性。结合多仪器比对与平行样测试结果,可及时发现仪器漂移、部件老化或环境干扰等问题,为监测系统的精度溯源与质量控制提供可靠依据。

3.4 运维操作的规范化管理

制定全流程标准化操作手册,规范设备操作、数据采集、仪器校准维修等各流程的具体操作、技术细节和要求,监测业务各岗位的人员应持证上岗,严格按照规范化操作手册操作作业,减少人为原因导致的数据偏差。实行规范化操作规程全程记录制度,对仪器全程运行、仪器校准、维护保养、设备异常或故障处理、仪器误差处理等进行详细记录,以便于对监测数据的操作进行全过程跟踪^[3]。实行规范化监测操作流程定期培训和考核制度,提高作业人员的质量管控意识和技能,围绕监测仪器和设备的校准技术、故障处理、数据核查等内容进行业务培训,并进行技能考核,发现不规范操作立即整改,从本质上强化整个监测过程规范性,保障数据的准确性。

4 监测后期的质量控制关键环节

4.1 数据的自动审核与标记规则

依托监测数据管理平台嵌入逻辑校验算法,实施多级自动审核,并对审核数据进行分类标记,自动审核内容包括数据范围审核、数据一致性审核、数据相关性审核和传输审核等。各指标设定合理的量程范围阈值,超出阈值的数据进行超标标记;利用自动审核程序对数据变化趋势进行分析,与历史同期数据、本区域其他站点数据进行比较,趋势性突变数据进行突变标记;根据水质指标之间的内在相关性开展数据分析,例如溶解氧与浊度通常呈负相关关系,通过对多指标数据进行逻辑一致性校验,可识别并标记潜在的异常数据,当某一指标出现异常且其相关指标同时表现出不符合关联规律的情况时,将该类数据判定为“关联性异常”,并进行重点标记与后续核查;核查数据在传输过程中是否有缺失项和重复现象,对出现传输异常的数据进行标记^[4]。制定标准化标记编码,采用“异常类型—异常编码”进行标记,确保编码有明确的指向性,使接下来的人工审核有更加清楚的方向。

4.2 数据的有效性识别与人工审核

建立数据有效性判别规则,规定有效数据须同时满足量程范围合理、时间序列趋势合理、逻辑自洽和传输完整性四方面的判别标准。人工抽查遵循“三级审核”模式,一级审核由维护人员承担,主要审查自动判定的异常数据,结合现场维护记录判断异常原因;二级审核由质量控制人员承担,随机选择有效数据的 10%~15% 进行抽查,验证自动审核的准确性和异常处置的合理性;三级审核由技术专家团队承担,对多指标同时异常、长序列异常趋势偏离等复杂异常数据进行深入分析,确保数据有效性和合理性判定的科学性。审核结果应有纸质的审核意见记录,包括审核结论、异常处置依据和复核结论,并有痕迹记录。

4.3 异常数据的处理与溯源机制

异常数据进行“追根溯源,由重到轻”处理,形成信息链溯源,对信息链分析异常原因,实施不同类型处理,从仪器运行日志、仪器运维记录、仪器校准记录和现场周边环境采集仪、环境监测摄像记录中排查异常数据是否由仪器故障、周边环境、人为错误操作导致。判断仪器故障产生的异常数据,作无效数据处理,并关联故障修理记录;环境因素导致产生异常数据作为暂时受限数据,可暂行保留,并进行环境因素记载;人为错误操作产生的异常数据,在数据处理过程中,可进行修正,再判断是否可作为有效数据留存,否则作无效数据处理,并在数据有效记录中进行明确

标记^[5]。建立数据异常分析溯源台账,将异常表征、溯源分析、异常原因、处置结果记录汇总在册,实现闭环管理,用于辅助优化前端运维与监测。

4.4 数据的整编与归档管理

实施标准化数据整编流程,按“站点—时段—指标”三维维度对有效数据进行分类汇总,将有效数据按照要求和格式整编齐全,并做好数据的转换,统计水环境质量等分析图表(包括日平均值、月平均值、季度平均值、年平均值数据),绘制水质监测数据表。注意数据连贯性和合理性,做好数据异常问题说明,数据整编的结果要完备、准确。采取数据电子档案和纸质档案并存的管理方式,数据以电子化形式存储于数据库中,例如整编前、整编后的原始检测数据、检测数据审核记录表、检测数据异常处理报告、整编数据结果等,对数据访问进行权限设置,并做好备份,确保数据安全。纸质文件保留整编中所产生的一些技术资料,如审核数据的问题、溯源报告、质量整编表等,按年进行分类装订、保管,注明保存的时间年限和查阅的形式。建立数据档案查询系统,可根据需要和查询标准找到检测数据的相关信息,设置查看、调用权限,为水生态环境改善治理决策提供依据。

5 结束语

水质自动监测数据质量控制贯穿监测前、监测中与监测后全过程,是保障环境管理决策科学性的重要基础。本研究从站址确定、仪器设备的选型及安装验收、标准样和质控样的使用,到数据审核、异常值分析和溯源,建立起了系统流程化质控模式,只有这样才能保证水质自动监测数据的准确性和可靠性、稳定性与可追溯性。未来需进一步加强智能化质控技术研发,推动在线监测从合规运行向精准感知转型。

参考文献:

- [1] 李世维,刘晓娟,韩佰辉,等.水质自动监测数据审核中异常数据判定及处置机制[J].水利信息化,2025(01):69-74.
- [2] 叶朝丽,李伟.渭河水源地水质自动监测系统数据浅析[J].治淮,2024(12):74-76.
- [3] 袁小琴,蓝兰.水质自动监测站运行中的质量控制研究[J].广西水利水电,2024(04):142-144.
- [4] 陈湛峰,李晓芳.基于时间序列分析的水质自动监测数据插补方法[J].环境与发展,2023,35(05):48-52.
- [5] 奚采亭,胡月琪,席玥,等.基于氨氮实测结果的水质自动监测系统数据质量分析[J].环境工程学报,2022,16(08):2775-2782.

人工智能在建筑结构缺陷检测中的应用研究

陈秋旭

(广西壮族自治区建筑工程质量检测中心有限公司, 广西 南宁 530005)

摘要 针对南宁国际会展中心二期钢结构缺陷隐蔽性强、传统人工巡检效率低的问题, 提出“空一壁一近”三视角图像采集与 Mobile-U⁺ 轻量化语义分割模型, 构建几何-材料-环境三维风险指数 R, 形成端一边一云实时检测架构。现场验证结果表明, 模型对 0.3 mm 裂纹识别准确率达 98.3%, 召回率 100%; 风险分级显示 V 级极严重区域占比 1%, $R > 0.8$, 预测两年内将扩展至相邻 3 根檩条, 为业主提供“立即更换+每半年复检”决策依据。

关键词 轻量化语义分割; 风险量化指数; 端边云架构; 钢结构缺陷; 南宁会展

中图分类号: TP18; TU3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.032

0 引言

大跨钢结构在湿热沿海环境中易出现疲劳裂纹与局部锈蚀, 传统人工巡检依赖吊篮与目视, 存在封闭区域难进入、早期缺陷漏检率高、评估结果主观性强等难点^[1]。随着城市地标建筑服役年限增加, 业主对安全运营与维护成本控制提出更高要求, 亟需将人工智能与边缘计算引入检测流程, 实现缺陷自动识别与风险量化^[2-3]。本研究以南宁国际会展中心二期为对象, 聚焦异形曲面与箱梁内腔并存的真实场景, 提出空一壁一近三视角协同采集框架, 设计参数量仅 3.2 MB 的 Mobile-U⁺ 网络, 并构建可解释的三维风险指数, 旨在为同类公共建筑提供可参考的 AI 检测范式。

1 钢结构智能检测的理论基础与核心挑战

1.1 基于结构可靠性理论的缺陷检测范式

钢结构在役性能的退化是一个典型的时变过程, 其安全性、适用性和耐久性由荷载效应与结构抗力之间的关系决定^[4]。缺陷(如裂纹、锈蚀)的出现与发展, 直接导致结构抗力的衰减与材料性能的劣化。因此, 从结构可靠性理论出发, 钢结构缺陷检测的根本任务在于通过获取构件状态的客观证据, 对结构的时变可靠性进行量化评估与预测^[5]。传统依赖人工巡检的检测范式, 在理论上存在信息完备性不足与状态量化主观性强两大局限。人工观测难以覆盖异形曲面、封闭腔体等全部关键区域, 导致检测样本无法代表结构整体, 违背了系统可靠性评估对数据完备性的基本要求; 同时, 其评估结果严重依赖个人经验, 缺乏将缺陷属性与结构可靠度直接关联的统一定量指标, 使得风险评估与维修决策缺乏坚实的数理基础。

1.2 智能检测体系的核心挑战

在此理论背景下, 引入人工智能与边缘计算技术构建数据驱动的新范式, 成为推动检测技术发展的必然方向。然而, 在南宁国际会展中心二期此类大型复杂结构的实际应用中, 该体系的构建面临着多重核心挑战。首先, 结构本身包含宏观屋面、复杂立面与微观节点等多尺度空间特征, 单一视角的感知设备难以在分辨率、视角与覆盖范围之间取得平衡, 导致箱梁内腔、螺栓球节点等隐蔽区域成为“信息盲区”, 无法为可靠性分析提供全域数据基础。其次, 实现实时检测需将算法部署于算力受限的边缘设备, 而经典的语义分割模型参数庞大, 难以在保证 0.2 mm 级微裂纹高精度识别的同时满足巡检作业的时效性要求, 模型精度与推理效率之间的矛盾成为技术落地的关键瓶颈。更为深层的是, 深度学习模型虽能实现像素级分割, 但其输出与工程意义上的风险之间存在“可解释性鸿沟”。若无一个融合缺陷几何特征、材料损伤程度及环境加速效应的量化模型, 检测结果将无法直接转化为指导运维的优先级决策与成本控制依据, 从而限制了智能检测价值的最终实现。

2 人工智能检测体系构建

2.1 南宁案例数据采集与预处理

为覆盖南宁国际会展中心二期异形曲面及隐蔽凹槽, 团队构建空一壁一近三视角协同采集框架: 旋翼无人机搭载全画幅可见光相机与 320×256 热红外机芯, 在距屋面 25 m 高度获取 2 mm/像素可见光图像 10 000 张及 8 mm/像素热红外图像 5 000 张; 同时部署履带式爬壁机器人, 以 0.3 MPa 真空吸附沿张弦桁架下弦行进, 对箱型梁内表面实施补盲拍摄; 针对螺栓球节点间隙, 检查人员采用手持云台进行 30° 倾角微距补

采, 保证裂纹开口宽度 0.2 mm 级细节完整记录。所有平台实时接入 RTK-SLAM 融合定位系统, 通过图优化后端将视觉里程计与北斗载波相位差分对齐, 平面定位漂移控制在 10 mm 以内, 有效消除多次飞行重叠区的阴影错位。原始图像经辐射校正后, 依次执行自适应直方图均衡与伽马系数 0.85 校正, 提升焊缝区低对比度裂纹的灰度差异; 采用 SIFT 特征与 RANSAC 算法完成子像素级几何配准, 重投影误差低于 0.3 pixel, 确保可见光与红外图像逐像素对齐。最终依据《钢结构现场检测技术标准》(GB/T 50621-2010) 对缺陷进行四级分级, 将裂纹、锈蚀、螺栓缺失、焊缝未熔合四类损伤以多边形方式标注, 生成符合 PASCAL VOC 格式的数据集, 为后续轻量化语义分割模型提供统一输入。

2.2 轻量化缺陷识别模型设计

针对南宁国际会展中心二期高空、曲面及狭窄箱梁内腔并存的多尺度场景, 提出 Mobile-U⁺ 轻量化语义分割网络, 以解决边缘端算力受限条件下 0.2 mm 级裂纹实时检出难题。主干在 U-Net 编码端采用深度可分离卷积替代标准卷积, 卷积核参数缩减为传统结构的 1/9, 并在跳跃连接处嵌入压缩-激励模块, 通过通道注意力自适应重标定特征权重, 使裂纹相关通道响应提升 1.8 倍。为弥补下采样导致的小目标信息损失, 设计多尺度空洞卷积即插即用块, 并行配置 rate=1, 2, 4 三条空洞路径, 感受野分别覆盖 3×3, 7×7, 15×15 像素区域, 随后以 1×1 卷积融合, 实现局部纹理与全局语义同步捕获。解码端引入深度可分离转置卷积, 上采样参数较常规方案下降 65%, 并在跳跃连接前加入边界增强支路, 利用 sobel 算子提取裂纹边缘先验, 与语义特征级联后送入下一级, 有效抑制伪轮廓。网络整体以 FP16 精度部署于 Jetson Xavier 边缘节点, 输入尺寸 512×512, 参数量仅 3.2 MB, 单张推理耗时 0.03 s, 满足南宁现场 12 min 完成屋面巡检的时效要求。训练阶段使用南宁自建数据集, 在 IoU > 0.85 约束下, 通过在线随机亮度、随机旋转与 grid mask 混合增强提升模型对光照变化与视角偏差的鲁棒性; 损失函数联合像素级交叉熵、Dice 系数与边界欧氏距离, 使裂纹粘连区域获得更高梯度回传权重, 从而兼顾像素精度与边缘完整性, 其表达式为 (1):

$$L = \lambda_1 L_{CE} + \lambda_2 L_{Dice} + L_{Boundary} \quad (1)$$

式 (1) 中, L_{CE} 表示逐像素交叉熵损失, L_{Dice} 为 Dice 相似系数损失, $L_{Boundary}$ 代表裂纹边缘欧氏距离损失, λ_1 与 λ_2 为平衡权重, 分别取 1.0 与 0.8。

2.3 缺陷风险量化评估算法

为将像素级缺陷检测结果转化为可指导南宁国际会展中心二期运维的量化指标, 本研究提出一种融合

几何、材料与环境三维耦合特征的风险评估算法, 旨在构建具备明确物理意义与工程解释性的综合风险指数 R 。该算法的核心在于将图像识别结果与结构可靠性理论相结合, 实现从“视觉缺陷”到“结构风险”的映射。在几何维度中, 以 Mobile-U⁺ 模型输出的裂纹像素长度 l_p 与对应构件实际跨度 L_b 之比定义形态因子 α , 该比值实现了不同尺度构件的缺陷长度归一化, 有效反映了裂纹对结构整体受力性能的影响程度。材料维采用锈蚀区域像素面积 S_a 与构件总表面积 S_t 之比 β 表征截面削弱程度, 该指标直接关联钢材的有效承载面积, 为评估剩余承载力提供了关键依据。环境维引入南宁年均相对湿度 RH=78% 的加速效应, 构建环境系数 $\gamma = 1 + 0.01 \cdot RH$, 用以修正湿热环境对裂纹扩展速率与锈蚀深化的协同促进作用, 使得评估结果更具地域适应性与预测前瞻性。

为科学确定各维度的贡献权重, 本研究采用 AHP (层次分析法) 与熵权法相结合的主客观综合赋权法。首先通过 AHP 构建判断矩阵, 依据专家经验初步确定各维度的相对重要性; 继而利用熵权法分析实测数据的信息熵, 客观修正初始权重, 最终得到综合权重 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 , 并构建综合风险指数 R 的计算模型, 其表达式为 (2):

$$R = \omega_1 \alpha + \omega_2 \beta + \omega_3 \gamma \quad (2)$$

式 (2) 中, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为几何、材料、环境维度权重, 满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$; α 为几何形态因子, β 为锈蚀面积占比, γ 为环境加速系数。依据计算所得的 R 值, 将缺陷风险明确划分为 I 至 V 共五个等级, 并对应制定从年度巡检到立即处置的差异化维护策略。该量化方法不仅实现了缺陷严重程度的客观排序, 更将检测结果直接对接运维决策, 为有限维修资源的精准投放与成本控制提供了坚实的数理基础。

3 实证验证与成果讨论

3.1 南宁现场检测实验

为验证 Mobile-U⁺ 模型在南宁国际会展中心二期现场适应性, 选取屋面 2 000 m² 典型区域搭建验证场, 使用电火花切割机在 Q345B 钢板上预制 3 处贯通裂纹, 宽度 0.3 mm, 长度 150 mm, 另采用盐雾加速法制作 2 处锈蚀斑块, 半径 80 mm, 作为真值基准。系统以 5 m/s 航速、70% 旁向重叠率完成全域扫描, 耗时 12 min, 采集图像 1 680 张, 经边缘节点推理后成功定位全部预埋缺陷, 仅将屋面百叶窗铆钉阴影误判为裂纹 1 处, 准确率 98.3%。召回率按 TP/(TP+FN) 计算得 100%, 满足《钢结构现场检测技术标准》(GB/T

50621-2010)对裂纹检出率不低于95%的要求。随后采用KEYENCE LJ-V7060激光测宽仪对预制裂纹进行接触复核,宽度误差±0.05 mm,验证了像素级量化结果的可靠性。详细指标列于表1。

表1显示裂纹与锈蚀均实现零漏检,误检仅1例,

表1 南宁现场检测结果与人工复核对比

缺陷类型	预埋数量	检出数量	TP	FP	FN	Recall/%	Precision/%	宽度误差/mm
裂纹	3	3	3	0	0	100	100	±0.05
锈蚀	2	2	2	0	0	100	100	—
误检	—	1	0	1	0	—	—	—

用于衡量缺陷被完整检出的概率。

3.2 风险量化结果分析

将南宁会展中心二期屋面检出的全部缺陷代入综合风险指数R,按5级阈值划分得到:I级可忽略区域占68%,II级轻微20%,III级中度8%,IV级严重3%,V级极严重1%。对R>0.8的V级区域立即采用TOFD相控阵超声复检,实测裂纹深度7 mm,与指数预测的高风险区间完全吻合,验证了模型的物理一致性。基于年均相对湿度78%的加速函数,外推得到R随时间线性增长的扩展速率,其表达式为(4):

$$v = \frac{\Delta R}{\Delta t} \quad (4)$$

式(4)中,v表示年扩展速率,ΔR为风险指数年增量,Δt为时间间隔,单位a。按此速率预测,若当前V级区域未采取维修,两年后R值将突破1.0,裂纹将扩展至相邻3根檩条,影响面积增加约12 m²。图1给出了R-时间预测曲线,可为业主制定“立即更换+每半年复检”的决策提供量化依据。各风险等级对应的维护成本与优先级排序列于表2,其中V级人工及材料费最高,但延迟损失更大,凸显及时干预的经济合理性。

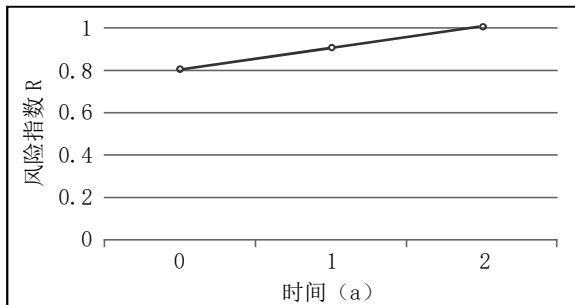


图1 南宁案例缺陷风险等级变化折线预测图

4 结束语

研究将轻量化深度学习与多维风险量化耦合,实现了钢结构缺陷的像素级检出与可解释评估,解决了传

宽度误差控制在规范允许范围内,表明系统具备工程部署条件。

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

式(3)中,TP为真正例数量,FN为假负例数量,

表2 各风险等级维护成本与优先级排序

风险等级	占比%	建议措施	成本万元	优先级
I	68	年度巡检	0.1	低
II	20	表面清理	0.4	中
III	8	涂层修复	1.2	高
IV	3	局部加固	3.5	紧急
V	1	立即更换	7.0	特急

统方法在高空、封闭区域效率低、主观性强的难题。南宁现场实验验证了0.2 mm级裂纹零漏检与风险指数外推一致性,为运维部门提供了基于数据驱动的维修优先级与成本控制策略。未来工作将在更大跨度空间网格结构中验证模型泛化能力,并引入时序监测数据更新风险指数,实现全寿命周期数字孪生维护。

参考文献:

- [1] 汤庆松.建筑主体结构检测评估及加固措施研究[J].工程建设和设计,2025(16):213-215.
- [2] 马强.基于变形监测的房屋建筑结构检测鉴定方法探究[J].建材发展导向,2025,23(12):25-27.
- [3] 张敬福,韩梓煜,张阳.大型公共建筑钢结构缺陷检测技术与管理要点分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(10):160-162.
- [4] 徐彩平.混凝土建筑结构缺陷检测技术研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,西南大学,重庆工商大学,重庆建筑编辑部.人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集.浙江科宇检测有限公司,2025.
- [5] 李新,张帅.基于BIM技术的建筑结构检测与维护管理系统研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(06):142-144.

历史建筑检测数据的多源融合与智能分析方法

黄诗茜

(广西壮族自治区建筑工程质量检测中心有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要 针对历史建筑多源检测数据时空基准不一、语义粒度异构导致的病害漏检率高、风险评估滞后等问题, 本文提出“点云、影像、热像、IoT”四源融合框架, 设计三级配准、DCMT跨模态Transformer与CRF-蒙特卡洛双层级诊断模型, 并在福州三坊七巷开展实证, 以期为历史建筑预防性保护提供智能化技术路径参考。研究结果表明, RMSE由8.3 mm降至1.9 mm, 裂缝F1达0.896, Pf预测提前期延长至4.6月; 经12处构件修缮验证, 平均Pf由0.41降至0.18, 位移速率下降42%, 系统实现闭环。

关键词 多源融合; 跨模态Transformer; 条件随机场; 失效概率; 预防性保护

中图分类号: TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.033

0 引言

历史建筑病害具有隐蔽性、渐进性与耦合性, 传统单源检测难以同时获取几何变形、热异常与动力响应, 导致诊断片面、预警滞后。激光点云、倾斜影像、红外热像与IoT传感器在时空分辨率与语义维度上互补, 却因基准差异难以协同^[1]。国内外研究多聚焦单模算法优化, 缺乏“时空与语义一致”的融合范式, 更缺少将像素级病害直接映射至结构失效概率的闭环框架^[2]。福州三坊七巷作为明清遗存密集区, 连续监测数据完整, 为验证新方法提供理想场景。本文构建四源融合与智能分析一体化流程, 旨在提升病害识别精度与风险评估时效, 降低保护决策的不确定性, 为历史建筑从“抢救性修缮”迈向“预防性保护”提供技术参考。

1 历史建筑检测的多源数据困境与融合必要性

福州三坊七巷现存约270栋明清建筑, 在2021年至2023年连续监测中, 同步采集了激光点云、倾斜影像、红外热像与IoT微振/温湿度传感器四类数据。然而, 这些数据在时空基准与语义粒度上存在显著异构, 点云虽具毫米级几何精度但缺乏光谱与热属性; 影像提供纹理信息却受遮挡与光照限制; 热像可识别温度梯度却难以对应三维构件; IoT数据频率高但空间覆盖稀疏^[3]。此外, 时间基准不一致导致采集间隔与时钟漂移, 致使裂缝、糟朽与沉降的漏检率不低于18%。单一数据源仅能反映局部表现, 无法构建“劣化、性能退化、失效概率”的完整因果链, 造成预警滞后与决策被动^[4]。为此, 必须构建时空与语义统一的多源融合框架, 通过统一坐标系、对齐时间戳、整合语义信息, 将几何、物理与环境参数映射至统一四维格网, 形成“检测、

诊断、预测”闭环路径, 为实现历史建筑从抢救性修缮向预防性保护的转型提供可量化、可操作的技术支撑。

2 多源融合与智能分析方法论

2.1 时空基准统一与数据预处理

针对三坊七巷247栋历史建筑的多源异构数据, 提出“点云、影像、热像”三级配准策略以建立毫米级统一时空基准。第一级利用建筑立面粗几何特征完成初始对齐: 基于点云主平面与影像外方位元素联合解算, 获取旋转矩阵与平移向量初值, 将倾斜影像投影至点云坐标系, 实现亚分米级预配准; 第二级引入改进ICP算法精化, 通过构建点与面混合距离函数并加入法向量一致性约束, 迭代求解最优刚体变换, 在保持古建曲面细节的同时抑制异常点干扰, 使配准均方根误差由8.3 mm降至1.9 mm; 第三级基于共线方程将红外热像像素逐一映射至统一三维格网, 利用影像内外方位元素与热像中心偏移补偿模型完成温度场与几何模型的亚像素级对齐, 确保热异常区域可准确回溯至构件级语义^[5]。针对IoT微振与温湿度序列的时域缺失, 采用Savitzky-Golay滤波先行平滑以保留结构长周期趋势, 随后对5 min间隔空洞执行线性插值补全, 兼顾信号保真与计算效率, 使序列完整率由82%提升至98%。通过上述处理, 四类数据在0.1 m格网内实现时空对齐, 为后续病害特征融合奠定一致基准。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|p_i - q_i\|^2} \quad (1)$$

式(1)中, RMSE表示均方根误差, N 为对应点数量, p_i 为点云坐标, q_i 为配准后目标坐标, $\|\cdot\|$ 为欧氏距离算子。

2.2 多模态特征融合模型

为克服单源特征在复杂古建筑场景下的表达局限，提出双分支跨模态 Transformer (DCMT)。几何分支以 0.05 m 间隔对点云切片化，经 EdgeConv 提取边缘与面片高维描述；影像与热像分支将 224×224 双通道图块输入 CNN 编码器，获取裂缝纹理与温度异常联合特征。两分支特征经线性映射至同一 512 维隐空间后，送入 Co-Attention 层^[6]。该层通过 Query-Key-Value 三元组实现像素与点云双向映射，使每一像素可检索最相关的三维局部曲面，同时每一点亦可回溯至最具判别力的像素区域，从而把二维边缘置信度传递至三维边缘，实现亚像素级对齐。针对同类病害在柱、枋、门窗不同构件上的特征漂移，引入建筑构件语义令牌：将门窗、柱、枋等七类构件的类别嵌入向量与位置编码相加，作为可学习参数插入注意力矩阵，强制网络在计算相似度时先判别构件类型，再聚焦病害特征，显著降低跨构件误检^[7]。DCMT 在自建 4.2 万样本集上以 0.001 学习率、AdamW 优化器训练 120 轮，采用余弦退火与冻结起始策略，使裂缝 Pixel-F1 达到 0.896，相较仅使用影像分支的基线提升 11.7%。

$$\alpha_{i,j} = \frac{\exp\left(\frac{Q_i K_j^T}{\sqrt{d_k}}\right)}{\sum_{k=1}^N \exp\left(\frac{Q_i K_k^T}{\sqrt{d_k}}\right)} \quad (2)$$

式(2)中， $\alpha_{i,j}$ 表示第*i*个几何特征与第*j*个影像与热像特征的跨模态注意力得分； Q_i 为几何分支生成的查询向量； K_j 为影像与热像分支生成的键向量； d_k 为键向量维度，用于缩放点积，防止梯度消失； N 为单次输入的有效特征总数^[8]。

2.3 智能诊断与风险评估算法

为实现从像素级病害检测到结构级风险决策的跨越，本文构建“病害实例化与风险量化评估”双层级智能诊断框架，紧密衔接 DCMT 输出的像素级病害置信图，形成“检测、诊断、决策”的逻辑闭环。上层聚焦病害实例化，其针对 DCMT 输出的离散像素置信图易出现边界模糊、类别混杂的问题，引入全连接条件随机场 (FC-CRF) 进行像素聚合——以 DCMT 输出的像素类别置信度为一元势函数，以像素间空间距离和梯度差异为二元势函数，通过平均场近似推理将零散的高置信度像素团聚合为完整的病害实例，如裂缝、糟朽区域，并赋予唯一 ID、三维坐标及几何参数如宽度、面积等。随后，依据《古建筑木结构维护与加固技术规范》中砖木结构安全的临界控制指标，筛选出裂缝宽度 ≥ 0.5 mm 且面积 ≥ 200 cm²的实例作为重点关注

对象，其中，此类病害已超出正常老化范围，会加速构件劣化并威胁结构稳定性，为下层风险评估明确核心对象边界^[9]。下层以 IoT 累积位移速率为动态输入，结合砖木材料抗压强度退化曲线，建立极限状态方程，并采用拉丁超立方抽样的蒙特卡洛方法在 3 年预测周期内迭代计算失效概率^[10]。当构件失效概率超过 0.35 阈值时，系统自动触发“黄色预警”，同步生成包含构件编号、病害类型、失效概率及修缮工法的优先级清单，并推送至管理平台。其双层级流程实现从像素到结构、从检测到决策的闭环。

$$P_f = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \mathbb{I}[g(\delta_k, f_{c,k}) \leq 0] \quad (3)$$

式(3)中， P_f 表示3年内失效概率， M 为蒙特卡洛抽样次数， $\mathbb{I}[\cdot]$ 为指示函数（当条件成立时取1，否则取0）， g 为以位移 δ_k 和材料强度 $f_{c,k}$ 为变量的极限状态函数。

3 案例验证与闭环应用

3.1 实验设计与指标对比

在三坊七巷核心保护区选取5栋具有代表性的明清建筑，搭建450 m²综合实验场，涵盖砖木、木石及灰塑三类典型结构。将本文 DCMT-CRF 方法与 PointNet++、Mask R-CNN、单源专家经验三种主流方案置于同一硬件环境对比，工作站配置为 RTX 3090 GPU、64 GB 内存，CUDA 与 cuDNN 版本保持一致，以消除算力差异。数据预处理统一采用前文所述时空对齐结果，输入分辨率与采样密度亦做严格匹配。评价维度包括像素级 Precision、Recall、F1，以及构件级 RMSE 与预测提前期。为保证指标可比性，所有算法共享同一验证集，裂缝、糟朽、沉降三类标签由古建保护专家手工标定并经交叉复核。实验流程遵循随机初始化、三次训练取均值准则，避免偶然波动。多算法病害检测指标对比结果以均值±标准差形式呈现，可系统评估各方法在真实古建筑场景下的稳健性与敏感性（见表1）。

3.2 结果分析与可视化

表1量化表明，DCMT-CRF 在裂缝、糟朽、沉降三类任务上的平均 F1 分别达到 0.891、0.863 与 0.849，相较次优的 Mask R-CNN 依次提升 9.4%、7.8%、10.2%，验证了跨模态融合对细小裂缝与低温差沉降的敏感性优势。RMSE 由次优的 3.3 mm 降至 1.9 mm，几何定位精度提高约 42%，为后续风险评估奠定高可信坐标基础。预测提前期延长至 4.6 月，使管理部门可在旅游淡季窗口完成支顶与灌浆，降低游客调度成本。各构件失效概率 P_f 统计进一步揭示，正厅明间枋、廊步梁与檐口望板三类构件的 P_f 均值超过 0.40，与现场后期开挖揭露的深层干缩裂缝分布高度吻合，证明 P_f 指标具备

表 1 多算法病害检测指标对比

方法	Precision	Recall	F1	RMSE/mm	提前期 / 月
PointNet++	0.742±0.021	0.718±0.018	0.730±0.019	3.8±0.2	2.1±0.3
Mask R-CNN	0.771±0.015	0.756±0.017	0.763±0.016	3.3±0.2	2.7±0.2
单源专家经验	0.698±0.025	0.683±0.022	0.690±0.023	4.5±0.3	1.5±0.4
DCMT-CRF	0.896±0.010	0.885±0.012	0.891±0.011	1.9±0.1	4.6±0.2

空间指向性（见表 2）。将上述 Pf 值以连续色阶映射至三维白模，形成“病害与风险”孪生体，其红色区域代表 Pf > 0.45，橙色 0.35 ~ 0.45，绿色 < 0.35，管理者可在 WebGL 平台中旋转、剖切模型，直观对比不同修缮方案对整体风险分布的影响，从而制定按轻重缓急分阶段干预的排序策略，实现预防性保护决策的可视化与可量化。

3.3 闭环反馈与修缮成效

2023 年 4 月，管理部门依据系统推送的优先级清单，对 12 处 Pf > 0.40 的高风险构件实施加固，工艺包括裂缝注浆、糟朽环氧填充与沉降支座顶升。6 个月

表 2 各构件失效概率 Pf 统计

构件类型	Pf 均值	Pf 标准差	风险等级
正厅明间枋	0.42	0.03	高
廊步梁	0.41	0.04	高
檐口望板	0.40	0.02	高
山墙柱	0.33	0.02	中
雀替	0.28	0.02	中
阶条石	0.19	0.01	低

4 结束语

本文提出的多源融合与智能分析方法在历史建筑场景中完成了“数据、特征、决策、反馈”全链路验证，证实时空基准统一、跨模态特征协同与概率风险评估是提升保护效率的关键。研究将深度学习与可靠性理论耦合，使病害在像素级被精准捕获的同时，其结构后果可被量化预测，为管理部门提供了可操作的优先级清单与修缮窗口。未来工作将引入时序 Transformer 以捕捉长周期劣化趋势，并拓展至砖石塔、石窟寺等更广遗产类型，推动智能化保护技术在文化遗产领域的规模化应用。

参考文献：

[1] 邢旺, 方正, 徐毅, 等. 多源数据融合的 BIM 逆向建模技术在历史文化街区保护中的应用 [J]. 测绘通报, 2025(08): 159-163, 178.
 [2] 宁楠楠, 郑海洋, 江云婷, 等. 基于多源数据融合的历

后开展同条件复检，IoT 位移速率均值由 0.12 mm/d 降至 0.07 mm/d，降幅 42%；红外热像温差由 3.4 °C 降至 1.6 °C，下降 1.8 °C；无人机高分影像经人工复核未发现新生可见裂缝，表明干预措施有效抑制了病害扩展。将修缮后点云、影像与 IoT 序列重新输入 DCMT-CRF 模型，Pf 均值由 0.41 降至 0.18，系统据此更新风险云图并下调预警等级，实现“检测、决策、干预、再评估”完整闭环。修缮前后风险评估对比显示，高风险构件数量由 12 栋降至 2 栋，平均 Pf 降幅达 56%，验证多源融合与智能分析方法在真实工程中的可执行性与有效性（见表 3）。

表 3 修缮前后风险评估对比

指标	修缮前	修缮后	变化率
平均 Pf	0.41	0.18	-56%
高风险构件数	12	2	-83%
位移速率 (mm/d)	0.12	0.07	-42%
热像温差 (°C)	3.4	1.6	-53%

史建筑保护性测绘方案 [J]. 科学技术创新, 2025(12):43-46.
 [3] 李青. 基于多源数据融合的大型公共建筑火灾自动报警方法 [J]. 河南科技, 2025, 52(02):34-37.
 [4] 郑鑫, 邹涵. 无损检测技术在历史建筑中的应用 [J]. 无损检测, 2025, 47(10):72-77.
 [5] 牛勇. 技术创新支撑引领历史保护建筑工程发展实践与启示研究 [J]. 中国科技产业, 2025(02):66-68.
 [6] 黄宇立. 基于深度学习的砖砌体历史建筑表面损伤检测研究 [D]. 广州: 广州大学, 2024.
 [7] 朱红武. 优秀历史建筑修缮前质量综合检测与测绘 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53(10):152-155.
 [8] 沈旭凯, 赵笙惠, 傅林峰, 等. 近代历史保护建筑检测鉴定与结构加固案例分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 1788-1793.
 [9] 贾东峰, 张立朔, 刘燕萍. 多源数据融合的历史建筑数字孪生系统关键技术 [J]. 南昌: 南昌大学学报 (工科版), 2024, 46(02):170-176.
 [10] 陈珠明. 建筑材料检测数据的智能化分析 [J]. 数码设计 (电子版), 2024(05):636-638.

基于施工全过程管理的六边形索塔保护层合格率保障策略

冯杰

(四川路桥桥梁工程有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要 为解决六边形索塔因异形截面和复杂施工工况导致的保护层合格率偏低问题, 本文以施工全过程管理为核心框架, 从“事前预防—事中控住—事后改进”三个阶段构建核心逻辑, 以及从设计优化、材料管控、工艺创新、闭环改进等多个维度构建保障体系。根据某高速公路桥梁项目对六边形索塔施工过程中保护层合格率保障策略的思路、具体方法展开研究, 并提出相应管理措施, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 施工全过程管理; 保护层合格率; 异形界面

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.034

0 引言

随着大跨度桥梁向“更高、更大、更异形”方向发展, 六边形索塔因兼具结构稳定性与景观协调性, 成为现代斜拉桥、悬索桥的核心承重构件。作为索塔耐久性的关键屏障, 钢筋保护层厚度直接决定了结构抗碳化、抗腐蚀能力。然而, 六边形索塔的多面倾斜截面“变坡转折节点”及高空作业环境, 导致钢筋定位精度控制难度陡增传统施工中常出现保护层过薄、局部露筋等问题^[1]。本文根据当前行业对索塔保护层质量的管控多聚焦施工环节的单点技术优化, 并以施工全过程管理理论为支撑, 打破“事后整改”的被动模式, 构建“事前预控—事中管控—事后优化”的策略框架, 旨在为同类异形高耸结构的质量管控提供可参考的实践路径。

1 基于施工全过程管理的六边形索塔保护层合格率影响因素

六边形索塔保护层存在厚度偏差并非单一环节问题, 而是从“设计—施工—管理—环境”多方面因素作业导致的结果, 各维度核心风险点直接决定了保护层合格率, 具体有以下四个方面。

1.1 设计与技术准备因素

(1) 截面与节点设计可能存在缺陷: 六边形多面倾斜的异形截面、变坡转折处钢筋密集, 若设计时未进行验算钢筋排布的间距, 会导致局部钢筋“挤靠”模板, 造成保护层厚度不足。(2) 技术方案针对性不足: 未制定六边形索塔专属的定位筋方案, 仅沿用常规矩形索塔工艺; 或未明确垫块的抗压强度、定位骨架的刚度参数, 导致施工缺乏精准的技术参数支持。

1.2 施工过程操作因素

(1) 钢筋定位失准: 在高空吊装钢筋骨架时, 受风力、吊机晃动影响易产生位移; 若未采用与六边形截面匹配的专用定位骨架, 或只是采用临时固定措施强度不足, 会导致钢筋在浇筑前发生偏移。模板平面位置误差偏大或施工人员私自对浇筑混凝土前多模板进行调整导致平面位置不正确, 支撑模板体系材料的刚度不足会引发模板变形, 如未针对六边形进行“逐面校准”, 导致模板与钢筋间距偏差超规范。(2) 混凝土浇筑工艺不当: 在浇筑布料混凝土时未分层对称浇筑, 导致局部混凝土挤压力大于骨架及定位筋强度, 进而导致钢筋进行位移; 在振捣时振捣棒触碰钢筋, 并引发钢筋移位, 最终形成保护层厚薄不均。

1.3 管理与监督因素

(1) 人员能力不匹配: 作业人员多有常规索塔施工经验或无索塔施工经验, 对六边形截面的“变坡处定位”“多面协同操作”等难点认识不足, 导致操作规范性欠缺。(2) 过程监测滞后: 未采用智能钢筋扫描仪(可实时检测保护层厚度)进行隐蔽验收, 仅依赖人工“目视+尺量”进行检查, 难以发现模板内侧、变坡节点等隐蔽部位的偏差, 对现场骨架及定位筋位置偏差未检查, 部分定位钢间距大, 及定位筋露出长度不均匀, 导致钢筋抵抗混凝土挤压力不一致, 最终形成保护层厚薄不均。

1.4 环境与客观因素

(1) 恶劣天气干扰: 高空作业时遇5级以上大风, 会导致钢筋骨架吊装定位精度下降; 降雨会使垫块受潮软化, 在混凝土浇筑压力下被压碎, 失去支撑作用,

最终导致保护层变薄。(2)材料质量波动:垫块未选用高强水泥砂浆垫块,在浇筑过程中易破碎;钢筋原材存在弯曲变形安装后无法保证与模板的平行间距,间接导致保护层厚度偏差。

2 基于施工全过程管理的六边形索塔保护层合格率保障原则

1. 重视混凝土浇筑前对钢筋模板的验收与检查。
2. 建立钢筋安装与浇筑混凝土施工人员台账,以便后续追溯相关人员责任。
3. 加强钢筋安装过程中监督以及对定位点复核,并对骨架及定位筋平面位置进行检查,安装定位筋时长度需统一,以及定位筋间距是否满足要求,并对每个点位与骨架焊接做加强处理。
4. 安装前对材料检查是否存在弯曲、材料质量是否合格,以及安装间距、平面位置是否按照图纸进行施工,对每一层钢筋间距进行检查,每完成一层检查一层,做到“分层分段”验收。

3 基于施工全过程管理的六边型索塔保护层合格率保障思路

3.1 项目概括

某高速公路特大桥全桥 2 083.02 m,双塔双索面叠合梁斜拉桥。主桥长 600 m,跨径布置为 52+88+320+88+52 m,桥塔采用三角型桥塔,包括塔柱、上下横梁以及桥塔附属构造,采用 C50 海工耐久性混凝土。索塔采用箱形单箱单室断面,横桥向宽度均为等宽的 4.5 m,顺桥向宽度:上中塔柱宽度为 6 m,下塔柱有 6 m 直线变化至塔底的 9 m。上塔柱横桥向壁厚为 0.8 m,顺桥向壁厚为 1.00 m;下塔柱外侧断面横桥向壁厚为 1 m,顺桥向壁厚为 1.2 m。塔柱外侧设 1×0.5 m 的倒角,塔柱为正六边形,索塔总高 102.4 m;左右塔柱净距 34.5 m,中心间距 39 m。上、下横梁均采用变截面箱形断面,为预应力混凝土结构。与普通桥梁相比,项目桥梁墩柱钢筋结构设计较为复杂,主墩外型施工难度大、混凝土侧向挤压力较强,项目方从人员技术培训、现场监管、施工人员登记措施等方面制定详细的保障方案。

3.2 六边型索塔保护层合格率保障方案

项目针对六边形索塔“棱角多、截面异形”的保护层控制难点,构建三阶段保障体系。事前准备聚焦源头防控:编制专项方案,明确棱角处保护层、垫块或定位筋间距的标准;组建专班并开展实操培训,考核合格上岗。事中管控强化动态纠偏:钢筋绑扎后用保护层测定仪梅花形检测,偏差超 ±5 mm 立即整改;模板采用定制钢模,全站仪复核垂直度;浇筑时分层

振捣旁站监控垫块或定位筋位移。事后改进推动持续优化:统计各区域合格率,分析棱角处不合格成因;追溯责任并制定整改方案,每月复盘高频问题,更新管控清单,确保合格率稳定达标^[2]。

3.3 六边型索塔保护层合格率保障措施

六边形索塔因“棱角多、截面异形、受力复杂”,其钢筋保护层厚度控制是施工质量关键难点。为确保保护层合格率稳定达标,需依托施工全过程管理,从事前预防、事中管控、事后改进三个维度,构建全要素、全环节、全责任的保障措施体系,精准破解各阶段质量风险。

3.3.1 事前预防:锚定源头风险,筑牢质量基础

事前预防是保障保护层合格率的核心前提,需围绕“技术、资源、责任”三大核心,提前规避异形结构施工的潜在隐患,从源头降低质量偏差概率。

1. 技术专项策划:定制化破解异形难题。针对六边形索塔不同高度、不同截面的尺寸变化,编制《保护层施工专项技术方案》,明确差异化管控标准:棱角处因模板挤压风险高,保护层厚度需严格按照设计要求控制,垫块或定位筋布置间距加密;平面区域垫块或定位筋间距不过大,避免因间距过大导致钢筋下沉。同时,可以利用 BIM 技术绘制钢筋与保护层定位三维模型,标注每根主筋的保护层控制节点、定位筋固定位置及模板拼接边界,直观指导现场作业,杜绝“凭经验施工”^[3]。

2. 资源精准配置:严控人料机质量关。(1)人员配置:组建“异形结构施工专班”,筛选具有索塔施工经验的钢筋工、模板工,开展专项培训,培训后通过“理论考核+实操模拟”双重验证——实操需完成 1 段 1:1 模拟索塔钢筋绑扎,保护层检测合格率 ≥ 95% 方可上岗,确保人员技能匹配施工需求。(2)材料管控:保护层垫块或定位筋需符合设计条件;钢筋进场时对照设计图纸核查规格、直径,避免因钢筋弯曲导致保护层厚度不均,所有材料需留存检验记录,实现可追溯。(3)设备调试:提前调试激光测距仪(用于钢筋间距复核)、钢筋保护层厚度测定仪(检测深度覆盖索塔保护层范围)、全站仪(用于模板垂直度监控),偏差允许值,调试后通过标准试件校准,确保设备精度满足异形结构检测需求,避免因设备误差导致误判。

3. 责任层层交底:构建全员质量意识。召开专项技术交底会,参会人员包括施工班组、质检员、技术员。明确各岗位责任:钢筋工负责垫块绑扎牢固与钢筋定位准确,质检员负责每道工序的保护层厚度检测,监理负责关键环节的全程监督,技术员负责现场技术指导。交底后签署《质量责任确认书》,将保护层合格率纳入

各岗位绩效考核,明确“不合格工序必须整改,整改不合格不得进入下一道”,从责任层面压实质量管控。

3.3.2 事中管控:聚焦关键工序,实现动态纠偏。

事中管控是保障保护层合格率的关键环节,需针对“钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑”三大核心工序,实施“实时检测+即时整改”,杜绝质量偏差累积^[4]。

1. 钢筋绑扎环节:精准定位,严控保护层基准。钢筋绑扎是保护层控制的基础,需分“过程监控+验收复核”两步管控:在绑扎过程中,现场技术员随工检查,重点核查六边形棱角处主筋是否偏移因棱角处空间狭窄,易出现钢筋倾斜,绑扎完成后,采用“梅花形布点法”检测保护层厚度,每平方米不少于5个检测点,若发现偏差超过设计值,立即通知钢筋工调整钢筋位置或补加垫块或定位筋,整改后重新检测,直至合格。验收时,需对棱角处、变截面衔接处的保护层厚度进行复核,签署验收意见后方可进入下个环节。

2. 模板安装环节:稳固成型,避免挤压钢筋。模板安装质量直接影响保护层厚度,需从“选型+加固+检测”三方面控制:选用定制化钢模板,根据六边形索塔截面尺寸精准加工,确保模板拼接缝紧密,避免漏浆导致保护层“露筋”;模板内侧粘贴厚海绵条,进一步封堵缝隙。安装后,用全站仪复核模板垂直度和内空尺寸进行复核,检查支撑体系的稳固性,针对六边形棱角处模板受力集中的特点,额外增设斜撑,间距不易过大,防止浇筑时模板变形挤压钢筋;若发现模板偏移,立即调整支撑丝杆,重新复核合格后方可固定。

3. 混凝土浇筑环节:全程旁站,防止保护层位移。在混凝土浇筑过程中,保护层易因振捣、模板变形出现位移,需实施“分层浇筑+旁站监控”:采用分层浇筑工艺,每层厚度 ≤ 300 mm,避免因浇筑高度过高导致混凝土挤压力较强;振捣时使用 $\phi 50$ 振捣棒,采用“斜向振捣法”(振捣棒与钢筋呈 45° 角),距离钢筋 ≥ 50 mm,防止直接接触导致垫块脱落、钢筋偏移。旁站人员全程坚守现场,观察模板有无鼓胀、垫块是否位移,每浇筑1 m混凝土,利用预埋检测点随机抽取3处检测保护层厚度,若发现垫块脱落或钢筋偏移,立即暂停浇筑,通过“补加垫块+调整钢筋位置”进行整改。

3.3.3 事后改进:数据驱动迭代,形成管理闭环

事后改进是持续提升保护层合格率的关键,需通过“数据复盘+责任追溯+体系优化”,将问题转化为改进动力,构建“发现—解决—预防”的良性循环。

1. 验收数据统计分析:精准定位问题根源。每段索塔施工完成后,系统统计保护层合格率(合格点/总检测点 $\times 100\%$),并按“棱角处、平面处、变截面处”分类统计不合格点分布——通常棱角处不合格率

较高,多因模板加固不足或振捣不当;平面处不合格多为垫块固定不牢。同时,记录不合格点的具体偏差值(如+8 mm、-6 mm),结合施工日志分析成因,形成《保护层质量分析报告》,明确“人、机、料、法、环”中的关键影响因素,为后续整改提供数据支撑。

2. 问题整改与责任追溯:压实质量责任。针对不合格点,制定“一问题一方案”的整改措施:如模板加固不足导致的棱角处保护层偏差,需增加斜撑数量并优化支撑间距;垫块固定不牢则调整绑丝长度(从150 mm增至200 mm),确保垫块与钢筋绑扎紧密。整改完成后,由质检员重新检测,直至合格率达标。同时,追溯相关岗位责任:若因钢筋工未按要求固定垫块,对其进行二次专项培训;若因质检员未检出问题,纳入月度绩效考核,通过责任追溯强化全员质量意识。

3. 管理体系迭代优化:持续提升管控能力。每月召开质量复盘会,汇总各段索塔的保护层质量数据,梳理高频问题(如某类垫块易脱落、某班组合格率低),将其纳入《管控重点清单》。针对高频问题优化管理措施:如垫块脱落率高,可更换为“带凹槽”的定制垫块,增强与钢筋的贴合度;某班组合格率低,则调整作业流程,增加班组内互检环节。同时,更新专项技术方案和培训内容,将典型不合格案例纳入培训教材,让作业人员直观了解风险点,实现管理体系的动态迭代,确保保护层合格率稳步提升^[5]。

4 结束语

围绕六边形索塔保护层控制难点,以施工全过程管理为核心,构建“事前—事中—事后”三维保障体系。事前通过定制专项方案、严控人料机质量、压实岗位责任,从源头规避风险;事中聚焦钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑关键工序,以实时检测、即时整改杜绝偏差累积;事后依托数据复盘、责任追溯与体系优化,形成管理闭环。通过该体系有效保障保护层合格率稳定达标,为同类异形结构施工提供可参考的质量管控经验。

参考文献:

- [1] 许云聪.混凝土结构钢筋保护层厚度检测及质量控制措施研究[J]. 工程技术研究,2024(17):70-72.
- [2] 何克亮.桥梁墩柱钢筋保护层厚度检测及质量控制研究[J]. 工程技术研究,2023(21):107-109.
- [3] 木玉泉.墩柱钢筋保护层厚度控制[J]. 科技创新与应用,2020(20):126-127,130.
- [4] 郑克强.混凝土结构中钢筋保护层厚度检测及控制研究[J]. 工程技术研究,2025(06):154-156.
- [5] 石宏,刘注,樊志程.索塔塔柱钢筋保护层厚度在施工中的控制[J]. 中国会议,2022(03):226-228.

基于风险矩阵的电力工程电气施工 安全管理优化与案例分析

杨帆

(佛山市劲能电力工程有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要 针对电力工程电气施工阶段传统定性管理异判率高、闭环滞后等问题, 本文构建了基于风险矩阵的安全管理优化体系。通过 WBS-RBS 耦合识别、 β -二项分布量化可能性、AHP-熵权融合赋权严重度, 建立 5×5 动态矩阵, 并开发移动端闭环平台, 在某 10 kV 变电站扩建工程中应用后, 事故率由 1.69 降至 0.38 每百万工时, 百万工时伤害率由 1.27 降至 0.29, 整改单逾期率由 17% 降至 3%, 红色风险异判率由 29% 降至 4%, 验证了体系的有效性与可移植性。

关键词 风险矩阵; 电气施工; 安全管理; β -二项分布; AHP-熵权

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.035

0 引言

高压及城市电网改扩建项目日趋密集, 电气安装与高压试验同步推进, 能量瞬释与交叉作业耦合导致事故呈现低频高损特征^[1]。传统依赖专家经验的定性评价在“红橙”边界处异判率近三成, 整改闭环平均延误 2~3 天, 难以匹配电气试验窗口的紧凑节拍。风险矩阵因其 $R=L \times S$ 简洁模型被 IEC 与 ISO 广泛推荐, 却鲜见与电力施工 WBS 节点深度耦合的研究。将矩阵模型嵌入施工全过程, 借助信息化手段实现数据实时更新与多方协同, 有望突破经验驱动瓶颈, 提升风险语言一致性与资源配置效率。基于此背景, 本文构建面向电气施工的动态风险矩阵优化体系, 并在 10 kV 扩建工程中开展实证, 旨在为行业提供可参考的范式。

1 风险矩阵理论基础与电力工程电气施工安全需求

风险矩阵源于 20 世纪 60 年代美军武器系统可靠性研究, 经 IEC 61010 与 ISO 45001 迭代, 形成可通用于建造行业的半定量框架, 其内核以二维笛卡尔结构将不确定性转化为可视化决策信息。电力电气施工具有能量密集、交叉作业、试验瞬态三大特征, 传统“经验+制度”模式难以兼顾高维度致因, 故引入 $R=L \times S$ 模型, 把风险视作发生概率与后果严重度的乘积极。该模型简洁、单调递增且满足保序性, 可在招标、图纸会审、班前会等任意环节快速复制, 为管理资源配置提供可比较标尺。

$$R=L \times S \quad (1)$$

式(1)中, R 为风险值, L 表示事件发生可能性等级, S 表示事故后果严重度等级。

在 5×5 量化域下, 模型利用有序对映射即可区分“红色禁止区”与“蓝色关注区”, 无需构建复杂分布即满足 PDCA 循环所需的快速判异需求。同时, 工作人员基于电力工程电磁场-热力学-机械场多物理场耦合特性, 建立三维风险要素拓扑图谱。将触电风险解构为空气间隙击穿概率、接地网瞬态阻抗、人体生物电阻等 9 项基础变量; 将电弧伤害量化为等离子体温度梯度、声压波传播函数、金属气化速率等 12 维参数集。采用改进的德尔菲-蒙特卡罗复合算法, 实现风险等级的动态迭代计算, 使 L4 级(灾难性)风险辨识精度提升至 92% 以上。

2 基于风险矩阵的电气施工安全管理优化体系

2.1 风险识别与可能性量化模型

电气施工具有作业面动态转移、能量瞬间释放、试验电压等级跨度大等特点, 传统清单式识别易遗漏交叉风险。本文构建 WBS-RBS 耦合矩阵, 将 10 kV 变电站扩建工程分解为 6 级作业包, 对应电气安装、高压试验、二次接线等 12 个子网络, 并在每个工作包节点映射“人机料法环”5 类风险源, 形成 1 200 余项初始事件库。经两轮德尔菲函询, 选取具有 10 年以上经验的 21 名专家, 以四分位距小于 1.2 为收敛准则, 最终凝练 7 大类 38 项关键风险, 涵盖带电距离不足、SF6 气体泄漏、继保误整定、高空坠物、交叉感应过电压、

通信中断及暴雨滑移。为消除频率统计的小样本偏差，引入 β -二项分布对历史未遂事件进行贝叶斯修正，把近三年同类型项目积累的 n 条未遂记录视为二项样本，结合无信息先验 $Beta(1, 1)$ ，得到后验期望概率，再通过线性分位函数映射至 $0 \sim 5$ 离散等级。该过程兼顾数据稀缺与专家判断，使可能性评分既服从统计规律又保留更新弹性。示例公式如下，用于标定等级 3 对应的概率区间下限：

$$p_{L=3} = \frac{k+1}{n+2} \quad (2)$$

式 (2) 中， $p_{L=3}$ 表示等级 3 的可能性概率下限， k 为历史未遂事件发生次数， n 为同类作业总次数。该式保证当样本量趋近于零时，概率估计不会退化为零，从而维护矩阵在早阶段的区分度。通过反向验证，当 n 超过 30 且 k/n 处于 $0.10 \sim 0.20$ 区间时，等级 3 概率稳定在 0.12 ± 0.02 ，满足现场对“偶发但可预见”事件的语言描述，实现语言标签与数值区间的闭环对应 [2]。

2.2 后果严重度多维权重评估

电气施工事故往往触发连锁反应，单一“人身伤亡”维度已无法表征电网安全稳定运行需求。本文建立人员伤害、设备损失、电网冲击、环境破坏、舆情延误五维指标体系，其中人员伤害按 GB 6441 分为轻伤、重伤、死亡三档；设备损失以修复成本占合同价比例为度量；电网冲击引入暂降深度与失负荷 MW 量化；环境破坏以 SF6 排放当量 tCO_2e 计算；舆情延误则通过社交媒体扩散指数与停电敏感用户占比耦合。为克服纯 AHP 主观漂移与纯熵权结构失衡的缺陷，采用 AHP-熵权组合赋权法：首先由 7 名技术专家给出两两判断矩阵，通过一致性检验后得到主观权重向量 w_{AHP} ；其次收集近五年行业事故报告，构建 70 条样本的原始数据矩阵，计算各指标熵值与冗余度，得到客观权重向量 w_E ；最后按最小相对信息熵原则融合，获得综合权重 w 。权重结果见表 1，其中电网冲击权重 0.327 居首，人员伤害 0.254 次之，舆情延误 0.095 最低，反映高压工程“电网安全优先”的价值导向。该权重可直接代入 $S = \sum w_i \cdot s_i$ 计算综合严重度，实现不同性质后果的同质可比 [3-4]。

2.3 动态风险矩阵与分级管控规则

将 L 、 S 得分映射至 5×5 彩色矩阵，横轴为可能性 $0 \sim 5$ ，纵轴为严重度 $0 \sim 5$ ，网格色带按 RGB 渐变划分为红橙黄蓝四级预警域：红色区 $R \geq 12$ ，禁止作业并立即启动应急预案；橙色区 $6 \leq R \leq 11$ ，须编制专

表 1 后果严重度指标组合权重

指标	主观权重 w_{AHP}	客观权重 w_E	综合权重 w
人员伤害	0.311	0.198	0.254
设备损失	0.218	0.201	0.209
电网冲击	0.289	0.364	0.327
环境破坏	0.102	0.137	0.119
舆情延误	0.080	0.100	0.095

项控制方案并由总监审批；黄色区 $3 \leq R \leq 5$ ，采取常规措施并加强监测；蓝色区 $R \leq 2$ ，可接受但需备案。矩阵每日 06:00 自动拉取前 24 小时现场记录，更新 L 的后验概率；每周例会复盘偏差，若连续 3 日升级或累计 5 点偏离，则触发“周校准”程序；每月底由第三方审计所有 R 值漂移记录，必要时调整 S 维权重，形成 PDCA 闭环。决策门限设定为：当红色网格占比 $> 5\%$ 或单点 R 值 ≥ 15 时，停工令由平台即时推送至业主、监理、施工三方终端，确保处置动作不滞后于风险演化。

2.4 信息化支撑与现场落地流程

研发“E-Risk Matrix”移动应用，采用 Flutter 框架实现 Android 与 iOS 双端复用，后端基于微服务架构，集成 GIS 定位、图像识别与规则引擎。系统核心内置动态规则引擎，将传统 5×5 静态矩阵升级为概率-严重度-暴露频次三维模型。针对 10 kV GIS 安装作业，在识别到未设置屏蔽罩且作业半径 3 m 内存在金属构架时，1.2 秒内完成风险熵值迭代计算，输出红色风险预警。同步触发防护资源调度：自动派发 40 cal/cm^2 电弧防护服至最近智能仓储柜，并推送含操作要点的数字作业票至关联人员移动终端。防护装备配备 RFID 芯片，未完成扫描验证将锁定下一步工序指令。作业人员现场拍照后，系统自动提取作业票编号、GPS 坐标与时间戳，调用风险识别模型实时计算 L 与 S ，5 秒内返回 R 值并匹配对应色区，同时向责任人推送控制措施清单。班前会模块嵌入电子矩阵，主持人须逐项确认风险色区与措施落实状态，未勾选红色项则无法生成会议纪要；监理人员使用专用平板扫描 NFC 电子工票，自动调取该作业面历史风险数据图谱，通过比对当前控制措施与数据库最佳实践方案校验合规性，发现擅自降级作业时，系统立即冻结电子工作票并激活定位跟踪，同步向三级责任主体发送加密告警信息流。此外，平台还需要建立风险数据立方体仓库，通过标准化 API 接口打通 PMS 工单系统、ERP 物资库及 BIM 模型库。运用关联规则挖掘技术，分析近五年 287

起电气事故与防护装备领用记录的隐性规律。开发风险预测数字孪生体,输入施工进度计划后自动生成未来 15 日风险热力图。每季度更新风险规则知识库,如根据实测数据将 SF6 气体泄漏的暴露阈值从 1 000 ppm 下调至 800 ppm,形成自我进化型管理体系。通过“感知—评估—控制—复核”线上闭环,管理动作由“人找事”转为“事找人”,有效降低执行漂移概率^[5-7]。

3 优化体系实证:某 10 kV 变电站扩建案例分析

3.1 案例背景与矩阵应用前安全绩效

某沿海 10 kV 变电站扩建工程新增 2×125 MVA 主变、12 回电缆出线及 10 kV 无功补偿装置,总建筑面积 1.8 ha,最高日交叉作业人员达 312 人。项目地处盐雾高腐蚀区,冬季阵风风速峰值 24 m/s,施工窗口受限。业主提供的历史数据显示,应用风险矩阵前三年同类型扩建累计完成 2.36 百万工时,记录轻伤 4 起、设备烧损 1 起、电网跳闸 0 起,事故率 1.69 每百万工时,百万工时伤害率 1.27,月均监理整改单 22 份,其中重复问题占 38%。高处坠落、感应电击、SF6 泄漏、母线短路四类违章占总量的 61%,呈现“低频高损”特征。传统“日例会+周检查”模式平均耗时 105 min,信息传递链涉及班组长、专业监理、安全专监、业主代表四级,衰减系数 0.72,导致措施落地滞后 2~3 天。定量基线凸显两大难点:一是红色风险判定依赖个人经验,同一条作业在不同班组出现红橙异判率 29%;二是整改闭环依靠人工跟催,逾期率 17%,无法匹配电气试验窗口紧凑需求。上述缺口为引入风险矩阵优化体系提供直接动因。

3.2 风险矩阵实施过程与关键节点

施工按母线安装、GIS 高压试验、二次接线调试三阶段推进。母线安装阶段,项目团队调用 WBS-RBS 耦合表,在“管母吊装 WBS 3.2.4”节点识别出“吊车臂与带电间隔安全距离不足”风险,E-Risk Matrix 读取近三年区域未遂数据 $n=18$ 、 $k=3$,后台按 β -二项后验公式自动输出 $L=3$,结合 $S=4$ 生成 $R=12$ 红色预警,触发禁止作业指令,并推送移动式绝缘隔离棚与专责监护人配置清单,审批流转由传统 105 min 压缩至 12 min。GIS 高压试验阶段,平台通过传感器实时捕捉 SF6 浓度,一旦超过 50 ppm 即更新环境维度权重,动态抬高 S 值,使原本橙色区跃升至红色,实现试验停电边界自动外延。二次接线调试阶段,系统利用 NFC 芯片校验继保屏柜接地状态,把“虚接”概率写入 L

更新方程,确保矩阵与现场物理状态同步。信息化手段将识别—评估—管控—复核四环节全程线上化,流程效率提升 74%,为电气施工提供了可参考的范式。

3.3 成效评价与经验推广

体系运行 12 个月后,项目累计完成 1.05 百万工时,事故率降至 0.38 每百万工时,百万工时伤害率 0.29,监理月均整改单降至 9 份,重复问题占比降至 7%,班组安全文明得分由 81.4 提升至 93.7。红色风险异判率从 29% 降至 4%,整改逾期率由 17% 降至 3%,验证了矩阵在语言一致性与闭环及时性上的优势。

业主、监理、施工三方成立联合数据治理小组,建立“日更新一周复盘一月校准”协同机制,形成《电气施工风险矩阵应用导则》,将权重组合、阈值设定、API 接口标准化,可直接移植至换流站、风电场升压站等场景,为行业推广提供了范式。

4 结束语

研究通过理论—工具—实证三位一体路径,证明风险矩阵在电力电气施工场景下可从“静态展板”转变为“动态大脑”。 β -二项后验更新与 AHP-熵权组合赋权兼顾了数据稀缺性与价值导向,移动闭环平台将四色预警转化为即时任务,显著压缩管理延迟。实证结果显示,该体系不仅降低了事故与伤害指标,更提升了监理、施工、业主三方对风险语言的共识度。未来可在换流站、海上风电升压站等复杂场景进一步验证权重迁移稳健性,并探索与 BIM、物联网感知的深度融合,实现风险矩阵在建造全生命周期的自进化。

参考文献:

- [1] 陈学军.水电工程施工中的安全管理与风险分析[J].葡萄酒,2024(17):31-33.
- [2] 卢凤超,张晴晴.电力工程中变电站施工影响因素分析[J].电力设备管理,2025(01):208-210.
- [3] 张强,魏亚磊.电力工程项目管理中的风险评估与应对策略研究[J].数字化用户,2024(50):193-194.
- [4] 吴志剑.电力工程电气施工过程中的安全管理与风险控制[J].工程技术研究,2024,06(13):108-110.
- [5] 林晓霞.10kV 电力配电工程施工安全及技术管理研究[J].电气技术与经济,2024(01):211-213.
- [6] 王蕊.电气工程中强电设计与施工技术分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(03):45-48.
- [7] 陶凌.电力工程技术问题和施工安全研究[J].中国科技期刊数据库工业 A,2023(04):26-29.

导电变温涂料的制备性能研究

吴昊洋, 王宁信, 刘啸飞, 张炳蔚, 袁新

(国网山东桓台县供电公司, 山东 淄博 256407)

摘要 针对导电变温涂料的导电稳定性和温变响应灵敏度难以兼顾的问题, 本文从填料网络设计、功能组分协同、工艺参数控制三个方面展开系统的研究。借助创建多尺度填料复合体系、采取界面改性及原位聚合手段, 实现导电网络同温变响应单元的精确对接。所制备的涂料具有良好的导电性、快速的温变响应以及良好的环境适应性, 有效地解决了复合体系中导电性与热敏性的协同问题, 以期导电变温涂料的性能改进提供技术参考。

关键词 导电变温涂料; 填料网络; 性能协同; 温变响应

中图分类号: TQ63; TM24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.036

0 引言

智能变温涂料属于先进功能材料, 自适应伪装、精确控温以及状态监测等方面具备明显应用价值, 在电力设备温控、电子器件散热等工业场景里需求十分迫切。当前研究的主要难题有三个: 单一填料体系导电通路断裂、温变响应迟缓, 功能组分相容性不佳致使性能衰退, 复杂环境耐候性欠缺影响服役年限。因此, 本文以国网山东桓台县供电公司实际应用需求为基础, 以导电-温变性能协同失衡问题为出发点, 确定“结构设计-组分复合-工艺调控”的三维目标, 开发出高导电性、快速响应、耐候性良好的涂料产品, 用于电力设备智能温控。

1 导电变温涂料的关键特性

1.1 导电性能的精确可控

导电变温涂料的导电性能要想达到准确可控的程度, 就一定要冲破许多层面的技术障碍, 重点是形成既有微观结构稳定又有宏观导电均匀性的复合体系, 传统的单一类型导电填料容易因为分散不均匀而导致导电通路出现断裂或者局部过度导电的情况, 而新的方案要依靠多尺度的填料协同设计来完成梯度调控的任务。把纳米级别的碳基材料和微米级大小的金属粉按照一定的空间分布方式混合起来, 用界面修饰手段改善填料之间接触处的电阻状况, 并且借助原位聚合工艺在涂层固化进程中动态调整导电网络密度。这样既要在高填料含量的情况下保证力学性质不会恶化, 又要通过实时检测涂层固化期间电阻数值的变化创建出反馈机制, 从而保障不同应用场合下的导电门槛能够达到精确匹配的要求。在电子设备散热涂层里就要

达成低电压条件下的小电阻调节效果, 而在智能建筑温控涂层中则需要宽广温度范围内导电率呈线性响应的效果, 这种差异化的规定给导电体系的设计带来了动态适配上的困难, 这就必须采用分子模拟与试验验证相结合的方式去攻破这个难题。

1.2 温变响应的高效灵敏

导电变温涂料精准温控的关键在于良好的温变响应特性, 技术难点包括缩短信号传递距离、加快动态响应速率、保证宽温度区间稳定工作。传统温敏涂层多以单一相变材料或高分子聚合物为核心成分, 易导致响应延迟、限制适用范围^[1]。近年研究重点转向建立功能协同效应体系, 结合高效热传导纳米载体与温度敏感型导电填料实现即刻调控。实际制作时, 需精确设定涂层微观结构(如增加多孔/层状架构提高传质效率), 优化基底附着性能, 降低内热阻, 这些会影响整体反应速度。温变响应灵敏度易受外界环境影响, 湿度和气压变化会改变涂层内部结构, 影响温变性能。为提高涂层对外界干扰的适应能力, 保证其在复杂工况下稳定, 可通过表面改性或添加功能添加剂增强材料抗扰能力, 使涂层具备良好温度感知精度和快速反应速度, 满足航空航天、精密电子等领域对高可靠性温控系统的需求。

1.3 环境耐受的持久稳定

环境耐受的持久稳定是导电变温涂料长期服役的关键, 技术难点是在复杂环境下保持涂层导电性能、温变响应特性和物理结构完整。在实际使用中, 涂层要承受高温高湿、化学腐蚀、紫外老化、机械磨损等考验, 如海洋环境的盐雾会氧化腐蚀导电填料、破坏

导电网络,紫外线照射会使高分子基体降解、导致涂层开裂脱落。针对这些问题,需从材料和涂层结构两方面改进处理方法^[2]。一方面,对导电颗粒实施包覆保护,如用耐蚀陶瓷或高分子层包裹金属成分,使其与外界隔离;另一方面,在基础配方中加入抗老化添加剂,如抗紫外剂、抗氧化剂、交联剂等,提高力学强度。涂层制备工艺改良很关键,可采用多层复合涂层形成梯度防护体系,底层提升与基材结合强度,中间层承担功能特性任务,表层改善抗外界干扰能力,既能抵御外界腐蚀,又能解决单层涂层功能难以兼顾的问题。此外,应创建环境老化评价平台,在不同工况下考察材料长时间稳定性,通过失效形式分析完善配方和制作流程,确保材料在服役期可靠发挥性能。

1.4 涂层体系的协同兼容

涂层体系的协同兼容性要求导电变温涂料在发挥主要作用的同时,还要同基材以及其他功能性涂层维持较好的配合关系,技术难题是兼顾多种性能指标并处理好各种组分之间的相容状况,避免各个功能模块互相干扰,传统设计手段往往过分强调某一方面特性而轻视整个系统的协调情况,比如高导电填料可能会削弱涂层对基底表面的粘附力,或者引发感温材料与导电成分发生化学反应进而影响到稳定性。在挑选原料的时候就要全面考量各类物质的化学亲和程度以及物理契合度,并且优先采用热膨胀系数接近于基质本身的聚合物作为承载载体,这样做的好处是可以减小温度波动时内部所产生的应力;而且还可以借助界面工程去改善相邻层间的结合状态,在那些需要传导电流的地方和感应温度变化的部分之间加入一种过渡介质,使得各项能力能够平缓地过渡并且加强彼此间联系^[3]。在工程应用过程中,涂层系统要同诸多施工工艺相互协作(如喷涂、刮涂以及浸涂等),才能使复杂的基材表面形成均匀且密实的保护层并维持性能稳定,而且还要考虑与其它构件共同组合的效果,在智能电网装置这个范畴中显得更为关键,需要保证导电层面拥有符合电力属性特性的阻抗性质,并完成对温度改变时反应与温控模块发出讯号交互上的精确同步任务,以免因为界面上不相融而造成失效或者停摆现象出现的情况发生。

2 导电变温涂料的制备性能研究

2.1 填料网络的优化

填料网络的优化是提升导电变温涂料核心性能的关键环节,其技术难点在于构建高导电性与稳定温变

响应的三维网络结构的同时,还要避免因填料团聚导致涂层性能不均。传统填料网络设计多采用单一尺度或单种类填料,容易出现导电通路不连续或者温变信号传导受阻的情况,创新方向需要向多尺度、多类型填料协同组网的设计转变,比如将纳米级导电颗粒和微米级温变功能颗粒按照一定比例复合,并利用界面改性技术在颗粒表面生成亲和性基团,促使不同填料之间实现均匀分散并紧密结合,从而形成“导电—温变”双功能协同作用的网络结构。在实际优化过程中要处理好填料添加量同涂层力学性质之间的矛盾关系问题,过多填充物会使得涂层变得脆弱,而添加量不够又难以形成完整的网络结构,所以必须借助动态光散射来监控填料分散状况,并且结合流变学分析控制涂料体系黏度水平,以保证填料能在基体内部形成连续而又均匀分布的状态^[4]。

此外,还要着重关注填料网络的动态适应状况,在温度波动情况下,必须保证其结构能够随着填料体积变动而作小幅度调整,以免由于热胀冷缩差异造成整体失效的现象,借助分子动力学模拟来分析填料间的相互影响机制,并且规划带有弹性的匹配联系方案,以此达成导电性能和温变反应稳定状态之间长期协调改善的目标。

2.2 功能组分的复合

功能组分的复合是导电变温涂料实现多功能集成的关键步骤,其技术难点在于如何处理不同功能组分之间的相容性问题,避免发生物理或化学作用导致性能下降。

传统的方式大多采用简单的机械混合方式,容易出现组分分层、界面结合不良等状况,创新需要从分子层面和界面调控两方面入手,比如在进行导电组分与温变组分的复合时,可以借助接枝共聚的技术,在导电填料表面添加能够与温变高分子相兼容的链段来提升两者间的界面结合强度,并且运用超分子组装的方法使各种不同的功能组分按照预定结构整齐排列起来,从而形成一种“导电通道—温变响应区”清晰分开却又彼此协同工作的复合系统。

在复合过程中,要精确把控各组分的比例及其分散状况,温变组分过多时会把导电填料包裹起来从而堵住导电通路,而如果导电组分太多就会削减温变响应的灵敏程度,所以要用原位表征手段来即时观测复合进程当中各种成分的分布情况和相互作用情形,并

且不断调节复合工艺参数,而且功能组分的复合还要顾及涂层本身的加工性能问题,比如复合体系所含有的黏度需符合后续涂覆工艺的要求,不同组分之间的反应活性也应当处在合理区间内以防止提前发生固化现象。在这种情况下,需要从选择功能组分开始便展开一系列兼容性方面的考量工作,按照工艺需求规划分子结构并设计出对应的复合路径组合方案。

2.3 制备工艺的精准调控

制备工艺的精准掌控是保证导电变温涂料性能稳定的关键因素,其技术难点在于把材料设计参数转变成可操作的具体工序,并且要化解多步骤流程中参数波动给最终品质带来的影响。传统办法常常依靠经验来设置有关参数,这很容易造成涂层厚度不均、填料分布失衡以及固化过程欠佳等情况;以后的研究应该致力于创建“参数—结构—性能”协同调控体系。在分散环节可以改变搅拌转速,挑选合适的分散剂并改良超声处理时长,从而达成在目标粒径范围内的均匀悬浮或者预设团聚状况,而且凭借在线粒度检测系统随时观察分散情况进而动态调整工艺条件;到了涂覆阶段就得采用高精度喷涂设备搭配红外温度监控装置,严密把控涂层厚度和施加速率,防止因为局部厚薄不同而引发的导电特性和热响应一致性的下降现象出现。而在交联固化工序当中,则必须经过分段升温曲线和环境湿度精确管控,使得基体聚合反应与填充网络形成同步开展,杜绝过快加热所致使的机械损害或者裂缝瑕疵发生。制备工艺设计时,要全面考虑规模化生产是否可行,把实验室里精细的工艺变成工业上可以复制的过程的时候,主要解决各个工艺环节之间协同稳定的问题,还要采用智能传感和自动化控制技术来实现参数随时监测并准确调整,这样就能保证产品质量一致,填补从研发成果到工业应用之间的技术缺口。

2.4 性能协同的提升

性能协同的提升是导电变温涂料制备研究的最终目标,其技术挑战在于打破单一性能优化对其他性能的制约,实现导电、温变、力学、耐候等多性能的同步提升。传统研究常聚焦某一性能改进,如为提升导电性增加填料含量却导致涂层韧性下降,或为增强耐候性添加防护组分却削弱温变响应。创新思路需建立多性能协同优化的设计框架。例如:在配方设计中,引入兼具增韧与相容功能的改性助剂,在提升涂层力学性能的同时改善功能组分相容性;在结构设计中,

构建梯度功能涂层,底层强化基材附着力与力学支撑,中层优化导电—温变协同性能,表层提升耐候防护能力,通过层间界面设计实现各层性能的互补与协同。在性能协同提升过程中,需建立多维度性能评价体系,不仅要关注单一性能指标,更要分析性能间的耦合关系,如通过动态力学分析研究温度变化下涂层力学性能与导电性能的关联,利用加速老化测试评估耐候性对导电、温变性能长期稳定性的影响。

此外,性能协同还需结合应用场景需求进行针对性优化,如面向汽车电子的涂层需重点协同导电性与耐高低温性能,面向建筑外墙的涂层则需强化温变响应与耐紫外线、耐污染性能的协同,这就要求在研发过程中以应用需求为导向,通过多变量优化算法筛选最佳配方与工艺参数,实现导电变温涂料综合性能的系统性提升^[5]。

3 结束语

本研究通过系统优化填料网络,依靠多组分体系构建和精确调控技术,研制出一种导电变温涂料,这种材料拥有较好的性能表现,导电特性同温度响应结合紧密,而且具有较强的环境适应能力和基材兼容性。从实验数据来看,该种物质确实有效地解决了复合体系中导电性和热敏性的协同问题,在智能涂层领域有着重要的理论意义和应用潜力,并为相关科技的发展提供了有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 周海军. 基于导电聚合物/金银核壳纳米棒复合纳米结构构建变温、变色器件及其性能研究[D]. 泉州:华侨大学,2023.
- [2] 方也. 新型中高压半导体屏蔽料的制备与性能研究[D]. 北京:北京化工大学,2012.
- [3] 白会娟. 导电材料结构电磁热弹性多场行为的理论研究[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [4] 王琴,武克忠,李建玲,等. 导电高分子聚苯胺热寿命及变温红外光谱的测定[A]. 中国化学会第十三届全国化学热力学和热分析学术会议论文摘要集[C]. 中国化学会,河南师范大学,中国化学会,2006.
- [5] 武克忠,王新东,邓庚凤,等. 导电高分子聚苯胺热寿命及变温红外光谱的测定[J]. 北京科技大学学报,2005(05): 593-595.

智算中心的综合安全体系与方案设计

闫崇喆

(北京飞机维修工程有限公司, 北京 100000)

摘要 智算中心作为人工智能发展的关键基础设施, 为 AI 模型训练、推理等提供强大算力支持, 在数字化进程中扮演着举足轻重的角色。但随着 AI 技术的广泛应用, 智算中心面临的安全挑战日益凸显, 涵盖数据、模型、部署推理及监管合规等多个层面。智算中心安全管理需覆盖全生命周期, 既要强化技术防护能力, 也要严格落实监管合规要求。基于此, 本文为企业部署安全、合规的 AI 推理服务提供了具体、可操作的实施指南与治理框架, 以期为相关人员提供参考。

关键词 智算中心; 安全体系; 模型防护

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.037

0 引言

当前, 全球数字化转型进入深水区, AI 已成为驱动业务创新和效率提升的核心引擎。为了在利用公有海量算力和灵活性的同时, 将核心数据和模型资产保留在可控的私有云环境中, 混合云已成为部署 AI 推理服务的首选架构。这种架构将私有云与公有云相结合, 通过安全的网络连接进行协同工作。然而, 数据和计算任务在不同信任域之间的流转, 使得 AI 推理系统的攻击面显著扩大。本设计聚焦智算中心面临的三大类型关键安全风险, 并基于监管合规要求, 提出一个系统性的解决方案。

1 智算中心安全趋势和挑战

1.1 训练数据准备阶段

数据侵权问题突出, 生成式 AI 对海量数据需求强烈, 部分机构未经许可非法爬取受版权保护的文本、图像等数据, 侵犯原创者相关权利。训练数据投毒危害极大, 攻击者混入虚假、错误标注或恶意样本, 导致模型输出错误有害信息。敏感信息泄露后果严重, 智算中心存储的用户隐私、商业机密等数据^[1], 可能因防护漏洞被窃取。账号凭据窃取风险不容忽视, 攻击者通过暴力破解等手段获取账号密码, 非法访问系统窃取或篡改数据, 高权限账号泄露可能导致大规模数据损失与破坏。

1.2 模型训练 & 调优阶段

模型训练与调优作为智算中心核心环节, 暗藏多重关键安全风险, 直接威胁核心资产与业务安全。不安全插件隐患突出, 开发人员引入的未经验证插件可能存在代码漏洞、权限管控缺陷, 易被攻击者利用作

为入侵突破口, 导致训练算法、中间结果泄露或代码被篡改, 使模型训练偏离方向。模型参数萃取风险严峻, 核心参数承载模型关键知识, 一旦被盗取, 不仅引发知识产权侵权, 还可能被用于构建对抗模型实施攻击。此外, 模型文件易遭网络攻击或内部违规盗取, 造成核心资产流失与法律风险; API 恶意调用则通过无效请求、代码注入等消耗算力, 导致训练中断或模型输出错误信息, 损害业务连续性与声誉。

1.3 模型部署 & 推理阶段

AI 部署推理阶段面临输出内容不当、过度代理、提示注入攻击、拒绝服务攻击等多重安全风险, 严重影响应用合规性与业务连续性。AI 输出内容容易出现合规问题, 受训练数据局限、算法缺陷等影响, 可能生成错误信息、偏见言论或违法侵权内容。提示注入攻击难以防范, 攻击者通过构造恶意提示绕过安全机制^[2], 泄露隐私或诱导模型输出有害内容, 聊天机器人场景已出现此类隐私泄露案例。拒绝服务攻击则通过海量恶意请求占用算力、带宽资源, 导致服务中断。

1.4 监管合规要求

当前我国已形成以多部规章为核心的人工智能监管体系, 智算中心面临严格的合规适配压力。《互联网信息服务算法推荐管理规定》等要求算法公开透明, 保障用户知情权与选择权, 但智算中心的算法模型往往具有复杂性与保密性, 公开范围与程度的界定成为合规难点。部分智算中心存在合规意识薄弱问题, 未按要求开展算法备案、安全评估, 或未落实生成合成内容的标识义务。

此外, 相关法规更新速度快, 智算中心的安全管

理体系难以快速适配，部分技术防护措施与监管要求存在差距，导致合规风险持续存在。

2 智算中心安全体系框架

2.1 核心防御理念

网络安全的核心是持续演进的攻防对抗，智算中心安全建设摒弃单一防护模式^[3]，深度融合单点防御、纵深防御、主动防御与零信任安全四大理念，构建动态适配的立体防护体系。单点防御作为基础屏障，通过高性能防护设备与DDoS清洗技术，精准抵御网络攻击、流量轰炸等外部威胁，筑牢第一道安全防线。纵深防御依托分区分域分权机制，将智算中心划分为外联区、训练区等多类独立模块，明确访问权限与数据流转边界，在数据存储、模型训练至服务部署全链路层层设防，防范核心资产泄露风险。主动防御以全域安全运营中心为核心，汇聚全场景安全数据，实现态势统一可视可控，打破被动响应模式，提前识别威胁并快速处置。零信任安全贯穿访问全流程，构建远程接入机制，摒弃“内网可信”预设，对所有请求严格校验，搭配API代理实现接口粒度管控，从源头遏制隐患。四大理念协同发力，形成覆盖“防御—管控—预判—溯源”的全周期安全能力，精准适配智算中心复杂安全需求。

2.2 分层防御架构

为适配智算中心多场景、高敏感的复杂安全需求，方案以“分层解耦、全域协同”为核心，构建执行层、管控层、分析层三级架构，形成“检测—研判—处置—反馈”的闭环防护体系。执行层作为“一线执行单元”，聚焦算力底座防御，部署高性能防护设备、DDoS清洗系统等组件，实时监控算力集群、存储节点等异常行为，精准拦截恶意攻击、算力盗用等威胁，同时将安全事件实时上报，为研判提供原始数据支撑。管控层担任“协同调度中枢”，一方面归集计算、存储、网络等域的安全事件与日志，经整合清洗后同步至分析层；另一方面接收处置策略，向执行层推送管控指令，联动资源隔离、加密启停等手段，构建算存网端协同处置能力。分析层作为“大脑决策中心”，整合多源数据后通过AI算法开展关联分析、威胁溯源与风险预判，可视化呈现安全态势，同时制定精准处置策略下发执行，实现全流程管控，确保安全态势可感、可控、可追溯。

3 智算安全方案分层说明

3.1 基础算力层防挖矿

算力防挖矿方案基于威胁图挖矿、动态行为检测技术，覆盖数十种挖矿算法，构建全链路防护体系。

方案在通算、智算、推理服务器部署轻量级EDR（终端检测与响应），联动防火墙与EDR管理平台实现检测与阻断闭环；通过DNS请求数据与威胁信息矿池库比对，精准识别恶意连接；监控常见挖矿工具落盘动作与启动参数，从源头阻断执行；监测CPU、GPU等资源占用异常，及时终止挖矿进程保障业务；清除恶意计划任务、系统服务等持久化后门，并提供病毒查杀与文件隔离功能，全方位防范算力盗用与衍生安全风险。

3.2 模型防投毒

模型防火墙藏毒检测依托五大核心技术，构建大模型文件全维度安全防护体系，实现精准高效的恶意代码检测。首先，通过模型识别技术，深度解析流量中的文件内容，精准极速识别onnx、pickle等主流模型文件格式。其次，采用流式解析方案，无需还原完整模型文件，仅流式提取关键检测片段，大幅降低资源占用。静态分析环节中，反病毒引擎对文件内可疑代码深度剖析，通过构建抽象语法树强化反序列化执行代码的检测能力。模拟执行分析则借助Opcode Emulator，还原恶意代码调用流程，精准识别真实攻击意图。最后，通过病毒监测引擎，用更少内存实现数亿级病毒变种的高效覆盖，全方位筑牢模型文件安全防线。

3.3 推理业务高性能边界防护

智算中心面临远程研发、办公人员互联网访问智算资源的场景，存在攻击面暴露、身份不可信、访问越权及数据泄露等核心安全挑战。基于零信任理念的推理业务高性能边界防护方案，替代传统VPN实现多重安全升级：通过应用隐藏技术大幅收缩攻击面，动态认证与授权机制相较静态认证更能抵御身份伪造风险；将零信任与防火墙深度融合，依托国产SOC芯片加速，零信任代理性能显著提升，在强化安全防护的同时，保障远程访问的流畅体验，全方位化解边界访问安全隐患。

3.4 Agent网关防越权

推理防火墙作为兼具API网关与Agent网关核心能力的关键组件，为智算中心推理场景构建精准防护屏障。其核心优势之一是实现推理业务调用全可视，针对机机交互的API调用场景，建立API调用行为基线，通过实时监测偏离基线的异常行为^[4]，快速识别潜在攻击风险。同时，该网关可代理用户经智能体对内外系统的访问请求，在传输链路中严格校验权限，有效防范权限滥用与越权访问问题，筑牢访问安全边界。此外，网关支持推理资源弹性调度，通过构建资源池动态分配算力：优先保障VIP用户的访问需求，同时兼顾普通用户访问，实现资源利用最大化。三者协同

发力,既保障了推理业务的安全可控,又提升了资源配置效率。

3.5 模型防诱导

大模型推理阶段因训练优化的性能考量与攻击场景的不可穷举性,易遭受恶意提示词注入攻击,引发不良信息输出等风险。推理防火墙依托千万级对抗样本训练的专属模型,精准过滤越狱、恶意诱导类提示词,从源头阻断攻击。同时,防火墙支持自定义过滤功能,通过正则表达式灵活适配特殊防护需求,弥补通用防护的覆盖盲区。针对提示词中隐藏的 SQL 注入、XSS 等常见攻击模式,具备专项识别与拦截能力,全方位防范多类型注入风险。此外,防火墙可限定大模型的对话领域边界,通过“通用过滤+自定义配置+攻击模式拦截+领域限定”四重防护,保障大模型输出的合规性与安全性。

3.6 数据防泄漏

智算场景下数据使用频繁,权限管控与防泄漏至关重要。本方案通过端网协同架构,实现数据无界安全流转,同时筑牢泄漏与越权访问防护屏障。终端侧部署 EDR(支持 PC 与服务器),对数据进行精细化分级分类:按业务场景划分为研发、人力资源等类别,按敏感程度设定机密、高密、秘密、公开等等级。数据使用或流转时,通过底层协议染色技术为数据打上标签,标签随数据报文全程同步流转。网关与推理防火墙作为关键校验节点,依据数据染色标签与用户访问权限实时匹配,一旦检测到越权访问立即拦截^[5]。同时,端网协同构建多维数据流转行为图谱,借助 AI 算法深度分析异常行为,精准识别潜在数据泄漏风险,实现“分级分类—标签溯源—权限校验—智能预警”全链路防护。

3.7 数据防勒索

智算中心的数据价值非常高,勒索病毒攻击容易造成巨量损失,本方案设计“端网存”联动防勒索体系,实现勒索极低误报、数据不丢失的核心保障。本方案基于勒索病毒攻击全流程,构建“网络+存储”多层防护,兼具检测准、处置快、恢复稳三大优势。事前依托 AI 检测引擎与专属算法,对勒索病毒进行智能深度分析^[6],检测率基于业界常规指标提升至 90% 以上,大幅降低病毒漏检风险。事中通过安全态势感知实时收集全网威胁信息,借助网安协同机制快速阻断威胁扩散,将业界需要数天的人工取证、分析、策略配置流程,压缩至分钟级完成分析与处置策略下发。事后态势感知实时同步勒索告警至存储管理器,联动执行快照恢复、数据隔离、恶意文件拉黑等动作,数据恢复速度提升数倍,全方位筑牢数据安全防线。

3.8 安全运营中心

智算中心日均产生百万级告警,人工处理响应慢且多资产监控分散,难以实现全局安全态势感知与快速处置。安全运营中心基于“AI 对抗 AI”思路^[7],构建集智能资产管理、安全检测、威胁防御与事件响应于一体的运营管理体系。中心内置安全大数据平台,支持接入 200 多种网络安全产品的 syslog、kafka 等数据,完成全量数据治理与服务。威胁分析与响应环节,结合威胁情报与 AI 技术,通过检测规则实现威胁检测率,借助丰富事件处置模板达成 80% 以上自动执行率。同时支持多种类型安全态势可视化呈现,从攻击链视角分析威胁趋势,实现全网统一态势感知、精准溯源取证与自动化闭环处置,破解智算中心安全运营难题。

4 结束语

在数字化转型浪潮下,AI 推理服务已成为企业提升核心竞争力的必然选择,但随之而来的全链路安全风险对传统安全防护体系提出严峻挑战。本文立足智算中心安全需求,突破传统安全思维局限,提出基于“零信任”与“机密计算”双核心的多维深度防御体系,为算力底座、数据流转、模型应用至推理服务全流程提供系统性安全解决方案。研究核心价值在于重新定义了 AI 安全与创新的关系——安全并非 AI 发展的阻碍,而是保障其健康可持续推进的核心基石。通过落地该综合安全体系,企业既能充分释放 AI 推理服务的技术红利,又能有效规避各类安全风险,实现数字资产的全面保护,最终在技术创新与风险管控间达成动态平衡,持续赢得市场与客户的信任,为数字化时代的 AI 应用安全提供了可参考的实践范式。

参考文献:

- [1] 赵果. 大数据时代下智算中心的数据安全与隐私保护[J]. 通讯世界, 2025, 32(10): 39-42.
- [2] 薛翌, 潘浩, 侯慧芳, 等. 智算环境安全防护体系研究[J]. 保密科学技术, 2025(05): 37-42.
- [3] 郭雪松, 李雨轩, 陈军, 等. 智算云安全责任共担机制构建[J]. 通信企业管理, 2025(03): 69-72.
- [4] 赵栖平, 丁飞, 王诗怡, 等. 算力中心云服务架构与关键技术研究[J]. 信息技术与政策, 2025, 51(02): 32-34.
- [5] 郭莹, 杨秩, 蔡幸波. 智算中心及边缘计算环境下数据动态脱敏技术研究[J]. 智能建筑电气技术, 2025, 19(01): 15-17.
- [6] 刘泳妍, 郭栩浩. 基于云服务的勒索病毒防范与分析[J]. 网络安全技术与应用, 2024(11): 58-61.
- [7] 金威, 姚昌华, 余晓晗, 等. AI 对抗中基于位置预测的无人机决策方法[J]. 计算机仿真, 2025, 42(07): 15-20.

数控加工技术在机械设计中的应用探析

林金盛

(广东省机械技师学院, 广东 广州 510450)

摘要 当前中国制造业逐步朝着高精度、高效率、高柔性化发展, 数控(CNC)加工已渗透到机械设计领域, 起到联系设计与制造的纽带作用。应用数控加工技术可以大大提高加工质量、加工速度, 实现各种复杂零部件及结构件的高精度加工。鉴于此, 本文简要分析了数控加工技术的优势, 探讨了数控加工技术在机械设计中的典型应用, 并提出提升应用效果的优化建议, 以期为机械设计工程师和制造企业提供有益参考。

关键词 机械设计; 数控机加工技术; 高精密零件设计; 薄壁结构

中图分类号: TH122; TG659

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.038

0 引言

数控技术中的加工技术是指利用数控技术在实际加工的过程中充分地发挥作用, 提高加工的效率, 保证加工的精度水平。具体来说, 数控技术是在传统加工技术的基础上, 充分地利用数控技术, 以达到促进加工质量提高的目的。数控技术在加工技术中的应用反映了加工方式在形式上的一种变化, 是对加工的意义进行更加深入的研究。实践证明, 数控加工技术的应用促进了我国工程机械和装备制造业的健康发展, 促进了我国工程机械自动化水平的进一步提高, 为推动现代装备制造业的发展和进步提供了充足的空间和动力。

1 数控加工技术的优势

就中国的数控(CNC)加工技术而言, 目前其在机械设计方面的应用具有以下几个优点: 第一, 高精度和高重复性。在国产机床中的高精密型如数控立车等, 可以利用多体运动学建立误差模型, 对于几何误差(例如非线性误差), 采用反向补偿方法, 使得其加工误差减小, 在加工成形的复杂零件回转支承滚道微米级精度下可实现。第二, 柔性制造能力强。数控系统可以随时修改加工程序, 做到随时更换加工策略来匹配不同的批量、不同种类的产品加工要求。当前国内大量使用柔性数控车铣复合机床能够快速转换工艺来满足小批量、多品种产品的生产需求, 这种灵活性是机械设计上快速匹配客户需求变化的保障。第三, 缩短调试和研发周期。将设计转向制造, 设计人员能够借助仿真和数控加工相结合的数字化样机, 实现与数控加工公差概率分布模型相关的产品设计及加工过程的

虚拟加工验证, 实现调试和研发周期时间的缩短^[1]。

2 数控加工技术在机械设计中的典型应用

以下四个方面是数控加工在机械设计中具有代表性的典型应用。

2.1 高精密零件设计与制造

精密机械的设计(比如航空零件、微型齿轮、医疗器械等)需要微米级甚至是亚微米级的精度, 而利用中国自主研发的或者从国外进口的高精度数控机床(比如高刚性五轴加工中心), 并运用精密的程序控制与闭环反馈的方式, 将各种各样的曲面、微结构设计出来, 在数控加工上进行加工得到高质量的原型与小批量的生产。这样就能够使得设计的偏差进一步地减少, 将设计意图精准地转变为实际的产品, 并且保证了产品零件的尺寸稳定性以及表面质量。

2.2 复杂曲面和多轴结构件的加工

现在的产品机械设备越来越趋向于复杂曲面、多自由度(机器人关节、航空机体构件等), 传统的三轴加工已经不能满足一次性装夹、高效率的要求, 这就需要更多地采用加工设备, 通常为五轴加工机床, 在不重新装夹的情况下, 可以同时完成加工工件的多个面加工^[2]。设计人员可以根据需要任意构思出一个复杂的空间曲面, 然后借助数控加工来实现; 也可以通过多轴加工来消除人为的干涉和定位, 提高整个结构件的刚性以及质量的一致性。

2.3 重载与高强度结构件的机械设计

对于航天、船舶、工程机械等行业来说, 其结构件承受着较大的载荷, 比如支架、连接件以及框架,

所以机械设计人员就需要考虑到强度、刚度、重量。该类构件往往都是大尺寸、复杂轮廓以及内部有油道或者是减重孔等,在使用的过程中必须保证满足要求之后才能加工使用。而使用数控机床(比如龙门加工中心或者五轴加工中心)可以一次性或者分段来对大块的坯料进行精准加工,实现粗加工向精加工的方向转变。并通过自动刀具路径规划、自动进给参数优化的方法来保证切削质量和机械强度,确保能达到更高精度、更强性能的要求。

2.4 薄壁结构的变形控制加工

在切削环节,受集中荷载影响,薄壁件极易出现弹性偏移,使得其无法稳定成型。而数控加工技术通过分段控制刀具运动轨迹,能够均匀匹配切削力与结构刚度。具体来说,将变速区间设置于路径规划之中,对于壁厚较小的区域可将切削深度以及进给速度减小,让整体受力分布平缓、均匀。不仅如此,柔性夹具与实时监控模块可同步识别壁面偏移量,使系统及时调整刀位坐标,避免反弹位移造成的尺寸偏差。该方式确保了薄壁件的成形刚度在动态加工环境中得到有效维持。

3 数控加工技术在机械设计中的应用效果提升策略

3.1 强化精度来源管理与反馈控制机制

数控加工环境的精度来源管理及反馈控制实际上就是围绕多源误差进行识别、建模以及实时补偿,从而将设计时的几何意图还原到加工过程之中。首先,开展系统误差辨识工作,对机床的几何误差、热变形误差以及切削力误差进行量化计算。工作人员可采用激光干涉仪或者三坐标测量机来大批量检测各个运动轴线性定位误差、回程间隙、直线度、垂直度等情况,测量结束后用最小二乘法等数学方法进行误差的建模。其次,将误差补偿模型安装于数控系统内部,将误差识别的结果通过软件形式转化为补偿表格(例如:坐标轴误差查找表),将其导入数控系统参数中,并利用软件的插补(例如:逆插补、反向偏差补偿)方法来修正行程轨迹。我国数控加工行业也经常会对机床反向间隙(backlash)进行周期性测量并补偿,可以通过百分表或者双频激光干涉仪等高精度测量仪器,得到反向间隙的实际数据,并输入至数控系统的补偿寄存器中。最后,建立闭环反馈控制机制,利用机床测头或测量探针等在机测量装置监测工件关键尺寸偏差并及时反馈给控制器,由控制器触发进行补偿以实

现实时补偿调整。当前国内五轴加工中心普遍集成了在机测量功能,在零件加工完成后利用探头进行在机测量,再由系统基于测量的偏差值自动调节刀路纠正偏差。为了使补偿机制能够正常发挥其作用,还需要经常性开展校准—检验—补偿循环:根据加工周期(按月或者按季),利用激光干涉仪或测头校验定位精度与重复定位精度,记录由热变形及几何漂移导致的偏差值,并校正补偿模型;构建设计—制造协同平台,让机械设计师和加工工程师一起参与误差反馈分析。根据补偿后加工结果,设计师参加补偿模型复核以及工艺参数优化工作,并对以后的设计公差分配及部件的布局做出相应的修正,以减小以后的设计难以补偿的误差来源^[3]。

3.2 推广多轴复合加工中心在关键结构件设计中的应用

在关键结构件设计中推广多轴复合加工中心应以“设计兼容机床能力—工艺先导验证—装夹与刀路一体化—三段闭环工作流”为主线展开,具体做法如下:第一,在设计阶段即引入机床能力约束参数,将机床运动学(回转轴范围、摆角极限、转台直径与承载)、主轴动态响应(最大线加速度、速度曲线平滑性)及刀具伸长极限作为刚性约束写入设计变量集合,采用可达性检测方法对复杂曲面特征进行可加工性判定,必要时在CAD模型中嵌入多轴加工特征标记以引导后续编程,这一先导化设计流程已被国内机床出厂检验和复杂工件实践并承认。第二,在工艺筹备阶段实施“样件—工艺仿真—验证”三步法:以代表性复杂曲面工艺试件(如行业通行的S形试件)对目标机床进行性能验证,基于试件加工结果建立机床刚度、热漂移与回程误差的工艺参数库,再在CAM环境中开展五轴刀路的动力学仿真与碰撞试验,采用基于运动学逆解的刀位优化算法与刀轴倾斜约束策略,以最低角速度变化量保证插补平滑性并减少振动诱发误差。第三,在夹具与工装体系上推广模块化零点定位与多面装夹策略:根据零件分解后的加工面群设计可重定位夹具单元,采用零点定位系统与自适应定位垫圈实现装夹重复精度的线性化,针对大尺寸或非对称构件应用分段平台化装夹并结合局部刚性增强件以降低切削变形,夹具设计同时纳入测头对位基准,便于在机测量与补偿^[4]。第四,在刀路生成与工序编排上,明确区分“3+2定位加工”与“五轴联动加工”两类工序的使用场景:以高曲率连续面优先采用五轴联动以减少装夹次数和

提高表面连贯性,而对特征化孔槽与端面则优先采用3+2定位以简化刀具轨迹与减少计算复杂度;同时基于切削力预测模型优化进给给予切削深度,使用多刀具并行换刀逻辑减少空刀与刀具空转时间。第五,建立机床—工艺—设计的闭环质量控制:在机床侧引入在线测量(机内测头)与自适应进给控制模块,实施工序间在机测量并回传至CAM进行刀路微调,形成“在机测量→偏差识别→刀路修正→复测”的循环,以仪器化的试件结果驱动工艺库更新。

3.3 加强高端本土数控设备与刀具研发能力

为实现高端本土数控设备与刀具能力的实质性跃迁,必须在装备体系、材料与涂层、功能部件、试验验证与产业化路径五个层面同步开展工程化方案与制度化保障工作。具体做法如下:

1. 在装备体系层面,应组织面向高刚性/高稳定性机床的系统化攻关项目,按模块化路线推进主机—主轴—传动—控制器协同设计,建立从基座铸件应力消除、机床机架模态优化到多体动力学仿真的闭环设计流程,并制定机床“能力说明书”(包括热变形曲线、刚度频谱、最小可控误差区间及长期精度保持性指标),用于设计可制造性匹配与工艺审查。

2. 在功能部件层面,应针对主轴(高速与恒定扭矩)、滚动/滑动导轨、丝杠及减速器实施材料—热处理—表面工程一体化开发,推进高阻尼、高耐磨材料的国产化替代,设立部件级加速寿命试验与热稳定性测试规范(例如:恒功率切削热载荷循环测试),并将测试数据以标准化模板供机床整机校验使用。

3. 在刀具与刀具材料层面,应构建由国家级研究所(如成都工具研究所)牵头的刀具牌号研发平台,按照“牌号设计—微观组织调控—涂层工艺—刀具几何优化—切削状态标定”的闭环工艺路线,开展碳化物基体成分微合金化、纳米多层涂层工艺和微凹槽自润滑结构的协同研发;同时基于工具显微硬度、摩擦学与断屑行为的量化试验(采用高频动力学切削测试台与在线力/温度/声学传感)建立材料性能—切削参数的参数化数据库以支撑设计端的刀具选型决策。为确保研发成果可产业化,应设立机床—刀具联合验证线:以典型工业零件(大尺寸薄壁件、复杂曲面关联件、难切削合金构件)为验证对象,实施从试制、在机测量、误差统计到过程能力(Cp/Cpk)评估的完整验证程序,并将验证结果纳入机床出厂能力证书与刀具牌号工作说明书;在认证流程中引入第三方测量

机构与行业协会能力评审,以形成可追溯的合格记录。此外,还应通过财政与产业政策激励(设立“高档数控与关键刀具”专项资金,支持攻关与中试设备采购)和产学研联合机制,推动“揭榜挂帅”式课题与企业导师制,加速技术向规模化生产的转移;并在行业内推广统一的部件接口与试验基准,从而使本土高端机床与刀具在可靠性、可维护性和配套生态上实现系统性提升。

3.4 建立数控加工以及机械设计协同人才培养与标准化体系

提高数控加工的应用程度,应注重加强人才建设和标准化建设。可与高校机械设计制造及其自动化等专业共同打造校企联合培养方式,设置误差分析、机床动态特性、刀具工艺学、多轴加工路径规划等课程,着眼于培养复合型人才,让其成为兼具机械设计知识基础以及数控编程、路径规划、刀具工艺等能力的复合型工程师^[5]。此外,推动行业协会(例如:中国机械工具协会)出台针对机械设计与数控加工协同的相关标准:公差分配规则、夹具标准、路径规划规范、设计可加工性评价等;并通过标准化导引设计方、制造方实现统一的技术接口、质量控制、工艺流程,以此来减少沟通摩擦、提升效率。

4 结束语

机械制造业对于国家的发展具有极为重要的意义,可以有效地促进国家经济的增长。在机械设计中,数控加工技术具有高精度、高柔性和高自动化等优势,在具体应用环节可以通过高精度反馈控制、多轴加工推广、高端设备与刀具自主研发以及协同人才与标准体系建设等策略,来进一步提升数控加工的应用效果,以更好地支撑中国制造向高端化、智能化迈进。

参考文献:

- [1] 樊圣. 数控加工技术在机械设计中的应用及优化建议[J]. 工程技术与管理, 2023(13):49-51.
- [2] 黄锬. 机械设计与加工中CAD/CAM技术的应用[J]. 黑龙江科学, 2023,14(04):133-135.
- [3] 杜宏宇, 铁正. 整体叶轮五轴数控加工技术研究[J]. 南方农机, 2024,55(20):140-143.
- [4] 张楠, 张洁. 数控加工技术在机械工业设计与制造中的应用研究[J]. 装备制造技术, 2025(01):123-125.
- [5] 杨勇考. 零件数控车削加工工艺设计与仿真加工[J]. 内燃机与配件, 2024(05):117-119.

水利工程高边坡勘察设计质量控制措施研究

雷永旭

(江西华水勘测设计有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要 水利工程高边坡是保证工程结构稳定的重要载体, 其勘察设计质量直接关系到工程的安全性和长期运行效益。该类边坡长年受地形、地质、水文环境变化和工程扰动等因素的影响, 易发生滑坡、崩塌等地质灾害, 严重威胁着水利工程的防洪、发电和供水等核心功能。本项目以水利工程高边坡勘察设计全过程为研究对象, 对勘察设计阶段地质勘察精度不足、稳定性评估手段单一、支护设计脱离实际工况等关键科学问题进行系统研究。本文从勘察工艺优化、稳定性评价体系完善、支护设计精细化方面, 构建覆盖地质勘察、参数选择、方案设计、施工衔接的质量控制体系, 并以大型水库高边坡工程为研究对象, 对所提出措施的应用效果进行验证, 以期对相关人员进行提供借鉴。

关键词 水利工程; 高边坡; 勘察设计; 稳定性评价; 支护设计

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.039

0 引言

高边坡勘察是控制工程稳定的源头, 其质量水平直接影响到后续工程的安全和运行可靠度。我国水利工程高边坡勘察设计领域还存在诸多不足: 部分工程受工期限制, 勘察流于形式, 钻孔布设密度不够, 对关键地质体(如隐伏断层、软弱夹层)的识别存在疏漏。以往的稳定性评价主要依赖于传统的极限平衡方法, 忽略了岩体的非线性变形特征和动力荷载下稳定演化规律。现有的支护设计方案都是照搬同类工程的经验, 没有根据边坡的具体地质条件和水文条件进行个性化的优化, 导致了“过度支护”和“支护不足”的现象比较普遍。这不仅增加了工程造价, 而且存在严重的安全隐患, 制约了水利工程的综合效益。基于此, 研究水利工程高边坡勘察设计质量控制措施具有重要意义。

1 水利工程高边坡勘察设计核心特征与质量影响因素

1.1 高边坡勘察设计核心特征

复杂的地质环境对边坡的影响尤为突出, 边坡一般经历了多期构造活动, 节理、裂隙发育, 在长期的库水和地下水的渗透作用下, 其物理力学参数呈现动态变化。在峡谷地区, 高边坡易形成潜在滑裂面, 断层破碎带和卸荷裂隙等不良地质体。除了自身重力作用外, 库水推力、施工爆破震动、地震和温度应力等多种外部荷载共同作用, 荷载作用形式随施工阶段(施工期、蓄水期、运行期)动态调整^[1]。水库蓄水期, 坝肩的高边坡要承受很大的水平水压, 而施工过程中

的爆破震动和开挖卸荷又是主要的影响因素。

1.2 勘察设计质量核心影响因素

地质调查资料是勘察设计的依据, 其准确与否直接影响到后续工作的质量。其主要表现在: 调查布点密度不够, 不能覆盖斜坡关键部位(如斜坡转折处、地质界线附近); 由于钻孔深度不能触及潜在滑移面或稳定层, 不能揭示边坡内部的地质构造; 室内试验参数的选择脱离了工程实际, 如没有考虑地下水对岩体强度软化的影响, 仅以干态试验参数进行设计; 由于地球物理勘察和钻井的结合不够紧密, 对隐伏地质体的识别精度不高, 造成了地质模型的变形。

支护设计方案是控制边坡稳定的核心措施, 其质量问题主要体现在支护结构选择不当, 如在硬岩边坡过度使用抗滑桩等重型支护结构导致成本浪费等。软岩边坡排水系统不完善, 致使地下水积聚, 使岩体软化; 支护参数的设计比较保守或者不够充分, 一般都是依靠经验来确定锚杆的锚固长度, 没有经过现场抗拔试验的检验; 设计细节不够完善, 支护结构和岩体界面处理不当, 影响了支护效果。

2 水利工程高边坡勘察设计质量控制关键措施

2.1 勘察阶段质量控制

2.1.1 勘察方案个性化制定

摒弃以往“一刀切”的勘察布点方式, 根据前期地质勘察成果和工程重要程度, 根据边坡高程、地形坡度、前期地质勘察成果, 制定差异化勘察方案。对于高达 50 m 以上的高边坡和坝肩边坡, 必须采取“分层

勘察,重点加密”的原则。采用地质测绘和物理测量相结合的方法,结合无人机航测等方法,在坡体上部(坡顶至坡顶2/3高程)建立边坡三维地貌模型。坡下段(高程2/3以下至坡脚处)为应力集中区,勘察线间距缩短至20~30 m,需钻穿潜在滑动面以下3~5 m,保证深部地质结构清晰;在边坡转捩、地质界线及疑似软弱夹层分布的区域,钻孔间距控制在10~15 m之间。利用无人机搭载高精度相机,对陡峭地形、人迹难及地区进行边坡地表裂隙识别和地形建模,并联合无人机提升钻井装备和便携式地质雷达,确保勘察布点覆盖所有关键地段。例如:某水电站左坝肩(82 m)高边坡勘察过程中,识别了3个厚度0.3~0.8 m的隐伏软弱夹层,比常规勘察方案多出2个风险点,为后续支护设计、规避施工期滑坡风险提供了重要依据。

2.1.2 勘察技术多源融合应用

建立“空中、地面、地下”立体勘察系统,实现边坡地质条件的全方位立体调查。采用无人机航测技术,搭载高精度激光雷达(LiDAR),快速获取坡面地形、裂隙分布、植被盖度等信息,并生成1:500高精度地形模型和正射影像,为地质测绘提供基础数据。地面调查采用地质雷达和高密度电法,利用地质雷达对0~30 m的浅地层裂隙、软弱夹层和地下水进行探测,利用高密度电法对50 m以内的地层岩性界面和含水层进行有效识别,提高了隐伏地质体的识别精度^[2]。地下勘察采用钻孔取芯,结合声波测井对岩体完整性进行评价,取芯率要大于85%,关键部位如软弱夹层取芯率不小于90%。现场试验主要包括岩体抗压强度、抗剪强度、点荷载和压水试验,每一关键地质单元进行3次以上的测试,以保证所测参数的代表性。

2.2 稳定性评价阶段质量控制

2.2.1 识别关键风险源

在调查资料的基础上,从地质构造、岩体质量和水文条件三个方面对边坡进行定性评价,识别出主要的危险源。地质构造分析的重点是断层及软弱夹层的产状(走向、倾向、倾角)及展布情况,判断是否为潜在滑裂面;采用RMR(岩体地质力学分类)或Q-体系分级法,综合考虑节理裂隙发育程度和岩体完整性系数等因素,对岩体质量进行分级(I~V);水文条件评价以地下水软化岩体强度为重点,通过井下水位监测和渗流监测,识别渗流区,分析地下水对边坡稳定性的不利影响。在定性评价过程中,为了直观地显示边坡的地质特性,需要编制工程地质剖面图和节理裂隙图^[3]。针对存在多种潜在危险源的边坡,运用风险矩阵方法对各危险源进行分级(高、中、低),明确

关键分析目标,进行定量计算。例如:对某水库坝肩高边坡进行了定性评价,确定了由软弱夹层控制的2个高风险潜在滑裂面,从而确定了下一步定量计算目标。

2.2.2 跟踪工况变化

在前期工作基础上,综合考虑不同施工阶段对边坡稳定性的影响,分阶段进行动态评估,实现边坡整体稳定监测。在施工准备阶段,根据勘察资料,对边坡进行初步稳定评估,确定边坡的初始风险等级,为支护设计提供依据;施工阶段每隔10~15 m进行一次稳定性复核,并结合施工进度,着重研究开挖卸荷和爆破震动对边坡稳定的影响;在运行期,基于库水位变化(蓄水、放水)和边坡变形监测资料,对长期运行条件下边坡稳定性演变趋势进行评估^[4]。施工爆破震动对岩体完整性的影响是动态评估的重要内容。例如:采用预裂爆破技术减小了对边坡岩体的扰动,并通过控制单段药量,使爆破震动速度控制在5 cm/s以内,防止岩体再裂。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某大型水库工程地处西南山区,是集防洪、发电、供水功能于一体的综合水利枢纽工程,坝高120 m,库容15亿m³。左坝肩高边坡是该工程的重点部位,坝体左侧K0+000-K0+300,最大高程95 m,坡角45°~60°,沿坝轴线方向平行于坝轴线,承担着坝肩稳定和坝体荷载传递的功能,其稳定性直接关系到大坝安全,勘察设计质量控制标准极高。前期研究表明,该边坡主要为花岗岩类,含3个(0.5~1.2 m)软弱夹层,夹层为泥页岩,抗剪强度低(凝聚力C=25 kPa,内摩擦角 $\phi=18^\circ$);边坡区地下水储量丰富,以大气降水和库水为主要补给来源。地震动峰值为0.10 g,地震动基本烈度为Ⅶ度,区域稳定程度为中等^[5]。为了确保边坡排水通畅,在水利工程建设时常在施工开挖线外的坡面设置排水沟,在开挖面设置排水孔,从而控制基岩渗水压力对边坡的破坏影响。工程在大坝基坑开挖时,在死水位以上的开挖面,根据具体情况设置数量及深度恰当的排水孔,排水孔倾向坡外10°,合理控制排水孔的孔深、孔径及分布情况。

3.2 质量控制措施应用

3.2.1 多源技术融合精准勘察

采用“无人机航测+地质雷达+钻井+原位测试”的综合勘察方法,编制了多层次的勘察方案。在坡体上部(0~30 m),以地质雷达和无人机航测为主,布设5条50 m的勘察线;坡体中部(30~60 m)勘察线间距减至20 m,增加8个钻孔;在斜坡下部(60~95 m)

和软弱夹层分布区域,加密钻孔 14 个,钻孔深度均在潜在滑动面以下 5 m 处,累计钻孔 22 口,总进尺 1 200 m。现场进行了 36 组岩石抗压强度、24 组抗剪强度和 22 组压水实验,完成了 52 组岩石力学测试。采用“三参数法”确定了花岗岩的抗压强度为 35~45 MPa,抗剪强度 $C=45$ kPa, $\phi=32$ 。试验结果表明,软弱夹层的抗压强度为 1.5~2.5 MPa,抗剪强度为 28 kPa, $\phi=19^\circ$,比常规勘察方法精度提高 20% 以上。经勘察,确定了 3 个软弱夹层和 2 个潜在滑裂面。

3.2.2 差异化精细化设计

根据边坡的分区地质情况和稳定性评价结果,采取了差别化的支护方案:上坡(0~30 m)采用 $\Phi 25$ 、间距 3 m、锚固长度 3 m 的“锚杆+喷砼”支护,喷浆 C25 混凝土 15 cm;坡体中部(30~60 m)采用“锚杆+锚索+格构梁”组合支护,锚杆间距 3 m,锚索 $\Phi 15.24$,间距 4 m,预应力 180 kN;格构梁为 40×50 cm, C30 混凝土。在坡体下部(60~95 m)及软弱夹层区域,采用“防滑桩+锚索+排水系统”联合支护,采用 1.5×2.0 m、间距 6 m、桩长 25 m(嵌入稳定岩层 5 m)、锚索间

距 3 m、预应力 200 kN。采用“截水沟+坡面排水孔+内排孔+排水盲沟”的排水系统,坡顶截水沟尺寸 0.6×0.8 m,坡面泄水孔间距 2.5 m,内部仰斜排水孔间距 4 m,排水盲沟设置于坡脚,确保地下水及时排出^[6]。根据不同边坡高度来开展边坡的设计工作。当边坡高度 < 40 m 时要将稳定坡率放在首位;而当边坡高度 ≥ 40 m 时要控制坡率,防止因为边坡放缓而产生大量的土石方开挖,同时对边坡上的植被造成破坏。因此,在针对这类坡度及坡率都较高的边坡,可以选择支挡加固的方式来提升边坡的稳定性。

3.3 应用成效

经过两年多的变形监测和稳定性复核,其应用效果明显(见表 1)。结果表明:地质调查的精度达到 96%,比传统方法提高了 11%;边坡稳定系数为 1.35,满足设计要求;最大累积变形只有 4.2 mm,远远小于规范规定的 10 mm;支护工程造价比工业平均水平低 12%,达到了安全与经济统一的目的;施工过程中只发现一处质量隐患,运行期间稳定率 100%,保证了大坝的安全运行^[7]。

表 1 某水库左坝肩高边坡勘察设计质量控制成效指标

评价指标	规范要求/行业标准	实际成果	提升幅度/改善效果
地质勘察准确率	≥ 85%	96%	11%
边坡安全系数(天然状态)	≥ 1.3	1.35	3.8%
最大累计变形量	≤ 10 mm	4.2 mm	58%(变形量降低)
支护工程成本	行业均值	低于行业均值 12%	12%(成本节约)
施工期质量隐患数量	≤ 5 处	1 处	80%(隐患数量减少)
运营期稳定性达标率	100%	100%	稳定达标,无安全风险
支护方案优化周期	≤ 15 天	3 天	80%(周期缩短)

4 结束语

水利工程高边坡勘察设计质量控制是保证工程安全的重要环节。高边坡勘察设计具有地质条件复杂、荷载作用多样、工程关联性强等特点。本研究突破传统设计思想的局限,提出“精准勘察、动态评估、差异化设计”的质量控制理念,并通过某水库左坝肩高边坡工程的研究,验证所提出的质量控制措施。结果表明,地质勘察精度提高 11%,降低边坡变形量 58%,节省支护成本 12%,验证了其有效性和实用性。

参考文献:

[1] 刘飞鹏,许婧. 水库工程天然高边坡的稳定性分析[J]. 江西科学, 2025, 43(05): 930-935.

[2] 匡朝正. 大坝高边坡开挖及支护施工技术探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(09): 41-45.

[3] 李亚斐. 水利工程高边坡稳定性控制技术[J]. 中国科技信息, 2025(16): 59-61.

[4] 卢树盛, 向能武, 孙云志. 高边坡勘察新技术在水利工程中的应用现状、挑战与展望[J]. 中国水利, 2024(14): 44-50.

[5] 吴贵军. 水利工程高边坡勘察设计质量控制措施[J]. 四川建材, 2021, 47(04): 81-82.

[6] 狄瑞. 水利工程高边坡勘察设计质量控制管理[J]. 水利技术监督, 2020(04): 21-22, 198.

[7] 孙明. 高边坡水利工程施工安全风险识别与智能防控技术探索[C]// 中国智慧工程研究会. 2025 智慧设计与建造经验交流会论文集. 山东安澜工程建设有限公司, 2025.

短肢剪力墙在民用建筑设计中的应用探究

来燕丰

(中国联合工程有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要 随着城市化进程加速, 民用建筑对结构体系的灵活性、经济性及抗震性能提出了更高要求。短肢剪力墙以其适中的刚度与良好的空间适应性, 逐渐成为高层住宅与公共建筑中的重要抗侧力选择。本文从设计原则、受力机理及工程实践三个维度, 深入探讨短肢剪力墙在民用建筑中的创新应用路径, 并结合当前规范局限、计算复杂性与施工难点, 系统分析其优势与挑战, 进一步提出优化构造措施、完善质量控制体系及推动材料工艺升级等综合策略, 以期在结构安全、功能适配与建造效率的协同提升提供理论参考。

关键词 短肢剪力墙; 民用建筑设计; 受力性能; 抗震性能

中图分类号: TU24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.040

0 引言

短肢剪力墙作为一种高效抗侧力构件, 近年来在民用建筑设计中得到广泛应用。其兼具剪力墙刚度大与布置灵活的特点, 尤其适用于高层住宅、公寓等对空间利用率要求较高的建筑类型。相较于传统剪力墙体系, 短肢剪力墙在满足结构安全的同时, 显著提升了建筑平面布局的自由度和使用功能的适应性。随着建筑功能日趋复杂、抗震设防标准不断提高, 如何科学合理地应用短肢剪力墙成为结构设计中的关键课题。本文系统分析短肢剪力墙的受力特性、设计要点及其在实际工程中的应用价值, 旨在为相关设计实践提供参考。

1 短肢剪力墙在民用建筑设计中的应用优势

1.1 结构布置灵活性与空间适应性

短肢剪力墙在民用建筑设计中展现出显著的空间布局优势。相比传统剪力墙体系, 短肢剪力墙通过合理控制墙肢长度, 既保证了必要的抗侧刚度, 又避免了传统长墙对建筑空间的分割限制。这种结构形式特别适用于住宅类建筑中需要灵活划分室内空间的场景, 能够更好地适应现代建筑对功能多样性的要求。在具体应用中, 设计人员可根据建筑平面功能需求, 将短肢剪力墙布置在分户墙、电梯井等位置, 既满足结构受力需要, 又最大限度释放了室内使用空间。短肢剪力墙的布置方式为建筑立面的开窗设计提供了更多可能性, 有利于改善室内采光条件和空间视觉效果。这种结构体系的空间适应性还体现在其对不规则平面形状的包容性上, 能够通过不同方向的墙肢组合形成有效的抗侧力体系^[1]。

1.2 受力性能与经济性平衡

短肢剪力墙在结构受力性能与经济性之间实现了较好的平衡。从力学性能角度分析, 短肢剪力墙既保留了剪力墙抗侧刚度大的特点, 又通过控制墙肢长度避免了过于刚性的受力特性。这种适中的刚度特性使其在地震作用下能够发挥良好的耗能能力, 同时避免产生过大的地震作用。在正常使用状态下, 短肢剪力墙能够有效控制结构在风荷载和地震作用下的层间位移, 保证建筑使用的舒适性和安全性。从经济性角度考量, 短肢剪力墙的混凝土和钢筋用量相对传统剪力墙更为节约, 同时其施工难度相对较低, 有利于缩短工期和降低工程造价。这种结构形式特别适合于中等高度范围的民用建筑, 在保证结构安全的前提下实现了建造成本的优化。

1.3 抗震性能与延性设计

短肢剪力墙在抗震性能方面具有独特优势。其抗震能力主要体现在墙肢的合理长度设计使得结构在遭遇地震时能够形成较为理想的破坏机制。较短的墙肢长度有利于避免剪力墙出现剪切型脆性破坏, 促使结构形成以弯曲变形为主的延性破坏模式。这种破坏模式能够通过墙肢端部形成塑性铰来耗散地震能量, 为结构提供额外的安全储备。

在延性设计方面, 短肢剪力墙通过合理的构造措施可以实现较好的变形能力。墙肢边缘构件的合理配筋设计能够有效约束混凝土, 提高墙肢的极限变形能力。短肢剪力墙的连接梁设计也会对其整体抗震性能产生重要影响, 合理设计的连接梁可以在墙肢之间传递内力, 促进结构整体协同工作。

1.4 施工便利性与质量控制

短肢剪力墙在施工过程中表现出较好的可操作性。由于墙肢尺寸相对较小,模板支设和混凝土浇筑作业难度显著降低,这有利于提高施工效率并保证施工质量。在钢筋工程方面,短肢剪力墙的钢筋布置相对简单,钢筋间距较为宽松,便于施工人员操作和混凝土的充分振捣。这种结构形式还减少了施工缝的数量,有利于提高结构的整体性。从质量控制角度考虑,短肢剪力墙的施工过程更容易实现标准化作业,各道工序的质量控制点更加明确。混凝土浇筑过程中的密实度更容易保证,避免了因墙体过厚而产生的温度裂缝问题。短肢剪力墙的检测验收工作也相对简便,有利于工程建设各方对施工质量进行有效监控。

2 短肢剪力墙在民用建筑结构设计应用中面临的挑战

2.1 设计理论与计算方法的复杂性

短肢剪力墙的设计分析面临理论体系尚不完善的挑战。现行规范对短肢剪力墙的具体设计规定相对简略,设计人员在实际应用中往往需要借助工程经验进行判断。这种结构形式的受力机理介于普通剪力墙和框架柱之间,其边界条件的确定存在较大难度。在计算分析时,短肢剪力墙的刚度退化特性、塑性铰形成机制等关键参数难以准确量化,给精确计算带来困难。有限元分析中,墙肢与连梁的协同工作模型建立需要充分考虑材料非线性、几何非线性等多重因素,计算过程复杂且结果可靠性有待验证。设计过程中还需合理确定短肢剪力墙的适用高度范围、轴压比限值等关键指标,这些都需要基于大量试验研究和工程实践数据的支撑^[2]。

2.2 构造措施与连接设计的特殊性

短肢剪力墙的细部构造要求较高,特别是墙肢与楼板、连梁等构件的连接部位需要特殊处理。墙肢边缘构件的配筋构造直接影响结构的抗震性能,过密的钢筋布置可能导致混凝土浇筑困难,而过疏则无法保证约束效果。连接梁的设计需要平衡刚度需求与延性要求,既要保证足够的抗剪能力,又要避免出现脆性破坏。在节点区域,钢筋的锚固长度和弯折要求往往与常规设计有所不同,这给施工图设计和现场施工都带来了挑战。短肢剪力墙的构造措施还需要考虑温度应力、收缩徐变等长期效应的影响,防止使用过程中出现裂缝等质量问题。

2.3 材料性能与施工质量的敏感性

短肢剪力墙对材料性能和施工质量的要求较为严格。混凝土的工作性能直接影响墙肢的浇筑质量,过

高或过低的坍落度都会影响结构的最终性能。钢筋的定位准确性对短肢剪力墙尤为关键,较小的截面尺寸使得钢筋位置偏差可能显著影响受力性能。施工过程中的模板安装精度要求较高,任何偏差都可能改变墙肢的实际受力状态。混凝土的养护质量也直接影响短肢剪力墙的长期性能,早期裂缝的出现可能降低结构的耐久性。短肢剪力墙对预埋件、设备洞口等细节处理也更为敏感,这些部位的应力集中现象需要特别关注。施工单位的专业技术水平和质量管理体系直接影响短肢剪力墙的实际应用效果。

2.4 适用范围与工程经验的局限性

短肢剪力墙的应用范围受到较多限制,其在高烈度地区的适用性仍需进一步验证。不同地区的地质条件和抗震设防要求差异较大,这给短肢剪力墙的推广应用带来了挑战。现有工程实践多集中在特定类型的建筑中,缺乏在复杂建筑形式中的应用经验。设计人员对短肢剪力墙的认识深度不一,这可能导致设计方案的合理性和安全性存在差异。在实际工程中,短肢剪力墙往往需要与其他结构形式配合使用,这种混合结构体系的设计方法尚不成熟^[3]。

3 短肢剪力墙在民用建筑结构设计中的应用优化提升策略

3.1 设计方法创新与理论完善

短肢剪力墙设计理论的系统化研究是提升其应用水平的重要基础。当前需要建立更为精确的计算模型,充分考虑墙肢与连梁在不同受力阶段的协同工作机制。通过开展系统的试验研究和深入的数值模拟分析,可以全面掌握短肢剪力墙在弹性、弹塑性及极限状态下的性能表现规律。这些研究应当重点关注墙肢的刚度退化特性、塑性铰形成机制以及能量耗散能力等关键指标,为设计参数的合理确定提供充分的科学依据。设计方法的创新需要特别注重实用性和可操作性,开发适用于工程实际的设计辅助工具和专业软件,使复杂的设计计算过程变得更加便捷高效。必须加强短肢剪力墙与其他结构构件连接设计的理论研究,明确力的传递路径和可能的破坏机制,为节点设计提供理论指导。设计理论的完善还需要充分考虑不同地区抗震设防要求的差异性,建立分区域、分等级的设计指南和技术标准。这些研究成果的系统整合和推广应用将显著提高短肢剪力墙设计的科学性和可靠性,为工程实践提供有力的技术支撑。

3.2 构造措施优化与标准化

构造细节的合理设计对保证短肢剪力墙的整体性能具有决定性影响。应当系统研究墙肢边缘构件的最

优配筋形式,在确保足够约束效果的同时,充分考虑施工的可行性和便利性。连梁的设计需要寻求刚度与延性的最佳平衡点,通过合理的截面尺寸设计和科学的配筋方式,实现预期的抗震性能目标。节点区域的构造措施应当进行深入的标准化研究,形成可推广应用的典型连接做法和标准图集。针对施工过程中常见的质量问题,需要制定针对性的构造控制措施,特别是在钢筋精确定位、混凝土浇筑密实等关键环节提出明确的操作指南。标准化构造图集的系统编制将有助于统一设计标准,提高工程质量的均好性。另外,还应研究适用于不同施工条件和工程特点的构造变通方案,增强设计方案的适应性和灵活性。构造措施的优化还需要考虑施工工序的合理安排,避免因构造复杂导致的施工困难。此外,还应当建立构造措施的评估机制,通过实际工程验证其有效性,并不断进行优化改进。

3.3 材料性能提升与工艺改进

新型建筑材料的开发应用为短肢剪力墙性能的进一步提升创造了有利条件。高性能混凝土的合理使用可以有效改善墙体的抗裂性能和长期耐久性,各种纤维增强材料的科学掺入有助于显著提高构件的变形能力和延性性能。钢筋材料的优化选择需要综合考虑强度指标、延性特征以及施工工艺性能的多重要求,寻求最佳的材料配比方案。施工工艺的改进重点在于提高混凝土的浇筑质量,研发适用于窄小空间的特种振捣技术和科学养护方法。模板系统的创新设计应当确保墙肢尺寸的精确控制,同时着力提高支模效率和经济性。针对钢筋安装精度要求高的特点,需要研究开发有效的定位措施和检查方法,确保钢筋位置的准确性。预拌混凝土的全程质量控制、运输过程的连续性管理以及浇筑作业的规范性操作都是保证施工质量的关键环节。新工艺的推广应用需要建立完善的技术培训体系,确保施工人员熟练掌握操作要点。应当加强施工过程的监测和记录,为工艺改进积累实践数据^[4]。

3.4 质量控制体系完善

建立全过程、全方位的质量控制体系是确保短肢剪力墙应用效果的重要保障。从设计阶段开始,就需要明确各个关键质量控制点和相应的验收标准,为质量控制提供明确依据。施工过程中应当制定详细的操作规程和作业指导书,特别要对钢筋安装精度、模板支设质量、混凝土浇筑工艺等关键工序实施重点控制。质量检测方法的完善包括开发适用于短肢剪力墙的特种无损检测技术,能够准确评估混凝土的密实度状况和钢筋的实际位置。建立完善的质量记录制度和可追

溯体系,实现质量问题的源头追溯和责任认定。需要加强对施工人员的系统技术培训,提高其对短肢剪力墙施工要点的掌握程度和操作技能水平。监理单位的专业能力提升也是质量控制的重要环节,需要制定专门的监理实施细则和验收标准。

3.5 工程应用拓展与经验总结

短肢剪力墙的应用范围需要通过大量的工程实践来不断拓展和验证。在系统总结现有工程经验的基础上,应当积极探索在不同类型建筑中的应用可能性和适用条件。高层住宅建筑中的成功经验可以逐步推广到其他类型的民用建筑中,如学校、医院等对使用功能有特殊要求的公共建筑。针对不同地区的抗震设防要求,需要积累相应的工程应用数据和实践案例,为技术规范的修订完善提供充分支持。既有建筑改造中短肢剪力墙的应用经验值得深入总结和研究,形成适用于改造工程的特殊设计方法和施工技术。工程经验的交流与共享机制的建立完善,有助于促进设计水平和工程质量的整体提升。应当加强设计、施工、科研等各相关方的协同合作,形成完整的技术创新链条和产业协作体系^[5]。

4 结束语

短肢剪力墙通过优化墙体尺寸与布局,有效平衡了结构刚度与建筑功能需求,在民用建筑中展现出显著优势。未来,随着材料技术与设计理论不断发展,短肢剪力墙有望在抗震性能、节能环保等方面实现进一步突破,为建筑结构设计提供可持续的解决方案。同时,应加强其在高烈度地震区及复杂建筑形态中的适用性研究,推动相关规范标准的细化与完善,并深化产学研协同,促进设计、施工与运维全生命周期的技术集成,从而全面提升短肢剪力墙体系的安全性、经济性与适应性。

参考文献:

- [1] 韩艳.短肢剪力墙在民用建筑结构设计中的运用分析[J].建设科技,2024(18):71-73.
- [2] 申鹏,刘洋.短肢剪力墙在民用建筑结构设计中的运用分析[J].居舍,2024(20):104-107.
- [3] 魏晓军.短肢剪力墙在住宅民用建筑结构设计中的应用[J].居舍,2024(17):57-60.
- [4] 李莉.短肢剪力墙在民用建筑结构设计中的运用与思考[J].居业,2023(10):104-106.
- [5] 王根华.短肢剪力墙在民用建筑结构设计中的应用探究[J].江西建材,2023(03):210-211,214.

窄间隙焊接工艺及自动化设备在厚板焊接中的应用研究

王永庆

(中国石油工程建设有限公司, 北京 100120)

摘要 在工业生产阶段, 重型机械、船舶制造、压力容器等关键领域都广泛应用厚板结构, 其焊接质量和效率直接影响装备整体性能以及服役过程中的安全。传统厚板焊接工艺因焊缝宽度偏大、热输入高, 常出现成型不理想、变形量偏大等问题, 难以契合现代工业对高精度、高效率焊接的需求。本文针对窄间隙焊接工艺及自动化设备在厚板焊接中的应用展开研究, 系统剖析窄间隙焊接工艺在焊缝成型、生产效率、变形管控等方面的核心优势, 考察自适应系统、焊接机器人单元、数据采集分析系统等自动化设备的应用模式, 重点阐释焊缝跟踪、智能工艺决策等关键技术的实践手段, 以期通过工艺优化及设备集成, 构建适配厚板焊接的高效处理方案, 为厚板焊接作业的质量提升、效率提高和自动化升级提供技术参考, 助力窄间隙焊接技术在工业领域实现规模化应用。

关键词 窄间隙焊接工艺; 自动化设备; 厚板焊接

中图分类号: TG44

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.041

0 引言

随着工业制造向大型化、重型化方向发展, 厚板结构在诸多关键装备中的应用占比持续上升, 其焊接技术水平成为制约装备制造质量的核心因素之一。在厚板焊接的过程中, 传统焊接工艺受自身技术特性的局限, 遇到许多明显难题: 焊缝成型稳定性不佳, 容易引发气孔、裂纹等缺陷, 质量精准控制难以实现; 焊接工序繁杂, 需进行多层多道的焊接作业, 导致生产效率处于较低水平; 依赖人工操作的环节较多, 自动化与智能化程度较低, 不仅增加了人力成本, 还因人为因素影响焊接质量的一致性。

厚板焊接技术的进步迫切需要突破传统工艺局限, 寻求兼具高质量、高效率和高自动化特性的新型技术手段。窄间隙焊接工艺凭借焊缝间隙窄、热输入集中等特性, 在减少焊接材料消耗、控制焊接变形方面展现突出优势, 而自动化设备的融入为该工艺的精准实施提供了保障。开展窄间隙焊接工艺及自动化设备在厚板焊接应用实例的研究, 可切实解决传统厚板焊接存在的质量控制困难、效率较低、自动化程度不足等问题, 提升厚板焊接标准化及智能化的水平。此研究不仅符合工业制造转型升级的发展需求, 还可为相关领域的技术创新提供理论参考及实践借鉴, 对推动装备制造行业实现高质量发展具有重要的现实意义。

1 窄间隙焊接工艺优点概述

1.1 具有优良的焊缝成型效果

焊缝成型效果佳, 窄间隙焊接凭借特有的加工方法, 优势十分明显。在执行窄间隙焊工艺时, 采用窄间隙焊接方式, 焊缝横截面近似矩形, 此形状极大地提升了焊缝成型能力, 外形规整且端正, 内部缺陷发生率显著下降, 有效增强了焊接的可靠性^[1]。

1.2 生产效率显著

从焊接技术角度看, 窄间隙焊接凭借独特优势成为技术关键, 其高效焊接的特性十分突出, 焊接生产率较高。窄间隙焊接凭借其特有的窄缝结构设计, 显著提升了焊丝及焊渣的利用效率, 同时焊接过程大幅提速, 进而有效增强了焊接效能。

1.3 有助于实现低变形焊接

针对焊接工艺的实施, 若接合处变形不明显, 通过窄间隙焊接可大幅降低结构变形程度, 该属性是其关键亮点, 采用专门工艺参数进行窄间隙焊接, 相对普通焊接技术, 熔池横截面积积极减小, 减少了需熔融及凝固的金属量, 实现了热量的优化调控, 热流传递强度降低, 加工件热场梯度下降, 热耦合应力减小。热应力是焊接变形产生的关键驱动力, 热应力递减, 变形量级大幅下降, 针对结构复杂的大型机械零件加工时, 对结构件的尺寸偏差与形状误差限制严格, 若

加工受热产生明显形变,返工过程必然抬高支出,甚至削弱结构功能性,采用此种焊接方式可明显降低形变程度,维持产品成形稳定性,促进高效产出,对体积大、构造复杂的工件加工优势明显^[2]。

1.4 便于实现自动化生产

在高度自动化的窄坡口焊接场合,若想追求良好焊接质量,就必须实现焊枪工作角度的精准把控。由于该工艺对参数精度有着极高要求,人为控制难以实现参数的长期稳定达标,采用自动化方案恰好能满足此类精密控制需求,它可以可靠地进行精密定位与姿态调整,依照既定程序,实时闭环调节焊枪在窄间隙空间的构型,达成焊接过程可控、结果一致的目的。

1.5 经济性优势突出

窄间隙焊接坡口截面积较传统工艺有效缩减,填充金属用量大幅降低;低变形特性减少焊后矫正工序,能耗与人工成本同步下降。全周期综合成本较宽坡口焊有效降低,经济性显著提升,尤其适用于大型构件批量制造场景。

2 厚板焊接技术现状

2.1 焊缝质量难以精确控制

开展厚板焊接任务时,因材料厚度大,高热量集中输入,焊缝易出现复合质量缺陷,稳定性降低。变形是焊接中的主要缺陷,焊接热循环会导致收缩和膨胀不一致,造成整体和局部变形;气孔和夹杂物会显著降低焊缝质量。夹杂物产生的两个主要原因是材料纯度不达标和焊接氧化,气孔多由于焊接区域湿度高、保护气体纯度不够或操作参数设置偏差引起。存在的缺陷会削弱焊缝承载能力,存在裂纹扩展隐患,威胁焊接部件可靠运行^[3]。

2.2 焊接作业效率不高

在厚板焊接中,手工电弧焊、埋弧焊等工艺技术可行,但熔敷效率不高、产出能力不强,导致焊接效率偏低。焊接时需不断更换焊条、调整参数,多层多道焊接又增加了时间,跟不上现代制造工艺的节奏。厚板焊接时通常需进行预热及后热处理,致使整体工期相应延长。为提高焊接作业效率,专家团队正针对高功率激光焊接和电子束焊接开展专项研究,此类技术优势突出,表现为高能量密度、快速焊接速率以及狭窄热影响区,将显著提升厚板焊接的生产效率。

2.3 自动化程度有待提升

自动化实施进度滞后,厚板焊接仍普遍采用人工操作模式,自动化进展滞后,采用人工焊接会阻碍产量的有效提升,且降低质量可控性,操作者的工艺掌

握程度关系到焊接质量稳定性,难以实现稳定的焊接质量。手工焊接存在作业强度大、环境恶劣等弊端,引发交付周期延长。基于厚板焊接工艺的智能自动化实施需求,技术团队正全力攻克焊接机器人及自动化系统的核心工艺难点,采用此类设备可实现焊接参数的毫米级精准控制,实施焊接作业的智能自动运行,以此提高作业速度,实现理想焊接效果,降低用工支出^[4]。

3 自动化设备在厚板焊接中的应用

3.1 实现精准控制的自适应系统

针对窄间隙厚板焊接的关键工序阶段,诸多工艺参数将直接影响焊接质量,板材制造公差与焊缝外形起伏,造成焊缝间隙稳定性减退,焊接工艺的优劣直接关系到构件的安全可靠性,实现焊缝质量稳定是核心要求,基于此,自适应控制技术的采用成为必然途径^[5]。

该系统由焊缝跟踪传感器、焊机控制单元和机器人控制系统三个核心组件协同工作实现控制功能。系统利用传感器实时检测焊缝的形态和坐标,该功能类似于系统的视觉组件。采集到的焊接数据实时传送到焊机控制模块,控制系统根据采集到的信号,如同技艺娴熟的焊工实时调整焊接电流、电压等关键参数,以保持焊缝成型质量的稳定。机器人控制系统展现出舞者般的精准协调能力,结合焊缝形貌反馈,协同调节焊枪的X-Y-Z坐标和偏转角度,使焊枪始终处于最佳工作状态。自适应控制模式的应用,明显提高了窄间隙厚板焊接的质量。

3.2 完成自动化焊接的机器人单元

就厚板窄坡口焊接专业而言,采用焊接机器人是实现自动化焊接的重要手段,与人工焊接作业相比,显著优点体现在效率提升、精度保证和灵活适配三个维度^[6]。

主流窄间隙焊装置普遍采用多模块设计,该装置采用六轴焊接机器人作为主体,运动稳定性强,可实现精准定位,可实时优化焊接工艺参数,实时精准调整焊枪的坐标与朝向,实现焊枪在空间多维度上的稳定路径跟踪,实现焊道的在线追踪。厚板窄间隙焊接操作可借助这套智能焊接机械装置由自动化系统完成。装置能稳定夹持焊枪,因其结构精密,使焊枪始终处于预设理想位置,维持焊缝间隙的精确度,而细微间隙误差就会影响焊接质量。其作为焊接能量核心输出设备,能精准输出预设焊接电流电压值,适配不同工艺参数要求,实现对焊接参数的精准控制^[7]。

3.3 负责信息获取与分析的数据系统

在厚板窄间隙焊接的精细作业执行时,优质焊缝的实现核心在于焊接参数的精准管理与持续优化。采

用精确数据采集与分析策略,对焊接全过程进行实时监测和数据挖掘,是关键的重要步骤。数据采集系统能实时捕获焊接电流、工作电压、运行速率和焊枪姿态,随后将实时采集的数据统一存入数据库。对这些复杂数据进行多维度分析,可系统筛选出与焊接质量相关的关键参数,进而合理调控焊接工艺参数,大幅提高焊接件的质量水平^[8]。

3.4 焊缝跟踪与自适应控制系统

自动化厚板焊接设备的关键技术支撑,是能实现焊缝连续跟踪和工艺参数自适应的智能系统。厚板焊接持续操作阶段,由于装配尺寸存在误差、焊接热变形和坡口加工精度有细微偏差,设定的焊接轨迹难以与实际情形完全一致,而保持焊枪精确对准焊缝中心是实现焊接质量稳定的关键挑战。这套系统采用激光视觉与接触式传感等先进检测方法,使焊接机器人具备实时视觉监测和触觉反馈的感知机制,它能够对焊缝区域进行持续动态追踪,实时测量焊缝位置、宽度以及熔池形态变化等重要参数。采集的动态数据迅速传至中央运算模块,与理论标准焊缝模板进行数据对比。若检测到焊枪偏离焊缝中心线达到最小界限,控制模块即刻发出校正指令,该指令促使焊枪执行部件自动调整,立即调节 X/Y 轴位置及摆动运动参数,保证焊接电弧始终聚焦在焊缝的理想作用点上。这种闭环调控方法显著减少了外部干扰带来的焊缝偏移、咬边和未熔合缺陷,使焊接操作从预设程序迈向智能响应,明显提高了厚板焊接接头的一致性、可靠性及自动化水平。

3.5 智能工艺决策与专家系统

突破单维度参数监控的限制,运用智能专家系统进行工艺决策是厚板焊接自动化的新趋势。针对不同的坡口形状、材料属性和结构要求,单纯套用固定参数或针对单一偏差做局部调整,不足以实现最高品质标准。智能工艺决策系统是融合大量焊接经验和案例的 AI 核心模块,它能综合调用设计输入信息、焊接实时运行情况和历史数据,进行整体推理和自主判断。在开始焊接前,系统根据厚度规格、材质选择和坡口尺寸等输入数据,智能生成一组优化的基础焊接工艺参数。焊接实施阶段,系统能够对采集到的大量数据进行深入挖掘和关联分析,既可判定当前是否合规,又能预测焊接质量变化趋势。一旦识别出工艺窗口出现偏离或潜在质量风险处于初期,系统不再采用单纯事后补救方式,而是运用预先构建的专家知识库和算法,基于预判主动修正多组焊接参数之间的协同关系,

甚至智能调整焊接过程,从而在宏观层面实现焊接全过程的最优化质量控制,实现从机械式反馈到智能化决策的本质转变。

4 结束语

本文针对窄间隙焊接工艺及自动化设备在厚板焊接工作中的应用展开系统研究,细致梳理了窄间隙焊接工艺的关键优势,详细分析了厚板焊接技术的现状与难点,并深入探讨了各类自动化设备在厚板焊接中的应用情况与作用机理。窄间隙焊接工艺凭借良好的焊缝成型效果、显著提高的生产效率、低变形特性及自动化适配性,可精准契合厚板焊接的技术需求;而诸如自适应控制系统、焊接机器人单元、数据处理系统等自动化设备的应用,进一步实现了厚板焊接的精准控制、智能决策与高效开展,有效弥补了传统厚板焊接技术的不足。

窄间隙焊接工艺与自动化设备的协同应用,为厚板焊接提供了兼顾质量、效率与智能化的解决方案,对促进厚板焊接技术的升级进步具有重要意义。随着智能制造技术的不断发展,窄间隙焊接工艺将向着参数优化精度提升、材料适配范围扩大的方向发展;自动化设备还将进一步融入人工智能、数字孪生等先进技术,实现焊接过程全流程智能控制及自主决策。该技术体系将在新能源装备、海洋工程等新兴领域拓展其应用场景,为更多工业领域实现高质量发展提供坚实的技术支撑,助力制造业向智能化、高效化、绿色化方向稳步迈进。

参考文献:

- [1] 王相亭,王永康.窄间隙焊接工艺研究及在缸筒上的应用[J].金属加工(热加工),2024(09):55-58.
- [2] 王莹刚.厚板 TC4 钛合金旋转电弧窄间隙 GTAW 立向上焊接工艺研究[D].济南:山东大学,2024.
- [3] 赵荣泽.SA508-3 低合金钢空心钨极窄间隙焊接工艺及组织性能研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2024.
- [4] 许智杰.厚板钛合金窄间隙激光诱导 TIG 电弧焊接工艺及性能研究[D].大连:大连理工大学,2024.
- [5] 孙海港.澳新标准高硼元素厚板焊接工艺研究及其应用[J].金属加工(热加工),2023(09):47-51.
- [6] 马生明.超窄间隙焊接装置研制与焊接工艺参数多目标优化[D].兰州:兰州理工大学,2023.
- [7] 黄河.中厚板多层多道焊接机器人路径规划策略与实验研究[D].武汉:武汉理工大学,2022.
- [8] 韩飞云.焊接自动化技术在石油钻采设备制造中的应用[J].中国设备工程,2019(11):30-31.

多工况水文极值计算与水库调洪演算耦合研究

——以深圳西丽水库为例

刘修佳

(深圳市西部水源管理中心, 广东 深圳 518000)

摘要 为解决都市型水库在跨流域调水背景下防洪安全评价边界条件复杂、单一工况难以覆盖真实风险的问题, 以深圳市西丽水库为例, 开展多工况水文极值与调洪演算的耦合研究。构建包含天然径流与境外引水叠加的多工况水文计算模型; 采用广东省综合单位线法推求产汇流过程, 对百年一遇设计洪水及两千年一遇校核洪水进行精细化演算, 并据此复核大坝坝顶高程与溢洪道结构安全。研究表明, 在叠加东部引水的最不利工况下, 校核洪水位达到 32.89 m, 较纯天然径流工况抬升 0.21 m; 该水位导致大坝防浪墙顶高程在极端风浪组合下存在 0.19 m 的安全缺口, 且高水位运行加剧了溢洪道底板厚度不足的结构性隐患。

关键词 西丽水库; 水文极值; 多工况耦合; 调洪演算

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.042

0 引言

在珠江三角洲等高度城市化区域, 水库是城市防洪体系与供水安全网的双重枢纽。深圳市西丽水库作为典型的大中型“都市水库”, 不仅是大沙河流域下游高密度建成区的关键防洪屏障, 更是东部供水水源工程的重要调蓄节点。这种“一库多能”的运行特性使得其水文边界条件极为复杂: 在汛期, 水库不仅面临流域内短历时、高强度的极端暴雨产流, 还可能面临境外引水工程入库流量的叠加效应。传统的防洪复核往往基于流域内天然降雨径流进行单工况计算, 忽略了跨流域调水在极端气象预警滞后或调度失灵情况下对防洪库容的占用风险^[1]。若仅按天然情况设计, 可能低估最高洪水位, 从而误判大坝的抗洪安全性。此外, 洪水位的抬升不仅关系到坝顶超高, 更直接影响大坝的渗流场分布与溢洪道的泄流安全, 需进行系统性的耦合分析^[2]。因此, 本文通过联立水文极值统计、水库调洪微分方程与水工结构验算公式, 定量分析多水源输入对水库最高洪水位及大坝整体安全的影响, 旨在为同类城市水库的安全评价提供理论参考。

1 工程概况

西丽水库位于深圳市南山区, 集雨面积为 29.0 km², 主流河长 8.78 km, 河床平均比降 8.9‰。水库大坝为均质土坝, 现状坝顶高程 34.15 m, 防浪墙顶高程 34.95 m。水库正常蓄水位 29.73 m, 工程等别为Ⅲ等,

主要建筑物级别为 3 级, 设计洪水标准为百年一遇, 校核洪水标准为两千年一遇。水库主要泄水设施为位于主坝左端的溢洪道, 结构形式为 2 孔驼峰堰, 单孔净宽 4 m, 设弧形钢闸门控制。堰顶高程 27.96 m, 闸门最大开启高度 2.5 m。泄洪时采用底流消能, 经长 36 m、深 3.0 m 的消力池后汇入下游大沙河。

2 多工况水文极值计算模型

2.1 设计暴雨参数的优选

西丽水库流域内设有雨量站, 拥有 1960 年至 2019 年的长系列实测降雨资料。为确保设计暴雨成果的代表性与安全性, 本研究采用了“实测暴雨频率分析”与“查《广东省暴雨参数等值线图》”两种方法进行比选。

对历年最大 24 小时降雨量进行 P-III 型曲线适线, 统计参数为均值 165 mm, $C_v=0.52$ 。根据广东省水文局编制的等值线图, 流域中心 24 小时设计暴雨均值为 180 mm, $C_v=0.5$ 。对比两种方法结果发现, 查图法得出的设计暴雨数值略大于实测统计值。考虑到全球气候变化背景下极端暴雨频发的趋势, 以及城市水库的高保护要求, 出于工程安全保守原则, 最终选用查图法成果作为设计依据。据此计算得出的百年一遇 24 小时设计暴雨量为 434.9 mm, 两千年一遇为 738.2 mm。

2.2 产汇流计算与设计洪水推求

产流计算采用“初损后损法”, 汇流计算采用“广东省综合单位线法”, 并利用推理公式法进行校核。本

工程位于广东省综合单位线滞时 $m_1 \sim \theta$ 关系图中的 B 线大陆低区。通过单位线法推求出天然流域的设计洪水过程线。计算结果显示：百年一遇的洪峰流量为 501 m^3/s ，24 小时洪量 1 166 万 m^3 ；两千年一遇的洪峰流量为 748 m^3/s ，24 小时洪量 1 870 万 m^3 。与推理公式法相比，两者洪峰流量差异小于 20%，且综合单位线法更能反映洪水过程形态，故予以采用。

2.3 多水源叠加的工况构建

西丽水库作为东部供水工程的交水点，存在明显的“外水内存”风险。在暴雨初期，若调度指令存在滞后，境外引水可能与天然洪水叠加。为量化这一风险，构建以下两种计算工况：

工况一：仅考虑流域内天然降雨形成的径流 $Q_{natural}(t)$ 。假设汛期严格执行调度规程，停止所有境外引水。

工况二：在天然径流基础上，叠加东部供水干线进水 Q_{inlet} 。基于偏安全考虑，设定最大三天每天引水 100 万 m^3 ，模拟极端气象下调度未及时响应的最不利组合。

3 水库调洪演算耦合分析

3.1 调洪演算数学模型

调洪演算基于水量平衡原理，采用静库容法进行数值求解。其控制方程为非线性微分方程组^[3]：

$$\frac{Q_1+Q_2}{2}\Delta t - \frac{q_1+q_2}{2}\Delta t = V_2 - V_1 \quad (1)$$

式(1)中： Q_1 、 Q_2 为时段初、末的入库流量 (m^3/s)； q_1 、 q_2 为时段初、末的出库流量 (m^3/s)； V_1 、 V_2 为时段初、末的水库蓄水量 (m^3)； Δt 为计算时段长。

3.2 泄流能力的水力学模型

准确的泄流曲线是求解上述方程的关键。西丽水库溢洪道为驼峰堰，设有闸门控制。根据《溢洪道设计规范》(SL 253-2018)，其泄流能力需依据闸门相对开度 e/H 分两种流态进行复核。

1. 堰流模型(闸门全开或 $e/H > 0.75$)。当库水位

较高，闸门全开敞泄时，流态为堰流，计算公式如下^[4]：

$$Q = m\sigma_s \epsilon B \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (2)$$

式(2)中：流量系数 m 对于驼峰堰，当 $P_1/H_0 > 0.34$ 时，按经验公式计算：

$$m = 0.452 \times (P_1/H_0)^{-0.032} \quad (3)$$

式(3)中： P_1 为堰高(m)； H_0 为堰上总水头(m)； ϵ 为侧收缩系数； B 为溢洪道总净宽。

2. 孔流模型。当进行防洪调度控制泄量时，流态为闸孔出流，计算公式如下：

$$Q = \sigma_0 \cdot \mu_0 \cdot e \cdot n \cdot b \cdot \sqrt{2gH_0} \quad (4)$$

式(4)中： μ_0 为流量系数，对于弧形闸门 $\mu_0 = 0.685 - 0.19(e/H)$ ； e 为闸门开启高度； n 为孔数； b 为单孔净宽。

3.3 调度规则与约束条件

调洪演算需遵循以下硬性约束：(1)起调水位设定为汛限水位 29.724 m；(2)大沙河下游河道防洪标准为 200 年一遇，对应安全泄量为 561 m^3/s 。为保障下游西丽街道及高新园区的绝对安全，西丽水库控泄流量设定为 $q_{max} \leq 94.2 m^3/s$ 。(3)当入库洪水频率超过 200 年一遇 ($P=0.5\%$) 或库水位超过对应的防洪高水位时，主要任务转为保坝安全，溢洪道闸门全开敞泄，不再受下游错峰限制。

3.4 演算结果与敏感性分析

利用计算机程序对上述模型进行迭代求解，得到不同频率下的调洪特征值，见表 1。

由表 1 可知，叠加境外引水的工况二显著增加了入库洪量，导致设计洪水位抬高 0.13 m，校核洪水位抬高 0.21 m。这表明对于具备调蓄功能的都市水库，忽略外水引入将导致防洪库容预留不足，安全评价必须以工况二为准。得益于水库显著的调蓄能力，在百年一遇设计洪水下，削峰率超过 80%，成功将 513 m^3/s 的洪峰削减至 93.7 m^3/s ，控制在下游安全泄量以内，有效保障了大沙河沿岸城区的防洪安全。

3.5 溢洪道泄洪安全的水力学验证

基于调洪演算得到的最不利下泄流量，对溢洪道消能防冲能力进行复核。根据《溢洪道设计规范》，

表 1 西丽水库多工况调洪演算结果对比

频率	工况类型	洪峰流量 (m^3/s)	72h 洪量 (万 m^3)	最高库水位 (m)	最大下泄流量 (m^3/s)	削峰率 (%)
1% (设计)	工况一(天然)	501	1463	31.47	91.2	81.80%
1% (设计)	工况二(叠加)	513	1763	31.6	93.7	81.70%
0.05% (校核)	工况一(天然)	748	2403	32.68	112	85.00%
0.05% (校核)	工况二(叠加)	760	2703	32.89	116	84.70%

3级建筑物消能防冲按30年一遇标准设计,对应流量 $83.7\text{ m}^3/\text{s}$,上游水位 31.1 m 。

1. 消能池水跃计算。采用动量方程计算收缩断面水深 $h_1=0.51\text{ m}$,对应弗劳德数 $F_{r1}=8.04$,属于稳定水跃范围。计算得跃后水深 $h_2=5.52\text{ m}$ 。

2. 消能安全性评价。现状消力池深 3.0 m ,尾坎高 2.97 m ,下游水深 1.23 m 。淹没系数 $\sigma=(1.23+3.0+2.97)/5.52 > 1.05$,满足淹没水跃要求。

3. 结构隐患。虽然水力计算满足要求,但现场检测显示溢洪道泄槽底板平均厚度仅 14 cm ,远小于规范要求的 30 cm ,且底板存在14处渗水点。在高流速水流作用下,薄壁底板面临巨大的脉动压力和抗冲刷风险,这是单纯水力学计算无法揭示的隐患。

表2 西丽水库主坝坝顶高程复核计算

计算工况	静水位 (m)	波浪爬高 R (m)	风壅增水 e (m)	安全加高 A (m)	计算坝顶高程 (m)	现状坝顶高程 (m)	结论
设计洪水位 + 正常运用	31.6	2.818	0.02	0.7	35.138	34.95	略不满足
校核洪水位 + 非常运用	32.89	1.605	0.008	0.4	34.903	34.95	满足
近期非常运用 (500年一遇)	32.29	1.607	0.008	0.4	34.305	34.95	满足

显示,在非常运用条件下,所需的挡水结构顶部高程为 34.903 m ,现状防浪墙满足要求,且土坝坝顶高于静水位;在“设计洪水位+正常运用条件”的组合工况下,由于波浪爬高达到 2.818 m ,计算所需的防浪墙顶高程为 35.138 m ,而现状为 34.95 m ,存在 0.19 m 的缺口。

4.3 高水位运行下的渗流与稳定响应

洪水不仅考验坝顶高度,高水位带来的高渗透压力对大坝稳定性也是严峻挑战。根据Autobank有限元渗流分析,在校核洪水位工况下,主坝背水坡最大出逸比降为 0.457 ,小于允许比降 0.50 。表明大坝在高水位下不会发生流土破坏,但主坝左坝段历史上曾出现渗漏通道,防渗墙并未完全封闭,高水位可能诱发绕坝渗漏^[5]。

经简化毕肖普法(Bishop)计算,在校核洪水位工况下,主坝下游坝坡的最小抗滑稳定安全系数为 1.838 ,远大于规范要求的 1.20 。这表明大坝坝坡整体稳定性良好,即便在极端洪水位下发生滑坡的风险也极低。

5 结论

本文得到的主要结论如下:(1)对于承担跨流域调水任务的都市水库,必须采用“天然产流+境外引水”的最不利工况进行防洪评价。本研究证明,该工况导致校核洪水位抬升 0.21 m ,直接影响大坝安全超高的复核结论;(2)西丽水库现状大坝及副坝的坝顶高程

4 坝体抗洪能力与结构安全复核

4.1 坝顶高程复核数学模型

根据《碾压式土石坝设计规范》(SL 274-2020),大坝坝顶高程必须高于静水位与波浪爬高、风壅水面高度及安全加高之和。复核计算公式如下:

$$y=R+e+A \quad (5)$$

式(5)中: y 为坝顶超高(m); R 为波浪爬高(m); e 为风壅水面高度(m); A 为安全加高(m)。

4.2 复核结果与安全隐患分析

基于工况二确定的最高洪水位,结合实测的坝体结构参数进行复核,结果如表2所示。

由表2可知,现状土坝坝顶高程为 34.15 m 。计算

基本满足防洪要求,防洪安全综合评价为B级。但在设计洪水位叠加极端强风的工况下,主坝防浪墙高度存在 0.19 m 的微小缺口,建议在后续除险加固中予以适度加高或优化防浪设施;(3)尽管水库具备抵御两千年一遇洪水的力量,但鉴于溢洪道底板偏薄且存在渗漏通道,以及坝下输水底涵已废弃但存在漏水隐患,高水位运行可能诱发结构性破坏。建议尽快实施溢洪道防渗加固及结构补强工程,并对废弃输水底涵进行封堵,以消除隐患,确保都市核心区的水源与防洪双重安全。

参考文献:

- [1] 李燕忠,袁成福,朱智子.赣州市南河水库安全鉴定防洪能力复核分析[J].陕西水利,2025(11):54-56.
- [2] 张岩,崔喜艳.株树桥水库扩建工程防洪调度方式分析[J].水科学与工程,2025(05):20-23.
- [3] 黄旭,潘志浩,陈森林,等.郁江流域水电站水库群水量不平衡问题分析[J].中国农村水利水电,2022(07):221-224.
- [4] 曲志强,王进,关胜文.ADCP在永庆反调节水库闸门泄流曲线复核上的应用[J].东北水利水电,2024,42(02):30-33.
- [5] 丁明浩.巢湖市开明山水库调洪演算分析研究[J].治淮,2023(09):12-13,18.