

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 1 月 第 1 期 (总第 626 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 墾 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：khgslzz@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：云南金伦云印实业股份有限公司

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：2026 年 1 月 5 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特别声明，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

科技博览

- 001 WPC 高分子建筑模板清水砼施工技术 杨青戈
005 CMOS 高精度运算放大器性能影响因素研究 徐皓琛
008 无源单尺定位系统在斗轮堆取料机上的应用 沈毅
012 考虑通信时延的配电系统可靠性建模与评估 李朝闻
016 基于自动化测试技术的继电保护装置性能评估研究 张其方, 王辉春, 杨婧
019 高比例分布式电源接入下的配电网电压波动抑制策略研究 鲁申奇

智能科技

- 022 电网基建工程中全过程智能化监控技术研究 薛宏飞
025 BIM 与机器学习在施工进度管理中的应用综述 王资国, 刘慧萍, 张玉燕, 南子杨
028 模块化预制舱智能温控系统设计与节能优化研究 曹海峰
031 基于扫描链的数字集成电路测试与故障诊断方法研究 邱子涵
034 基于 AI 的人脸识别门禁系统在智慧校园中的应用研究 李泽夏, 李明凡
037 BIM+GIS 技术在水利工程规划中的空间分析精准度提升效果分析 陈淑青
040 建筑信息模型 (BIM) 技术在城市排水泵站建设与运维管理中的应用探索 俞建烽

目录 contents

应用技术

- 043 电气自动化技术在电力工程中的应用探析 李雪峰, 田 坤
046 电力系统电气工程施工问题分析与解决对策研究 李淑琳
049 供热供发电一体化技术在电力工程中的应用及实践 陈 宇
052 抽水蓄能机组典型故障机理分析与检修关键技术研究 陈登会
055 三相异步电动机用滚动轴承温升过高损坏的故障原因解析 张家春
058 水运工程深水基础大直径钻孔桩施工技术优化探究 李支洋
061 水利工程中水库大坝防渗加固施工技术关键点分析 刘 强

科创产业

- 064 建筑工程项目风险识别与应对策略 余凤闪
067 水电厂运行效率提升策略与关键技术研究 方杨勇
070 家用光伏发电与电动汽车充电结合模式探索 王以军
073 基于 AI 驱动的混合云 IDC 资源自动化与成本优化策略 闫崇喆
076 煤矿井下工作面支护技术与安全高效开采 刘延东
079 MIL-101(Cr)/MAP 防灭火凝胶在煤矿自燃防控中的安全应用 方子远
082 高强度钢材在水电站分叉管道成型中的辅助工具研发与实践 刁乾坤

技术管理

- 085 满堂支架现浇箱梁施工技术要点 龙玉峰
088 建筑工程钻孔灌注桩施工技术分析 赵东民
091 公路改性温拌沥青路面施工技术运用 缪冬志
094 办公建筑大空间空调系统性能优化分析 金 松
097 公路桥涵伸缩缝病害巡查与快速修复方法研究 秦光明
100 水库水利工程施工现场管理问题分析及应对策略研究 邢科健
103 市政路桥工程沥青路面早期损坏的成因分析与防治措施 蔡必挺

科学论坛

- 106 超长尺寸单元式幕墙安装技术研究 包立波
109 绿色建筑工程施工技术应用与管理策略研究 马 超
112 关于铁路路基抗沉降新材料的应用研究 潘凯斌
115 新能源发电企业应急预案编制与实操研究 张大立
118 天然气开采对地下水环境的影响及保护策略 李小俊
121 地下水挥发性有机物 (VOCs) 污染快速检测技术 顾余滨
124 基于遥感与 GIS 技术的流域水资源时空分布特征及演变规律 贺俊伟

WPC 高分子建筑模板清水砼施工技术

杨青戈

(中铁十二局集团第七工程有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要 WPC 高分子建筑模板 (Wood-Plastic Composite Building Formwork) 依托复合结构优势, 在清水砼施工中具备优良脱模效果、高周转率与环保特性, 成为钢模板与竹胶合板模板的重要替代。结合工程实践研究表明, 其支撑强度与平整度控制模型能有效保障施工质量, 清水砼表面平整度误差 $\leq 2 \text{ mm/m}$, 模板周转次数超 50 次, 成本较竹胶合板降低 38%, 显著提升了施工的经济性与绿色化水平, 为清水砼工程高质量、低成本建设提供有益参考。

关键词 WPC 高分子建筑模板; 清水砼; 模板支撑系统强度计算技术

中图分类号:TU74

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.001

0 引言

清水砼对模板的平整程度、刚性、脱模性能和耐用性有着极高的要求。竹胶合板模板周转次数达不到 10 次, 易造成蜂窝麻面现象且对环境造成污染; 钢模板虽具备较高刚度, 但存在自重较大、能耗偏高且易生锈的问题。以 PE/PP 为基础物质的 WPC 模板, 添加 30%~50% 植物纤维与改性助剂后经挤出工艺成型, 既具有耐候性能, 又具备刚性, 每立方米质量处于 1 100~1 300 kg 范围, 具有可回收性, 已应用于楼板、剪力墙、桥梁等清水砼项目, 但仍需进一步改良与推广。

1 WPC 高分子建筑模板材料性能

1.1 基础物理力学性能

WPC 高分子建筑模板的物理力学性能直接影响清水砼的施工质量。经实验室测试与工程实地测量, 关键参数如下: 把密度调控到 $1 200 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ 的范围, 与传统钢模板相比, 重量减轻 84.6%, 极大地降低了吊装与安装时的能耗; 静曲强度达 18 MPa 及以上, 弹性模量达 2 500 MPa 及以上, 可用于跨度 2.4 m 及以下的清水混凝土楼板模板支撑; 24 小时浸泡后吸水率不超过 3%, 和竹胶合板模板 (吸水率 $\geq 15\%$) 相比大幅降低, 能防止因模板吸水变形致使的砼表面平整度误差; 脱模阻力被控制在 0.8 N/mm^2 以内, 不使用脱模剂就能达到顺利脱模效果, 减少对混凝土表面的污染。实测住宅项目数据表明, 采用 18 mm 厚的 WPC 模板浇筑 C30 清水混凝土楼板时, 模板最大挠曲度达 1.2 mm, 低于规范所设限值 ($L/250$, 其中 L 代表支撑跨度), 证实其力学性能可靠。

1.2 耐候性与耐久性

由于清水砼施工中模板需长时间暴露在高温、潮湿、紫外线照射的室外环境中, 因此开展 WPC 高分子模板专项耐久性试验, 经过 70 °C 高温、时长 1 000 小时的老化试验后, 静曲强度保留率达到或超过 85%, 弹性模量留存率达 80% 以上; 经过 -30 °C 低温环境下 50 次冻融循环测试后, 未出现开裂与分层状况, 力学性能的损失比率 $\leq 12\%$; 经 500 小时盐雾试验后, 表面无锈蚀, 可用于沿海地区清水砼工程^[1]。对模板表面实施 UV 固化涂层处理, 抗紫外线老化能力大幅增强, 经 6 个月室外暴晒, 表面色差值 ΔE 不超过 2, 可防止因模板褪色引发清水砼表面出现色差。例如: 开展跨海大桥墩柱建造工作时, WPC 模板经 3 个月室外应用后, 表面状况依旧良好, 所浇筑清水砼墩柱表面色泽差异小, 符合清水砼外观质量验收标准。

1.3 模板规格与适配性

WPC 高分子建筑模板借助标准化挤出成型方法, 能制造多种规格的产品来契合不同清水砼构件。常见规格和对应的适配场景见表 1, 模板宽度大多为 1 220 mm, 长度可根据构件的具体尺寸进行定制化设计, 厚度需按照构件荷载与支撑跨度合理选定; 竖向构件如剪力墙、柱等, 推荐优先采用 15~18 mm 厚的模板; 针对楼板、梁这类水平结构。由于要承载混凝土自重与施工负载, 应选用厚度为 18~22 mm 的模板, 模板拼接缝隙采用企口式构造, 缝隙宽度不超过 0.3 mm, 与专用密封胶条搭配运用, 能切实杜绝砼浇筑时的漏浆问题。在办公楼剪力墙施工中, 采用企口拼接的 WPC 模

作者简介: 杨青戈 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: WPC 高分子建筑模板清水砼施工技术。

表1 WPC高分子建筑模板规格与适配性参数表

模板厚度 (mm)	模板宽度 (mm)	常用长度 (mm)	适配清水砼构件类型	支撑跨度 限值 (m)	每平方米 重量 (kg)
15	1 220	2 440、3 000、3 600	剪力墙、柱 (截面尺寸≤600 mm)	1.8	18.30
18	1 220	2 440、3 000、4 200	楼板 (厚度≤150 mm)、 梁 (截面高度≤500 mm)	2.4	21.96
22	1 220	3 000、3 600、4 800	大跨度梁 (截面高度500~800 mm)、 桥梁盖梁	3.0	26.84

板未产生一处漏浆的现象，清水砼墙面外观质量评分达95分。

2 WPC高分子模板清水砼施工关键技术

2.1 模板支撑系统强度计算技术

WPC高分子模板支撑系统需要承受混凝土自身重量，要经科学运算明确支撑间距和立杆规格，杜绝模板变形或者坍塌。按照材料力学梁的相关理论，创建WPC模板支撑强度计算的模型，主要公式如下。

2.1.1 模板最大弯矩计算公式

$$M_{\max} = (q \times L^2) / 8 \quad (1)$$

式(1)中： M_{\max} 代表模板跨中的最大弯矩值； q 代表模板所承受的线荷载，单位为kN/m， q 的计算方式为：(混凝土自身重量与构件厚度的乘积加上施工活荷载)和模板宽度相乘的结果； L 表示模板支撑所形成的跨度长度。

2.1.2 模板抗弯强度验算公式

$$\sigma = (M_{\max} \times 10^6) / (W \times \gamma^x) \leq [\sigma] \quad (2)$$

式(2)中：模板实际承受的抗弯应力用 σ 表示，应力单位是MPa； W 代表模板的截面抵抗矩，单位为mm³，若为矩形的截面， $W=(b \times h^2)/6$ ，(b 为模板宽度， h 是模板的厚度)； γ^x 为截面塑性发展系数，取值1.05； $[\sigma]$ 表示WPC模板可承受的抗弯强度(确定取值为18 MPa，按照材料性能参数加以确定)。

2.1.3 支撑立杆稳定性验算公式

$$N / (\phi \times A) \leq [f] \quad (3)$$

式(3)中： N 代表立杆所受的轴向力， $N=q \times L \times L_s$ (L_s 立杆横向间距)； ϕ 代表立杆稳定系数，该系数由立杆长细比决定，如 $\phi 48 \times 3.5$ 规格的钢管，长细比 λ 是100时， ϕ 取值0.638； A 代表立杆截面的面积(mm²)，规格是 $\phi 48 \times 3.5$ 的钢管，其 A 的数值为489 mm²； $[f]$ 指代立杆材料能够承受的抗压强度许可值。

在住宅楼板的清水混凝土施工作业中，采用厚度为120 mm的楼板和18 mm厚的WPC模板，经计算得出 q 的值为 $(24 \times 0.12 + 2.5) \times 1.22 = 6.87$ kN·m，设定支撑跨度为1.2 m，把数据代入公式(1)，得到最大弯矩

$M_{\max} = (6.87 \times 1.2^2) / 8 = 1.237$ kN·m； $W = (1.220 \times 18^2) / 6 = 65.880$ mm³，把该结果代入公式(2)，得到 $\sigma = (1.237 \times 10^6) / (65.880 \times 1.05) = 17.8$ MPa ≤ 18 MPa，达到强度要求；设置立杆横向距离为1.2 m，经计算 N 值， $N = 6.87 \times 1.2 \times 1.2 = 9.89$ kN， $\phi = 0.638$ ，把这些数值代入公式(3)算出， $9.89 \times 10^3 / (0.638 \times 489) = 31.5$ MPa ≤ 215 MPa，支撑系统具备稳定性。

2.2 清水砼浇筑与脱模控制技术

在清水混凝土施工期间，浇筑工艺的合理程度直接关联着成型品质与表面视觉效果。由于WPC高分子模板特性，施工期间要科学调整浇筑参数。砼运输至入模阶段，一般运用泵送手段进行浇筑，让砼供应连贯稳定。为使混凝土于模板中均匀散布并密实成型，应将坍落度控制于160~200 mm范围。若坍落度过小，振捣不能实现混凝土的密实效果，容易出现蜂窝麻面现象；若混凝土坍落度超出合理范围，会使混凝土自由流动能力过强，使模板侧压力增大，甚至造成模板形变。切实管控坍落度是保证质量的核心，按照构件形式对浇筑速度，需依据构件样式适当调节。针对竖向构件，竖向构件的浇筑速率应控制为不超过0.5 m/h，而水平构件的浇筑速率应把控在≤1.5 m/h。以剪力墙施工为例，施工时采用分层浇筑技术，每层高度设置成500 mm，同时配合插入式振捣器开展工作，把单点振捣的时间限定在20~30秒，振捣棒的插入间隔不超过400 mm。通过以上途径，切实规避了混凝土离析、泌水以及局部胀模等质量问题，保障了结构整体密实度与成型效果。

结合WPC模板的导热能力对脱模工艺加以优化。由于WPC模板导热系数仅为0.35 W/(m·K)，与钢模板相比，混凝土中保温效果更好，使养护温度提升3~5 °C，进而使脱模周期缩短^[2]。在竖直构件施工时，混凝土浇筑12~16小时便可安全脱模；在水平构件施工时，砼强度达到设计强度的75%才可脱模，在正常温度状况下大概是24~36小时。为进一步减少表面受损概率，脱模过程应选用专用吸盘装置，杜绝采用硬性工具撬

动, 防止清水砼表面出现缺陷。实际工程监测结果表明, 运用该方法完成脱模后, 清水砼表面的破损比例可控制到 0.5% 以下, 较传统钢模板 3% 以上的破损率大幅降低, 既提升了清水砼外观质量, 还增加了 WPC 模板的周转时长。具体见图 1。

2.3 模板周转与维护技术

通过出色的物理力学特性与耐候表现, 在清水砼施工中可实现多次周转。为使其耐用性能充分发挥且延长使用期限, 需搭配科学的维护管理手段。脱模操作结束后, 需立即开展模板清理工作, 一般采用高压水设备进行冲洗操作, 冲洗水压应控制在 0.8 MPa, 从而高效去除表面附着的残余砼浆与颗粒物质。若未及时开展清理工作, 模板表面的残留混凝土会硬化, 影响后续砼浇筑的平整程度与外观表现。在完成清洗操作后, 应对模板表面及企口缝的完整性进行细致检查, 若存在局部划痕或磨损, 应运用专用的腻子开展修补工作。修补工作结束后, 应把模板表面平整度的误差限制在 1.5 ~ 2 mm/m, 保障后续施工质量不受干扰。

WPC 模板同样要开展科学管理。模板存放需采用水平堆叠形式, 将堆叠高度把控在 1.5 m 内, 底部需均匀布置木方, 间隔不大于 600 mm, 以此分散模板自身

重量, 防止长时间受力引发局部变形。存放环境需维持干爽通风, 防止因潮湿情况造成企口缝磨损程度加深或局部出现变形现象, 进而有效延长模板的使用期限。针对实际工程项目中的 18 mm 厚 WPC 模板, 实施长期周转性能的追踪监测, 前 30 次使用期间, 模板的静曲强度和弹性模量大体维持稳定, 未出现显著衰减, 清水砼表面平整度的误差稳定控制在 1.5 ~ 2 mm/m 区间。在经历 50 次周转后, 静曲强度降低到 16.2 MPa, 降幅约达 10%; 弹性模量降低到 2 300 MPa, 下降幅度约 8%, 不过依旧符合施工规范标准。到第 55 次周转的节点, 由于企口缝磨损状况显著, 拼接部位存在漏浆隐患, 已不适宜继续投入使用。相较于传统竹胶合板模板仅能使用 10 次影响便报废, WPC 模板寿命提升约 4.5 倍, 极大地提升了经济效益和施工效率, 还体现出优良的绿色环保特性^[3]。

3 WPC 高分子模板清水砼施工应用效果分析

3.1 施工质量效果

挑选 3 个运用 WPC 高分子模板的清水混凝土项目, 开展砼表面质量与结构性能的检测, 检测所得结果见表 2。三个项目清水砼的表面平整度误差均 $\leq 2 \text{ mm/m}$, 垂直度的误差 $\leq 3 \text{ mm/2 m}$, 达到了清水砼质量验收标准;

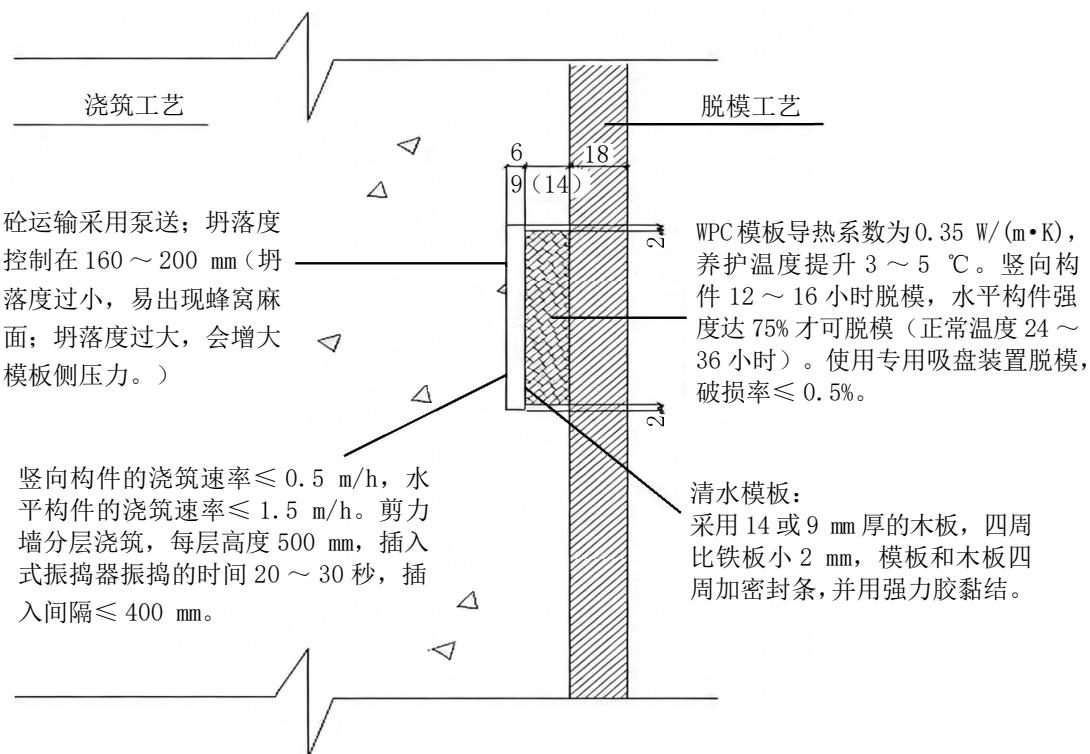


图 1 WPC 模板清水混凝土施工工艺要点

表2 WPC高分子模板清水砼施工质量检测表

项目类型	检测指标	规范要求	实测值(项目1: 住宅楼板)	实测值(项目2: 办公楼剪力墙)	实测值(项目3: 桥梁墩柱)
表面平整度	误差(mm/m)	≤3	1.8	1.5	2.0
垂直度	误差(mm/2m)	≤4	2.5	2.2	3.0
表面缺陷率	(%)	≤2	0.8	0.5	1.0
砼抗压强度	达标率(%)	100	100	100	100
强度标准差	(MPa)	≤3.0	2.2	2.0	2.5

表面存在的蜂窝、麻面、色差缺陷，其比率都≤1%，大大低于传统模板施工时≥5%的缺陷率；清水砼抗压强度实现百分百达标，同时强度离散程度低，证明了WPC模板可提升清水砼质量^[4]。第三方检测办公楼剪力墙清水砼，表面平整度最佳评分为98分，荣膺“省级优质工程”称号。

3.2 施工效率效果

WPC高分子模板质量轻盈、安装便利，可有效提高施工效率。安装WPC模板时，一块规格为18 mm×1 220 mm×2 440 mm的WPC模板，重量仅21.96 kg，只需两名工人就能够轻松搬运，每日每组的安装面积可达80~100 m²，和传统钢模板（安装速率40~60 m²/天·班组）相比，提高了66.7%；运用专用卡扣开展模板拼接工作，拼接单缝耗时不超过1分钟，而竹胶合板模板采用钉子拼接，拼接时间每缝不少于3分钟，节省了66.7%。

住宅项目由3栋18层的楼构成，运用WPC模板开展清水砼楼板与剪力墙施工，与同户型采用竹胶合板模板的项目相比，施工周期减少15天，人工成本从85元/m²降到63元/m²，降低了22元/m²，主要原因在于WPC模板安装效率高，不用频繁更换，竹胶合板模板每栋楼需更换2~3次，WPC模板仅需换一次。

3.3 经济与环保效果

从全寿命周期成本考量，WPC高分子模板虽起步单价较高（大概120元/m²，竹胶合板模板大概60元/m²，钢模板大概200元/m²），不过因其周转频次多，单位面积的成本明显降低：若WPC模板实现50次周转，每平方米成本为120元/m²÷50次=2.4元/m²·次；当竹胶合板模板周转次数达到10次时，每单位面积所产生的成本为60元/m²÷10次=6元/m²·次；钢模板周转次数为30次的情况下，每平方米成本为200元/m²÷30次≈6.67元/m²·次。经项目计算表明，运用WPC模板后，清水砼模板工程的总成本与竹胶合板模板相比降低了38%，与钢模板相比降低了49%。

从环保角度看，废弃的WPC模板可回收再利用，再利用率高达90%，每1万平方米WPC模板可使木材消耗减少约50 m³，等同于保护10棵成年树木，大约可减少8 t建筑垃圾；生产期间不释放甲醛（甲醛含量≤0.1 mg/L），满足《室内装饰装修材料 胶粘剂中有害物质限量》（GB 18583-2008）标准规定，相较于竹胶合板模板（甲醛含量≥1.5 mg/L），环保性更佳。项目所用WPC模板报废后，均由专业厂家回收处理，达成“零废弃”状态，被授予“绿色施工示范项目”认证^[5-6]。

4 结束语

在清水砼施工中，WPC高分子建筑模板展现出卓越性能：竖向和水平构件可满足密度、强度与耐候性的要求，通过支撑强度计算模型，可有效防止变形，工程应用中将挠度控制在1.2 mm以下；经改良的浇筑及脱模工艺使混凝土表面平整度误差控制在2 mm/m以下、缺陷率控制在1%以下，模板可循环使用50次以上，使施工质量与效率大幅提升；相较于竹胶板，其单位面积成本下降了38%，回收比例达到90%，既具备经济效益，又具有环保效益。未来应持续改良材料配比与智能安装工艺，扩大其在大跨度、重荷载构件中的应用范围。

参考文献：

- [1] 毛冰慧.装配式建筑铝模板施工技术要点[J].模型世界,2024(36):118-120.
- [2] 解云霞.木塑复合材料在装配式建筑中的应用[J].合成材料老化与应用,2022,51(04):133-134,154.
- [3] 王志强.现浇混凝土顶板铝框塑料模板与支撑快拆体系技术分析[J].安徽建筑,2024,31(06):47-48.
- [4] 吕晓英.木塑复合材料在绿色建筑中的应用[J].塑料工业,2023,51(03):208.
- [5] 周丽红.木塑复合材料在建筑中的应用[J].砖瓦,2021(01):45-46,48.
- [6] 程明,赵保伟,刘乾,等.建筑混凝土模板支撑体系施工技术分析[J].砖瓦世界,2025(23):94-96.

CMOS 高精度运算放大器性能影响因素研究

徐皓琛

(西安邮电大学, 陕西 西安 710061)

摘要 CMOS 高精度运算放大器在信号采集、传感接口与精密测控环节中承担着核心放大与误差抑制功能, 静态精度、动态特性与噪声抑制能力受器件物理属性、结构布局、工艺偏差及外部环境扰动的共同影响, 而高精度需求伴随应用边界扩大而变得更为敏感。本研究依托典型指标体系梳理关键性能表现, 并围绕阈值漂移、迁移率变化、补偿配置、电源纹波与 EMI 等因素进行系统性分析, 再结合参数调控、级联与补偿协同、工艺匹配与校准、电源完整性和隔离措施构建面向高精度场景的设计路径, 旨在为使运放在严苛条件下维持稳定、低噪与高线性度的综合性能提供参考。

关键词 CMOS 运算放大器; 高精度设计; 性能影响因素; 器件匹配; 噪声抑制

中图分类号: TP34

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.002

0 引言

运算放大器在模拟电路系统及数模混合信号电路系统中非常重要, 是电路系统中的基础功能模块, 对电路系统的各项性能指标实现起到关键性的作用。高精度 CMOS 运放的设计常在多维制约中展开, 静态误差、动态边界、噪声抑制和电源扰动等因素相互牵连, 使性能的稳定性更依赖器件物理特性、拓扑链路的调度方式与工艺偏差的承受能力。伴随电路密度的持续增加与工作环境的复杂化, 对精度边界的掌控逐渐从单点优化转向多层次协同, 使运放在大范围温度、电源与负载条件下仍维持可预测的行为, 从而构成模拟系统可靠运行的重要支撑。

1 CMOS 运放关键性能指标表征

1.1 静态精度类指标

静态精度类指标用于刻画运放在零频条件下的偏移与线性保持能力, 其中输入失调电压反映差分端在理想平衡条件下仍存在的电压偏差, 偏置电流与失调电流则从电流侧呈现输入级的不对称程度, 并在高阻源环境下对微弱信号准确性产生直接影响^[1]。温度引起的失调变化量以漂移速率量化运放在热条件变化中的直流稳定性, 是评价精密链路一致性的关键维度, 而输入与输出的直流线性度用于描述电压传递关系的比例保持情况, 使静态区间内的偏移与线性品质得以在多参数框架中获得可量化表征。

1.2 动态特性类指标

动态特性类指标聚焦运放在频域与瞬态条件下的响应能力, 增益带宽积以统一量衡揭示高增益与宽频带之间的能力边界, 相位裕度则依托环路相移余量展现系统在闭环工作下的稳定性幅度。压摆率通过过渡瞬态的最大变化斜率刻画大信号条件下的速度极限, 使动态过载情况下的上升沿与下降沿表现具有可比较性, 小信号带宽反映微幅信号在高频侧的有效传递范围, 大信号带宽则用于呈现较大幅度驱动时的频率覆盖能力, 两者共同构成运放在动态区间内的幅频结构, 使瞬态、稳定性与带宽表现形成可分层的技术刻度。

1.3 噪声与抑制类指标

噪声与抑制类指标用于呈现运放在干扰背景下的信号纯度与抗扰能力, 输入噪声密度以单位带宽噪声量显示底噪水平, 并为微弱信号链路提供等效噪声边界^[2]。积分噪声依托特定频段的累积量刻画整体噪声能量, 使有效信号的动态范围具有明确下限, $1/f$ 噪声拐点频率用于区分低频区间由闪烁噪声主导与高频区间由热噪声主导的结构, 并决定低频测量场景的可用噪声窗口。电源抑制比体现电源端纹波在输出端的衰减能力, 共模抑制比则以差分提取能力呈现共模干扰的压制水平, 使噪声与抗扰度在体系内获得独立而完整的表征坐标。

作者简介: 徐皓琛 (2004-), 男, 本科, 研究方向: 模拟集成电路设计。

2 CMOS运放关键性能影响因素

2.1 器件层面影响性能的主要因素

器件层面的限制首先体现在阈值电压偏差上，栅氧厚度、掺杂浓度和沟道尺寸的微小差异会累积为输入失调、电流不平衡和跨导偏移，使相同偏置条件下各支路的工作点出现系统性偏离。沟道长度调制则在高增益设计中拉低输出电阻，电流源与放大管不再表现为理想高阻节点，导致增益随输出电压摆动产生隐性压缩，难以维持理论计算的直线关系，载流子迁移率伴随温度、应力和电场强度变化而波动，跨导、噪声功率谱与动态响应边界随之产生温区依赖；热噪声和闪烁噪声构成的噪声本征机制又以频段主导权的变化影响低频零漂和宽带底噪，使器件物理属性成为高精度性能的起点约束。

2.2 结构设计影响性能的关键因素

结构层面的影响集中体现在信号路径与增益链路的组织方式上，差分输入级在共模范围、对称性和输出摆幅上的差异，会让同一器件库下形成截然不同的偏移水平与共模抑制能力，有源负载结构在确定增益斜率的同时引入附加极点和非线性区间，使高增益与宽线性区间难以兼得^[3]。补偿网络的布置位置、补偿电容与电阻的组合关系直接改写环路极点与零点的分布，若高频极点与零点靠近或顺序不当，容易在单位增益附近压缩相位裕度，让系统处于亚稳态边缘，输出级拓扑在驱动能力、压摆能力与输出电压范围之间形成多维权衡，不同的源极跟随、共源或推挽结构在大信号条件下呈现迥异的负载适应性，使结构选择成为性能差异的显性来源。

2.3 工艺制造导致参数偏移的影响因素

工艺制造环节引入的失配与漂移往往在晶圆级别才被完整暴露，器件失配源于面积、间距与局部工艺场分布的微小差异，镜像结构与差分对在实际芯片上难以保持完全对称，使偏置电流和阈值电压形成统计意义上的偏移。工艺角变化体现为工艺在快角、慢角及典型角之间的系统性波动，跨导、阈值、电阻率与寄生电容在不同角落组合下呈现成套改变，高增益与高速设计在某些工艺角下容易暴露出原本被掩盖的稳定性隐患。温度循环导致的长期漂移与封装应力共同作用，使器件参数在寿命周期内产生缓慢但不可忽视的迁移，蒙特卡洛分析给出的参数离散分布则揭示电路在批量生产条件下性能散布的边界，使工艺波动成为高精度设计不可回避的背景噪声。

2.4 外部环境引发性能波动的影响因素

外部环境对运放性能的干扰往往沿电源、电磁和热三条路径渗入，电源纹波经供电引脚、衬底和偏置

网络耦合到内部节点，在低频段表现为直流工作点的缓慢起伏，在高频段叠加为输出端的附加噪声与调制成分^[4]。EMI 辐射依托封装引线、走线回路和寄生电容形成耦合通道，高频脉冲和射频信号在敏感节点诱导瞬态电压，使本应平滑的信号轨迹出现毛刺或亚稳态抖动，地弹噪声多发生于数字逻辑或大电流切换场景，地参考电位的局部抬升破坏模拟前端的基准稳定性，片上或板级热分布不均又让不同区域器件处于截然不同的温区，使失调、电流与噪声特性在空间上呈现缓慢变化，从而在时间与空间两个维度叠加为高精度指标的漂移来源。

3 CMOS运放性能提升的设计路径

3.1 器件层面设计路径：参数调控的技术实现

器件层面的设计关键在于把可掌控的物理参数做成可执行的调节路径，让失配、噪声与温漂在最初级的版图和器件选型阶段被限制在可控范围内，其中针对宽长比的调控宜让输入差分对保持较大的有效沟道面积，常见设计把 W/L 设置在 80/1.2 至 100/1.0 区间，使阈值电压的三倍标准差维持在约 1 mV，从而让输入失调在微伏级精度下具备更稳定的边界；为进一步压低电流镜的失配，可采用指状并联的小单元策略，把大面积管拆分成 6 ~ 10 个相同尺寸的小单元以弱化局部应力带来的迁移率差异，使电流比误差稳定在 0.1% 以内。在噪声方面，输入级宜布置长沟道低 1/f 噪声器件并与热源保持 10 μm 左右间距，让热耦合下降到原布局的一半，使低频噪声密度在 10 Hz 处维持在 20 ~ 25 nV/√Hz 区间；在温度特性上，可把关键管集中放在热分布均匀的区域并依托 dummy 管建立等温边界，使 -40 °C 至 125 °C 内的跨导变化趋于平滑并把温漂引起的失调变化压缩在 ±2 μV/°C 左右，并把关键偏置链路加入低漂移电阻单元，使温度导致的偏置变化不再放大输入噪声，从而在更宽的工作电流区保持稳定特性，进一步确保器件级调控在复杂应用场景中具有可重复性与可验证性，通过此类可落地的器件级调控，让后续结构级与补偿级动作建立在更稳定的基础之上。

3.2 结构设计实践方向：增益链路的级联与补偿

结构设计的核心在于让增益链路与稳定性控制形成连续可调的结构路径，其中输入级的对称化处理应先通过跨导均衡来稳定小信号增益，可把差分对与有源负载的跨导比控制在 1.1 ~ 1.2 区间，让输入级的增益分配具备更可控的斜率，再把输入级与电流镜级布成镜像对称并保持布线等长，使增益偏移减少到不足 1%；在输出阻抗的构建上，可依托共源共栅链路把有效输出阻抗从几十千欧扩展到数百千欧，通过把栅偏置定

在 $0.2 \sim 0.3$ V 的裕度区间，让堆叠管在高电流密度下仍保持足够的跨导，使增益在不开启更高功耗路径的前提下获得明显增强。补偿网络的设计宜以自适应方式加入频率调节结构，把主补偿电容放在 $1.5 \sim 3$ pF 区间，再布置一条可控零点路径，使相位裕度稳定在 $60^\circ \sim 70^\circ$ ；为保证在大范围负载下仍维持稳定，可让补偿电阻具备 $15\% \sim 25\%$ 的调节范围，使闭环带宽在负载从 20 pF 上升至 200 pF 时仍保持平稳变化^[5]。同时在驱动路径加入局部隔离段，让不同负载状态下的瞬态电流无法反向耦合到输入链路，使中频段的相位波动得到明显削弱，从而让补偿后的动态响应在复杂应用条件下更具可重复性，输出级的设计可把驱动管布成跨区域平均的对称拓扑并控制驱动偏置的温漂，使峰值驱动电流在 $8 \sim 12$ mA 区间保持稳定，从而让线性度在大信号条件下维持在较小的失真边界内。

3.3 工艺协同实现方式：偏差抑制与匹配校准

工艺协同的设计重点在于把器件离散性与工艺角波动压缩到可预测区间，使运放在不同批次、不同温循环下仍维持稳定性能布局，在版图结构上宜采用共心与镜像的组合方式，把差分对、电流镜及增益链路的关键器件保持在完全一致的应力环境中，并让指状单元在中心对称轴两侧做严格镜像，使 V_t 失配的 3σ 水平稳定在 $1 \sim 1.5$ mV；工艺角变化可依托偏置自适应调节来维持跨导与偏置点的稳定，把偏置电流的调整范围预设在 $\pm 15\%$ 区间，使在 SS 到 FF 角的跨导变化不再放大失调漂移，并让增益变化维持在不超过 8% 的幅度内。温度补偿电路宜以局部温度敏感单元为基准，通过在偏置路径中加入具有正温度系数的调节支路，让 -40 °C 到 125 °C 的漂移被限定在 ± 2 μV/°C 左右。另外，把高功耗单元移至热扩散能力更好的区域，使局部热点在上电后数秒内即可被平滑摊开，从而避免热梯度触发额外失配；而在长期偏差的处理上，可让闭环校准单元依托片上参考节点做周期性微调，把累积偏移控制在 $100 \sim 150$ μV 区间，使老化后的参数变化不影响核心指标的边界。蒙特卡洛条件下的参数离散性可通过对关键器件面积的分级扩展与多片抽样校核，使增益、PSRR 与 CMRR 的 3σ 浮动范围保持在可接受区间，从而让工艺波动在量产条件下更易被验证与追溯，使校准后的性能具备可靠的重复性。

3.4 环境抗扰设计路径：电源完整性与隔离策略

环境抗扰的核心在于让电源完整性、布线隔离与热均衡形成可执行的协同结构，电源路径宜采用多级退耦把纹波耦合压缩在毫伏级范围，可把片上 MIM 电容分成 $20 \sim 50$ pF 的小单元贴近偏置节点，并在一二级电源口加上 $1 \sim 2$ nF 的中频退耦，使电源阻抗在 100 kHz

至 5 MHz 区间维持在较低水平，再把高频退耦布置在输出级附近提供快速电荷回补，使 PSRR 在高频段不出现突降。EMI 抗扰布局可依托屏蔽金属层与差分走线的组合方式，让输入级的敏感节点受外部辐射的影响下降至少 10 dB，在此基础上可对长距离布线段加入对称护线，让辐射耦合在源端即被削弱，从而避免干扰在中频区形成二次放大，并通过把高 dv/dt 节点以最短路径收敛到局部的回流区域，使电场耦合不再扩散到跨级链路；同时把数字噪声源与模拟核心保持在 $30 \sim 50$ μm 的最小隔离距离，并把地平面切割成独立的模拟与数字回流区，再在单点位置完成汇合，让地弹噪声在跨域传播过程中被充分衰减。对于回流路径本身，可让高频电流沿最小阻抗通路回到源点，并对关键信号线加入护线结构，使耦合噪声下降至原设计的一半，热均衡部分可依托扩散金属条把热点区域温差压缩在 $3 \sim 4$ °C 区间，使温度梯度不再放大输入级的偏移波动，通过此类连续动作把外部扰动限制在可管控范围，使电源噪声、EMI 与热分布产生的参数波动不再侵入核心增益链路。

4 结束语

CMOS 运放的高精度构建依托器件本征规律、拓扑结构调度与工艺协同动作在同一框架内形成稳定约束，使静态精度、动态特性与噪声抑制在复杂条件下依旧维持清晰边界。伴随参数离散性的不断累积，设计者需要使匹配、补偿与抗扰路径在不同尺度上保持连贯，使偏置场景、温度梯度、电源波动与辐射干扰都无法打破关键指标的平衡关系，由此使增益链路具备更坚韧的可预期性。运放的高精度能力并不来自单一技术，而来自多个层面的互补作用，只有在器件、结构、工艺与环境的多维耦合中形成稳固逻辑，精密模拟性能才会延展出可持续的可靠性。

参考文献：

- [1] 杨彦杰. CMOS 毫米波射频前端放大器的研究与设计 [D]. 广州：广东工业大学，2025.
- [2] 袁璐，李德建，赵玉霄，等. 基于 180nm CMOS 工艺的 700M-900MHz 低噪声放大器 [C]// 中国电子学会. 2025 年全国微波毫米波会议报告集 -WP4T. 北京智芯微电子科技有限公司，清华大学，2025.
- [3] 付玉. 高精度低噪声集成运算放大器研究 [D]. 贵阳：贵州大学，2025.
- [4] 胡望恒. 基于 CMOS 工艺的 X 波段功率放大器设计 [D]. 杭州：杭州电子科技大学，2025.
- [5] 谢郢. 一种开关电容相位补偿的 CMOS 可变增益放大器设计 [J]. 集成电路应用，2025,42(03):22-26.

无源单尺定位系统在斗轮堆取料机上的应用

沈毅

(安徽马钢矿业资源集团有限公司, 安徽 马鞍山 243081)

摘要 无源单尺定位系统是一种新型的高精度定位设备, 其工作稳定可靠, 不依赖地面供电, 具有灵敏度高、信号反应快、安装维护方便、设备模块化程度高、环境适应性强等优点。本文介绍了无源单尺定位系统产品的原理、设备构成、功能特点、详细的技术参数与产品的安装规范, 详细地描述了无源单尺定位系统在智慧料场斗轮堆取料机无人化作业系统中的应用, 并分析比较了无源单尺定位系统和其他常见工厂定位系统的优缺点, 旨在为无源单尺定位系统在斗轮堆取料机上的应用提供有益参考。

关键词 斗轮堆取料机; 无源单尺; 无人化; 位置检测系统

中图分类号: TH24; P22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.003

0 引言

斗轮堆取料机是一种用于大型干散货堆场的连续输送装卸机械设备, 其广泛应用于港口散货码头、火电厂煤厂、化工厂、钢铁厂、粮食储备厂等散料存储料场的堆取作业。斗轮堆取料机主要依靠人工操作作业, 这不仅使得工人在操作过程中承受着沉重的工作负担, 而且现场恶劣的作业环境也对他们的身体健康构成了严重威胁。为了适应高度自动化生产, 有效降低人工成本、改善工作环境、稳定工作效率, 催生了斗轮堆取料机的自动控制^[1]。在斗轮堆取料机的自动化系统中, 必不可少的是实时检测斗轮堆取料机的行走位置。一方面, 通过对大车进行实时精准的定位, 可以判断斗轮堆取料机是否到达指定的作业点, 为斗轮堆取料机下达自动化作业指令提供直接的参考数据。另一方面, 通过对距离接近的多个斗轮堆取料机的位置进行分析, 可以计算出斗轮堆取料机的相对位置, 再结合回转机构的回转角度, 可以判断出多台斗轮堆取料机及其回转机构是否存在碰撞可能, 提前规避风险, 提高现场作业的安全性。斗轮堆取料机位置检测有多种不同方式, 本文重点介绍使用无源单尺定位系统检测斗轮堆取料机位置数据, 并分析对比斗轮堆取料机位置检测不同方式下的优缺点。

1 无源单尺定位系统概述

1.1 无源单尺定位系统简介

无源单尺定位系统(以下简称LDR系统)是武汉索尔德公司在多年现场应用基础之上研发出的一款成

熟可靠的位置检测设备。LDR系统是基于复合信号正交解码电磁感应原理而开发的一款新型位置定位、移动测距定位系统, 该系统可用于检测工业现场各种沿指定轨道行驶搬运设备的实时位置^[2]。其由无源单尺、精尺源组件、边缘计算网关组成。每根无源单尺长度为2 m, 根据现场需求长度, 组成需求长度的数量, 在现场进行施工安装。精尺源组件从外部取电点取电, 通过无线充电的模式向无源单尺内部芯片供电。精尺源组件与硬质单尺不直接接触, 减少被撞击的风险, 数据交互主要通过电磁感应原理。

1.2 无源单尺定位系统工作原理

无源单尺定位系统利用复合信号正交解码电磁感应原理机制监测移动设备位置。边缘计算网关生成位置编码信号, 经精尺源组件调制放大后发送给无源单尺。无源单尺内部的阵列线圈接收能量和信号, 接收到的能量为内部电路板供电, 接收到的信号分析同步时钟和测址信息, 驱动位置标定线圈进行相干同步。通过对比信号和算法解算, 最终确认边缘计算网关的实时位置。

1.3 无源单尺定位系统组成结构

无源单尺定位系统由若干根每根2 m长的无源单尺、精尺源组件、边缘计算网关、车载电气柜及柜内解码仪等设备共同组成(如图1所示)^[3]。无源单尺需要固定在移动设备运行轨道一侧, 每根无源单尺有0~30 mm的安装间隙, 根据移动设备需要检测位置的长度来确认安装多少根无源单尺, 精尺源组件和车载

作者简介: 沈毅(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 矿山智能化。

电气柜都固定到移动设备上。解码仪精尺源组件通过专用线缆直接连接边缘计算网关，边缘计算网关输出信号给解码仪。解码仪显示移动设备当前位置信息，边缘计算网关对外输出位置信号数据。

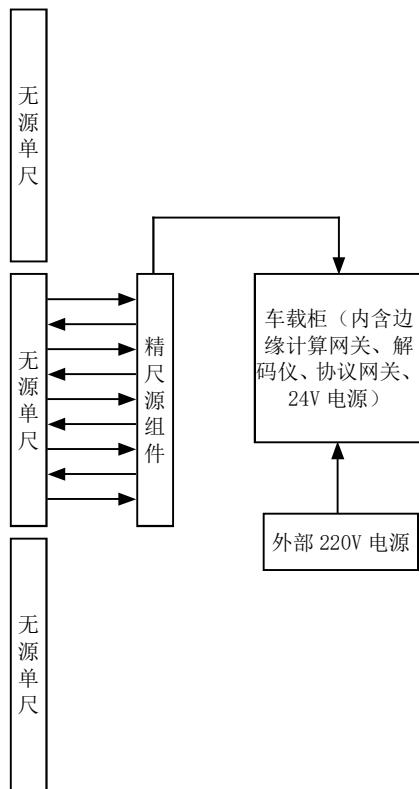


图 1 无源单尺系统框图

1.4 无源单尺定位系统功能特点

1. 稳定性：无源单尺定位系统具备反向极性保护功能，不怕雷击、不怕外界电磁环境，具有稳定性强、可靠性高等特点。

2. 灵活性：无源单尺定位系统可根据需要灵活定制，依据现场需检测的移动设备检测范围来确认长度，连续检测和分段检测方式均可实现。位置检测数据是绝对值，不怕掉电，恢复供电后数据仍保持原位置数据。

3. 安装与维护：无源单尺结构强度高，每根无源单尺可称重 1.5 吨重量，每根长 2 m，可分段式安装，不受现场环境影响。设备结构简单、安装方便迅速，维护时限短，10 分钟可更换好一根无源单尺。

4. 技术特点：电磁感应技术无需硬性接触，避免机械损伤风险，并且可连续检测位置数据，使用寿命长。整个测距区间可检测多个移动设备位置。

5. 适应性和耐用性：具有超强耐污染能力，防水、防蒸汽、耐酸碱。单根无源单尺出现故障或者被损坏

对系统整体性没有影响，具有天然的抗干扰及故障隔离能力。

1.5 无源单尺定位系统技术指标

1. 多设备检测：能同时检测一条轨道上的多个移动设备位置。

2. 连续检测与实时性：对移动设备位置检测具有连续性和实时性。

3. 系统工作温度范围：-15 °C ~ +85 °C。

4. 分辨率与精度：分辨率：0.1 mm；校正后的精度：≤ 1 mm。

5. 非接触间隙：0 ~ 150 mm（可定制）。

6. 上下偏摆容差：±100 mm。

7. 电源需求：DC+24 V、10 A。

8. 地址刷新率：最高 30 Hz，适应速度：最高 3 m/s。

9. 安装与防护：精尺源组件和无源单尺的防护等级 IP67，无透光或磁性材料，硬性分段结构，阻燃 V-0 级别，具有良好的物理与化学性质。

10. 抗干扰与故障隔离：每段测距部分的损坏或故障不影响系统运行，具有自我修复能力。

11. 精尺源组件的特性：高信噪比、高灵敏度、强抗干扰能力、自检功能以及提供多种维护参考信息。

12. 标准化与通用性：无需定制，后期备件可分段替换，每段 2 m 长的单尺可通用。

2 无源单尺定位系统在斗轮堆取料机现场的应用

2.1 应用场景介绍

某料场有 2 台斗轮堆取料机，每台斗轮堆取料机需检测范围为 220 m，为满足料场的无人运行功能需求，总包方研发了料场无人智能调度系统^[4]。远程操作人员根据实际工艺需求，远程启动操作斗轮堆取料机无人系统来完成预定的作业任务。通过料场无人智能调度系统，可以大大减少现场人员配置和劳动成本，降低现场环境劳动风险，减轻了员工的工作负担，实现 24 小时不间断作业，整体提高工作效率。

2.2 系统设计

料场无人智能调度系统包括：主控上位机操作系统，PLC 控制系统，无源单尺定位系统以及各种传感器和执行机构^[5]。各系统设备通过 EtherNet/ip 协议互相通信。PLC 控制系统先采集现场各设备信息进行预处理，再通过工业以太网集中发送到主控上位机操作系统，主控上位机操作系统分析处理接收到的数据，再根据生产调度需要，向现场 PLC 控制发送调度指令，

各执行机构再完成动作。图2是斗轮堆取料机全自动控制系统的系统框图。

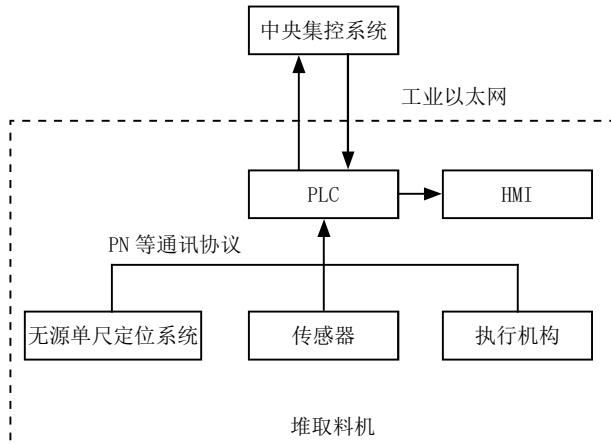


图2 斗轮堆取料机全自动控制系统的系统框图

料场无人智能调度系统中现场采集的数据来自以下设备：超声波测距仪（斗轮堆取料机防撞）、三维扫描装置（实时扫描堆场物料三维数据）、无源单尺定位系统（斗轮堆取料机位置检测）、俯仰编码器（检测斗轮堆取料机俯仰机构的角度）、电子皮带秤（检测皮带物料重量）、高清摄像头（实时监测斗轮堆取料机各部件是否正常运行）。堆取料控制原理如图3所示。

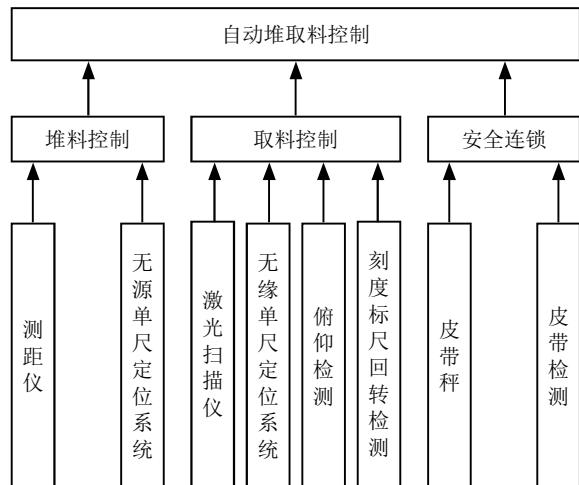


图3 堆取料控制原理框图

2.3 系统集成与部署

精尺源组件与边缘计算网关使用专用电缆连接，车载电气柜为边缘计算网关供电并从边缘计算网关读取定位数据。料场无人智能调度系统使用AB 1769PLC作为现场所有设备的主要控制器，CPU通过EtherNet/ip协议与车载电气柜内网关通信读取定位数据（如图4所示）。

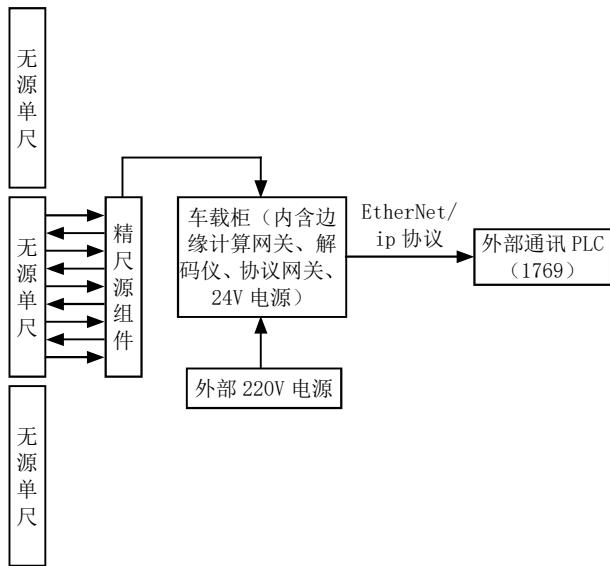


图4 无源单尺系统与现场PLC连接

3 无源单尺定位系统优势分析

国内外斗轮堆取料机位置检测手段有：旋转编码器、接近开关辅助旋转编码器、格雷母线、GNSS、无源单尺定位系统^[6]。

3.1 旋转编码器位置检测

旋转编码器是通过安装在移动设备车轮上检测车轮旋转圈数进行定位，这种定位方式通过测量旋转轴的旋转角度和旋转方向对移动设备的位置和行走方向进行确认。旋转编码器的优势是成本低和结构简单，但也存在明显缺点。当车轮出现打滑或卡死等情况时，旋转编码器的计数就跟实际走行不重合，导致定位不准，并且会导致累计误差，影响后续位置数据。此外，编码器属于机械式结构传感器，在长时间往复运动中，会受到磨损，极其容易损坏，因此需要大量的维护更换工作，并且损坏会导致数据丢失或者跳变，引起生产事故和安全事故。

3.2 接近开关辅助旋转编码器位置检测

为了解决旋转编码器的累计误差，可以在系统中加装接近开关，即使用接近开关辅助旋转编码器的方式进行定位测量。这种检测方式也存在限制，接近开关在有钢铁粉末现场，极易受到物理环境影响而产生误判断。并且接近开关的非接触间距非常小，移动设备的偏摆，都会导致接近开关被撞击损坏，影响系统的稳定性和运行。

3.3 接格雷母线位置检测

格雷母线是应用了电磁感应原理，实现对移动设备进行位置检测。地址编码器、天线箱、地址解码仪

与格雷母线四大件组成格雷母线系统，该系统具有检测精度高、不易磨损、使用寿命长等特点^[7]。但是格雷母线属于定制化产品，生产制造和供货周期长，对项目进度有影响，并且格雷母线安装在斗轮堆取料机现场，存在被物料堆砸损坏的风险，修复的周期长、费用高，并且修复后数据存在跳变等问题。

3.4 GNSS 位置检测

GNSS 定位是采用中国北斗系统，美国 GPS 系统，俄国格洛纳斯系统，欧盟伽利略系统 4 套导航系统，具体原理是差分技术应用，实现对设备进行定位。但是，GNSS 定位系统受到外界制约因素较多，卫星远离定位点，会导致信号弱，定位点卫星少也会导致定位信号弱^[8]。最主要定位信号还会受到遮挡，如果是料棚，那么 GNSS 定位系统将无法使用。

3.5 无源单尺定位系统

无源单尺定位系统的核心构成包括无源单尺、精尺源组件、边缘计算网关及解码仪。其中，单根无源单尺的标准长度为 2 m，通过多根拼接的方式即可搭建形成完整的定位系统。作为标准化量产产品，无源单尺具备便捷的维护特性：若单根单尺发生损坏，无需对整套单尺进行更换，仅需替换故障单尺系统便可快速恢复正常使用，显著降低了维护难度与综合成本。在系统稳定性设计上，无源单尺定位系统采用容错架构：单点故障仅会导致对应位置的定位数据出现偏差，不会影响其他区域的位置检测功能，更不会造成系统整体瘫痪，从而有效保障了定位系统运行的可靠性与稳定性。

4 无源单尺定位系统安装规范

4.1 无源单尺安装

无源尺建议安装在斗轮堆取料机皮带立柱上，把支架焊接在皮带立柱上，再把通丝螺杆、无源尺夹具组装固定在支架上，通丝螺杆前端螺丝扣露出 2 扣丝；通丝螺杆与支架的腰圆孔连接，固定在腰圆孔靠中间位置（便于后期维护有可调整空间），保证安装后在同一水平线上。注意事项：

1. 单根无源尺长度约为 198 cm，第一根尺与第二根尺间隙约为 2 cm。需保证第一根尺左边沿到第二根尺左边沿距离保持 2 m，以此类推。

2. 无源尺不宜固定在抖动较大的地方，必要时选择地上单独打立柱固定。

3. 支架的固定间距遵循以下原则：第一根支架与第二根支架间距 120 cm，用于固定第一根无源尺，第二根支架与第三根支架间距 80 cm，第三根支架与第四

根支架间距 120 cm，第三根和第四根支架用于固定第二根无源尺。以此类推。

4. 无源尺上下前后偏差不得超过 3 ~ 5 mm，印字的一面朝外。

4.2 精尺源安装

用 M12*150 通丝螺杆把精尺源和支架组装在一起后，将精尺源中心位置对准无源单尺中心位置，安装在小车上。与无源尺保持 50 ~ 80 mm 的感应间距可调。安装注意事项：

1. 精尺源需要预留调试空间，精尺源面不允许被正面固定机构遮挡，要能方便拆外壳，方便后期维护。

2. 精尺源光滑无印字一面朝无源尺，精尺源上的 1# 精尺源组件为首端。安装时首尾方向必须与无源尺的首尾方向保持一致。

3. 精尺源离整块金属结构和动力变频线缆距离大于 0.5 m。

5 结束语

在料场无人智能调度系统中，无源单尺定位系统具备安装维护便捷、检测精度高、环境适应性强、无运行磨损、寿命长、稳定可靠等核心优势。无源单尺位置检测技术在斗轮堆取料机上的成功应用，充分验证了其成熟可靠的产品性能。无源单尺定位系统凭借独特的技术优势，有效破解了传统定位技术难点，在工厂自动化领域占据重要的地位。

参考文献：

- [1] 张明, 王磊, 陈浩. 工业无线定位技术综述 [J]. 自动化仪表, 2023, 44(02):1-8.
- [2] 陈立新, 吴波. 基于电磁感应的非接触式精密位移测量技术研究 [J]. 传感器与微系统, 2022, 41(06):10-13.
- [3] 陈立新, 吴波, 杨帆. 无源电磁定位传感器设计与精度分析 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(07):215-222.
- [4] 徐宏业, 梁建国. 智慧料场无人化堆取作业系统设计与实践 [J]. 控制工程, 2024, 31(01):88-94.
- [5] 周涛, 刘洋. 工业自动化系统中现场总线与通信协议的设计与应用 [J]. 制造业自动化, 2023, 45(04):112-116.
- [6] 赵伟, 孙晓峰. 工业定位技术选型与应用案例分析 [J]. 自动化应用, 2023(08):22-26.
- [7] 刘志强, 黄海峰. 格雷母线在斗轮堆取料机自动定位系统中的应用 [J]. 港口装卸, 2022, 39(05):45-48.
- [8] 李岚, 朱锋, 刘万科, 等. 城市分类场景的 GNSS 伪距随机模型构建及其定位性能分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(03):545-553.

计及通信时延的配电系统可靠性建模与评估

李朝闻

(长春工业大学电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要 随着分布式可再生能源并网规模扩大, 配电网渗透率持续提升, 对主动控制策略的依赖日益增强, 进而推动信息通信系统需求增长。现有研究普遍采用解析法等传统方法, 存在运算效率较低的问题, 难以满足大规模配电网可靠性评估的实际需求。基于此, 本文开展计及通信时延的配电系统可靠性建模与评估研究。首先, 构建信息—物理融合配电网结构模型, 分别建立 SDH 协议下骨干通信层与 TCP/IP 协议下终端接入层的传输延时模型; 其次, 结合信息系统离散性与物理系统时序性, 构建耦合的可靠性综合评估模型; 最后, 提出序贯与非序贯蒙特卡罗模拟结合的混合求解方法, 模拟故障处理流程以量化通信时延影响。本研究有效验证了所提模型与混合求解方法的准确性, 以期为提升配电网可靠性提供理论参考。

关键词 配电系统; 通信时延; 可靠性评估; 蒙特卡罗模拟; SDH 协议

中图分类号: TM74; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.004

0 引言

在智能电网建设持续推进的背景下, 配电网中智能终端、先进通信技术及传感监测技术的广泛应用, 正推动其逐步演变为信息系统与物理系统深度耦合的二元复杂系统^[1]。然而, 分布式可再生能源大规模并网, 显著增加了配电网运行的经济性与可靠性挑战。主动控制策略成为关键解决方案, 但其高度依赖信息通信系统, 一旦信息通信失效将严重影响配电网运行。因此, 开展通信时延的配电网可靠性评估^[2]成为该领域的研究聚焦点。

1 信息物理系统可靠性研究现状

信息物理系统的可靠性研究可分为两个阶段^[3]:

第一阶段围绕信息系统与物理系统的耦合关系展开。首先, 构建典型信息系统的结构框架, 初步探究两者的耦合关联, 并从直接作用和间接作用两种方式描述信息元件或网络故障对物理系统的影响; 其次, 聚焦不同应用场景, 重点通过分析直接作用明确信息元件故障、网络拓扑改变与物理设备的耦合关系^[4], 同时建立通信时延物理系统可靠性模型。随着研究推进, 信息系统模型逐渐演变为更复杂的网络形态, CPS 可靠性评估方法大多转向采用模拟法^[5-6]。

第二阶段的研究核心: 一是对信息系统进行更精细化的建模, 二是深入分析其对配电网的深层影响, 其中信息传输延时给 CPS 可靠性带来的作用尤为关键^[7-8]。

分布式电源的接入, 进一步凸显了解析法的局限性, 其难以全面刻画系统中的实时交互与多因素耦合关系。因此, 有学者尝试用模拟法来评估配电自动化的故障处理流程通, 如倪伟等^[9]采用马尔可夫过程蒙特卡洛法, 通过抽取元件“运行—停运”时间序列模拟故障演化过程, 结合最优负荷削减调度模型, 精准计算故障期间的负荷缺供量与停电时长, 实现对含多能源元件的配电网可靠性评估。李莉等^[10]提出融合改进深度优先搜索与二进制粒子群优化的混合模拟方法, 先通过改进 DFS 算法精准定位故障后孤岛分布, 再以联络开关状态为优化变量, 构建涵盖功率损耗、负荷恢复率等指标的多目标函数, 通过 BPSO 算法搜索最优开关组合方案, 有效提升故障隔离与供电恢复的效率和可靠性。这类研究相比解析法更具优势, 不仅能自然纳入微电源参与故障恢复的动态过程, 还能突破解析法仅考虑信息元件随机故障的局限, 如刘文霞等^[11]基于主动配电网故障的自愈过程, 通过建立信息路由中断以及混合通信网结构下的信息传输延时的信息系统可靠性模型, 分析了信息传输有效性对系统处理故障的影响, 体现了模拟法在刻画信息故障动态影响上的价值。

针对现有研究的不足并且加快解析法本身的运算速度, 本研究采用模拟法构建信息传输延时模型, 提升评估结果贴合度, 为系统可靠性提升提供精准依据。

作者简介: 李朝闻(2004-), 男, 本科, 研究方向: 主动配电网可靠性评估。

2 信息失效对配电网可靠性影响机理分析

2.1 配电系统结构建模

信息—物理融合配电网由物理层与信息层构成二元耦合体系（见图 1）。信息层按功能层级划分为骨干网与接入网：骨干网采用同步数字体系（Synchronous Digital Hierarchy, SDH）传输协议，构建配电主站与子站间的广域通信通道，保障调控指令与状态信息的可靠传输；接入网则基于传输控制协议 / 网际协议（Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP）的以太网架构，实现配电子站与智能电子设备（Intelligent Electronic Devices, IED）的局域互联。在运行机制上，信息层输出的控制指令直接作用于物理层的设备运行状态；而物理层的实时运行工况数据，通过智能电子设备采集后，反向为信息层的数据输入提供基础数据源，形成“指令—状态”双向动态交互闭环，支撑配电网的智能调度、故障自愈等高级应用，保障配电网的安全稳定运行与智能管控效能。

2.2 配电系统通信时延建模

在配电系统信息交互架构中，通信网络作为终端设备与主站系统的数据传输载体，其通信时延特性直接制约配电自动化功能的响应效能。本文基于电力通信网络分层架构，构建通信时延模型。

2.2.1 骨干通信层传输时延建模（SDH 协议）

骨干通信层作为配电系统数据传输的核心承载层，

采用同步数字体系（SDH）协议保障高可靠性与低延时传输。其传输延时 T_1 聚焦于节点转发流程，涵盖交换延时、帧发送延时、线路传输延时三个核心环节，交换延时 ($T_{SF,i}$)：SDH 交叉连接设备对 SDH 帧开销进行解析、执行时隙交换操作的时间开销，保障数据平面的快速交换转发，帧发送延时 ($T_{TL,i}$)：与 SDH 帧结构参数及传输端口速率强相关，线路传输延时 ($T_{WL,i}$)：由物理传输距离与光纤介质中光信号传播特性决定。

对于包含 M_1 个节点的骨干网通信路径，其传输时延为各节点交换延时、帧发送延时、线路传输延时的线性累加和，数学表达式为：

$$T_1 = \sum_{i=1}^{M_1} (T_{SF,i} + T_{TL,i} + T_{WL,i}) \quad (1)$$

2.2.2 终端接入层传输时延建模（TCP/IP 协议）

终端接入层作为配电终端与骨干通信层的接入层，需适配多样化终端设备，采用 TCP/IP 协议栈实现灵活接入。受系统负载率、路由跳数及协议机制影响，接入网引入复杂的传输时延。其传输时延 T_2 需叠加帧排队延时 ($T_{QL,i}$)，并受网络负载率显著影响，采用随机扰动与归一化处理：引入随机扰动因子 δ ，反映网络动态波动特性，对于包含 M_2 个节点的接入网通信路径，需叠加各节点的交换延时 ($T_{SF,i}$)、帧发送延时 ($T_{TL,i}$)、帧排队延时 ($T_{QL,i}$) 及线路传输延时 ($T_{WL,i}$)，并通过归一化处理消除随机扰动的非线性影响，数学表达式为：

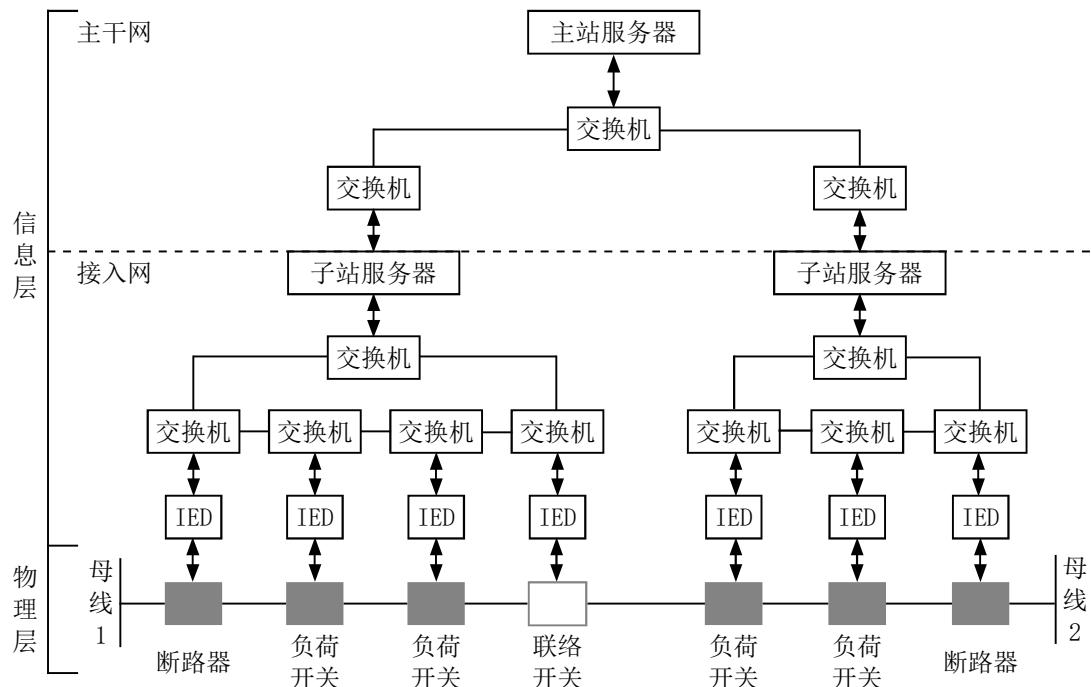


图 1 配电信息物理系统结构

$$T_2 = \frac{\sum_{i=1}^{M_2} (T_{SF,i} + T_{TL,i} + T_{QL,i} + T_{WL,i})}{\sqrt{1-\delta}} \quad (2)$$

2.2.3 系统端到端传输延时状态定义

综合骨干网传输延时 T_1 与接入网传输延时 T_2 , 定义系统端到端通信路径的传输延时状态 R_2 :

$$R_2 = \begin{cases} 1, & T_1 + T_2 < T_0 \\ 0, & T_1 + T_2 > T_0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, T_0 为配电系统允许的最大传输延时阈值 $R_2=1$ 表示传输延时处于允许范围内, 可保障配电业务的正常交互; $R_2=0$ 则表示传输延时超限, 可能引发动态传输失效。

3 基于蒙特卡罗模拟的通信时延对配电网故障后果的影响分析

配电网故障处理包含定位、隔离、恢复环节, 通信时延通过影响信息系统的信号量测、开关遥控功能, 扰故障处理流程。利用蒙特卡罗模拟, 随机生成通信时延、故障场景、信息交互状态, 模拟故障处理全流程, 量化通信时延对故障后果的影响。

3.1 模拟参数与场景构建

3.1.1 故障场景参数

信息量测信号: 设上传成功概率 $p_{meas}=0.9$, 0~1 随机数模拟“成功 1/ 失败 0”。

开关遥控动作: 设反馈成功概率 $p_{switch}=0.95$, 0~1 随机数模拟“成功 1/ 失败 0”。

3.1.2 模拟次数与初始化

设定模拟次数 $N=10\,000$, 每次模拟随机生成: 故障区段、通信时延 T 及状态 R_2 、量测信号与开关动作状态。

3.2 故障处理流程模拟

3.2.1 故障定位模拟逻辑

$R_2=1$ (时延正常): 若信息量测信号构成完整路径, 按最后一个经历故障电流的开关逻辑定位; 否则用遗传算法判断定位结果。

$R_2=0$ (时延超限): 信号完整性受破坏, 按信号不完整 / 无信号逻辑, 模拟定位失败或错误重构路径情况。

$$\text{统计定位成功率 } P_{loc} = \frac{\text{定位成功次数}}{N} \quad (4)$$

3.2.2 故障隔离模拟逻辑

1. 定位成功: (1) 开关动作成功: 正确隔离, 记录时间 / 范围。 (2) 开关动作失败: 搜寻可控开关, 存在则尝试隔离; 无则断路器跳闸。

2. 定位错误: (1) 开关动作成功: 恢复引发跳闸, 二次定位隔离。 (2) 开关动作失败: 分隔离范围是否含故障点, 模拟范围扩大。

$$\text{统计隔离成功率 } P_{iso} = \frac{\text{隔离成功次数}}{N} \quad (5)$$

$$\text{范围扩大概率 } P_{exp} = \frac{\text{范围扩大次数}}{\text{隔离失败次数}} \quad (6)$$

3.2.3 供电恢复模拟逻辑

通信正常 ($R_2=1$): 故障区域停电时间 $t=t_3$, t_3 为修复时间。

通信失效 ($R_2=0$): 故障区域停电时间 $t=t_1+t_2+t_3$, t_1 人工查找、 t_2 人工操作时间。

$$\text{统计平均停电时间 } \bar{t} = \frac{\Sigma \text{每次模拟停电时间}}{N} \quad (7)$$

$$\text{断路器平均跳闸次数 } \bar{k} = \frac{\Sigma \text{每次模拟跳闸次数}}{N} \quad (8)$$

4 算例分析

4.1 系统可靠性评估

基于蒙特卡罗模拟, 对计及通信时延的配电系统可靠性进行了全面分析。结果如表 1 所示。

表 1 系统可靠性计算结果

可靠性指标	数值
SAIDI (系统平均停电时间)	5.5 235 h/(用户·年)
EENS (期望缺供电量)	2.7 617 MW·h/年
断路器平均跳闸次数	0.1 526 次/年
故障定位成功率	89.02%
故障隔离成功率	84.74%
停电范围扩大概率	15.26%
平均通信时延	8.4 071 ms
时延标准差	9.4 256 ms

从核心可靠性指标看, 系统平均停电时间 (SAIDI) 达 5.5 235 h/(用户·年), 期望缺供电量 (EENS) 为 2.7 617 MW·h/年, 表明系统供电连续性存在优化空间。通信子系统表现出较高稳定性: 平均通信时延 8.4 071 ms, 时延正常比例 99.36%, 但故障定位成功率 89.02%、隔离成功率 84.74% 及停电范围扩大概率 15.26%, 揭示了通信时延的偶发波动对故障处理流程的干扰效应, 需从信息—物理融合视角剖析其作用机制。

4.2 关键影响因素的敏感性分析

4.2.1 网络负载率 (ρ) 的双重影响

从折线图中不同负载率的曲线对比可见: 负载率越高, SAIDI (用户平均停电持续时间) 数值越大; 负载率越低, SAIDI 数值越小, 说明高负载率会显著增加配电网通信时延, 导致系统可靠性下降。

4.2.2 骨干网节点数 (M_1) 的边际效应

从折线图中每条曲线的趋势可见: 随着骨干网节

点数的增加，各负载率下的 SAIDI 均呈上升趋势。无论负载率高低，节点数越多，SAIDI 数值越高，说明骨干网节点数增加会加剧配电网通信时延，削弱系统可靠性。

4.2.3 两者的综合影响

从折线图的曲线分布来看：当骨干网节点数少且负载率低时，SAIDI 处于较低水平（为较优状态）；当节点数多且负载率高时，SAIDI 达到较高水平（为较差状态）。这表明网络负载率和骨干网节点数对通信时延的影响呈叠加效应——负载率越高、骨干网节点数越多，配电网通信时延越大，两者的联合作用会进一步强化对系统可靠性的负面影响。

不同网络负载率下的 SAIDI 变化详见图 2。

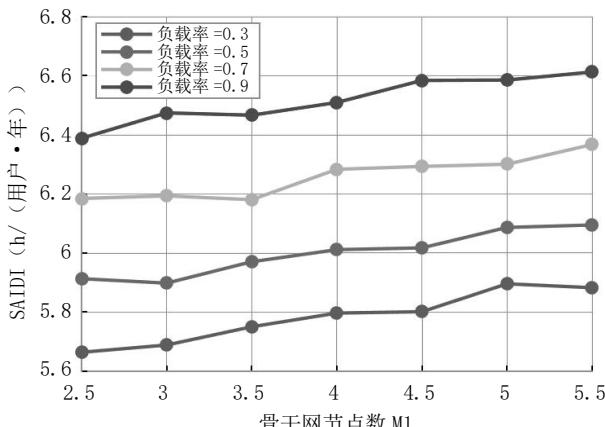


图 2 不同网络负载率下的 SAIDI 变化

5 结论

本文基于配电网的架构，在考虑骨干网 SDH 协议与接入网 TCP/IP 协议差异化传输特性、网络负载率及骨干网节点数量等影响因素的情况下，构建计及通信时延的配电系统可靠性评估模型，结合蒙特卡罗模拟对故障处理全流程进行仿真分析，由算例结果得出以下结论：

1. 当配电网物理层发生故障时，通信时延引发的信息传输失效会显著加剧物理故障的影响后果。具体表现为系统平均停电时间（SAIDI）较通信正常场景增长约 43.5%，期望缺供电量（EENS）增长约 41.7%，大幅增加了系统的故障损失与运维恢复成本，充分体现了通信时延在信息—物理耦合场景下对配电网可靠性的关键制约作用。

2. 不同通信关联因素对配电网可靠性的影响存在明显差异，需采取针对性优化措施。一方面，网络负载率与系统可靠性呈强负相关，当接入网负载率超过 80% 阈值后，帧排队延时会呈指数级激增，导致通信时

延超限概率大幅上升，因此需将接入网负载率严格控制在 80% 以内；另一方面，骨干网节点数量的增加会直接导致各节点传输延时累加值上升，时延超限风险随节点数增多而逐步加大，故在通信拓扑设计中应优先减少骨干网传输节点数量，以优化整体链路延时特性。

3. 后续研究将进一步探索更复杂信息扰动下的配电网可靠性影响机理，重点聚焦多协议混合传输场景下的时延协同波动、极端天气引发的信息—物理双重故障等复杂扰动因素，深入分析此类因素对通信时延稳定性、信息交互完整性的耦合影响机制，为配电网在高扰动场景下的可靠性提升提供更全面的理论支撑与优化方向。

参考文献：

- [1] 张瑶, 王傲寒, 张宏. 中国智能电网发展综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2021(05):180-187.
- [2] 邓华. 配电信息物理系统可靠性评估 [D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [3] 刘文霞, 林子鉴, 马铁, 等. 计及信息失效影响的主动配电系统可靠性建模与评估 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19):94-102.
- [4] 王超超, 董晓明, 孙华, 等. 考虑多层次耦合特性的电力信息物理系统建模方法 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(03): 83-91.
- [5] 王进, 钟啸, 冯隆基, 等. 基于蒙特卡洛法的用电信息采集系统可靠性评估模型 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(03): 173-179.
- [6] 薛禹胜, 李满礼, 罗剑波, 等. 基于关联特性矩阵的电网信息物理系统耦合建模方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(02):11-19.
- [7] Phan K T, Phat H, Diep N N, 等. 节能双跳物联网具有延迟中断约束的通信网络 [J]. IEEE 工业信息学汇刊, 2021, 17(07):4892-4903.
- [8] Hossein H N Y, Yousef K, Alimorad M. IEEE 802.15.4 的马尔可夫链模型在周期性流量下具有数据包违约的时间关键型无线传感器网络 [J]. 环境智能与人性化计算杂志, 2022, 13(04):2253-2268.
- [9] 倪伟, 吕林, 向月, 等. 基于马尔可夫过程蒙特卡洛法的综合能源系统可靠性评估 [J]. 电网技术, 2020, 44(01): 150-158.
- [10] 李莉, 阳东升, 余梦天, 等. 基于改进混合法的电网运行可靠性评估方法研究 [J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 74-79.
- [11] 刘文霞, 宫琦, 郭经, 等. 基于混合通信网的主动配电网信息物理系统可靠性评价 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(06):1706-1718.

基于自动化测试技术的继电保护装置性能评估研究

张其方，王辉春，杨婧

(云南电力试验研究院(集团)有限公司，云南 昆明 650500)

摘要 继电保护装置作为电力系统安全稳定运行的核心保障设备，其动作的可靠性与速动性对整个电网的安全至关重要。鉴于传统人工测试方法在测试效率、覆盖范围与结果一致性方面存在固有局限，难以满足智能电网背景下对继电保护装置高性能与高可靠性的严格要求。若保护装置的潜在缺陷未能被及时检出并消除，在系统发生故障时可能导致保护误动或拒动，极易引发大规模的停电事故。本研究以某型号数字线路保护装置为研究对象，系统性开展基于自动化测试技术的性能评估研究，准确识别装置在不同故障类型及工况下的性能薄弱环节，旨在为继电保护装置的优化设计、入网检测与运行维护提供科学依据，进而有效提升电力系统的安全稳定运行水平。

关键词 自动化测试；继电保护；性能评估；测试平台

中图分类号：TM77；TM76

文献标志码：A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.005

0 引言

继电保护装置是电力系统不可或缺的重要组成部分，其性能优劣直接关系到供电可靠性与设备安全。对继电保护装置进行全面、精确的性能评估，是确保其正确动作、防止故障扩大的关键环节，对于构建坚强智能电网、保障社会经济稳定发展，具有不可替代的重要作用。我国《继电保护和安全自动装置基本试验方法》(GB/T 7261-2016)等一系列技术标准的颁布与实施，为继电保护装置的测试验证提供了更为科学、规范的指导^[1]。随着电网结构日趋复杂，新能源大规模并网，电力电子设备广泛渗透，系统运行特性发生深刻变化，对继电保护的动作速度、选择性和适应性提出了更高要求。传统的定期检修与抽样测试模式已难以全面、动态地掌握保护装置在真实复杂工况下的性能状态。因此，引入高效、精准、可复现的自动化测试技术，构建系统化的性能评估体系，成为行业发展的必然趋势。

1 继电保护装置概况

某型号数字线路保护装置广泛应用于220 kV电压等级的输电线路，占地面积约为标准19英寸机箱的面积。该装置自21世纪初投入研发与应用，长期承担线路的电流差动保护和距离保护任务^[2]。在功能实现上，该装置采用了大量集成电路、高性能数字信号处理器(DSP)和实时操作系统。随着智能电网建设的推进与

设备技术迭代，该型号装置于2020年逐步停产，但仍在大量现场运行，现计划对其进行系统性能评估，以决定其后续技术改造或替换策略。该装置设计于特定历史时期，其硬件架构与算法逻辑基于当时的电网条件和芯片技术水平。在当前电网运行方式多样化、故障形态复杂化的背景下，其处理能力、通信带宽及逻辑判别机制可能面临挑战。对其进行全面的自动化测试与评估，不仅是对存量设备健康状况的把控，也为理解早期设备设计逻辑与当前运行需求之间的差距提供了宝贵案例。

2 继电保护装置自动化测试与性能评估

2.1 测试平台构建与方案设计

在自动化测试平台的构建过程中，通过查阅该保护装置的技术说明书、型式试验报告、通信规约文档等必要资料后，了解到该装置在既往应用中具备完善的保护功能和通信接口^[3]。通过访谈该装置的多位现场运维人员，及前往相关调度部门进行取证，进一步了解到该装置在近年运行中曾出现过数次不明原因的通信中断记录，同时，在调查过程中发现，该装置在区外故障转区内故障的复杂序列下，曾有过动作延时偏长的报告。考虑到该装置可能存在逻辑判别与时序配合问题，在测试方案中重点设置了包括单相接地短路、两相相间短路、三相短路以及转换性故障在内的多种故障类型^[4]。依据测试需求，在测试系统中配置

作者简介：张其方（1987-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：电力系统自动化测试。

了实时数字仿真器（RTDS）、功率放大器、精密计时仪及自动化测试主机，共同构成闭环测试系统。

2.2 测试用例与数据采集

在故障模拟区域，通过设置故障起始时间、故障持续时间、故障位置和过渡电阻等关键参数，生成标准 COMTRADE 格式的故障数据文件^[5]，共计生成有效测试用例（35 个）。在通信压力测试区域，通过模拟网络背景流量，在 80~100 Mbps 的带宽压力下，测试装置 GOOSE（面向通用对象的变电站事件）报文的响应时间与丢包率，获取关键性能数据（12 组）。在其他功能验证区域，依据保护定值单完成功能性测试用例（18 个）的布置与执行。

2.3 采集样品检测

2.3.1 动作时间样品采集

采集该保护装置在各类测试用例下的动作时间数据送往测试系统内置分析模块完成处理。动作时间检测项目涉及保护启动时间、判断时间及出口跳闸时间等关键指标，见表 1。

2.3.2 通信性能样品采集

在通信性能样品采集过程中，通信报文的类型大部分为 GOOSE 报文与 SV（采样值）报文^[6]。通信性能检测项目涉及传输延时、抖动、丢包率及其他类型通信质量的常规指标等^[7]，见表 2。

2.4 测试结果

2.4.1 动作时间测试结果

动作时间测试结果显示，该型号保护装置在金属性

短路故障条件下，动作时间稳定在 21~26 ms 范围内，满足行业标准要求的 30 ms 以内。但在过渡电阻（100 Ω）接地故障情况下，平均动作时间延长至 35.8 ms，最大动作时间达到 38.9 ms，已超出定值整定范围。上述检测结果表明，该保护装置在高阻接地故障条件下存在动作延迟的风险。值得关注的是，在模拟转换性故障时，装置平均动作时间达到 45.3 ms，最大动作时间达到 52.1 ms，这一现象产生是由于该保护装置的故障判别逻辑在故障类型突变时需要进行序列复归与再判别，消耗了额外的处理时间。过长的动作时间可能导致故障切除延迟，对电力系统稳定性和设备安全产生不利影响。

2.4.2 通信性能测试结果

本次测试过程中，通过通信测试仪采集到的 GOOSE 报文性能数据中，传输延时、丢包率及抖动在 95 Mbps 高背景流量下均出现超标现象，最大传输延时达到 14.8 ms，丢包率达到 0.25%，抖动达到 3.2 ms。通信性能劣化区域主要集中在高负载网络压力测试场景。通过分析通信劣化原因，发现该保护装置采用的通信处理芯片在处理高优先级报文队列时，缓存容量不足，当网络流量瞬时突增，极易造成报文堆积与延迟。由于 GOOSE 报文承载着关键的跳闸与联锁信息，其传输的实时性与可靠性直接关系到保护系统的正确动作，通信性能的劣化可能造成保护功能的失效或异常。

2.5 装置性能风险评估

2.5.1 危害识别

通过分析装置的硬件逻辑图与软件架构说明，并

表 1 某型号保护装置动作时间测试结果统计表 (ms)

序号	故障类型	过渡电阻 (Ω)	测试次数	平均动作时间	最大动作时间	是否超标
1	A 相接地短路	0	10	24.5	26.1	否
2	A 相接地短路	100	10	35.8	38.9	是
3	BC 相间短路	0	10	22.7	23.5	否
4	三相短路	0	10	21.2	22.0	否
5	转换性故障	N/A	10	45.3	52.1	是

表 2 某型号保护装置通信性能测试结果统计表

序号	性能指标	背景流量 (Mbps)	测试值 (最大)	标准限值	是否超标
1	GOOSE 延时 (ms)	80	6.5	10	否
2	GOOSE 延时 (ms)	95	14.8	10	是
3	丢包率 (%)	80	0.01	0.1	否
4	丢包率 (%)	95	0.25	0.1	是
5	抖动 (ms)	95	3.2	2.0	是

结合自动化测试结果，确定动作延时与通信可靠性是影响该装置性能的两个突出风险点。动作延时问题主要源于装置在复杂故障（如高阻接地、转换性故障）下的算法处理效率^[8]。通信可靠性问题则可能与装置采用的早期网络接口芯片及其驱动程序的处理机制有关，在高负载下容易出现性能瓶颈。

2.5.2 暴露评估

对该保护装置在电网中可能面临的风险，需要综合考虑故障发生时其动作失败（拒动或误动）对系统稳定、设备损坏及供电中断等不同途径的影响。动作失败概率的计算基于可靠性工程中常用的故障树分析（FTA）模型。保护系统拒动概率的计算公式可简化为：

$$P_{fail} = P_{hw} + P_{sw} - P_{hw} \times P_{sw} \quad (1)$$

式（1）中： P_{fail} 表示系统整体拒动概率； P_{hw} 为硬件失效导致的拒动概率； P_{sw} 为软件逻辑或时序错误导致的拒动概率。根据装置历史运行数据及测试结果，假设硬件失效率 P_{hw} 为 1.0×10^{-6} /小时，结合测试中发现的复杂故障下软件逻辑延时问题，设定 P_{sw} 为 5.0×10^{-5} /次动作。经由公式（1）运算得出，在面临特定复杂故障时，该装置的等效拒动概率上升至约 5.1×10^{-5} /次动作。

通信失效后果量化评估通过计算因通信延迟或丢失导致保护动作失败的风险增量进行。

$$Risk_{inc} = P_{comm} \times Severity \quad (2)$$

式（2）中： $Risk_{inc}$ 表示风险增量； P_{comm} 为高负载下通信失效概率（根据测试数据估算为 0.25%）； $Severity$ 为动作失败后果的严重程度等级（此处量化为 10^6 元/次）。计算得出，因通信问题导致的期望风险损失为 2 500 元/次事件。暴露评估通过对不同风险路径下的概率与后果进行量化，为评估装置潜在风险提供关键的数据支撑。

2.5.3 毒性评估（失效影响评估）

该型号保护装置所在线路由于长期面临潜在的误动与拒动风险，会严重威胁电网安全运行。通过调阅该装置及同系列装置服役区域的电网事件报告发现，该系列装置所在区域的保护不正确动作率（包括误动和拒动）明显高于全网平均水平。研究发现，通过对同系列装置进行深入的故障录波数据分析后，结果清晰地显示，在多起事件中，装置的故障判别时间或通信响应时间超出了预期设计值，一系列数据证实了动作延时与通信不可靠对保护系统正确动作产生的危害。

2.5.4 风险表征

针对具有明确后果的硬件失效与设计缺陷，采用行业内的定量风险分析中常用的风险矩阵完成风险等

级的评定。风险值（Risk）的计算公式为：

$$Risk = Likelihood \times Consequence \quad (3)$$

式（3）中： $Likelihood$ 为失效发生的可能性（根据概率分级）； $Consequence$ 为失效后果的严重性。通过严谨的计算与矩阵定位，该保护装置在高阻接地故障下的动作延时问题，其可能性等级为“偶尔”，后果等级为“严重”，风险等级被评定为“高风险”。在通信可靠性方面，高负载下的通信劣化问题，其可能性等级为“偶尔”，后果等级为“临界”，风险等级被评定为“中等风险”。上述结果表明，该保护装置在特定运行条件下存在不可忽视的运行风险，尤其是应对复杂故障的能力不足，可能导致故障切除时间延长，增加系统稳定破坏的风险。

3 结束语

该型号数字线路保护装置在常规故障条件下性能基本满足要求，但在高阻接地、转换性故障等复杂场景下存在明显的动作延时，且其通信性能在网络高负载情况下存在劣化风险，整体性能评估揭示出中等至高风险隐患。为保障电网后续安全稳定运行，建议对该系列装置进行软件逻辑优化或有计划地实施技术改造与替换。同时，在运维策略中加强对复杂故障的监测与诊断，制定科学合理的设备健康管理方案，确保继电保护系统能够充分满足智能电网对可靠性与速动性的高标准要求。

参考文献：

- [1] 吴丹阳. 继电保护和安全自动装置的两种基本试验方法比较 [J]. 魅力中国, 2018(32):270-271.
- [2] 荣浩. 220kV 电网输电线路继电保护与自动装置设计研究 [J]. 电气技术与经济, 2024(06):196-199.
- [3] 徐钊, 田娟. 基于 LabVIEW 的继电保护装置柔性自动化测试系统设计 [J]. 微型电脑应用, 2024, 40(11):213-216.
- [4] 聂祥论, 李义, 吴瑀, 等. 基于 RGB 图像生成的 CNN-CBAM-BiLSTM 配网接地故障分类方法 [J]. 智能电网, 2025, 15(04):73-81.
- [5] 曹可. 带故障录波的多功能电表方案分析 [J]. 现代建筑电气, 2024, 15(06):33-36.
- [6] 杨静, 程克杰, 郭亮, 等. 配电网 5G 通信 UDP 封装 GOOSE/SV 报文自动判断测试的设计与实现 [J]. 东北电力技术, 2023, 44(08):19-23.
- [7] 王顺其. 融合通信系统流媒体自适应传输研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- [8] 应雨龙, 李靖超, 武文杰, 等. 基于模型与数据混合驱动的重型燃气轮机全通流部件性能诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15):6000-6012.

高比例分布式电源接入下的配电网 电压波动抑制策略研究

鲁申奇

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 210001)

摘要 本文以电压波动抑制为核心目标, 从主动控制与被动补偿两大维度系统分析分布式电源有功 / 无功协调控制、储能系统协同调度、柔性负荷响应及无功补偿设备配置等关键策略的技术内核与适用场景, 进而构建多策略分层协同控制架构, 明确各层级控制目标与协同机制。同时, 探讨策略应用中的成本优化、兼容性提升及智能化升级等核心挑战。研究结果表明, 单一抑制策略难以适配复杂波动场景, 通过主动控制与被动补偿的有机协同, 结合智能化调度手段, 可实现电压波动的精准高效抑制, 为配电网安全稳定运行提供技术参考。

关键词 分布式电源; 配电网; 电压波动; 主动控制; 被动补偿

中图分类号: TM7

文献标志码: A

D01:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.006

0 引言

配电网作为能源供给末端, 其电压稳定性直接影响用户用电体验与电力系统安全运行。高比例分布式电源接入改变传统配电网潮流分布特性, 其出力的随机性、间歇性与波动性, 易诱发节点电压偏移、闪变等电压问题。电压波动抑制的核心是通过可控资源调节或补偿设备配置, 抵消分布式电源接入带来的电压扰动, 维持节点电压在允许范围。本文聚焦各类抑制策略的技术特性、适用场景及协同优化路径, 为配电网电压控制提供理论与实践参考。

1 配电网电压波动抑制策略分类与核心原理

1.1 主动控制策略

主动控制策略通过对配电网中可控资源的运行状态进行主动调节, 从源头上削弱电压波动的产生与传播, 具有灵活性强、调节范围广的特点, 主要包括分布式电源协调控制、储能系统调度与柔性负荷响应三类。

1. 分布式电源有功 / 无功协调控制。分布式电源具备有功与无功调节能力, 其协调控制核心在于保障电源出力效率的同时, 通过动态调整有功输出平滑度与无功补偿容量, 实现电压波动抑制。(1) 有功功率平滑控制方面, 引入出力预测与滚动优化机制, 结合短期功率波动阈值约束, 对有功输出实施限幅与平抑, 避免出力突变引发电压冲击; 超阈值波动分量通过与储能设备联动, 由储能系统吸收或释放功率抵消, 确

保注入配电网的有功功率连续稳定。(2) 无功功率就地补偿控制依托逆变器无功调节潜力, 根据节点电压偏差实时调整无功输出, 通过“就近补偿”减少线路无功传输损耗, 降低电压降落。策略采用电压—无功下垂控制模式, 分布式电源可根据节点电压变化自动调整无功出力, 实现分散式电压调节, 无需全局通信, 响应迅速且可靠性高。

2. 储能系统协同控制。储能系统作为配电网“功率缓冲器”, 其协同控制核心通过灵活充放电调度, 平抑分布式电源出力波动与负荷变化引发的电压扰动。依据波动频率与幅度差异, 储能系统采用差异化控制模式: 针对光伏秒级出力等高频小幅波动, 依托电化学储能或飞轮储能的瞬时充放电特性, 实施快速响应控制, 迅速抵消功率差值以维持电压稳定; 针对风电小时级出力等低频大幅波动, 结合日内出力预测制定充放电计划, 采用容量优化控制, 在出力高峰吸收多余功率、低谷释放补充, 保障电压中长期稳定。多类型储能互补协同可进一步提升抑制效果: 超级电容器响应迅速, 适配高频波动平抑; 锂电池储能容量充足, 适配低频波动应对。二者组合应用, 既能兼顾响应速度与调节容量, 又能降低单一储能系统的配置成本与运行损耗。

3. 柔性负荷调度控制。柔性负荷具备可平移、可中断或可调节特性, 其调度控制策略通过聚合调控, 将分散柔性负荷转化为配电网虚拟调节资源, 参与电

作者简介: 鲁申奇 (1993-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。

压波动抑制。该策略核心在于构建需求响应型负荷聚合机制：通过电价激励、合同约束等方式，引导用户调整负荷运行时段或功率消耗水平，实现负荷与分布式电源出力的时空匹配。例如：分布式电源出力高峰、电压偏高时，启动电动汽车集中充电或空调负荷升档，提升负荷吸收功率以降低节点电压；出力低谷、电压偏低时，暂停非关键负荷或降低负荷功率，缓解电压降落^[1]。为提升调度精度，可引入负荷聚合商模式，对海量分散柔性负荷实施集群控制，通过标准化接口与配电网调度中心交互信息，依据电压控制指令动态调整负荷聚合容量，实现电压波动的精细化抑制。

1.2 被动补偿策略

被动补偿策略通过在配电网关键节点配置无功补偿设备，实时抵消分布式电源接入带来的无功冲击，维持系统无功功率平衡，进而抑制电压波动。

1. 静止无功补偿设备控制。静止无功补偿设备以电力电子器件为核心，兼具响应快速、调节精准的特性，主要包括静止无功补偿器（SVC）与静止同步补偿器（STATCOM）两类：（1）SVC 基于晶闸管控制电抗器（TCR）与投切电容器（TSC）的组合结构，通过调节晶闸管触发角改变电抗器等效阻抗，实现无功功率连续调节，可在感性与容性区间灵活切换，适用于中低压配网中分布式电源出力中等频率波动场景。其结构成熟、成本适中，但响应速度受晶闸管开关特性限制（通常为毫秒级），调节过程中可能产生少量谐波。（2）STATCOM 采用电压源型变换器（VSC）结构，通过控制变换器输出电压与系统电压的幅值及相位差，实现无功功率快速连续调节，响应速度达微秒级，且谐波污染小、调节范围广，可适配分布式电源出力快速波动。同时，STATCOM 具备低电压穿越能力，系统电压跌落时仍能维持无功输出，有效提升配电网故障恢复能力。

2. 分布式电容器组补偿。分布式电容器组于配电网分支线路或用户侧部署，通过固定容量或分组投切式配置输出容性无功功率，抵消分布式电源的感性无功损耗，抑制线路电压降落。其核心优化方向为部署位置与投切策略：位置优先选择电压波动显著的节点或线路中段，以最大化补偿效能；投切模式分为手动投切、基于电压或无功功率阈值的自动投切，以及融合分布式电源出力预测的智能投切。在技术特性上，固定容量型成本低廉、维护便捷，适配波动幅度稳定的场景；分组投切型通过多电容单元组合，实现无功容量阶梯式调节，适用于波动幅度中等的场景；智能投切型结合预测数据提前调整投切状态，减少动作次数，提高补偿精度。该方案存在调节不连续的局限，

可能引发电压小幅波动，且对快速波动的响应能力不足，通常需与其他补偿设备协同应用，以满足配电网无功补偿的全面需求。

3. 有载调压变压器（OLTC）调节。OLTC 通过切换变压器分接头调整变比，实现二次侧输出电压调节，适用于配电网电压慢变波动场景，如日内负荷变化、分布式电源出力小时级波动。其控制策略以二次侧电压偏差为核心，电压超出允许范围时，触发分接头切换，使电压趋近额定值。OLTC 优势显著，调节范围广、可靠性强，可满足配电网较大区域的电压调节需求；但存在固有局限，分接头切换依赖机械动作，响应速度为秒级至分钟级，无法适配快速波动，且频繁操作会缩短使用寿命，故需合理设定电压阈值与切换间隔^[2]。为优化调节效果，OLTC 常与无功补偿设备协同运行：OLTC 负责慢变波动的粗调，无功补偿设备承担快变波动的细调，形成快慢互补的协同调节机制。

2 配电网电压波动抑制多策略协同控制优化

多策略协同控制通过整合主动控制与被动补偿策略的优势，建立分层协同架构，实现各类策略的有机配合，提升电压波动抑制的精准性与经济性。

2.1 协同控制分层架构

协同控制架构分为配网层、区域层与设备层三级，各层级分工明确、信息互通：

1. 配网层。全局控制中心制定电压控制总目标（电压偏差 $\leq \pm 5\%$ 额定电压），结合配电网运行状态开展全局优化，明确各区域电压控制指标及策略优先级，经通信系统向区域层下发控制指令。

2. 区域层。配电网分区以供电范围或馈线为划分依据，区域层统筹各类调控策略协调分配，依据配网层指令与区域内实时电压波动数据，精准下达调节任务至具体设备。针对高频波动，优先调度 STATCOM 与储能系统；中频波动调度 SVC 与分布式电源无功调节；低频波动调度 OLTC 与电容器组。此外，区域层需处理多设备调节同一节点电压的冲突，通过优先级排序保障调节有序开展^[3]。

3. 设备层。承担各类控制设备本地执行及状态反馈工作，按区域层指令调整储能充放电功率、STATCOM 无功输出量等运行参数，实时上传设备剩余容量、工作模式等状态及电压调节效果，为上层决策提供数据支撑。

2.2 协同控制目标与机制

协同控制的核心目标是在满足电压质量要求的前提下，实现调节成本最小化、设备损耗最低化与系统

可靠性最大化的多目标优化。为达成该目标，需建立三类协同机制：

1. 信息交互机制。配电网通信系统支撑各层级、各设备实时数据交互，涵盖分布式电源出力、负荷、电压监测及设备运行状态等数据，为上层决策提供全面准确的数据支撑。

2. 优先级分配机制。依据电压波动的频率、幅度及影响范围，明确策略执行优先级：快速波动（频率 $> 1 \text{ Hz}$ ）优先启用 STATCOM、超级电容器等快速响应设备；中频波动（ $0.1 \sim 1 \text{ Hz}$ ）采用 SVC、分布式电源无功调节、锂电池储能；低频波动（ $< 0.1 \text{ Hz}$ ）选用 OLTC、电容器组、柔性负荷调度。同时，结合储能剩余容量、电容器投切次数等设备运行状态动态调整优先级，规避设备过度损耗。

3. 动态调整机制。基于实时电压调节效果与预测数据，动态适配各策略调节参数。分布式电源出力波动超预期时，自动提升储能系统调节容量；电压偏差收窄时，下调无功补偿设备输出功率，规避无效损耗。

2.3 协同控制优势

多策略协同控制较单一策略优势显著：其一，快慢策略协同，实现高频、中频、低频波动的全场景覆盖与全面抑制；其二，策略间优势互补，弥补单一策略短板，有效提升调节精度、缩减调节误差；其三，优化设备调度逻辑，降低 STATCOM、储能等高成本设备使用频率，延长设备寿命，进而控制运行成本；其四，强化系统鲁棒性，单一设备故障时，其余设备可快速补位，保障电压控制的连续性与稳定性^[4]。

3 配电网电压波动抑制策略应用关键问题与优化方向

3.1 关键应用问题

1. 成本控制问题。储能系统、STATCOM 等设备初期投资成本较高，大规模配置会增加配电网建设成本，需在抑制效果与成本之间寻求平衡，优化设备配置容量与位置。

2. 兼容性问题。不同策略涉及的设备来自不同制造商，控制接口、通信协议不统一，导致协同控制时信息交互困难，影响调节效率。

3. 可靠性问题。主动控制策略依赖分布式电源、柔性负荷等可控资源的稳定运行，若资源退出运行，会导致调节容量不足；被动补偿设备故障会直接影响补偿效果，需提升设备冗余度与故障自诊断能力。

3.2 优化方向

1. 经济性优化。运用全生命周期成本分析方法，综合分析设备投资、运行损耗、维护费用等核心因素，

优化策略组合及设备配置方案；引入共享经济相关模式，有效减轻单一主体的投资负担，兼顾经济性与配置合理性。

2. 标准化建设。制定统一的控制接口与通信协议标准，实现不同设备间的即插即用；建立策略协同控制的标准化流程，规范各层级控制逻辑与数据交互格式。

3. 智能化升级。融合大数据与人工智能技术，精进分布式电源出力及负荷预测精度，达成预测性控制目标；引入强化学习算法，赋能协同控制系统自主习得波动特性，动态优化策略组合与调节参数配置；依托数字孪生技术构建配电网虚拟仿真模型，仿真各类策略调节效能，为实际运行提供科学参考依据，全面提升配电网运行调控的智能化与精准化水平^[5]。

4. 韧性提升。增强策略的抗干扰能力，在分布式电源大规模脱网或设备故障时，快速重构控制策略，确保电压稳定；结合微电网技术，实现配电网分区自治，当某区域发生故障时，其他区域可独立运行，提升系统整体韧性。

4 结束语

在高比例分布式电源接入场景下，配电网电压波动抑制是保障供电质量的核心技术瓶颈，单一抑制方案难以适配复杂多变的波动特性。主动控制策略从源头调控电压波动，具备高灵活性；被动补偿策略依托实时补偿抵消波动效应，可靠性突出。构建“配网层—区域层—设备层”分层协同控制架构，深度融合两类策略技术优势，可实现对多频率、多幅度电压波动的精准高效抑制，为配电网安全稳定运行提供技术支撑。

参考文献：

- [1] 李文竹,寇汉鹏,曹阳,等.含高比例分布式电源配电网谐波治理策略[J].电工技术,2023(02):65-68.
- [2] 马成廉,李闯,薛冰,等.含高比例光伏配电网分区电压协调控制策略[J].东北电力大学学报,2024,44(04):77-85.
- [3] 臧益果.含高比例分布式电源的配电网可靠性评估与提升方法研究[D].长沙:湖南大学,2023.
- [4] 欧阳金鑫,陈纪宇,袁毅峰,等.基于分布式电源主动控制的配电网合环电压波动抑制方法[J].电力自动化设备,2024,44(01):49-56.
- [5] 赵舒心,肖仕武,梁伟宸.基于聚合电流的高比例分布式电源接入配电网短路故障计算与分析[J].电力系统保护与控制,2025,53(07):16-26.

电网基建工程中全过程智能化监控技术研究

薛宏飞

(国网陕西省电力有限公司延安供电公司, 陕西 延安 716000)

摘要 随着社会对电力需求的不断增加, 近些年我国电网建设规模呈现出不断扩大的趋势, 而电网基建工程作为电网建设的重要一环, 其重要性已愈发明显。为确保电网基建工程的安全、高效建设, 现阶段很多供电公司已经开始将智能化技术应用到电网基建工程中。基于此, 本文对电网基建工程中常见智能化监控技术进行分析, 揭示了智能化监控技术原理, 分析了电网基建工程的特征、监控需要、技术构成与系统架构等, 旨在为电网基建工程智能化监控技术的可持续发展提供理论参考, 进而推动电网基建工程朝着智能化方向发展。

关键词 电网基建工程; 全过程智能化监控技术; 数据采集; 传输技术; 数据预处理

中图分类号: TM7; TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.007

0 引言

智能化监控技术融合了多种先进技术, 能够实现对电网基建工程全过程的实时、全面监控, 提升工程建设的安全性、质量和管理效率, 为工程管理和决策提供科学依据。在智能化监控技术的支持下, 电网基建工程能够更加高效地运行, 降低工程成本, 提高电力系统的整体性能。因此, 深入研究电网基建工程中全过程智能化监控技术具有重要的现实意义和应用价值, 为推动电网建设的现代化进程、提升电力供应稳定性提供有力的电力支持。

1 电网基建工程关键智能化监控技术

1.1 数据采集与传输技术

1.1.1 数据采集方式

在电网基建工程智能化监控体系中, 数据采集是获取工程信息的首要环节, 其方式丰富多样, 每种方式都有其独特的适用场景。传感器作为基础的数据采集设备, 类型繁多, 以温度传感器为例, 变压器、开关柜等设备在运行过程中会产生热量, 使用温度传感器实时监测温度, 能够发现设备过热异常, 预防设备故障。智能电表可以测量和记录电力消耗、电量、功率因数等参数, 不仅具备传统电表的计量功能, 还具有通信功能, 将采集到的数据传输到监控系统。在电网基建工程的施工现场, 智能电表可用于监测施工设备的电力使用情况, 帮助管理人员合理安排施工设备的运行, 优化电力资源配置, 降低施工成本^[1]。同时, 通过对智能电表数据的分析, 还能及时发现电力故障和异常用电行为, 保障施工电力的安全稳定供应。

1.1.2 传输技术及优化

在电网基建工程中, 数据传输技术主要包括有线传输和无线传输两种方式。有线传输技术中, 光纤以其高带宽、低损耗、抗干扰能力强等优势成为长距离、大数据量传输的首选。在电网基建工程中, 变电站之间、输电线路与监控中心之间的通信, 通常采用光纤传输, 能够确保数据的高速、稳定传输, 满足实时监控和远程控制对数据传输的严格要求; 电缆传输成本低、安装维护简单, 适用于短距离、对传输速率要求不是特别高的场景, 如施工现场内部设备之间的数据传输。无线传输技术可以满足实时视频监控、远程操作等对数据传输实时性要求较高的应用场景。在施工现场应用4G/5G网络, 能够将摄像头采集的视频图像快速传输到监控中心; 而LoRa技术低功耗、远距离传输, 适用于对功耗要求较高、传输距离较远且数据量相对较小的传感器数据传输, 如分布在偏远地区的传感器节点与汇聚节点之间的数据传输^[2]。

为了保障数据的实时、稳定传输, 需要对传输技术进行优化。在有线传输方面, 可以优化光纤铺设路径、采用冗余光纤链路等, 提高传输的可靠性。例如: 在重要的输电线路通信中, 采用双光纤链路备份, 当一条光纤出现故障时, 另一条光纤可自动切换, 保障数据传输的不间断。采用先进的光纤通信设备和技术, 如波分复用技术提高光纤的传输容量, 满足不断增长的数据传输需求。在无线传输方面科学规划无线基站的布局, 优化信号覆盖范围, 减少信号干扰, 提高信号强度和稳定性, 如在施工现场周围设置4G/5G基站, 确保信号覆盖整个施工区域, 避免出现信号盲区。

作者简介: 薛宏飞(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 输变电工程。

1.2 数据处理与分析技术

1.2.1 数据预处理

电网基建工程中采集到的原始数据往往存在噪声、异常值，使数据分析存在一定偏差。因此，在展开数据分析工作前应该对原始数据做好相关的预处理。通常来说，数据清洗是重要环节，旨在消除数据里面含有的错误信息，设置合理的阈值和规则能够识别并去除明显错误的数据，如超出合理范围的传感器测量值；借助数据平滑算法对数据实施平滑处理，进一步加强数据稳定效果。

去噪操作主要针对传感器采集的数据，通常情况下，传感器工作期间会被各种各样的原因所影响，使得最终采集到的数据里面含有噪声。采用滤波算法去除数据中的噪声，保留有用的信号，对于缺失值的处理可以根据数据的特点和分布情况，采用不同的方法进行填补。如果数据缺失较少，采用均值、中位数、众数等统计量进行填补；如果数据缺失较多，采用基于模型的方法，如回归模型、神经网络模型等，根据已有数据预测缺失值^[3]。

1.2.2 数据分析算法与模型

机器学习算法在电网基建数据分析中具有广泛的应用，能够挖掘数据中的潜在信息和规律，为工程管理和决策提供支持。决策方面可引入决策树算法，做到数据内容精确分析的基础上根据计算需求构建对应决策模型，在提升数据应用准度的基础上为后续工作提供协助。在电网基建工程中，决策树算法可以分析设备故障数据，根据设备的运行参数、环境条件等特征判断设备故障的类型和原因，为设备维护和故障修复提供依据。将神经网络用于其中，则可在构建高效率计算模型的基础上，发挥其非线性映射能力来减少前期计算当中出现的数据偏差问题。在电网基建数据分析中，神经网络可用于预测工程进度、评估工程质量、预测设备故障等。例如：采用递归神经网络（RNN）或长短句记忆网络（LSTM）对工程进度数据进行分析，可预测工程的完工时间，提前发现进度滞后的风险；而结合卷积神经网络则可实现针对图像数据资源的高精度解析，在这一过程中评估施工过程可能出现的各项问题。

1.3 智能决策与预警技术

1.3.1 决策支持系统

智能决策支持系统是以信息数据分析结果为基础，依据专家经验、业务规则等而构建的为决策提供支持的智能化系统，该系统存在的主要作用是辅助企业管理人员做出正确决策。在电网基建工程中，技术人员可以将工程进度、工程质量管理规则、安全管理规范以及成本管理要求等信息全部导入决策支持系统中，

该系统中数据分析模块可利用数据挖掘、机器学习等实现对上述信息数据的分析，并以此探究数据背后的价值与规律。例如：系统在对历史工程信息分析后可构建工程进度预测模型，以此实现对工程完成时间的精确预测，进而为工程施工物力、人力资源的协调提供支持。除此之外，决策支持系统还能够融入专家经验，并将其自动转化为可识别的规则，以工程质量评估为例，在此期间系统能够依据专家经验拟定质量评估规则，同时技术人员在将工程质量数据传输到系统中后，系统能够依据评估规则自动判断工程质量是否达标，并提醒管理人员工程中的质量隐患。最后，在面临决策问题时该系统还可以依据分析结果提供多种解决方案，同时说明每一种方案的优点与缺陷，以此确保管理人员能够了解各种方案的后果，从而作出更为明智的决策^[4]。

1.3.2 预警机制

预警机制通过设定合理的预警指标与阈值，在经过数据分析后可发现各类潜在风险与故障。电网基建工程中常见的预警指标包括工程施工进度、工程质量、施工安全以及设备运行状态等。以工程建设进度为例，系统会将工程施工计划进度作为基准并按照管理人员要求设定偏差阈值，当工程实际施工进度与计划进度出现较大偏差后，系统会自动向管理人员发出预警信号，并提醒管理人员需采取适当措施加快工程进度。在质量管理阶段，系统预警机制会依据工程质量标准与规范设定质量指标阈值，同时细化混凝土强度、钢筋间距等指标的允许偏差范围。在系统监测阶段一旦相关指标超过阈值，那么系统会立即提醒管理人员对工程施工质量作出检查，以此避免质量问题进一步扩大。在设备运行管理中，系统会参考温度、振动以及电流等正常参数，一旦设备参数超过或者低于正常运转数据后，便意味着设备已经出现故障，此时系统会自动发出预警并提醒维护人员做好检查维修，以此避免因设备故障问题而引发安全事故。

2 电网基建工程智能化监控技术应用与实践

2.1 应用场景

在变电站建设场景中，智能化监控技术发挥着至关重要的作用。在施工阶段部署各类传感器和监控设备，对变电站的基础施工、设备安装等环节进行实时监控。利用位移传感器监测变电站建筑物基础的沉降情况，确保基础的稳定性；通过摄像头实时监控设备安装过程，保证安装工艺符合标准要求。在变电站运行阶段，智能化监控技术能够实现对设备状态的全面监测，包括变压器、开关柜、互感器等关键设备。在线监测设备的油温、绕组温度、SF6 气体密度等参数，第一时间发现设备的潜在故障隐患并进行预警^[5]。

输电线路施工场景跨度大、环境复杂，智能化监控技术为施工安全和质量提供了有力保障。在施工的时候，利用无人机搭载高清摄像头和红外热像仪对输电线路的路径进行巡检和监测，能够发现线路下方的障碍物、施工隐患及线路本身的缺陷。在杆塔上安装传感器以监测杆塔的倾斜度、应力、振动等参数，确保杆塔在施工过程中始终处于稳定状态。在恶劣天气下，智能化监控系统可以获取线路的运行状态信息，为施工决策提供依据，保障施工人员、设备的安全。利用卫星定位技术和地理信息系统（GIS）对施工人员和设备进行定位和跟踪，优化施工资源的调配，提高施工效率。

配电网直接面向用户，其建设质量和运行可靠性决定着用户的用电体验。智能化监控技术在配电网中的应用，通常体现在对配电设备和线路的实时监测以及对用户用电情况的分析上。其中，在配电设备方面，在配电箱、配电柜等设备上安装智能电表、温度传感器、漏电保护器等设备，能够不间断地监测设备的运行参数和状态，如电流、电压、温度等。当设备异常时，系统发出预警通知运维人员处理，防止出现停电事故；在配电线路上，利用分布式故障定位技术和智能监测终端，可以准确定位线路故障点，减少故障修复时间，让供电更加可靠。此外，对用户用电数据展开分析，能够了解用户的用电习惯和负荷特性，为电力调度和需求侧管理提供依据，提高电力系统的运行效率。

2.2 应用效果评估

2.2.1 提高施工安全

持续性监测施工人员行为和设备运行状态，可以在第一时间觉察到安全隐患并进行警示。利用智能安全帽对施工人员的位置、运动状态进行实时跟踪，当检测到人员进入危险区域或发生异常摔倒时，系统立即发出警报，通知现场管理人员和周边人员，有效避免安全事故的发生。对施工设备各项参数给予监测，设备表现出不正常振动、温度急速上升等现象时，及时停机并预警，避免造成重大事故。

2.2.2 保障工程质量

对施工期间的关键参数和工艺展开不间断地监控以及数据分析，能够从根本上保证施工满足设计标准。在进行混凝土浇筑的时候，利用传感器监测其坍落度、温度等数据，最大限度增强混凝土质量及其整体的浇筑效果。对设备安装的位置、精度等进行实时监测，确保设备安装符合规范要求。同时，通过对历史数据的分析和挖掘，可以总结出质量问题的规律和趋势，为后续工程的质量控制提供参考^[6]。

2.2.3 提高管理效率

智能化监控系统能够满足各类工程信息实时采集、传输与共享需要，工程管理者可以通过监控系统获取工程施工进度、安全与质量等信息，并依据系统反馈的数据做出针对性的决策。例如：管理人员可通过智能化监控系统跟踪工程进度，且当进度出现滞后问题时可立即采取相关举措加快施工进度。不仅如此，依托自动化信息数据处理技术还可以降低人工作业量，这对提高作业效率、控制人工成本等方面有着重要价值。从现状来看，智能化监控技术在电网基建工程中的应用还需要标准化的数据接口与统一的通信协议支持，然而目前部分电网基建项目在上述领域还存在些许缺陷，由此将会对监控数据的高效整合造成影响。为此，未来需要做好统一化监控数据中心的构建，一方面实现多源信息数据的整合，另一方面确保多源信息数据的标准化处理，以此打破设备之间的信息壁垒。此外，数据中台可提供灵活的数据服务接口，支撑不同监控模块的协同联动，有效加强监控系统的协同效能，为全过程智能化管控打下坚实的基础。

3 结语

尽管目前智能化监控技术在电网基建工程中取得了一定的应用成果，但仍存在诸多需要改进和完善的地方。后续应进一步加强对智能化监控技术的研究和创新，深化与新兴技术的融合，不断提升技术的性能和应用水平。与此同时，还应该高度重视技术落地的实用性与经济性原则，进一步加快监控方案的标准化与规模化应用，为电网基建工程的高质量发展提供更加坚实的技术支撑，并助力电力行业实现智能化转型和可持续发展。

参考文献：

- [1] 张志宇,陈国平,杜文瀚,等.电网基建工程中全过程智能化监控技术研究[J].自动化应用,2025,66(S1):82-84.
- [2] 何传滨.电网基建工程管理中视频监控技术运用[J].电力设备管理,2024(18):244-246.
- [3] 单姗.电网小型基建项目全过程安全管控体系构建[J].电力安全技术,2022,24(06):8-11.
- [4] 张树凯.视频监控技术在电网基建工程管理中的应用[J].江西建材,2021(10):372-373.
- [5] 吴小飞,谢志炜.电网基建项目全过程智能化监控关键技术分析[J].长江信息通信,2021,34(09):102-104.
- [6] 刘江,宋丹,刘喆男,等.电网监控技术在智能电力系统中的应用与发展趋势[C]//《中国招标》期刊有限公司·新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(一).国网宁夏电力有限公司石嘴山供电公司,2025.

BIM 与机器学习在施工进度管理中的应用综述

王资国，刘慧萍，张玉燕，南子杨

(西安工业大学建筑工程学院，陕西 西安 710032)

摘要 本研究以中英文文献为样本，构建“任务—数据—方法—评价”框架，比较视觉与点云两条监测路径的对齐机制与完成度量化，综合计划一体化、软逻辑再排产、Transformer 对齐与概率预警等进展，并提出最小数据契约与多源融合、域自适应建议，以期为支撑监测—预测—控制的落地提供有益参考。研究结果显示：点云在几何真实性与可解释性上占优，视觉在部署与覆盖上更具弹性；闭环效果取决于 4D/WBS 的可写回与接口一致性。

关键词 BIM；施工进度管理；机器学习；点云（Scan-vs-BIM）；4D/WBS 计划闭环

中图分类号: TP24; TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.008

0 引言

本文聚焦建筑信息模型（BIM）与机器学习（ML）在施工进度管理中的应用，将“施工进度管理”限定为：以 BIM/4D-WBS 语义为锚点，利用视觉影像与点云等现场数据完成感知—对齐—量化的 as-built 表达，并与 as-planned 计划开展预测—预警—再排产 / 控制的闭环。相较于依赖人工记录与节点验收的传统做法，这一闭环取决于三层关键：其一，数据层——多源现场数据（图像 / 视频、激光扫描 / 点云、移动测绘 / SLAM 等）的可获取性与时空覆盖；其二，语义层——BIM/IFC 与 WBS/4D 的几何—语义映射及“稳定回写”（指量化结果可按字段一致地写回 4D/WBS）；其三，决策层——将完成度百分比进一步转化为延误概率与工期回归，并在“软逻辑”和计划对齐的框架下形成可执行的控制策略。

1 研究方法

1.1 文献检索

检索范围设置为 2012–2025 年，数据库选用 Web of Science（核心合集）、Scopus、Google Scholar 与 CNKI，并对 Automation in Construction、Advanced Engineering Informatics、Sustainability 等期刊进行定向检索。主题限定在施工“进度链条”，即感知、对齐、量化、预测 / 预警与再排产及其与 4D/WBS 的联动，安全、质量与成本仅在与进度判定或预测具有直接耦合时纳入。关键词以中英双语组织，核心组合包括：“施工进度 / 进度监测 / 进度预测 / 再排产”与“BIM/4D/IFC”，并与“点云 / 激光扫描 / Scan-vs-BIM / 计算机视觉 /

分割 / 检测 /SLAM/Transformer / 软逻辑 / 贝叶斯”等交叉匹配。

1.2 文献筛选

筛选遵循“题名—摘要—全文”的逐层收敛路径。题名阶段首先剔除与进度无关或与 BIM/ML 关联度不足的条目；摘要阶段保留明确涉及进度感知、几何 / 语义对齐、完成度或偏差量化、延误或产能预测、再排产与计划对齐等任务的研究；全文阶段依据纳入 / 排除标准进行一致性判定并去重。为便于学术复用，纳排标准以问题—方法—数据—结果—质量五个维度，如表 1 所示。

1.3 文献分析

分析以定性综合为主，围绕“任务—数据—方法—评价”的四维框架展开，力求在同一评价语境下比较不同技术路线。任务维度涵盖进度感知与完成度估计、变更检测、延误 / 产能预测以及再排产与计划对齐；数据维度覆盖 4D BIM/IFC 语义模型、图像 / 视频、点云与移动测绘数据、日志与报表信息；方法维度区分计算机视觉与深度学习、配准与对应、传统机器学习与贝叶斯网络、优化与软逻辑、面向计划语义的序列或语言模型；评价维度则统一采用视觉类指标（如 IoU、mAP、F1）、几何类指标（如点一面距离、RMSD、覆盖率或密度阈值）、预测类指标（如 MAE、RMSE、MAPE、F1/AUC）以及业务类指标（如 SPI、SV、滞后概率与关键路径风险）。为提高横向可比性，优先在同一场景与相近数据条件下进行对照，在必要时给出容差与阈值的量纲说明，避免仅以相对提升作为依据。

作者简介：王资国（1997-），男，硕士研究生，研究方向：施工进度管理数字化技术研究。

表1 纳入 / 排除标准

维度	纳入要点	排除要点
研究对象	构件、作业、工序、工段或线性工程的进度问题	仅安全 / 质量 / 成本且与进度无直接耦合
方法关联	存在 BIM/IFC/4D 与现场数据的几何或语义对齐，或与计划体系 (CPM/LPS/ 软逻辑) 显式联动	纯概念或方法描述不足，缺乏可验证流程
数据基础	图像 / 视频、点云 / 激光、SLAM/MMS、进度报表 / 日志等可获取数据	全文不可得或关键数据缺失
产出形态	完成度 / 偏差 / 变更的量化，或延误预测、再排产、计划对齐与接口证据	无可用于进度决策的量化或系统证据
质量要求	指标与流程清晰，实验设置可定位；工程案例或可复现实验优先	指标严重缺失或明显选择性报告

为减轻不同论文在口径上的不可比性，评价与讨论环节尽可能回到可度量的共同要素：一是“识别到量化”的映射是否公开且可复核，例如由分割 / 检测输出到完成度百分比的计算规则；二是“几何到结论”的阈值是否透明且与场景匹配，如点一面距离阈值与覆盖率要求在装配式与室内场景的取值差异；三是“预测到控制”的接口是否明确，如与 4D/WBS 的回写字段以及与 CPM/Last Planner 的衔接方式。通过上述约束，力求在保持阅读流畅的同时，提供可被复用与审查的分析基线。

2 监测与对齐

2.1 视觉路线：由识别到完成度的语义落点

视觉路线的核心并非“识别本身”，而是识别一BIM 语义—WBS 条目的双重对齐。早期外观分类结合 4D 的研究已表明，只有把影像中的状态绑定到计划条目，进度量化才具有可操作的语义载体。后续工作将流程固化为“检测 / 分割→构件映射→完成度计算”，并建议在同一口径下报告模型指标与业务指标，从而可跨数据集比较。在地基与土方等场景，实例分割（如以 SOLov2 实现）能够稳定识别模板、钢筋、混凝土等要素，并以可视化方式呈现阶段性完成度。然而，视觉方法对光照、反光与遮挡敏感，跨项目迁移门槛较高。为此，基于 BIM 的合成图像可在材质与光照上进行可控扰动，配合域适配以降低标注成本与域偏移^[1]。总体而言，视觉路线的可落地前提是明确从 mAP/IoU/F1 到“构件状态（完工 / 在建 / 未开工）”的映射规则，并在规则中设置置信度与遮挡容差；当存在多视角或时间序列时，可通过时序投票与渲染一实拍对齐抑制漂移与偶发误检。在适用性上，视觉路线更适合外观可判别、遮挡相对可控的阶段（如装饰、模板 / 钢筋外露、土方作业），其工程代价主要来自数据治理与跨项目泛化。

2.2 点云 /Scan-vs-BIM：以几何为核心的进度量化

点云路线的关键在几何对齐到覆盖与距离的量化。经典工作以“平面基准 +ICP”解决了扫描与模型的初配与精配问题，为后续量化建立坐标基础。进而，室内变更检测将不确定性传播纳入，给出由密度与遮挡引起的判断置信度，从“检测结果”过渡到“可用结论”的证据链更完整。近期研究通过构造高维点云特征张量来提升 BIM—施工对应的区分度，在构件密集与局部遮挡条件下保持较好稳定性^[2]。在量化层面，结构阶段的实证表明，以覆盖率 × 点一面距离阈值作为最小判据可得到稳定的构件级完成度；阈值与密度口径必须在报告中透明披露，否则难以复现与横向比较。在装配式场景，几何偏差与质控阈值天然耦合，进度判定的工程语义更直接。当监测需求从“节点验收”转向“连续跟踪”时，多工位高频扫描提供了可行路径，配合语义约束可减少邻近构件的相互干扰，并输出随时间演化的完成度曲线。总体上，点云路线在几何精度与可解释性方面具有优势，更适合结构、装配式与室内复杂环境^[3]；其工程代价集中在采集设备与配准链路，以及对阈值 / 密度的现场调校。

两条路径在“把识别转成可管理的完成度 / 偏差”上形成互补（见表 2）：视觉方法在表现可辨与场景开放时成本较低、部署灵活，但需要明确“模型指标→业务指标”的映射并通过合成数据、时序多视角与渲染对齐缓解域偏移；点云方法在几何真实性与容差管理方面更强，适于结构与装配式，但对采集频度、密度与配准链路更敏感，工程化成本较高。在项目落地层面，较为稳妥的做法是视觉与点云的分场景协同：以点云提供几何锚点与容差口径，视觉补足高频覆盖与作业语义；二者的输出统一回写至 4D/WBS，以支持后续预测、预警与再排产的闭环处理。

表 2 视觉与点云路线的精炼对比

维度	视觉路线	点云路线
数据与采集	相机 / 视频，部署便捷，需多视角与时序	激光 / 移动测绘，采集组织成本较高
核心机制	检测 / 分割 → BIM/WBS 映射 → 完成度	配准 / 对应 → 覆盖率 × 点一面距离 → 完成度
典型指标	IoU/mAP/F1 → 规则化完成度与置信度	RMSD、点一面距离、覆盖率 / 密度阈值
主要误差源	遮挡、材质相似、视角漂移	稀疏 / 遮挡导致的欠采样、误配准
适用场景与代价	外观可判别、遮挡较可控；成本低、易扩展	结构 / 装配式 / 室内复杂环境；精度高、代价高

3 预测与控制：从量化进度到计划闭环

进度预测的管理价值取决于是否能稳定写回计划并触发控制。集成式框架以 BIM/IFC 为数据骨架，将 as-built 量化与 as-planned 在统一数据契约下循环耦合，形成“感知—生成 / 更新—执行—再感知”的闭环^[4]。主计划与滚动计划粒度不一致会放大误差；以 Transformer 自动对齐可显著降低人工比对，并保证写回粒度一致。由此可见，若预测缺少 WBS 定位与前置逻辑，难以沉淀为可执行更改单。

将可放宽的先后关系建模为软逻辑并纳入优化，比单纯压低预测误差更能提升可执行性^[5]。评估除 MAE/RMSE 外，应关注关键路径缩短 (ΔCP) 与滞后概率下降 (ΔP)。模型选型取决于数据粒度、稳定性与不确定性表达：RF/XGB 对异构特征稳健，结合 SHAP 可解释驱动因素，适合周一月滚动；LSTM/TCN/Temporal Transformer 适合高频量化但需域适配；贝叶斯网络及其与元启发式的结合擅长不确定性传播与情景推演。工程案例表明，装配式梁桥能将 BIM 语义与现场量化联用，实现动态工期预测并写回；地铁项目以改进 BP 做滞后分类与偏差识别，给出数据规模有限下的可行下限。据此，可解释性与可写回性应与误差指标并列为选型准则。

不确定性的概率化表达提升预警可用度，以滞后概率、区间工期与计划可靠性构成的面板，优于单点估计；“时间弹性”提示正确工期受组织与资源配置影响，可靠性宜作为约束或目标纳入；在既定风险水平下给出置信度，有助于将预测转化为可执行管控策略。此外，供应链时滞常是隐性关键路径；BIM+GIS 可将材料—运输—安装的链路可视化，并把到货事件编码为特征，用于瓶颈识别与再排产。

接口与字段一致性是闭环成败的技术基础，规则推理的自动编排实现“BIM 语义→计划条目”的可计算映射；行业 IFC 扩展支撑特殊对象交换；项目管理系统实践强调权限流与表结构约束。“好模型”至少应

在 WBS 粒度可定位、在不确定性上可表达、在计划系统中可写回，否则难以转化为可执行的进度控制。

4 结束语

BIM+ML 的施工进度管理已形成“监测—量化—预测—计划闭环”的基本范式：以 BIM/IFC-WBS 为语义锚，将 as-built 稳定映射到 4D 并写回计划。在监测侧，视觉方法部署灵活、成本低，适用于外观可判别且遮挡可控的阶段，但对域迁移与“模型指标完成度 %”映射依赖较强；点云 /Scan-vs-BIM 在几何真实性与容差管理上更具优势，可用“覆盖率 × 点一面距离阈值”形成可复验的构件级判据，适合结构、装配式与室内复杂环境，但对采集密度与配准链路更敏感。由量化走向控制，关键是计划语义的可写回与粒度一致性。集成式计划将感知—计划—执行闭环化，主 / 短期计划的 Transformer 对齐可降低人为比对误差；软逻辑优化把可并行 / 可调序约束显式建模，评价不应止于 MAE/RMSE，还需关注 ΔCP 与滞后概率下降等“控制成效”。

参考文献：

- [1] 华泉英, 拉斐尔·萨克斯, 阿米尔·德加尼. 基于 BIM 和计算机图形学的建筑场景综合图像数据生成 [J]. 建筑自动化, 2023(154):105016.
- [2] 贾寿君, 吴航斌, 郭志坚, 等. 利用高维点云特征张量实现 BIM 与施工的精确对应 [J]. 建筑自动化, 2024(162):105407.
- [3] 张帆, 孙楚津, 覃思中, 等. 基于 BIM 和深度学习点云分割的施工检查方法模拟研究 [J]. 工程力学, 2024, 41(02):194-201.
- [4] 马坦·塔玛里, 沙布泰·艾萨克. 全面集成的施工规划 [J]. 建筑自动化, 2023(154):105027.
- [5] 魏建英, 刘玉明, 卢晓春, 等. 考虑软逻辑的隧道施工进度优化 [J]. 应用科学, 2024, 14(06):2580.

模块化预制舱智能温控系统设计与节能优化研究

曹海峰

(双杰电气合肥有限公司, 安徽 合肥 231121)

摘要 模块化预制舱作为新型建筑形式, 其温控系统能耗问题日益凸显。智能温控系统通过集成传感器网络与自适应算法及精准控制策略, 实现预制舱内部环境的动态调节, 系统采用分区温控技术结合负荷预测模型, 并通过云边协同计算平台实现多层次优化决策可有效降低能源消耗。通过优化控制参数与改进热交换效率以及引入可再生能源, 系统节能率可达 30% 以上。实践表明, 智能温控系统不仅提升了预制舱的能效水平, 还显著改善了室内环境舒适度, 响应速度提升 60%, 高峰时段用电量削减 27%, 为模块化建筑的可持续发展提供了技术参考。

关键词 模块化预制舱; 智能温控系统; 节能优化; 自适应控制; 负荷预测

中图分类号: TU3; TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.009

0 引言

随着装配式建筑技术的快速发展, 模块化预制舱凭借其工期短与质量可控以及施工灵活等优势, 在数据中心与移动办公及应急设施等领域得到广泛应用, 然而预制舱因其密闭性强与热容量小以及负荷波动大等特点, 传统温控系统难以兼顾能效与舒适性需求。智能温控技术融合物联网与人工智能与先进控制理论, 能够实时感知环境变化动态优化运行策略, 为解决预制舱温控难题提供了有效途径, 探索适用于模块化预制舱的智能温控系统设计方法与节能优化机制, 对推动装配式建筑产业升级具有重要意义。

1 模块化预制舱智能温控系统架构设计

1.1 传感器网络布局与数据采集机制

模块化预制舱智能温控系统的传感器网络采用分层分布式架构, 在舱体内部按照功能区域划分温湿度与 CO₂ 浓度及人员活动等多类型传感器节点。温湿度传感器以 3 m 间距均匀布设, 确保环境参数采集精度达到 ±0.3 ℃ 与 ±3% RH, CO₂ 传感器则集中部署于人员密集区域, 监测范围覆盖 400 ~ 2 000 ppm。节点采用低功耗设计功耗小于 0.5 W, 配备备用电源确保在断电情况下维持 2 小时数据采集, 系统采用 Modbus-RTU 协议, 节点通过 RS-485 总线与边缘网关连接实现 100 ms 级数据刷新, 边缘网关内置预处理模块对原始数据执行滤波与校准及异常值剔除, 处理后的有效数据通过 MQTT 协议上传至云端平台^[1], 该机制使系统数据采集准确率

提升至 98.5%, 为后续控制决策提供了可靠的数据基础。

1.2 分布式控制单元配置与通信协议

系统采用分布式控制架构将预制舱划分为若干独立控制区域, 每个区域配置一套控制单元负责局部温控设备的调节^[2], 控制单元以 ARM Cortex-A7 处理器为核心, 搭载实时操作系统 FreeRTOS, 单元间通过 CAN 总线构建冗余通信网络, 通信速率达到 1 Mbps。控制单元内置看门狗电路与故障自恢复机制, 当检测到通信中断或程序异常时, 系统自动执行重启与状态恢复, 平均故障恢复时间小于 3 s, 控制协议层采用自定义应用层协议, 数据帧结构包含设备 ID 与控制指令以及状态反馈与时间戳等字段, 帧长度控制在 64 字节以内以降低传输延迟。各控制单元之间建立点对点与广播两种通信模式, 点对点模式用于设备间精确协调, 广播模式用于系统级指令下发, 该架构使控制指令响应时间缩短至 50 ms 以内, 同时具备单点故障不影响整体运行的容错能力, 系统可用性达到 99.7%。

1.3 云边协同计算平台构建

云边协同计算平台采用三层架构设计, 包括边缘计算层与雾计算层及云计算层^[3]。边缘计算层部署于控制单元内部执行实时控制算法, 处理延迟低于 10 ms; 雾计算层设置于舱体网关设备, 负责多区域协调优化与短期负荷预测; 云计算层构建于远程服务器, 承担长期数据分析与模型训练及全局优化任务。平台引入任务优先级调度机制, 将控制任务分为紧急、重要以

作者简介: 曹海峰 (1981-), 男, 本科, 研究方向: 电气设计。

及常规三个等级，紧急任务响应时间保证在 5 ms 以内，平台采用 Docker 容器化技术部署微服务架构，各计算层通过 RESTful API 实现数据交互，边缘层处理 80% 的实时控制任务，雾层处理 15% 的协调优化任务，云层处理 5% 的深度分析任务，这种计算资源分配策略使系统响应速度提升 60%，网络带宽占用降低 45%，实现了计算效率与通信成本的平衡优化（见图 1）。

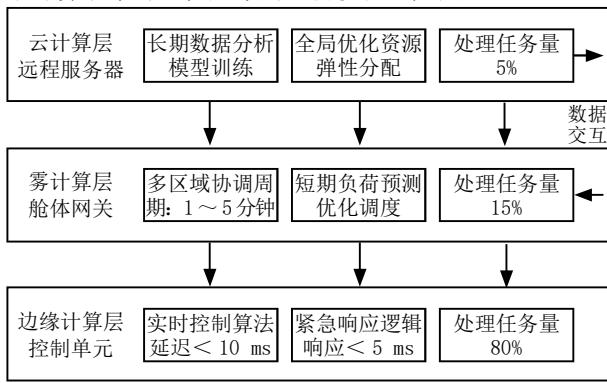


图 1 模块化预制舱智能温控系统三层架构示意图

2 智能温控算法与动态调节机制

2.1 基于负荷预测的前馈控制策略

负荷预测模型采用长短期记忆神经网络（LSTM）结合气象数据与历史负荷序列，对未来 2 小时的热负荷进行预测。模型输入层包含室外温湿度、太阳辐射强度、人员数量、设备运行状态等 12 个特征变量，隐藏层设置 128 个神经元，输出层预测各时段的冷热负荷需求。训练数据集涵盖连续 3 个月的运行数据，采用 Adam 优化算法训练 300 轮次后，预测平均绝对百分比误差（MAPE）收敛至 8.3%，前馈控制策略根据预测负荷提前调整制冷 / 制热设备的运行参数，预测负荷 Q_t 与设备输出功率 P 的关系式为：

$$P(t) = \alpha Q_t(t + \Delta t) + (1 - \alpha) Q_m(t) \quad (1)$$

式 (1) 中， α 为前馈系数取值 0.6 ~ 0.8， Q_m 为实测负荷， Δt 为预测提前时间。该策略使系统对负荷突变的响应速度提升 40%，温度波动幅度控制在 ± 0.5 °C 以内（见表 1）。

表 1 负荷预测模型性能对比

预测模型	MAPE(%)	RMSE (kW)	预测时长 (h)	计算时间 (s)
ARIMA	15.2	3.8	2	0.8
SVR	12.6	3.1	2	1.2
BP 神经网络	10.4	2.6	2	2.5
LSTM	8.3	2.1	2	3.8

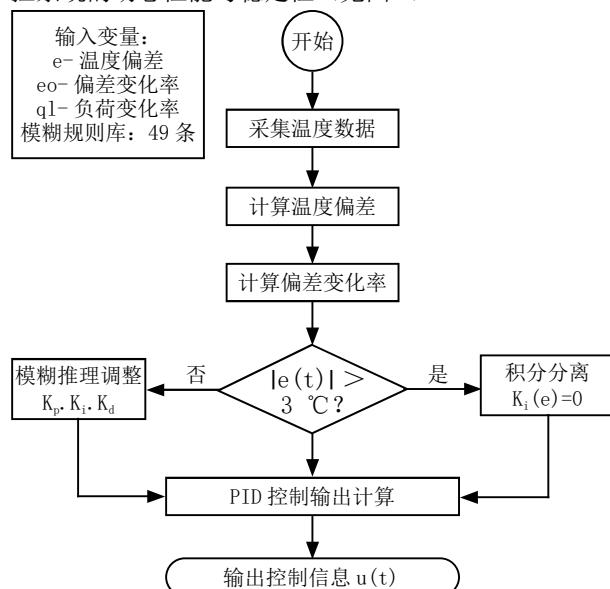
2.2 多变量自适应 PID 调节算法

自适应 PID 控制器针对预制舱温控系统的时变性与非线性特性，引入模糊推理机制动态调整 PID 参数，控制器以温度偏差 e 与偏差变化率 ec 及负荷变化率 ql 作为输入变量，通过模糊规则库输出比例系数 K_p 与积分系数 K_i 及微分系数 K_d 的修正量，模糊规则库包含 49 条规则，覆盖不同工况下的参数优化方案。

控制输出 u 的计算公式为：

$$u(t) = K_p(e) \cdot e(t) + K_i(e) \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d(e) \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式 (2) 中， $u(t)$ 为控制输出值， $e(t)$ 为温度偏差， $e(t) = T_{set} - T_{actual}$ ， K_p 、 K_i 以及 K_d 为自适应调整的控制参数，其取值范围分别为 0.8 ~ 2.5、0.05 ~ 0.3 以及 0.1 ~ 0.8， τ 为积分变量， t 为时间变量。另外，当温度偏差 $|e(t)| > 3$ °C 时启用积分分离机制，暂停积分项作用即令 $K_i(e) = 0$ 。算法采用增量式输出避免积分饱和，设定积分分离阈值为 3 °C，当温度偏差超过阈值时暂停积分作用。实际运行表明，自适应 PID 相比传统固定参数控制，超调量降低 65%，调节时间缩短 55%，稳态误差控制在 ± 0.2 °C 范围内，显著提升了温控系统的动态性能与稳定性（见图 2）。



(注: 控制周期 100 ms, 响应时间 < 50 ms。)

图 2 模糊自适应 PID 温度控制流程图

2.3 分区温控与需求响应联动技术

分区温控策略将预制舱划分为核心区（ 22 ± 1 °C）、过渡区（ 20 ± 2 °C）及边缘区（ 18 ± 3 °C）三类功能区，形成梯度温控格局。需求响应模块接入电网实时电价，峰值时段自动放宽非核心区温控精度，预冷预热功能在低谷时段提前调节舱体温度，利用建筑蓄热特性平移用电负荷，各区域通过电动风阀动态调节风量分配，

优先保障核心区温控质量。联动控制采用多目标优化算法，综合考虑舒适度损失与电费成本求解最优策略，测试显示：核心区温度波动小于0.8℃，系统整体能耗降低18%，峰时段用电削减27%，实现舒适性与经济性协调平衡。

3 节能优化技术与性能评估

3.1 热泵系统变频优化与能效提升

变频热泵系统根据实时负荷需求动态调整压缩机转速与冷媒流量，避免了传统定频系统频繁启停造成的能耗浪费，压缩机变频控制范围为额定转速的30%~100%，采用矢量控制技术实现转速精确调节，控制精度达到±0.5 Hz。系统根据蒸发温度、冷凝温度以及室外环境温度计算最优运行频率，当部分负荷率低于60%时，变频运行比定频运行节能效率提升35%~50%，冷媒侧设置电子膨胀阀，阀门开度根据过热度反馈自动调节，使蒸发器出口过热度稳定在5~8℃范围内，提高了热交换效率。水泵与风机同步采用变频控制，根据温差与流量需求调整转速，使水力输配系统能效比(HVAC-EER)从2.8提升至3.6，实测数据表明变频优化后系统季节能效比(SEER)达到4.2，相比传统系统提升42%，年运行费用降低38%（见表2）。

表2 变频优化前后系统能效对比

运行工况	负荷率 (%)	定频功率 (kW)	变频功率 (kW)	节能率 (%)	COP
满负荷	100	45.2	43.8	3.1	3.8
高负荷	75	42.5	35.6	16.2	4.1
中负荷	50	38.7	24.3	37.2	4.5
低负荷	30	35.2	17.8	49.4	4.8

3.2 围护结构热工性能协同改进

预制舱围护结构采用复合保温体系，墙体由外至内依次为镀铝锌钢板、100 mm岩棉保温层以及防潮隔汽层与内装饰板^[4]，整体传热系数K值控制在0.35 W/(m²·K)以下，顶板保温层厚度增至150 mm。同时，设置通风间层，以降低太阳辐射热影响，使顶板传热系数降至0.28 W/(m²·K)。门窗系统选用Low-E中空玻璃，玻璃传热系数1.8 W/(m²·K)，遮阳系数0.6，配合外置电动遮阳百叶，夏季可阻隔70%的太阳辐射得热，围护结构连接部位采用热桥阻断设计，在钢结构支撑与围护板材间填充气凝胶隔热垫片，使热桥传热损失减少60%以上。围护结构气密性达到N2级标准，50 Pa压差下换气次数低于1.5次/h，有效减少了渗透冷热负荷，热工性能改进后预制舱冬季热负荷降低32%，夏季冷负荷降低28%，使温控设备装机容量减少25%。结构优化与智能温控系统协同作用，使舱体综合能耗指标从

85 kW·h/m²降至58 kW·h/m²，节能效果显著。

3.3 可再生能源耦合与能耗评价体系

系统集成光伏发电与空气源热泵技术，在预制舱顶部铺设20 m²薄膜光伏组件，装机容量3 kWp，年发电量约3 600 kW·h，满足系统30%的用电需求。光伏系统配置5 kW·h储能电池组，采用削峰填谷控制策略，白天光伏发电优先供给温控设备并对电池充电，夜间及阴雨天由电池放电或电网补充供电。储能系统采用锂铁磷酸电池，循环寿命超过6 000次，配置智能电池管理系统(BMS)实时监测电池状态，确保充放电安全高效，空气源热泵在环境温度-15℃以上工况下作为主供热设备，低温工况由电辅热补充。能耗评价体系基于单位面积能耗强度(EUI)、可再生能源利用率(RER)及一次能源消耗量构建综合评价模型，实时监测系统能效水平^[5]，评价周期设定为月度与年度两个维度，月度评价侧重运行策略优化，年度评价用于系统性能考核，实施可再生能源耦合后预制舱年一次能源消耗量降低42%，碳排放量减少3.2吨，可再生能源利用率达到35%，经济效益与环境效益显著提升。

4 结束语

模块化预制舱智能温控系统通过多层次技术集成与优化，实现了环境调控与能源管理的协同提升。系统架构设计确保了感知、控制及计算资源的高效配置，智能算法的应用使温控过程更加精准灵活，节能优化措施从设备与围护结构到能源供给形成完整链条。实践验证表明，该系统不仅显著降低了运行能耗，还提升了预制舱的环境品质与适应能力。未来应进一步深化人工智能技术应用，探索多舱联控与群控优化方法，推动智能温控系统向更高智能化、更低碳化方向发展，为模块化建筑行业的绿色转型提供持续动力。

参考文献：

- [1] 倪宁晖,刘砚峰,倪乐.油气田数据中心智能温控运维探讨[C]//中国机械工业联合会,中国机电装备维修与改造技术协会.2024中国工业设备智能运维技术大会论文集(上).中国石油化工股份有限公司华东油气分公司,2024.
- [2] 薛欢,刘超,王笠,等.模块化智能变电站预制舱的多舱结构设计[J].宁夏电力,2024(01):69-74.
- [3] 董军,张照允,张同胜,等.全智能模块化预制舱在煤矿变电站的应用[J].中国设备工程,2022(S2):230-231.
- [4] 左涛,刘建涛,蒋强,等.非金属模块化预制舱式变电站节能环保关键技术[J].电气技术,2024,25(04):59-65,76.
- [5] 马斌,郑馨怡,王昱婷,等.基于节能降耗的模块化变电站设计及能效研究[J].能源与环保,2022,44(03):158-161,168.

基于扫描链的数字集成电路 测试与故障诊断方法研究

邱子涵

(矽力杰半导体技术有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要 数字集成电路在规模扩张和工艺节点压缩的双重作用下, 测试时间、功耗与故障覆盖率之间的矛盾日益尖锐, 亟须引入一套依托扫描链结构的可测试性设计与故障诊断思路。本研究在系统梳理扫描链结构形式、插入策略与测试向量生成流程的基础上, 分析了低功耗测试、数据压缩、在线监测等新型技术路径, 剖析了不同方法在覆盖率、测试成本和诊断精度方面的差异。研究结果表明, 基于扫描链的测试框架可以在控制测试数据规模和功耗风险的前提下显著提高内部故障可观测性和定位精度, 为复杂芯片的量产测试和运行管理提供技术参考。

关键词 扫描链; 数字集成电路测试; 故障诊断; 低功耗测试

中图分类号: TN79

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.010

0 引言

数字集成电路已成为信息基础设施、消费电子和汽车电子等领域的关键支撑。随着集成度不断增加和工艺尺寸持续缩小, 工程实践在测试难度、质量可靠性和成本控制之间承受了更为明显的压力。传统依赖功能验证的测试路径在面对复杂控制逻辑和深层次状态空间时往往难以兼顾覆盖率与效率, 设计团队开始依托可测试性结构在电路内部嵌入扫描链, 对关键寄存器和控制路径进行重构, 以期在测试阶段便能获得更高的可控性和可观测性, 为故障定位和质量评估提供更清晰的数据依据。

1 扫描链数字测试技术的基本框架与关键要素

1.1 扫描链结构形式与工作模式概述

扫描触发器在结构上较普通触发器多出扫描输入端 (SI) 与扫描使能端 (SE), 这两项改进为测试信号在电路内部的有序传递提供了路径。当扫描模式被激活时, 所有触发器被串联为一个长移位寄存链, 外部测试信号可按时钟节奏依次加载到每个节点, 实现内部状态的直接控制, 有效提升测试响应可观测率。

单扫描链结构一般适用于中小规模电路, 其信号路径简单但移位时间较长; 多扫描链结构则能将测试路径并行化, 可在相同时钟频率下显著缩短加载周期, 分层扫描结构适用于系统级芯片, 它可将模块级扫描链分区连接至顶层控制单元, 以平衡布线复杂度和信

号同步需求。整个测试过程需依次经历“移位—加载—捕获—读出”四个阶段: 先将测试向量移入寄存器, 再加载至逻辑电路, 捕获响应后再顺序读出结果。

1.2 可测试性设计流程与扫描链插入策略

工程实践通常在逻辑综合完成后启动可测试性设计流程, 将普通触发器替换为扫描触发器, 结合设计规模和结构特点规划扫描链数量, 随后在版图阶段对链路走线、时钟树与布线拥塞进行协同校正, 并在约束文件中统一描述测试时钟、扫描使能和输入输出端口的关系在多时钟域电路中需要优先明确各时钟域的边界。针对异步域设置锁存或桥接单元, 在复位信号较多的电路中需要审慎处理同步复位与异步复位的配合方式, 在包含大量锁存器的路径上需要采用扫描替代结构或局部旁路结构, 以保证扫描模式下时序关系与功能模式保持一致^[1]。常见的扫描链划分策略包括按模块划分、按时钟域划分和按物理邻近程度划分, 按模块划分有利于后期调试定位但链长差异较大, 按时钟域划分便于统一测试时序但对跨域逻辑要求较高, 按物理邻近程度划分可以有效控制布线长度和寄生效应, 在实际设计中往往依托可测试性设计与扫描插入工具对链路数量、链长差异和物理分布进行综合权衡, 以获得兼顾版图实现与测试需求的折中方案。

1.3 测试向量生成方法与故障覆盖指标说明

自动生成测试向量的基本思路是由工具在给定电路结构和目标故障条件下, 逐步推导需要施加在输入

作者简介: 邱子涵 (1997-), 男, 本科, 研究方向: 集成电路测试。

端的比特组合，再判断哪些内部节点必须翻转，才能在输出端形成可区分的响应。设计团队在使用此类工具时通常需设置约束条件，限定时钟关系、复位状态和非法输入组合范围，新一代测试工具还可引入搜索剪枝、学习辅助等技术，缩短搜索路径并减少无效向量数量。

常见故障类型在工具内部可被抽象为“节点始终为0或1”“信号过慢导致边沿错位”“短路导致两个节点行为相同”等模型，这些模型能让测试向量生成过程更集中地覆盖典型失效场景。在评价测试质量时通常先关注故障覆盖率、测试长度和测试时间等指标，故障覆盖率反映被成功检测出的故障比例，测试长度对应需要移入和读出的向量总量，测试时间则综合考虑扫描时钟频率和链路数量，工程实践往往需要在较高覆盖率和可接受的测试周期之间找到折中方案，为低功耗和压缩技术的应用留出空间。

2 新型扫描链测试优化技术与复杂电路适配方法

2.1 面向低功耗与低噪声的扫描链测试优化技术

在大规模扫描测试过程中，测试向量会在短时间内推动大量内部节点反复翻转，芯片电源网络容易出现瞬时电流峰值和电压波动，量产阶段往往需要在测试覆盖率、测试时钟和供电裕度之间反复权衡，一旦峰值电流过高，电源跌落和地弹噪声就可能引发误判甚至损伤芯片，这一情况在工艺进入7 nm及以下节点后表现得更加突出。围绕功耗与噪声问题，可测试性设计和测试向量生成工具逐步引入了针对性的低功耗技术路径，典型做法包括对测试向量进行重排，将切换较多的向量分散到不同批次，并在扫描链中采用分段移位的方式，让不同段链路在不同时刻接收数据^[2]。部分项目还会在测试控制器中配置分时测试策略，为不同模块分配错峰的移位窗口，测试过程不再同时驱动全部扫描链，而是按预设组合轮流启用，以压缩同一时刻翻转的节点数量。

在测试时钟频率和扫描链并行数量的选择方面，需结合功耗估算结果和ATE设备能力设定上限，常用思路是适度降低测试时钟或在高功耗模块附近减少并行链条数量，借助功耗感知的自动向量生成工具预估每个测试周期的翻转密度。新一代测试平台已逐步将功耗和噪声约束纳入测试计划编制过程，在生成向量时同步考虑链路分布、移位顺序和观测时间点，以在不显著拉长总测试时间的前提下压低电源干扰风险，为高密度芯片在量产环节维持稳定良率提供更可靠的测试环境。

2.2 面向大规模系统芯片的扫描链分组与数据压缩方案

在大规模系统级芯片中，扫描链数量往往达到数百条甚至上千条，如果直接把所有扫描响应完整送到外部测试设备，测试数据量会急剧增大，设计团队在这类项目中通常会采取“数据缩减”和“链路分组”的要求，即在芯片内部先对测试数据进行整理和压缩，再将有限数量的观测结果输出到芯片边缘，将ATE侧的数据吞吐压力控制在可接受范围内。

输入压缩的基本思路是由少量外部测试通道驱动片内的解压网络，这个网络可将有限比特扩展为多条扫描链需要的刺激序列，输出压缩则将多条扫描链的响应信号经由简单逻辑组合或线性压缩结构汇聚到少量观测端口。此类虽能显著减少对引脚和存储资源的依赖，但也会带来结果混叠风险，即不同故障场景在压缩后可能出现相同观测值，需要在压缩比和混叠概率之间设定约束，并在必要时为关键模块保留额外的直连观测路径。

在分组策略方面，工程实践常按功能模块、按时钟域或按物理邻近程度进行分组，把结构相似、时序关系接近的扫描链划入同一组，再为每组配置相对独立的压缩网络，以缩短布线长度并减轻局部拥塞^[3]。压缩网络结构一般采用层次化设计，上层负责将多组响应先在组内压缩，下层再把若干组的结果进一步汇聚，观测点选取优先覆盖关键信号路径和故障敏感节点，新一代可测试性设计工具已经能够在同一平台内协同审视链路分组、压缩结构和观测点分布，以“兼顾数据量、诊断精度与电路复杂度”为目标，输出更贴合故障诊断需求的综合优化方案，为定位和修复工作打好基础。

2.3 面向安全与可靠性的扫描链保护与容错设计

扫描链在增强内部节点可观测性的同时也会暴露电路结构和运行状态信息，在涉及密码算法、身份认证和安全存储等敏感场景时，如果调试端口长期保持开放状态，攻击者就可能借助扫描链推断秘钥或窃取配置信息。工程实践需重视访问权限控制，依托加密认证的测试控制器限定测试模式触发条件，在量产阶段仅保留少数受控入口，在出厂后对部分扫描路径进行锁定或裁剪，以压缩潜在攻击面。

常见的安全措施包括在扫描路径中增加简单加扰或屏蔽机制，将关键寄存器的真实内容与掩码数据混合输出，或者只暴露经过抽取与重编码的有限比特，让外部观察者难以还原完整内部状态，新型方案还能

将安全相关寄存器从公共扫描链中独立隔离，仅在受信环境下短时开启专用测试通道^[4]。芯片在长期运行和高温、辐照等恶劣环境下，扫描触发器本身也可能出现老化或偶发错误，设计可在规划阶段预留冗余链路和旁路结构，引入定期自检序列和简单纠错逻辑，对扫描路径的连通性和数据可靠性进行在线审视，以在测试能力、安全需求与长期可靠性之间形成更稳妥的平衡。

3 基于扫描链响应的故障诊断方法与工程应用

3.1 基于测试响应特征的故障快速定位与分类方法

在扫描测试阶段，测试设备可记录每条扫描链在“移位—捕获—读出”过程中得到的响应序列，设计团队再将这些序列与事先计算好的预期结果一一对比，根据错误比特出现的链路位置和轮次，初步判断故障更可能落在某一逻辑模块或某一类型节点上，这一过程主要借助“偏离模式”推断故障大致范围和性质。工程实践中常用的诊断方法包括基于模式匹配的故障指纹库，即将历史故障对应的错误分布特征保存为模板，在新测数据到来时寻找最接近的指纹；也包括基于统计特征的聚类与简单机器学习模型，将错误数量、分布跨度、是否集中出现在关键路径等信息组合为特征向量，从大量样本中抽取具有代表性的故障类型^[5]。在设计方案选择时还需要在诊断速度、定位精度和实现复杂度之间寻找平衡，在量产测试场景更看重快速筛选出高风险芯片并给出粗粒度分类，在失效返修和质量追溯场景则更依赖精细的特征提取和多轮交互诊断，为版图优化和工艺调整提供依据。

3.2 面向在线监测与老化评估的扫描链诊断扩展

在面向高可靠性的设计中，系统在运行阶段会保留一定扫描测试能力，控制逻辑可以在业务负载较低的时段短暂切换到测试模式，对若干关键模块执行状态采集，这一做法依托已有扫描链结构，能在不明显打断业务的前提下获得内部健康信息。长期运行条件下，温度循环、供电波动、电磁干扰和机械振动可能会引起门电路延迟、阈值电压和泄漏电流缓慢变化，通过定期记录扫描响应并与早期基线数据对比，能够更早发现时序裕度缩小或某类路径错误概率上升的趋势。

在线监测场景中，通常不沿用完整量产测试序列，而是围绕关键路径和关键寄存器构建长度更短的健康检查序列，这些序列重点覆盖时钟网络、电源敏感单元以及安全相关逻辑。监测控制器可以按小时或按天发起有限轮次扫描，并结合温度、电压等传感器读数给出综合评估结论，在这一过程中需要兼顾额外

时钟周期和功耗开销与诊断效果之间的平衡，让芯片既能保持适度的自我诊断能力，又能够维持长期稳定运行。

3.3 典型应用场景与工程实践经验梳理

在某数字信号处理芯片项目中，设计团队在早期便按功能模块和时钟域规划了数十条扫描链，在测试阶段依托压缩向量库和分组诊断策略对滤波、控制和接口模块分别设置了不同的测试强度，工程人员在调试现场通过对比扫描响应错误分布和功能仿真结果，很快就锁定了乘加单元中的若干边界寄存器问题。通信控制芯片和片上系统项目中还出现了测试时间偏长、峰值功耗偏高、诊断结果对工艺批次敏感等代表性问题，项目组通过缩短低价值向量序列、调整扫描链并行数量、细化故障指纹库等手段进行了修正，在不更改主功能结构的前提下将单片测试时间压缩了约三分之一。这些实践表明，工程团队如果能够在架构阶段就预留测试结构空间，在版图收敛阶段保持设计与测试岗位的高频沟通，并在每一轮量产后的认真整理测试与诊断数据，就能在后续改版中形成稳定的经验闭环，为新项目的扫描链规划和故障诊断策略提供可复用的参考框架。

4 结束语

在工艺尺度持续缩小和应用场景愈加多元的语境下，基于扫描链的测试与故障诊断已经从单一工艺辅助环节转变为贯穿架构规划、实现落地和寿命管理的共同约束，当设计团队能将测试视为电路功能的一部分时，就能在结构抽象阶段预留监测与诊断通道，将制造过程中的不确定性转化为可观测的工程变量。面向新一代高密度芯片，扫描链相关技术只有在功耗、数据规模、安全性与在线监测需求之间持续寻找动态平衡，才能为长期可靠运行构建更坚实的基础。

参考文献：

- [1] 肖光旭. 基于多通道边界扫描的模数混合电路测试技术研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2025.
- [2] 戚萧榕. 基于扫描测试的IP核可测性设计方案与功耗优化 [D]. 西安：西安电子科技大学, 2024.
- [3] 黄小妹. 数字电路系统可测性设计(DFT)技术实现方法研究 [J]. 电子制作, 2022, 30(14): 86-88.
- [4] 李华伟, 李晓维. 电子设计自动化中的数字电路测试技术 [J]. 微纳电子与智能制造, 2021, 03(02): 28-35.
- [5] 向韬鑫, 王仁平, 刘东明, 等. 多电压与扫描链技术在芯片设计中的应用研究 [J]. 电气技术, 2020, 21(06): 35-38.

基于 AI 的人脸识别门禁系统在智慧校园中的应用研究

李泽夏¹, 李明凡²

(1. 国防科技大学军政基础教育学院, 湖南 长沙 410072;
2. 厦门市邑度高新技术有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要 智慧校园创建促使教育信息化朝着深度融合发展前进, AI 人脸识别门禁系统属于关键基础设施, 依靠生物识别的唯一性以及人工智能的智能化特性, 实现校园出入管理的安全提升及服务改善。本文从系统核心技术支撑角度出发, 阐述了 AI 驱动的身份核验以及多模态感知技术的原理, 搭建“云一边一端”多层次的应用架构, 并探寻其在校园核心区域管控、教学场景联动、生活服务延伸等方面的应用路径, 剖析系统在安全防护、管理效率、生态协同等方面效能, 以期为智慧校园出入管理智能化转型提供理论借鉴与实践参考。

关键词 AI 人脸识别; 智慧校园; 门禁系统; 应用架构; 场景融合

中图分类号: TP242; G47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.011

0 引言

在数字化转型大潮之中, 智慧校园创建把技术赋能教育管理和服务改善当作核心目标, 校园出入管理是安全防范和秩序维持的重要部分, 必须冲破传统门禁方式的束缚。基于 AI 的人脸识别门禁系统把生物识别、深度学习和物联网技术融合起来, 依靠非接触式身份核验, 动态权限控制以及多系统协同联动, 既克服了传统刷卡门禁容易丢卡, 容易被冒用的缺点, 又符合智慧校园“安全、高效、便捷”的建设理念。该系统是校园安防体系的重要组成, 也是和教学管理、生活服务等场景深度融合的智慧校园各个功能模块之间的连接枢纽。

1 AI 人脸识别门禁系统在智慧校园中的核心技术支撑

1.1 AI 驱动的身份核验技术

人脸识别算法的核心部分是深度学习的人脸识别算法, 使用 ResNet、MobileNet 等深度卷积神经网络, 利用多层卷积和池化操作, 提取出人脸轮廓、五官比例、纹理细节等 68 个生物特征点, 产生唯一性 128 维特征向量^[1]。系统依靠 GPU 并行计算集群, 每秒可以完成数万次的特征比对, 单人身份核验时间被压缩到 0.3 秒之内。同时采用活体检测技术的三级防护体系, 一级是通过红外光谱成像检测皮肤温度和血管搏动,

二级是通过 3D 结构光重建人脸立体模型, 检测面部深度信息, 三级是通过微表情捕捉和眼球运动轨迹分析, 检测细微肌肉动作^[2]。此种技术方案可以有效抵御面具、3D 打印模型等新型伪造方法, 国家级安全认证活体检测准确率达到 99.7%。这种无介质识别模式冲破了传统门禁依靠校园卡、指纹等实体载体的限制, 与 AI 姿态识别算法相配合, 在师生正常行走、交谈时可以做到 1.5 米范围内主动识别, 大幅改善校园出入口通行效率。

1.2 多模态感知融合技术

为了满足校园复杂环境的使用需求, 建立了“视觉+红外+环境”多模态感知矩阵。部署了 800 万像素的星光级摄像机, 使用的是 1/1.8 英寸的大尺寸图像传感器, 并配上 F1.4 超大光圈镜头, 即使在夜间极低照度的环境里依然可以清晰地捕捉到人脸的细节; 红外补光模块采用的是 940 nm 的不可见光技术, 可以避免强光的刺激, 保证 24 小时不间断识别^[3]。通过自适应光线调节算法, 在强光直射 50000Lux 或者逆光的角度下, 系统会自动启动动态曝光补偿和 HDR 图像处理, 消除面部阴影的干扰。同时加入边缘计算网关做数据本地化处理, 把 90% 以上的识别任务在设备端完成, 响应时间缩短到 200 ms 以内, 有效地缓解了校园网高峰压力^[4]。该系统中首次集成了毫米波雷达感知模块,

作者简介: 李泽夏(2006-), 男, 本科, 研究方向: 计算机 IA 应用研究、人工智能与物联网等技术的深度融合。

可以实时检测到有人接近的情况，提前唤醒识别设备。认证方式除了基础的人脸识别之外，还有动态二维码扫描、NFC 校园卡、蓝牙密钥等七种认证方式，采用贝叶斯融合模型对多源数据的置信度进行加权计算，根据教职工、学生、临时访客等不同的群体，自适应地选择最合适的认证策略，构建分层分类的智能通行管理方式^[5]。

2 智慧校园中 AI 人脸识别门禁系统的多层级应用架构

2.1 云端管理中枢

云端管理平台属于系统的核心决策层，肩负着数据储存、权限设定、全局控制以及数据分析的任务。把校园师生身份信息、区域权限规则和通行记录数据归入同一个管理数据库当中，从而实现对不同区域、各种场合的权限实施动态分配并及时更新。管理人员可以利用云端平台对门禁设备实施远程监管，针对出现的异常状况发出预警，并且对通行数据加以统计，借助数据可视化工具，能够清楚地看到校园出入流量分布以及各个区域的通行热度，进而为校园资源的优化配置及管理策略的改变提供数据上的支持。

在数据安全保障上，云端管理平台用 AES-256 高级加密标准把人脸生物信息加密传输，创建五级权限的分级访问体系。只有经过多次身份验证的高级管理员才能获取原始生物特征数据，普通管理员只能看到脱敏后的通行记录。

2.2 边缘计算节点

边缘计算层放置在校园本地服务器上，接收云端命令并处理实时性要求高的业务需求，达到数据就近处理、快速响应的目的。在门禁通行场景下，边缘节点负责进行人脸特征比对、活体检测验证等核心运算，从而减少对云端网络资源的依赖，保证网络断网时系统依然可以依靠离线模式保持基本的通行功能。

为了提高运算效率，边缘计算节点使用分布式缓存技术，缓存了高频通行人员的人脸特征模板。识别请求到达时，先在本地缓存快速比对，命中就直接放行，平均响应时间降到 0.3 秒。同时边缘节点用动态权重算法对采集的人脸数据进行预处理和筛选，把置信度低于 85% 的模糊图像或者异常数据标记后上传到云端，用云端算力进行二次复核，既降低了 70% 的数据传输压力，又保证了关键信息的完整性。

2.3 终端设备层

终端设备层属于系统感知及执行终端，包含人脸识别闸机、壁挂式识别终端、移动核验设备等多种形态，

可以适配校园校门、教学楼、宿舍、图书馆等不同场景的安装需求。终端设备集高清摄像头、红外传感器、智能控制为一体，支持快速人脸采集、实时特征比对、通行指令执行、工业设计、户外环境下稳定工作。

在硬件上，新一代人脸识别闸机采用 3D 结构光摄像头和双红外补光灯，能在强光直射、夜晚无光时也能精准识别。壁挂式终端有防拆报警装置、钢化玻璃防护面板，IP67 防水防尘等级。移动核验设备带 5G 通信模块和长续航电池，可以用于校园活动临时安检、校外实践身份核验等场景。部分终端设备有多种功能扩展，可以集成体温检测、口罩识别等附加功能，实现身份核验和健康监测一体化，为校园场景化管理提供灵活的硬件支持。

3 AI 人脸识别门禁系统在智慧校园中的多场景融合应用实践

3.1 校园核心区域管控

对校园校门、宿舍区等重要的安防区域，系统使用分级权限管理的方式来实现精确控制，根据师生、职工、访客等不同的身份设定不同的通行权限以及时间段。系统在高峰时段可以实现快速通行，通过无感识别减少排队拥堵，同时和安保预警系统联动，对未授权人员进行实时拦截并触发报警，有效防止无关人员闯入。

在校门处设置的 AI 监控系统具有异常行为分析功能，对翻越围栏、尾随闯入等危险行为实行视频流实时识别，触发之后自动生成事件工单，将事件工单同步发送到安保指挥中心及附近的巡逻人员手持终端上。宿舍区结合夜间时段管控规则，自动记录晚归、未归的通行状态，同步推送信息给管理平台和家长终端，形成家校协同的安全管理机制。

在访客管理上，依靠线上预约审批来创建临时通行权限，配合人脸核验和电子通行证联动，从而实现访客身份的迅速认定以及出入轨迹的追踪。预约系统支持同企业微信、钉钉等第三方平台对接，访客通过手机端进行实名认证、上传身份证件照片等操作。

3.2 教学场景联动应用

系统同教学管理系统深度整合，实现门禁通行和考勤管理一体化运作。教学楼、实验室等教学区域师生刷脸通行时系统自动完成考勤记录，管理平台实时生成出勤报表，统计出迟到、早退情况，减少人工统计工作量，为教学管理提供准确的数据支持。

对于实验室等特殊的教学场所，系统可以根据课程安排以及实验预约情况，动态地分配通行权限，只

有经过授权的人才可以在指定时间段内进入。实验室入口处终端设备使用指纹和人脸双重认证的方式，重要设备操作区域增加虹膜识别模块，形成多层身份验证体系。系统通过物联网传感器对设备使用状况进行实时监测，自动记录设备使用人员、使用时长，产生设备维护提醒工单，实现教学资源规范化管理。

系统可以同智慧班牌、教学预警系统联动起来，凭借通行数据来判定学生是否到课，随即发送预警信息，从而改善教学质量。

3.3 生活服务场景延伸

系统跳出一门一关的功能范围，向着校园生活服务的场景拓展，形成“一脸通”智慧校园生态。在食堂、超市等消费场所，师生只需通过人脸核验即可完成支付结算，不用携带校园卡或者手机，既提高了消费的便捷性，又避免了卡片丢失、盗刷等风险。支付系统使用动态二维码加密技术，每次交易产生唯一的支付凭证，并且通过生物特征做两次验证以保证支付的安全性。

图书馆、体育场馆等公共资源场所实现刷脸借阅、预约使用等功能，简化流程的同时准确记录资源使用情况，为资源优化配置提供依据。图书馆设置智能书架系统，使用人脸识别技术完成借阅、归还、定位追踪。

与校园水电管理、自助服务终端等系统对接联动，人脸信息成了师生在校园内身份认证的唯一媒介，实现出入、消费、服务等各种场景的无缝衔接，提升校园生活的智能化体验。宿舍区学生刷脸开门禁、用洗衣机等设备，自助打印终端人脸识别自动调取打印任务，全程无需介质，真正实现“一脸走遍校园”。

4 AI人脸识别门禁系统在智慧校园中的应用价值与协同效能

4.1 安全防护体系升级

AI人脸识别门禁系统依靠生物特征的唯一性、不可复制性，从源头上杜绝身份冒用的风险，比传统的门禁模式提高了校园安全防护等级。系统具备实时预警和轨迹追溯功能，能够对异常通行行为、黑名单人员闯入等即时做出响应，联动监控设备抓拍取证并发送告警信息，给安保人员快速处置提供便利，形成事前预防、事中控制、事后追溯的全链条安全防护体系。

4.2 管理服务效能优化

系统用自动化身份核验和数据统计来代替传统的手工登记、点名等繁琐的工作，大大降低管理成本，提高工作效率。管理人员可以通过云端平台实现跨区域、多设备的集中控制，无需现场值守就可以完成权

限调整、设备维护等操作，从而优化管理资源的配置。对师生来说，无感通行、一键预约、全程自助等服务模式减少了等待时间、流程复杂度，提高了校园生活的便捷性、满意度。双重效应即“管理降本、服务提质”，促使校园管理由经验型向数据驱动型转变，符合智慧校园建设理念。

4.3 智慧校园生态协同

AI人脸识别门禁系统属于智慧校园的关键基础设施，它经由数据接口同校园管理平台、教学系统、生活服务系统等展开深度协同，冲破信息孤岛，塑造一体化的智慧生态。系统产生的通行数据、权限数据、行为数据等，在经过分析处理之后可以为校园管理决策提供支持。例如：根据区域通行热度来优化空间资源配置，根据出勤数据来调整教学安排，根据消费数据来优化餐饮服务。多系统协同、数据共享模式推动校园各功能模块形成有机整体，促使智慧校园建设朝深度融合、协同高效的方向发展。

5 结语

以技术创新为驱动，场景融合为途径的人脸识别门禁系统，在智慧校园建设中具有明显的应用价值和发展潜力。依靠核心技术的精准赋能、多层次架构的稳定支撑、多场景的深度渗透，既实现了校园出入管理的安全升级、效率提升，又成为连接校园管理、教学服务、生活保障的枢纽，为智慧校园生态的构建提供重要支撑。随着AI算法的不断升级，多技术融合程度的加深，该系统在复杂环境识别、跨场景协同、隐私安全防护等方面将会有更多的提升，为智慧校园的创建提供更强劲的动力。

参考文献：

- [1] 刘生华,朱丹妮,高志灏,等.人脸识别技术在智慧校园建设中的应用探究[J].电脑知识与技术,2024,20(31):21-23,30.
- [2] 陈晓灵,张圣彬.智慧校园人脸识别技术应用的法律治理[J].中国公共法律服务,2024(02):208-220.
- [3] 崔彦君,龙君芳.基于多源数据融合和深度学习的智慧校园分析模型[J].贵阳学院学报(自然科学版),2024,19(03):62-68.
- [4] 李东风,唐雯炜,马亮,等.智慧校园背景下人像库管理平台的建设及应用[J].现代信息科技,2024,08(16):74-78.
- [5] 钟昌红,王建强.从数字校园到智慧校园:教育信息化建设的目标指向与实践路径[J].教育传播与技术,2024(03):3-8,21.

BIM+GIS 技术在水利工程规划中的空间分析精准度提升效果分析

陈淑青

(山东新汇建设集团有限公司济南分公司, 山东 济南 250000)

摘要 BIM+GIS 融合技术为水利工程规划内的空间分析提供了多源数据集成与精准建模的解决方案。本文就技术融合原理、精准度提升机制以及应用效果评价三个维度展开研究, 搭建空间分析精度的评价指标体系, 利用实际工程案例对比传统方法与 BIM+GIS 方法的应用不同。研究结果表明, BIM+GIS 技术可使空间定位误差降低幅度超 60%, 将水文模拟偏差控制在 5% 以内, 为水利工程规划的科学性及经济性提供有效支撑, 具有工程应用价值, 推广前景广泛。

关键词 BIM+GIS 技术; 水利工程规划; 空间分析; 精准度提升

中图分类号: TP3; TV5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.012

0 引言

传统的空间分析途径依赖二维图纸与单一地理信息数据, 不能有效整合工程设施三维的细节与复杂地理环境各要素, 可能引起地形分析结果失准、水文模拟偏差显著等问题, 影响规划方案的优化设计实施。BIM 技术可实现工程构件的参数化建模以及与属性信息的关联。GIS 技术具备十分强大的空间数据管理及地理环境分析能力, 二者深度融合为突破传统方法的局限开辟了技术路径。本文深入探究 BIM+GIS 融合技术在水利工程规划当中的应用基础及精准度提升办法, 采用构建科学的评价体系验证技术应用的实际效果, 为水利工程规划的数字化转型进程提供理论支撑与实践借鉴经验。

1 BIM+GIS 融合技术在水利工程规划中的应用基础

1.1 BIM 技术与 GIS 技术融合原理与方法

BIM 技术与 GIS 技术融合的核心要义是打破数据壁垒与技术藩篱, 实现工程实体信息与地理环境信息的深度协同互作。数据级融合借助统一的数据标准与存储格式, 把 BIM 的 IFC 格式构件数据和 GIS 的 GeoJSON 地理数据整合进时空数据库, 构建含有工程属性、空间位置、地理特征的一体化数据群。模型级融合借助三维可视化的引擎, 采用坐标基准统一、模型精度匹配等技术措施, 促成 BIM 构件模型与 GIS 地形模型的无缝拼接, 打造出涵盖自然地理环境与人工工程设施的三维综合场景^[1]。应用级融合依托二者技术优势的互

补, 开发专门的空间分析模块, 将 BIM 在构件级方面的细节分析能力与 GIS 的区域级宏观分析能力结合起来, 实现水利工程规划多尺度、多维度的空间分析需求。

1.2 水利工程规划中空间数据处理流程

在水利工程规划中, 空间数据处理遵循“多源采集—清洗整合—格式转换—集成存储—质检校验”的全流程规范, 保障数据质量达成精准分析的要求, 多源数据采集囊括了高分辨率遥感影像、GPSRTK 实测数据、水利工程设计图纸、水文监测数据与地理基础数据等多样数据种类。数据清洗按照 3σ 准则去除监测数据里的极端异常值, 运用空间插值手段去填补数据的空白, 保证数据的完整与连贯一致, 采用 FME 等专业工具开展格式转换, 实现 IFC、CAD、Shapefile 等多样格式数据向统一地理空间数据格式的变换, 化解数据互操作性的相关问题^[2]。集成存储采用 PostgreSQL 及 PostGIS 的时空数据库, 构建支持三维空间查询与属性关联检索的数据管理体系, 质检校验利用空间一致性检查与属性完整性校验, 保障数据在空间位置与属性信息方面准确可靠, 为后续分析提供可靠的数据支撑。

1.3 三维建模与地理信息集成技术

三维建模技术针对水利工程规划特点, 构建“地形—工程—环境”三位一体的三维模型体系。地形三维重建采用无人机倾斜摄影测量技术获取工程区域点云数据, 结合 ArcGIS 的 3D Analyst 工具生成高精度 TIN 地形模型, 高程精度可达 ± 5 cm, 能够精准还原

作者简介: 陈淑青 (1993-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

地形起伏特征。工程设施建模基于 Revit、Bentley 等专业软件，采用参数化建模方法，依据水利工程设计规范与构件标准尺寸，构建闸坝、渠道、水库等核心工程设施的三维模型，模型包含材料类型、结构尺寸、设计参数等完整属性信息^[3]。地理信息集成技术通过唯一标识符（UUID）将 BIM 模型的工程属性与 GIS 的地理属性进行关联，实现“三维模型—空间位置—地理环境”的信息互通，支持在三维场景中同时查询工程构件细节与周边地理环境特征，为空间分析提供一体化的数据支撑。

2 基于 BIM+GIS 的空间分析精准度提升机制

2.1 空间定位精度优化技术

空间定位精度优化的核心是解决 BIM 局部坐标系与 GIS 大地坐标系的不一致问题，通过坐标转换模型实现二者的精准对齐。采用七参数坐标转换模型进行坐标系统一，该模型通过求解三个平移参数（ ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ）、三个旋转参数（ ω 、 ϕ 、 κ ）与一个缩放参数（ m ），实现不同坐标系下空间点的精准转换，其数学表达式为：

$$\begin{cases} X = X_0 + m(X' + Z'\omega - Y'\phi) + \Delta X \\ Y = Y_0 + m(Y' + X'\kappa - Z'\phi) + \Delta Y \\ Z = Z_0 + m(Z' + Y'\phi - X'\omega) + \Delta Z \end{cases} \quad (1)$$

式（1）为七参数坐标转换模型，其中 X' 、 Y' 、 Z' 为 BIM 局部坐标系坐标； X 、 Y 、 Z 为 GIS 大地坐标系坐标； X_0 、 Y_0 、 Z_0 为坐标原点平移量。

在工程区域布设不少于 3 个高精度控制点，采用 GPS 静态测量技术获取控制点的大地坐标系坐标，同时通过全站仪实测其在 BIM 局部坐标系中的坐标，代入式（1）求解转换参数。通过该技术，BIM 模型与 GIS 地理数据的空间定位偏差可控制在 ± 3 cm 以内，较传统坐标转换方法的定位精度提升 70%，为后续空间分析的精准性奠定基础。

2.2 地形地貌分析算法改进

传统的地形地貌分析凭借自然地形数据构建 TIN 模型，未顾及水利工程区域内人工地形（如堤岸、渠道、消力池之类）的影响，致使分析结果与实际地形出现偏差，基于 BIM+GIS 的地形地貌分析算法利用融入 BIM 模型里的人工地形特征，完善 TIN 模型构建与分析的进程。首先，把 BIM 模型里的人工地形表面拆分成特征点，与自然地形点云数据融合在一起，建立包含自然及人工地形特征的混合 TIN 模型；其次，在坡度、坡向等地形因子的计算操作中，添加地形类型权重因子（自然地形权重取值 $\alpha=0.6$ ，人工地形赋予的权重 β 为 0.4），经过改进的地形坡度计算表达式为：

$$\text{Slope} = \alpha \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2} + \beta \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial H'}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H'}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

式（2）为改进后的地形坡度计算模型，其中 H 为自然地形高程， H' 为人工地形高程， $\partial H/\partial x$ 、 $\partial H/\partial y$ 为自然地形高程在 x 、 y 方向的偏导数， $\partial H'/\partial x$ 、 $\partial H'/\partial y$ 为人工地形高程在 x 、 y 方向的偏导数（该算法能够精准刻画水利工程区域内复杂地形的起伏特征，坡度计算误差控制在 2% 以内，较传统算法的分析精度提升 45%，为工程选址、边坡稳定性分析等提供精准的地形数据支持）。

2.3 水文要素空间分布模拟

水文要素空间分布模拟的精确程度直接关乎水利工程防洪标准的确定和水资源配置方案的设计。基于 BIM+GIS 的水文要素模拟技术依靠整合多源数据，构建融合下垫面特性与工程边界的模拟模型。在进行降水空间分布模拟的工作中，把气象站的实测降水数据与遥感反演数据联合起来，引入 BIM 模型内水库、渠道等工程设施的降水拦截效果，采用协同克里金插值手段精准描述降水的空间分布特征。在径流深模拟工作中，采用 GIS 技术对水文响应单元进行划分，结合利用 BIM 模型取得的工程区域地形坡度、土地利用类型、土壤类型等下垫面参数，采用 SCS 水文模型算出不同单元的径流深，同时将渠道输水损失、水库调蓄作用等工程影响因素考虑进去，对径流深空间分布的结果加以修正^[4]。此模拟技术可精准展现工程区域内水文要素的空间变异特性，径流深模拟偏差维持在 5% 以内，与传统模拟方法相比，精度提升 35%，为水利工程的水文局势分析提供可靠依据。

2.4 工程设施空间关系智能识别

工程设施空间关系识别是水利工程规划中优化设施布局、规避空间冲突的关键环节。基于 BIM+GIS 的空间关系智能识别技术通过融合拓扑关系理论与人工智能算法，实现工程设施之间及设施与地理环境之间空间关系的自动识别与分析。构建包含相邻、包含、相交、距离等多类空间关系的识别规则库，利用 BIM 模型的构件级细节信息与 GIS 的地理空间数据，通过拓扑关系查询算法检测闸坝与渠道的连接关系、水库与生态敏感区的空间距离、输水管道与地下管线的交叉冲突等。引入卷积神经网络（CNN）对 BIM+GIS 融合模型进行特征提取，优化空间关系识别算法的鲁棒性，提高复杂场景下空间关系识别的准确率^[5]。该技术能够自动识别工程规划中的空间冲突与不合理布局，识别准确率达 98% 以上，较传统人工识别效率提升 5 倍，为工程设施布局优化提供快速、精准的技术支撑。

3 BIM+GIS 技术应用效果评价

3.1 空间分析精度评价指标体系

构建涵盖空间定位、地形分析、水文模拟、空间关系识别四个维度的评价指标体系，全面衡量 BIM+GIS 技术的空间分析精准度。空间定位精度下设平面定位误差、高程定位误差 2 个二级指标，采用实地实测数据与分析结果的差值统计计算；地形分析精度下设坡度计算误差、坡向计算误差、地形起伏度计算误差 3 个二级指标，通过与高精度地形测量数据对比获取；水文模拟精度下设降水空间差值偏差、径流深模拟偏差、洪水淹没范围预测偏差 3 个二级指标，结合水文监测站实测数据与实地洪水调查结果验证；空间关系识别精度下设空间冲突识别准确率、设施布局合理性判断准确率 2 个二级指标，通过人工复核与工程实践验证相结合的方式评价。各指标均明确计算方法与分级标准，形成科学、可操作的精度评价体系。

3.2 传统方法与 BIM+GIS 方法对比分析

以某中型水库除险加固工程规划项目为案例，分别采用传统方法（CAD+ArcGIS 基础分析模块）与 BIM+GIS 方法（Revit+Bentley+ArcGIS Pro）进行空间分析，对比二者在各项评价指标上的表现，结果如表 1 所示。

表 1 传统方法与 BIM+GIS 方法对比分析

评价指标	传统方法表现	BIM+GIS 方法表现	精度提升幅度
平面定位误差 (cm)	±15.2	±2.8	81.6%
高程定位误差 (cm)	±12.5	±2.3	81.6%
坡度计算误差 (%)	8.5	1.8	78.8%
径流深模拟偏差 (%)	12.3	4.2	65.9%
洪水淹没范围预测偏差 (%)	15.7	4.8	69.4%
空间冲突识别准确率 (%)	72.5	98.3	35.6%
数据处理效率 (h/ 项目)	72	18	75.0%
工程规划返工率 (%)	8.2	1.5	81.7%

从表 1 内容可知，各项评价指标中，BIM+GIS 方法显著比传统方法要好，空间定位误差从传统方法的超过 ±12 cm 降到 ±3 cm 以内，地形分析及水文模拟的偏差均控制在 5% 以内，空间冲突识别的精准度提升至 98% 以上，与传统方法相比，BIM+GIS 方法的数据处理效率提高了 75%，工程规划的返工率降低至 18.3%，还明显强化了空间分析的精准水平，提升了工程规划的效率以及经济性。

3.3 技术应用效益与推广前景评估

水利工程规划中运用 BIM+GIS 技术，产生了明显的经济、社会及生态效益。从经济效益的视角看，采用

精准的空间分析优化工程布局，可降低工程量上的浪费与返工开支，如某水库项目采用此技术后在设计与建设成本上节约了 120 万元，占该项目总投资的 8.5%。就社会效益而言，以精确的洪水淹没范围预判为移民安置及防洪调度提供科学依据，减少了约 3 200 个受洪水威胁的人员，减少了工程运营阶段的安全风险。就生态效益而言，依靠精确识别生态敏感区与工程设施的空间关联，优化工程布局与路线，防止 1.2 公顷的植被被破坏掉，保护了区域生态环境。在推广前景方面，随着数字孪生水利建设的深入推进，BIM+GIS 技术作为数字孪生的核心支撑技术，将在流域综合规划、跨流域调水工程、防洪抗旱规划等更多水利工程领域得到广泛应用。未来可进一步融合人工智能、大数据、物联网等技术，开发动态更新的 BIM+GIS 融合模型，实现空间分析的实时化与智能化，拓展在水利工程施工监控、运营管理等全生命周期环节的应用场景，为水利行业向精准化、智能化方向高质量发展提供坚实的技术支撑。

4 结束语

BIM+GIS 融合技术通过多源数据集成、三维模型构建与智能算法优化，构建了水利工程规划空间分析精准化的技术路径。该技术突破了传统方法在数据整合与分析精度上的局限，通过坐标转换优化、算法改进、多要素协同模拟等机制，实现了空间定位、地形分析、水文模拟与空间关系识别的精准提升。未来需进一步完善技术融合标准与数据共享机制，优化分析算法与软件工具，拓展技术在水利工程全生命周期管理中的应用，为数字孪生水利建设提供更有力的支撑，推动水利行业实现高质量发展。

参考文献：

- [1] 张黎希. 基于 BIM+GIS 的水利工程数字孪生全生命周期管理技术探析 [J]. 电子元器件与信息技术, 2025, 09(05): 218-220.
- [2] 梁爱萍, 张发清, 蔡运忠, 等. 基于 BIM+GIS+IoT 技术的水利工程数字孪生工地建设管理系统研究与应用 [J]. 水利技术监督, 2024(02):39-43.
- [3] 黄保强, 高建强, 赵晓林. 基于“BIM+GIS”技术的水利工程建设精细化管理 [J]. 农业开发与装备, 2024(10): 128-130.
- [4] 苏强. 水利工程 BIM+GIS 协同管理平台研发与应用 [J]. 人民黄河, 2024, 46(11):133-136, 148.
- [5] 孙少楠, 宋宜昌. 基于 BIM+GIS 的水利工程全生命周期建设管理研究 [J]. 中国农村水利水电, 2022(10):131-137, 142.

建筑信息模型（BIM）技术在城市排水泵站建设与运维管理中的应用探索

俞建烽

（浙江省第一水电建设集团股份有限公司，浙江 杭州 310000）

摘要 本文针对建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）技术在城市排水泵站建设与运维管理中的应用展开深入探究。首先阐述BIM技术的核心内涵与特征；其次详细剖析其在排水泵站设计、施工以及运维各个阶段的实际运用情况；最后提出设计阶段的协同设计优化、施工阶段的精准化运作以及运维阶段智能化维护策略，旨在对提升排水泵站的建设质量与运行效率有所裨益，进而为城市排水系统的高效运行提供技术参考。

关键词 BIM；城市排水泵站；运维管理

中图分类号：TP3；TV67

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.013

0 引言

城市排水系统的高效运行，对于维护城市安全起到十分重要的作用。排水泵站位于城市排水系统核心，其建设与运维管理的质量可影响整个排水系统的效能。近年来，BIM技术作为一种先进的数字化技术，在建筑和基础设施领域得到广泛应用，通过应用数字化模型，简化了从设计、施工直至运维的全生命时段运作，为城市排水泵站的建设和运作提供了新的解决途径。

1 建筑信息模型（BIM）技术的内涵、核心特征

1.1 BIM技术的内涵

建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）是一种依托三维数字技术构建起来的建筑工程信息运作方式，通过形成并利用包含建筑项目整个生命时段信息的三维数字模型，实现建筑项目设计、施工、运维各阶段的协同作业与信息共享。BIM技术既包含建筑物的几何信息，又包含建筑构件的属性信息、施工进度信息和运维管理信息等，是一个全方位的建筑信息融合平台^[1]。

1.2 BIM技术的核心特征

1. 多维度可视化。BIM技术具有从二维向三维发展的全面可视化能力，可为设计人员、施工人员以及运维管理人员提供直观的建筑信息，有益于及早察觉设计矛盾和施工难题，减少施工时产生的错误并减少返工量。

2. 参数化设计。BIM模型中的构件和属性信息具有参数化特性，即任意的设计更改都可以通过调整参

数自动体现在整个模型中，这种参数化设计既提升了设计效率，又保障了设计更改的一致性和准确性，有效减少由于人工修改而产生的错误。

3. 信息集成与共享。BIM技术具有很强的信息整合与共享能力，借助BIM平台，设计、施工以及运维各个阶段的所有参与者都可以随时获取并更新项目信息，显著提升项目的整体效率。

4. 全生命周期管理。BIM技术融入建筑项目的整个生命时段，覆盖规划与设计、施工建造直至运行维护各阶段，其模型的应用更新，为各阶段提供支撑。

2 BIM技术在城市排水泵站建设阶段的应用

2.1 设计阶段的BIM技术应用

在设计阶段，BIM技术的应用重点在于协同设计、方案优化以及冲突检测等方面。

其中，排水泵站设计比较复杂，涉及很多专业领域，以往的设计方法中，各专业之间传递信息会受阻，很容易产生设计矛盾，进而影响项目进度和质量。然而，BIM技术创建了一个可供多方共享的三维模型，打破了不同专业之间的信息壁垒，使全体专业设计人员可以在同一平台开展合作，建筑师可通过BIM模型规划泵站的整体布局及其空间关联，结构工程师依照此框架实施结构设计，这样就能确保泵站建筑结构具备较好的承重能力；给排水和电气工程师按照建筑与结构设计，在模型内添加相应的设备和管道，进行各专业设计的有效衔接^[2]。

作者简介：俞建烽（1988-），男，本科，工程师，研究方向：施工管理。

方案优化是BIM技术在设计阶段的一大重要应用，其可视化功能为设计人员提供了直观表现排水泵站设计方案的机会，利用虚拟漫步和动态显示功能，设计人员可以模仿泵站的运行状况，并从大量视角考量设计方案是否合理。通过模拟水流路径，可以查找是否存在水流受阻以及局部积水等问题，以此来改善泵站的水流组织；还要考察设备布置是否恰当，操作空间是否充足，以保证设备的安装、保养和操作得以顺畅开展。而且，BIM模型可以与性能分析软件结合、能耗分析以及结构分析等诸多方面的性能评定，为设计方案的优化提供科学依据。

BIM技术在设计阶段的应用还能避免施工冲突。在传统设计流程中，各专业设计图纸间存在信息不符的情况，极易引发空间冲突、功能冲突等状况。BIM技术可自动识别各专业间的此类冲突，其碰撞检测功能能在设计阶段预先察觉给排水管道同电气管线存在的空间冲突，也可找出设备与结构构件发生的碰撞问题，如果这些问题等到施工阶段才被找到，大概会造成返工及拖延，进而提升项目成本，借助BIM技术在设计阶段尽早察觉并处理这些冲突，防止施工阶段出现返工与拖延现象，削减项目成本，优化项目的总体效益^[3]。

2.2 施工阶段的BIM技术应用

1. 施工准备阶段。施工准备阶段是排水泵站建设的核心部分。在施工准备阶段，BIM技术重点用于施工场地规划、施工方案模拟以及施工进度计划制定方面，通过BIM模型，可以针对施工场地执行三维建模，合理安排施工区域、材料存放区以及临时设施等，优化施工场地的交通秩序，减少施工期间的堵塞情况和安全风险。

BIM技术在施工准备阶段的另一关键应用体现在施工方案模拟上，利用BIM技术，可以对施工方案进行虚拟模拟，事先考虑其可行性和安全性。例如：模拟大型设备的吊装流程，检查吊装路线是否畅通，吊装设备是否合格等，还可以模拟基坑开挖流程，并评判支护结构是否稳定，从而减小施工风险，促使施工过程顺利开展。

施工进度计划编制是施工准备阶段的一项重要工作，利用BIM技术可以将施工进度计划与三维模型关联起来，进而构建出四维施工进度模拟图，这样一来，施工管理人员就能清楚地看到施工进度，一旦察觉到进度出现差错，就可以采取办法去纠正，这样施工队伍就能随时了解当前的施工状况，还可以更好地协调各施工环节，促使项目按照计划向前推进。

2. 施工过程管控。在施工期间，BIM技术主要应用在质量控制、安全运作以及成本控制方面。

质量控制是施工流程中的重要环节，通过BIM模型，施工人员可以随时查阅设计图纸及施工规范，同时借助BIM模型所含的构件信息，可以针对施工材料展开质量检验，保证其规格与性能达标。此外，BIM技术还能与质量检测设备相融合，即时采集施工过程中的质量检测数据，利于后续实施质量追溯。采用此种方法，可以切实提升施工质量，减少由于质量问题而造成的返工时间和延误时间^[4]。

安全管理在施工过程中也非常关键。BIM技术可用于进行施工安全风险评定并制订安全措施。通过模拟施工时可能出现的危险情况，如高空作业、深基坑挖掘等情况，事先制定好安全防护方案，而且BIM模型可以和安全观测系统关联起来，随时掌握现场施工的安全情况，尽快察觉到潜在的风险并予以解决，切实提升施工现场安全运作的水平，减少安全事故发生的概率。

成本控制是施工过程中的关键任务，BIM技术通过材料用量的准确计算及施工进度模拟，为成本控制提供了有力支撑。而且，BIM技术还能同造价软件结合，及时更新工程造价的相关信息，从而为成本控制提供科学依据。利用BIM技术，可以有效地减小施工成本，提升项目的经济效益。

3. 竣工验收阶段。竣工验收阶段是排水泵站建造的最后一个阶段，此阶段BIM技术主要体现在形成竣工模型并管理验收资料上。

当施工完毕以后，BIM模型需更新为竣工模型以体现实际施工状况。竣工模型包含建筑物的几何信息，而且覆盖施工过程中的变更信息、材料信息以及设备信息等内容，通过竣工模型，运维管理人员可以全方位知晓排水泵站的建造情况，进而为后续的运维管理提供基础数据。建设竣工模型为排水泵站的运维管理提供了精确且完备的信息支撑，有益于提升运维管理的效率与质量。

验收资料运作是竣工验收阶段的一项重要工作，利用BIM技术，可以将竣工验收资料与三维模型相关联，实现资料的可视化运作。例如：点击模型中的某个构件，就能看到该构件的验收资料、质量检测报告、施工记录等，这样既提升了验收效率，又方便日后查找和运作资料。采用BIM技术后，可以高效运作竣工验收资料并长久保存，从而为排水泵站的后续运行和维护提供有力支撑^[5]。

3 BIM技术在城市排水泵站运维管理阶段的应用

排水泵站的运维管理对于保障其长时间稳定运行十分关键。在运维管理阶段，BIM技术主要被用于建设运维数据平台以及改善核心运维场景。

3.1 运维数据平台构建

在运维阶段，BIM技术的关键应用在于构建一个综合的运维数据平台，这个平台把BIM模型与物联网(IoT)、大数据、云计算等技术融合起来，实现设备运行数据、环境检测数据、维修记录等相关信息的即时收集与分享。

在设备运行数据采集环节，在排水泵站的关键设备处可以对应安装传感器，如水泵的流量传感器、电机的温度传感器等，以此来即时获取设备的运行数据，这些数据依靠物联网技术发送到运维数据平台，并且与BIM模型中的设备部件相联系，管理者就可以清楚地看到设备的运行状况，从而及早察觉到异常情况。

运维数据平台还可整合设备运行数据之外的环境检测数据，如泵站内部的温度、湿度和水质等相关数据，随后通过对水质变化实施监测，便可以预先作出清淤及设备维护的部署，从而保障泵站得以正常运行。

3.2 核心运维场景的BIM技术应用

1. 设备管理。排水泵站的关键设备涵盖水泵、电机和阀门等，这些设备的运作状况与泵站是否能正常运行密切相关，通过BIM技术，运维人员可以实施精准化的设备管理。

在BIM模型当中，各个设备构件均蕴含着大量的设备信息，运维人员通过BIM平台可以直接查看设备信息，立即定位设备所在位置，从而提升设备管理的效率。

物联网技术可以采集设备的运行数据并即时传送到BIM平台，运维人员通过BIM平台可随时查看设备的运行情况、水泵的流量、电机的功率等。一旦设备发生异常，系统就会自动发出警报，告知运维人员尽快解决。

最后，按照设备的运行数据以及维修记录，BIM平台可以自行生成设备维护计划。就拿水泵来说，按照其累计运行时长，系统会自动告知运维人员执行定期维护，如此一来，既提升了设备的可靠性，又减少了设备发生故障的可能性。

2. 故障诊断与应急处置。排水泵站在运行过程中可能会出现各种故障，及时准确的故障诊断和应急处置对于保障泵站的正常运行至关重要。

BIM平台整合了设备运作数据和环境监测数据，运维人员便能立即找到故障所在。例如：水泵流量出现异常，运维人员通过BIM平台查阅水泵的运作数据及相关设备状态，从而快速判定故障缘由。

当故障产生时，BIM平台能提供应急处理方案。例如：泵站因设备故障致使排水受阻，BIM平台会根据故障状况给出备用设备启动方案，保障排水系统正常运作。

3. 改造与扩建。随着城市的发展，排水泵站可能需要进行改造或扩建以满足新的需求。BIM技术在改造和扩建过程中具有显著优势。

在改造期间，BIM技术可用于设计与考量改造方案，可在BIM模型中模拟改造完毕后的运行状况，以此来评价改造方案是否可行及其效益如何，如通过模拟提升水泵之后的排水量来看改造方案能否达到新的排水要求。

在扩建施工期间，BIM技术可用于施工进度管理和质量把控，把扩建施工进度与BIM模型关联，及时更新施工进度信息，促使扩建工程按期竣工。利用BIM模型所含的详细信息，对扩建施工开展质量检测，保证施工质量达标。

当改造和扩建完毕之后，BIM模型要立即执行更新操作以体现新的设备与设施信息，通过BIM平台，运维管理人员可以立即得到改造和扩建以后的泵站信息，从而为后续的运维管理提供支撑。

4 结束语

随着城市化进程不断加快，城市排水泵站的建设以及运维管理面临更多挑战。BIM技术是一种先进的数字化技术，为排水泵站的全生命时段运作提供了有力的技术支撑。在设计阶段执行协同设计并加以优化，在施工阶段实施精准化运作，在运维阶段进行智能运维。BIM技术明显改善了排水泵站的建设质量及其管理效率。未来，随着BIM技术持续发展，应用不断深入，它在城市排水系统中的作用会越发关键，从而有力地推动城市的可持续发展。

参考文献：

- [1] 朱东阳.基于BIM技术的泵站全生命周期管理优化研究[J].水利科技与经济,2024,30(08):100-105.
- [2] 宋琴,郭延辉,李海鸿,等.BIM在大型水质净化厂超大超深基坑工程中的应用研究[J].施工技术(中英文),2022,51(23):14-18.
- [3] 周春煦,林伟,朱九峰,等.基于BIM技术的小型泵站全生命周期优化研究[J].工业技术与职业教育,2021,19(04):6-8.
- [4] 李尚林,郭维东,徐伟,等.BIM技术在高校建筑结构教育优化中的应用[J].农业科技与装备,2019(06):81-83.
- [5] 王步新.BIM技术在大树刘泵站中的应用[J].河北水利,2019(04):38-39.

电气自动化技术在电力工程中的应用探析

李雪峰，田 坤

(陕西省电力有限公司子洲县供电公司，陕西 榆林 718400)

摘要 本文阐述了电气自动化技术在电力工程发电、输电、变电、配电等环节的具体应用方式，分析该技术在提高电力工程运行效率、增强电力系统稳定性及节省运维成本等方面的优势，并且剖析其面临的技术标准不统一、网络安全风险和人才短缺等挑战，然后对智能化、信息化、绿色化的未来发展趋势展开论述，旨在为电力工程领域的技术发展与应用提供参考。

关键词 电气自动化技术；电力工程；火力发电；水力发电；智能变电站

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.014

0 引言

电气自动化技术的快速发展，推动了电力工程开展水平的提升。现如今，由于社会用电需求的不断增多，电力系统的规模也明显扩大，其复杂化特点日渐突出，增大了电气自动化技术在电力工程中应用的难度，制约着电气自动化技术的进一步发展和应用。因此，研究电气自动化技术在电力工程中的应用，探讨其发展趋势，旨在使电力工程领域的技术能够取得进步，切实维护社会供电状态的安全与稳定，促进电力事业的稳步发展。

1 电气自动化技术在电力工程各环节的具体应用

1.1 电气自动化技术在发电环节的应用

1.1.1 电气自动化技术在火力发电中的应用

电气自动化技术在火力发电中发挥了关键作用，对于提高发电效率、加快设备安全运行及减少能耗及污染来说是重中之重。以锅炉燃烧优化为例，借助自动化技术可以准确控制燃烧过程，通过传感器持续性监测炉膛内的温度、氧量及燃料和空气的流量等一系列重要参数，同时传输到自动化控制系统。系统按照预设的算法和模型对数据进行处理，以此调整燃料和空气的供给量，使得燃料得到充分燃烧，进一步增加整体的燃烧效率^[1]。例如：采用现代化的燃烧优化算法能够根据各煤种和负荷需求来改进风煤配比，让燃烧过程变得越来越稳定，减少飞灰含碳量，控制能源浪费等问题的出现，使火力发电系统实现对能源的高水平利用。

1.1.2 电气自动化技术在水力发电中的应用

在水力发电中，水轮机调速是水力发电自动化的一个重要环节。自动化调速系统可以按照电力系统的负荷变化以及水轮机的运行情况，灵活改变水轮机导水机构的开度，进一步完善水轮机的转速及其具体的输出功率。自动化调速系统采用现代化的控制算法，如 PID 控制等，再搭配高精度传感器以及执行机构，对水轮机进行科学有效的控制。当电力系统负荷上升时，调速系统增大导水机构的开度，让大量的水流加快水轮机旋转，增加水轮机转速以及输出功率；当负荷减少时，调速系统则减小导水机构的开度，降低水轮机的转速和输出功率，使得水轮机的转速一直保持在额定值上下，确保电力系统频率没有较大起伏^[2]。

1.2 电气自动化技术在输电环节的应用

1.2.1 电网调度自动化

电网调度自动化系统由自动化系统、主站系统以及数据通信网络系统组建而成。其中，自动化系统属于核心部分，在发电厂、变电站等节点设置传感器、智能终端等设备，不断采集电力系统运行的一系列数据并进行初步处理，为后续的调度决策提供基础信息；主站系统大多是在电网调度中心，主要负责信息汇总、处理、决策制定和指令下发等工作，其接收来自自动化系统采集的数据，运用计算机技术以及算法模型对电力系统的运行情况展开分析，预测运行趋势，然后采取高效的调度方案和控制方法。

1.2.2 输电线路监测与维护自动化

现阶段，输电线路规模正进一步扩大，运行环境

作者简介：李雪峰（1998-），男，本科，助理工程师，研究方向：电气工程。

也变得越来越复杂，利用传感器、无人机等技术对输电线路展开监测与自动化维护，是保障输电安全的关键措施。基于此，传感器技术发挥了关键作用，能够实现对输电线路的监测，在输电线上设置一系列的传感器，如温湿度传感器、振动传感器和应力传感器等，能够较为精准地掌握输电线路的实时运行状态，并了解环境参数等关键信息。其中，温度传感器主要是监测导线、接头处的温度变化情况，温度过高就表明线路过载或接触不良，发出预警信号提醒运维人员进行检查，防止温度过高造成线路破损；振动传感器则能够在输电线路出现振动状况时尽快感知，第一时间发现因风力、舞动等原因引起的振动，避免线路因长时间不断振动而疲劳损坏；应力传感器则是监测导线的受力情况，线路受到过大的拉力时快速发出警报，同时采取防护方法，以此保证线路实现稳定运行^[3]。

1.3 电气自动化技术在变电环节的应用

1.3.1 变电站自动化系统

变电站自动化系统由监控子系统、保护子系统、通信子系统等相关部分所构成，这些部分彼此协作，对变电站设备进行全方位的监管。以监控子系统为例，其在变电站内设置一系列的传感器以及智能终端，用来采集电气设备具体运行参数及设备的运行信息等，实现对相应数据信息的快速处理，并尽快将其呈现在监控界面当中，推进数据信息的直观获取，使运维人员时刻掌握变电站的运行情况。

1.3.2 智能变电站

智能变电站是在传统变电站自动化系统的前提下，融合了现代化的信息技术、通信技术、智能控制技术等。在智能变电站运行期间，一次设备智能化技术，如智能变压器、智能断路器等得到了有效应用，智能变压器通过内置的传感器和智能控制系统，可以测变压器的运行状态并基于此优化变压器的运行方式；智能断路器则拥有智能化的操作控制以及状态监测功能，可以按照电网的运行情况完成分合闸操作，并且监测断路器的触头磨损、机构状态等信息，对断路器展开预防性维护。

1.4 电气自动化技术在配电环节的应用

1.4.1 配电网自动化系统

配电网自动化系统由配电自动化主站、子站、终端设备及通信网络组成。其中，配电自动化主站是系统的核心，主要对整个配电网的运行进行监控、分析和决策，其接收来自子站和终端设备上传的配电网运行数据并进行综合处理。建立配电网的数学模型以及

运行分析算法，主站可以评估配电网的运行状态，预测负荷变化趋势，采取行之有效的调度计划以及控制方法；主站还具有人机交互功能，为运维人员带来一目了然的操作界面，使其可以对配电网进行监控和操作。子站是连接主站和终端设备的中间环节，对终端设备上传的数据进行汇总和初步处理，然后将处理后的数据上传到主站；子站还接收主站下达的控制指令并转发至终端设备，以此对配电网设备进行远程控制^[4]。

1.4.2 分布式能源接入与微电网技术

在新能源产业的蓬勃发展下，分布式能源如分布式光伏、分布式风电和小型燃气轮机等得到了越来越多的应用，其接入配电网的规模进一步扩大，对配电网的自动化控制技术有着严格的要求。分布式能源具有分散布局、出力波动等特点，直接接入配电网会对电网的电压稳定、频率稳定及潮流分布造成一定影响，所以要借助电气自动化技术实现分布式能源的友好接入及管理。

在分布式能源接入配电网的自动化控制方面，核心技术包括分布式能源出力预测、接入点电压调节、潮流优化控制及故障穿越控制等。部署传感器和智能监测终端，采集分布式能源的出力数据、接入点的电压电流数据，还有配电网的运行工况数据，应用通信网络传输到配电网自动化主站系统。然后主站系统利用大数据分析和人工智能算法对分布式能源的出力进行短期和超短期预测，为配电网的调度运行提供依据。在分布式能源出力波动作用下，容易引发接入点电压波动问题，自动化控制系统通过协调控制分布式能源自身的调节装置和配电网中的无功补偿设备，实现接入点电压的实时调节，保证电压稳定在允许范围内。

2 电气自动化技术在电力工程应用中的优势

2.1 提高电力工程运行效率

在发电环节中，自动化控制系统可以按照电力负荷的实际变化情况，灵活调整发电设备的运行参数，如火力发电中的锅炉燃烧控制、汽轮机调速控制，水力发电中的水轮机导水机构开度调节，以及风力发电中的桨距角调节、功率控制等，保证发电设备一直处于最佳运行的状态下，增加整体的发电效率。

2.2 提高电力系统稳定性以及可靠性

多样化的传感器以及监测设备是电气自动化技术进行实时监测的前提条件。它们被大范围应用在电力系统的不同环节，可以持续性采集电力设备运行参数以及状态信息，如电压、电流、振动等。接着，数据借助通信网络快速传输到自动化控制系统中，为系统

分析、决策提供数据依据。自动化控制系统利用现代化的算法和模型，实现对采集数据信息的快速处理，当系统检测到电力设备的运行参数超出正常范围或出现异常状态时，能够及时预警，使运维人员获取关键信息，提高重视程度^[5]。

2.3 节省整体运维成本

在电气自动化技术的帮助下，还能够实现高水平运维管理，支持对电力设备的远程化监控与管理，实时掌握相应设备的运行状况以及参数，不用多次到现场亲自巡检，有效节省了人力成本的支出。应用自动化系统，运维人员能够在监控中心对电力设备进行远程操作和调节，如远程控制断路器的分合闸、变压器的分接头调节等，保证了工作效率，也降低了人为因素带来的安全风险。

3 电气自动化技术在电力工程中的发展趋势

3.1 智能化发展趋势

在电力系统故障诊断过程中，人工智能技术所具备的应用潜力是不容忽视的。以往的故障诊断方法往往是凭借人工经验以及阈值判断，无法应对复杂的电力系统故障情况。而人工智能技术，如神经网络、专家系统等能够深入研究电力系统运行期间产生的数据，同时建立一套完善的故障诊断模型。在监测到电力设备的一系列运行参数，如电压、电流和振动等，人工智能系统就可以马上判断出设备有没有出现故障问题并识别故障类型、位置。除此之外，在变压器故障诊断中，利用神经网络对变压器的油色谱数据、绕组温度以及局部放电等信息展开分析，可以在短时间之内找到变压器内部的隐藏故障隐患，满足故障的早期预警和精准诊断要求，最大限度地增强电力系统的可靠性。

3.2 信息化发展趋势

在电力数据存储环节，大数据技术为数以万计的电力数据提供了有效的存储处理方案。通常来说，电力系统在运行期间会产生庞大的数据，如发电、输电、变电和用电等环节的数据，不仅数据量大、数据类型多样，而且数据产生的速度也极为迅速。以往的数据存储手段已经满足不了电力数据存储的需求，而大数据技术采用分布式存储架构，如 Hadoop 分布式文件系统（HDFS）等，能够实现对数据的分散化储存，以此提高数据的高可靠性、高扩展性^[6]。不仅如此，大数据技术还支持存储结构化、半结构化和非结构化数据，满足电力系统中各个类型数据的存储需求。应用大数据技术，电力企业能够科学存储并管理电力数据，为后续阶段的数据分析、挖掘工作奠定了强有力的基础。

3.3 绿色化发展趋势

新能源发电，如太阳能、风能以及生物质能等都有有着清洁、可再生的优势，是未来能源发展的关键趋势。但是新能源发电往往有间歇性、波动性和随机性等缺陷，给电力系统实现平稳运行造成了极大挑战。例如：太阳能光伏发电会被光照强度、时间所干扰，风力发电受风速、风向的影响较大，导致新能源发电的输出功率不稳定，给电能质量、可靠性带来了负面影响，无法有效维护电力系统运行的良好状态。

储能技术是应对新能源发电不稳定现象的重要措施，可以在新能源发电过剩时储存一部分的电能，然后在发电不足或电力需求高峰时快速释放出电能，以此调节电力供需平衡、平滑新能源发电输出曲线。一般来说，当前应用较多的储能技术有电池储能、抽水蓄能以及压缩空气储能等，其中，电池储能响应速度快、安装十分方便，在新能源发电领域得到大范围应用。例如：锂离子电池储能系统能够快速充放电，平抑光伏发电和风力发电的功率波动；抽水蓄能则储能容量大、使用时间长，常用于大规模储能以及电网调峰。

4 结语

随着科技的不断进步，电气自动化技术也紧随时代的发展脚步，推动了自身的转型升级。人工智能、大数据、云计算等一系列新兴技术将与电气自动化技术快速融合，促进电力系统智能化的提升，也能够有效提高系统的运行效率，助力电力系统的可持续发展。相信在各方的共同努力下，电气自动化技术能够持续发展，在电力工程中得到更高水平的应用，更好地维护供电良好状态，切实满足社会用电需求，为推动社会的发展提供关键支持。

参考文献：

- [1] 林辉辉. 电气自动化技术在电力设备节能管理中的创新应用 [J]. 电力设备管理 ,2025(20):265-267.
- [2] 王爱斌. 电气自动化技术在电力系统生产运行中的应用 [J]. 光源与照明 ,2025(08):242-244.
- [3] 臧传星,王文清,陈家辉. 电力工程中电气自动化技术的分析和应用 [J]. 现代工业经济和信息化 ,2025,15(07):127-129.
- [4] 闫洪起,丁保贺. 电气自动化在电力工程技术中的应用 [J]. 光源与照明 ,2025(01):210-212.
- [5] 刘冰松. 电气自动化技术在电力工程建设中的运用探析 [J]. 仪器仪表用户 ,2025,32(01):93-95,98.
- [6] 胡娜,仇培飞. 电气自动化技术在电力系统运行中的应用 [J]. 自动化应用 ,2024,65(S2):29-31.

电力系统电气工程施工问题分析与解决对策研究

李淑琳

(和远电力建设有限公司, 江苏南京211500)

摘要 电力系统电气工程施工是保证电力网络稳定安全运行的重要一环, 技术含量高、工况多变、安全标准严格。本文结合工程实践, 针对施工设计与现场适配性、材料设备质量控制、施工工艺标准化、安全管理体系四个核心问题, 从设计脱离实际、质量参差不齐、操作不规范、安全控制薄弱等方面入手, 分析造成这些问题的原因和危害。在此基础上提出加强设计审查、建立材料准入机制、完善工艺规程、健全安全管理体系等具体的解决办法, 以期为提高电力工程质量、降低安全风险、保障系统运行可靠性提供有益参考。

关键词 电力系统; 电气工程施工; 材料设备; 施工安全管理

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.015

0 引言

电气工程施工是电力系统建设及改造的重要环节, 包含高压设备安装、线路敷设、继电保护调试等繁杂的技术流程, 而且存在户外作业、交叉施工、环境变量多等现实状况。目前, 新型电力系统的建设加快了, 新能源并网和智能设备的使用使得施工精度和可靠性有了更高的要求。但是实际施工过程中还存在设计与现场脱节、材料质量把关不严、工艺执行不规范、安全管理不到位等问题, 容易造成返工浪费、设备故障甚至安全事故。因此, 深入剖析这些问题的本质, 寻找科学有效的解决对策, 对提高电力工程施工质量、保证电力系统安全稳定运行有重大的现实意义和研究价值。

1 电力系统电气工程施工的特点与重要性

电力系统电气工程施工技术密集、工况复杂、安全严格、系统关联等特点十分明显。它涉及高压电气设备安装、电缆敷设、二次回路调试、接地系统创建等诸多专业领域, 需要融合电气、机械、自动化等诸多学科的技术, 对施工人员的专业水平和操作精度有着极高的要求, 施工场合包含户外露天、高空作业、地下管网等诸多环境, 容易受到气候条件、地质状况、周边设施等众多因素的影响, 工况动态多变, 电力工程直接关系到高压电能, 施工过程中一旦出现疏漏, 就会造成触电、设备烧毁、大面积停电等严重后果, 安全管控贯穿施工全过程^[1]。另外, 电气工程施工质

量直接影响电力系统运行效率和可靠性, 电气工程施工质量作为电力系统的“物理基础”, 其施工质量的好坏直接影响到设备的使用寿命和运行稳定性, 也关系到整个电力系统的供电能力和安全防护水平, 对于保证能源的持续供应、支撑新型电力系统建设、促进能源转型等方面具有不可替代的作用。

2 电力系统电气工程施工存在的问题

2.1 施工设计与现场条件不匹配, 导致返工与质量隐患

施工设计是电气工程施工的前期关键环节, 它的科学性以及适配性直接关乎施工进程和质量。目前部分设计工作存在重理论轻实践的问题, 设计人员没有深入进行现场勘查, 只根据图纸资料和通用规范来设计, 造成设计方案和实际工况严重不符。例如: 在城市配网改造工程中, 有的设计未对施工区域地下管网分布情况、周边建筑物结构、现有线路走向等实际状况进行调研, 造成设计的电缆敷设路径与燃气管道、给排水管网相冲突, 设备安装位置距周边建筑物安全距离不够; 有的设计对现场地质条件考虑不周, 在软土地基区域仍按常规基础设计, 易造成设备基础沉降; 有的设计未充分考虑施工可行性, 如高空设备安装吊装路径设计不合理, 施工机械无法进场^[2]。不匹配问题不但使施工单位中途更改设计, 拆除已施工的部分, 造成人力、物力、工期的浪费, 而且由于仓促更改, 使施工衔接不

作者简介: 李淑琳(1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

畅，留下设备固定不牢、线路绝缘破损、接地电阻不合格等质量隐患，给电力系统后续运行埋下安全隐患。

2.2 材料设备质量不稳定，影响系统运行可靠性

材料设备是电气工程施工的主要载体，其品质直接影响电力系统运行寿命及可靠程度。目前市场上一些电气材料和设备存在着质量好坏不一的现象，一些供应商为了降低成本，使用劣质原材料生产电缆、绝缘子、断路器等重要部件，造成材料的绝缘性能、机械强度、耐候性等指标不合格；部分设备生产企业没有严格按出厂检测程序进行检测，造成装配有缺陷、参数有偏差的设备进入施工环节。劣质电缆导体电阻超标准，绝缘层薄，运行中容易因为过载发热导致绝缘老化击穿；不合格的绝缘子抗污闪性能不好，潮湿时容易发生闪络事故；部分断路器的灭弧室密封性不好，容易造成灭弧失效而使设备发生故障。施工单位在材料设备采购环节缺乏完善的管控机制，部分采购人员受利益驱动选择低价劣质产品，进场验收环节流于形式，没有按照规定进行抽样检测和性能试验，不合格材料设备直接用于工程施工。质量不稳定的材料设备不但会影响电气工程施工质量，还会大大增加设备运行过程中故障率，影响电力系统供电可靠性，甚至造成大面积停电等严重后果。

2.3 施工工艺不规范，存在操作偏差与工序衔接问题

施工工艺的规范性是保证电气工程施工质量的关键因素，但是施工过程中还存在工艺执行不严、操作偏差大、工序衔接不畅等问题。部分施工人员缺少系统培训和实操经历，对施工规范、工艺要求认识不够深入，在操作时带有随意性。例如：电缆接头制作时，没有按照工艺要求进行剥切、压接和绝缘处理，造成接头接触电阻过大、绝缘性能降低，运行中容易发热烧毁；设备安装时，没有准确校准水平度和垂直度，或者紧固螺栓力矩不够，造成设备运行时振动超标，影响使用寿命；二次回路接线时，接线错误、端子松动等，造成继电保护误动作。同时工序衔接没有有效的协调机制，前道工序未经验收就进入下道工序，或者各专业施工交叉冲突，造成施工流程混乱^[3]。线路敷设未做绝缘测试就进行设备对接，隐蔽工程未经验收就覆盖掩埋，这些不规范行为不但会造成施工质量缺陷，还会增加后续维护难度，给电力系统安全运行埋下隐患。

2.4 施工安全管理薄弱，易发生安全事故

电力工程施工的高危性对安全管理提出很高的要求，但是部分施工单位的安全管理体系还存在很多薄

弱环节。首先，安全管理制度不健全，一些单位没有根据电气工程施工的特殊性来制定专门的安全管理规定，安全责任不明，造成安全管理形同虚设。其次，风险预控能力差，施工前没有进行全面的安全风险辨识，对高空作业、带电作业、交叉施工等高危环节的风险评估不足，缺少有效的防控措施。例如：带电作业场所缺少足够的安全隔离设施，高空作业没有做好防坠落措施，动火作业没有配备消防器材等。再次，安全培训不到位，部分施工人员没有进行安全培训就上岗，缺乏最基本的安全防护知识和应急处理能力，违章操作时有发生。最后，现场安全监管力度不够，安全员配备不足或者履职不到位，对施工过程中的违章行为不能及时发现、制止。这会造成电力工程施工安全事故频发，造成人员伤亡和财产损失，影响工程进度，严重时还会造成电网大面积停电，危及公共安全。

3 电力系统电气工程施工问题的对应对策

3.1 强化设计审查与现场勘查，提高设计与实际条件匹配度

为了应对设计和现场相脱节的情况，要构建“现场勘查—方案设计—多级审查—动态调整”的全流程设计管理体系。首先，加强现场勘查的深度和广度，设计人员要深入施工一线，了解施工区域的地质情况、地下管网分布、周边建筑物结构、现有线路走向、气候环境等实际情况，采用无人机测绘、地质雷达探测等先进技术手段，准确采集现场数据，为设计提供可靠依据。其次，根据现场实际情况和施工的可行性来制定个性化的设计方案。例如：在地质条件复杂的区域采用不同的设备基础设计，在城市密集区优化电缆敷设路径来避开地下管网的冲突^[4]。再次，建立多级设计审查制度，成立由设计方、施工方、监理方、运维方等多方面专业人员组成的设计审查组，从技术可行、施工方便、安全可靠、经济合理等各个角度对设计方案进行全面的审查，着重查找设计与现场不相符的问题。最后，设立设计动态调整机制，施工期间若出现现场条件发生变化的情形，设计人员应立即赶赴现场勘察，根据实际情况对设计方案作出调整优化，并按变更审批程序办理手续，保证设计方案与现场条件始终保持高度契合，从源头上削减返工和质量隐患。

3.2 建立材料设备准入机制，加强质量检测与供应链管理

保证材料设备质量要从采购、验收、使用全流程建立闭环管控体系。首先，建立材料设备准入机制，

施工单位应制定合格供应商名单，以资质审核、业绩评估、样品检测等方式选择信誉好、质量可靠的供应商，并与供应商签订质量保证协议，规定材料设备的技术标准、检验要求及违约责任。其次，加强采购环节质量控制，实行阳光采购，防止利益输送，对重要设备、材料采取招标采购方式，选择性价比最好的产品。再次，严格执行进场验收和质量检测制度，材料设备进场时需要核对产品合格证、检测报告等质量证明文件，并按照规范要求进行抽样检测，重点检测电缆的绝缘性能、导体电阻，设备的电气参数、密封性能等关键指标，检测不合格的材料设备一律不得进场使用。最后，加强供应链全流程管理，对材料设备的生产、运输、存储等环节进行跟踪管理，防止运输过程中损坏、存储期间受潮、老化。此外，建立质量追溯体系，对每一批材料设备都进行编号登记，从而达到从采购到使用全过程的追溯目的，一旦发现质量问题，可以追溯源头、更换、整改等措施，保证材料设备的质量符合工程要求。

3.3 完善施工工艺规程，严格执行标准化施工流程

规范施工工艺要从制度建设、技术指导、过程控制三个方面入手。首先，完善施工工艺规程体系，根据新型电力设备、施工技术的发展，修订完善有针对性的施工工艺标准、操作细则，明确各个工序的技术要求、操作步骤、质量控制点、验收标准，如细化电缆接头制作、设备安装校准、二次回路接线等关键工序的工艺参数、操作规范。其次，加强对施工技术的指导和培训，定期对施工人员进行工艺标准、操作技能、质量控制等方面的培训，邀请技术专家现场指导，通过实操演练、案例分析等方式提高施工人员的专业能力及规范操作意识。同时，推行标准化施工流程，严格执行工序交接验收制度，上道工序必须经检测验收合格后方可进行下道工序，对隐蔽工程实行全过程旁站监理和验收签字确认制度，保证施工流程规范有序^[5]。最后，采用先进的施工技术和设备，如自动化电缆敷设设备、智能螺栓紧固工具、红外测温检测仪器等，提高施工精度和效率，减少人为操作误差。另外，建立施工工艺质量追溯机制，对关键工序施工过程进行记录存档，便于之后的质量排查和追溯，保证施工工艺全过程可控、可查。

3.4 健全安全管理体系，加强风险预控与现场安全培训

筑牢施工安全防线要创建“制度保障、风险预控、培训教育、现场监管”的全方位安全管理体系。首先，

健全安全管理制度，根据电气工程施工的高危性，制定高空作业、带电作业、交叉施工、动火作业等专项安全管理细则，明确各级管理人员和施工人员的安全责任，把安全责任层层分解落实到每一个岗位、每一个环节。其次，加强安全风险预控，在施工前进行全方位的安全风险识别，用风险矩阵法对识别出的风险进行评估分级，对高危环节制定专项安全施工方案和应急处置预案，组织演练。例如：对带电作业区域设置双重安全隔离设施，高空作业配备防坠落装置和应急救援设备，动火作业划定安全区域并配备消防器材。再次，加强安全培训教育，制定分层分类的安全培训计划，对新员工进行岗前安全培训，对在岗员工进行定期安全再培训，重点培训安全操作规程、风险辨识方法、应急处置技能等内容，提高施工人员的安全意识和自我防护能力。最后，加强现场安全监管，足额配备专职安全员，实行定点监管加流动巡查的方式，对施工全过程进行实时监管，重点对高空作业、带电作业等高危环节的违章行为进行排查，对排查出的安全隐患及时下达整改通知，跟进整改落实情况。

4 结束语

电力系统电气工程施工质量及安全事关电力系统是否能够稳定运行、保障能源供应，也是新型电力系统创建的重要基础。本文从设计管理、质量控制、工艺规范、安全管理四个方面，对电力工程施工过程中存在的设计与现场不匹配、材料设备质量不稳定、施工工艺不规范、安全管理薄弱等主要问题提出具体的解决办法。在实际工程应用时要根据项目的实际情况，灵活采取上述对策，持续优化施工管理流程，提高施工技术水平。

参考文献：

- [1] 王智超. 电力系统电气工程自动化的智能化运用 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(34):1-3.
- [2] 牟付海. 试论电力系统电气工程智能化技术的运用 [J]. 中国设备工程, 2024(18):26-28.
- [3] 孙凤玲, 张立鹏, 关博文. 电力系统电气工程自动化中 PLC 自动控制技术的运用 [J]. 科技资讯, 2024, 22(12): 37-39.
- [4] 邓兴彦, 季亚枫. 电力系统电气工程自动化的智能化应用分析 [J]. 产品可靠性报告, 2023(12):114-116.
- [5] 陈财星. 电力系统电气工程施工存在的问题及解决策略 [J]. 大众用电, 2021, 36(03):70-71.

供热供发电一体化技术在 电力工程中的应用及实践

陈 宇

(南通苏源天电检修安装工程有限公司, 江苏 南通 226000)

摘要 为顺应“双碳”目标下能源高效利用与低碳转型的核心诉求, 供热供发电一体化技术借助能源梯级利用原理, 实现了电力生产与热力供应的协同优化, 极大地提升了能源利用效率, 降低了污染物的排放量。本文从技术原理入手进行探讨, 全面阐述了一体化技术的核心机组种类、能量转换原理; 结合电力工程中的典型应用场景, 通过实际工程案例分析其技术选型及运行效果, 深入探讨了机组灵活调节、能源梯级利用等关键技术面临的难点及应对策略; 并从技术、经济、环境三维度对效益展开评估, 最后对该技术未来与新能源融合以及智能化升级等发展方向进行展望, 以期为电力工程中一体化技术的规模化应用及优化提供技术参考。

关键词 供热与发电一体化; 能源梯级利用; 城市集中供热; 工业园区能源供应; 新能源互补

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.016

0 引言

在全球能源危机与气候变化的双重压力下, 我国明确提出“2030 碳达峰、2060 碳中和”战略目标。电力行业作为能源消耗及碳排放的核心领域, 亟需从传统高耗能、高排放模式转型为高效化、低碳化模式。传统燃煤火电项目的能源利用效率仅维持在 35% ~ 40%, 大量余热通过冷却塔排放, 造成了较为严重的能源浪费; 而单一供热系统则需额外消耗一次能源, 存在能源消耗叠加的问题。

供热与发电一体化技术(简称“热电一体化技术”)以“能源梯级利用”为核心, 将发电过程中产生的中低温余热回收用于供热, 实现“电—热”协同供应, 能源总利用效率可达到 80% 以上, 是电力工程实现节能降碳的关键技术手段。该技术已广泛应用于城市集中供热、工业园区能源保障、新能源互补系统等场景, 成为推动电力行业绿色转型及能源结构优化的重要支撑。本文基于热电一体化技术的核心原理, 结合工程实践案例, 深入探究其在电力工程中的应用要点、关键技术及综合效益, 为技术推广和优化升级提供理论与实践依据。

1 供热供发电一体化技术核心原理

1.1 技术本质: 能源按梯级利用

热电一体化技术的核心逻辑是破除“发电与供热”彼此分离的模式, 根据能量品质的不同实施梯级分配:

优先用高品位能量(燃料化学能)来发电, 满足电力负荷需求; 发电时产生的中低品位余热(如汽轮机排汽、锅炉烟气余热), 借助余热回收系统转化为热力, 供应工业生产及居民采暖需求。

与传统火电“仅发电”或“仅供热”模式相较, 梯级利用模式明显降低了能量的流失, 实现了一次能源的最大化利用^[1]。

1.2 核心机组类型及工作机制

热电一体化技术的核心设备是热电联产机组, 按热力循环方式可分为背压式、抽凝式及可调抽背式三类, 其技术特性与适用场景存在显著差异, 见表 1。

1.3 辅助系统构成

完整的热电一体化系统除核心机组外, 还包含辅助支撑系统, 大体分为三类:

1. 余热回收系统: 包含烟气余热换热器、汽轮机排汽换热器、凝结水回收装置, 用于截获发电过程各环节产生的余热。

2. 热力输送系统: 由供热管网、板式换热器及高温水箱、相变储热器等储热装置构成, 实现热力的平稳输送与负荷缓冲。

3. 控制系统: 采用 PLC/DCS 智能控制系统, 实时监测电力/热力负荷需求, 动态调整机组抽汽量、燃料供应量及管网流量, 使系统供需达到平衡状态。

作者简介: 陈宇(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

表1 背压式、抽凝式及可调抽背式技术特性对比

机组类型	工作机制	关键参数	优点	缺点
背压式机组	汽轮机排气直接用于供热，排气压力 $0.3 \sim 1.2 \text{ MPa}$ ，无凝汽器冷却损失	排气温度 $250 \sim 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$	能源效率高（85% ~ 90%），结构简单、运维成本低	发电负荷与供热负荷强耦合，灵活性差
抽凝式机组	从汽轮机中间级抽取部分蒸汽供热，剩余蒸汽进入凝汽器冷却发电	抽汽压力 $0.1 \sim 0.8 \text{ MPa}$ ，抽汽量可调节	供热与发电负荷解耦，调节灵活性高	存在凝汽损失，效率略低（75% ~ 85%）
可调抽背式机组	结合抽凝式与背压式优势，抽汽量 $0 \sim 100\%$ 可调，背压范围 $0.2 \sim 1.5 \text{ MPa}$		兼顾效率与灵活性，适应多工况运行	设备复杂度高，初始投资大

2 供热供发电一体化技术在电力工程中的应用场景

2.1 城市集中供热工程

城市集中供热是热电一体化技术最成熟的应用场景。针对城市居民采暖及商业建筑供热的规模化需求，通常采用大型抽凝式或背压式热电联产机组作为热源，结合环状供热管网实现热力覆盖。

1. 技术要点：机组选型需匹配城市供热负荷峰谷差异，优先采用抽凝式机组保障整体灵活性；供热管网采用“长距离高温水输送 + 区域换热站”模式，供水温度维持在 $110 \sim 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，回水温度为 $60 \sim 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，降低长距离输送能耗；配置大容量储热装置，平衡日间与夜间的负荷起伏，减少机组频繁启停次数。

2. 典型应用：北方某省会城市筹备的热电一体化项目，采用 $3 \times 350 \text{ MW}$ 抽凝式机组，配套供热管网总长度 280 km ，覆盖供热面积 2200 万 m^2 。项目借助智能负荷预测系统，灵活调节抽汽量，冬季采暖期机组总效率达 82.5%，较传统区域锅炉房供热，节能效果超 30%。

2.2 工业园区能源供应工程

工业园区对化工、制药、纺织等行业存在稳定的工业用汽及电力需求，热电一体化技术可实现“电—汽”同步供应，满足多品位能源需求。

技术要点：按工业用汽参数（压力 $0.5 \sim 4.0 \text{ MPa}$ 、温度 $200 \sim 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ）选型机组，优先采用背压式机组提升效率；设计构建多抽汽口机组，供给不同等级蒸汽，贴合不同工艺需求；配套增设余热回收装置，回收锅炉烟气余热用于预热锅炉给水或加热生活热水，进一步提升能源利用效率^[2]。

2.3 新能源互补一体化工程

针对风电、光伏等新能源发电的波动与间歇特性，热电一体化技术可与新能源系统耦合，通过“新能源发电 + 热电联产调峰 + 储热装置”模式，实现能源稳定供应目标。

技术要点：给予新能源发电优先上网权，热电联产机组承担调峰任务，当新能源发电出力不足时，机组提升发电负荷，同时保障供热；配置大容量蓄热装置，储存新能源出力充足时多余电能转化的热能，或热电联产机组的剩余热量，应对新能源出力波动；采用虚拟电厂技术，实现新能源、热电机组与储热装置的协同调配。

3 供热供发电一体化技术难点与解决方案

3.1 机组灵活性调节难题

3.1.1 难点分析

热电一体化机组面临“发电负荷—供热负荷”的耦合矛盾：背压式机组效率较高，但灵活性欠佳；抽凝式机组灵活性有所提升，却存在凝汽损失问题。冬季供热高峰时，机组需将供热保障置于首位，可能导致发电调峰能力不足；夏季供热需求较少时，机组工作效率下降，甚至出现“空转能耗”现象。

3.1.2 解决方案

一是采用可调抽背式机组。通过液压调节机构实现背压 / 抽凝模式转换，供热负荷稳定时切换至背压模式，负荷波动时切换至抽凝模式，兼顾效率与灵活性。二是配置储热装置。采用相变储热器或高温水箱，容量按日供热负荷的 15% ~ 25% 设计，冬季储存富余热量，供热高峰时释放，缓解机组负荷波动。三是优化控制策略。采用机器学习算法构建负荷预测模型，提前 24 小时预测电 / 热负荷，动态优化机组抽汽量与燃料供给量，实现从“以热定电”到“电热协同”的转变^[3]。

3.2 能源梯级利用效率提升难题

3.2.1 难点分析

传统热电一体化系统余热回收不充分，以锅炉烟气、汽轮机轴封漏汽、凝结水余热为主的中低品位能量未得到有效利用；各用户热力需求品位差异显著，能量匹配不合理导致损失增加。

3.2.2 解决方案

一是多级余热回收技术。在锅炉尾部设置低温省煤器回收烟气余热，在汽轮机轴封处装设漏汽回收装置，利用凝结水余热预热生活热水，实现全流程余热捕获。二是热力品位匹配优化。采用“高压抽汽供工业用汽+低压抽汽供居民采暖+烟气余热供生活热水”的多级供热模式，按用户需求品位等级分配能量，减少能量转化损失。三是循环系统优化。采用再热循环与回热循环融合的热力系统，提升汽轮机内效率；选用高效换热器，将换热端差降至 $5\sim8^{\circ}\text{C}$ ^[4]。

3.3 环保达标与低碳转型难题

3.3.1 难点分析

传统燃煤热电一体化机组面临 SO_2 、 NO_x 、粉尘等污染物超低排放要求；在“双碳”目标背景下， CO_2 减排压力进一步加大，亟需探索低碳化技术路径。

3.3.2 解决方案

1. 超低排放改造：采用“石灰石—石膏湿法脱硫+SCR脱硝+电袋复合除尘”技术，使 SO_2 排放 $\leq35\text{ mg/Nm}^3$ 、 NO_x 排放 $\leq50\text{ mg/Nm}^3$ 、粉尘排放 $\leq5\text{ mg/Nm}^3$ ，满足《火电厂大气污染物排放标准》（GB 13223-2011）要求。

2. 燃料替代：推广天然气、生物质能、氢能等清洁燃料热电联产机组，其中天然气热电机组 CO_2 排放强度较燃煤机组降低40%以上。

3. CCUS 技术融合：在大型燃煤热电项目中试点 CO_2 捕集、利用与封存（CCUS）技术，通过胺法捕集锅炉烟气中的 CO_2 （纯度可达99%以上），用于化工合成或地质封存，降低碳排放^[5]。

4 供热供发电一体化技术应用效益评估

4.1 技术效益

1. 能源利用效率显著提升：热电一体化项目整体的能源利用效率达到75%~90%，与传统火电（35%~40%）相比提升到2倍以上，较分散供热（60%~70%）提高15%~20%。

2. 供应可靠性增强：通过采用储热装置和多机组冗余设计，供热可靠性超99.5%，发电负荷调节区间拓展至30%~100%，适配各类负荷需求。

3. 系统灵活性优化：采用可调抽背式机组与智能控制技术，使系统响应时间缩短至分钟层级，可适应电网调峰及负荷起伏需求。

4.2 经济效益

1. 运营成本降低：以余热回收替代传统供热的燃料消耗，单位供热成本降低30%~50%；因机组效率提

升，单位发电煤耗降至 $250\sim300\text{ g/kW}\cdot\text{h}$ ，较传统火电降低 $50\sim80\text{ g/kW}\cdot\text{h}$ 。

2. 投资回报可观：大型热电一体化项目一般投资回收期为5~8年，工业园区项目因负荷稳定，投资回收期可缩短至4~6年；分布式项目虽初始投资较高，但可省去电网接入成本，投资回收期约为6~10年。

3. 政策红利叠加：可获得国家可再生能源补贴、热电联产电价优惠、碳排放权交易收益等政策扶持，进一步提升项目盈利水平。

4.3 环境效益

1. 污染物减排显著：完成超低排放改造的燃煤热电一体化机组， SO_2 、 NO_x 、粉尘排放强度较传统火电降低60%~80%；天然气机组几乎无颗粒物排放， NO_x 排放强度 $\leq30\text{ mg/m}^3$ 。

2. 碳减排效果突出：与传统模式相比，单位能源供应的 CO_2 排放强度降低40%~60%，1台350 MW热电联产机组每年可减排 CO_2 约100~150万吨。

3. 能源结构优化：推动天然气、生物质能等清洁燃料替代煤炭，促进新能源消纳，助力能源结构低碳化转型。

5 结束语

供热供发电一体化技术基于能源梯级利用原理，通过核心机组与辅助系统的协同设计，实现了电力、热力的高效协同供应。该技术已在城市集中供热、工业园区能源保障、新能源互补、偏远区域能源自主供应等电力工程场景广泛应用，通过攻克机组灵活性调节、能源梯级利用效率、系统集成控制等关键技术难题，显著提升了能源利用效率，降低了运营成本和污染物排放，是电力行业实现节能降碳、推进绿色转型的核心技术路径。

参考文献：

- [1] 姜德健, 伦国峰. 电力工程中供热供发电一体化技术的能效分析与提升策略 [J]. 新潮电子, 2025(04):91-93.
- [2] 翟兴哲. 多工况下高低压旁路灵活性供热技术研究与应用 [J]. 电力设备管理, 2025(02):117-119.
- [3] 韦宗春. 电气自动化技术在电力工程中的应用研究 [J]. 通讯世界, 2024, 31(06):118-120.
- [4] 陆水锦, 莫育杰. 考虑电气转换及储能一体化的 SOFC 热电联供技术优化 [J]. 工业加热, 2022, 51(06):60-64.
- [5] 白云鹏. 分布式太阳能光伏发电站与建筑一体化技术分析 [J]. 电力设备管理, 2023(06):227-229.

抽水蓄能机组典型故障机理分析与检修关键技术研究

陈登会

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 抽水蓄能电站作为电力系统中调峰、调频与应急备用的重要支撑, 其机组运行的安全性与稳定性直接影响整个系统的调节能力。在实际运行中, 机组常伴随频繁启停、高负荷切换等复杂工况, 导致导水机构、电气系统及转动部件频发故障。本文聚焦抽水蓄能机组运行中的关键部位失效特征, 依托案例数据剖析裂纹扩展、振动失稳与润滑冷却异常等典型故障机制, 并对关键检修技术的实际应用路径展开研究。研究结果表明, 振动信号识别、无损检测手段与智能巡检系统是检修提效的关键, 有助于构建更加高效、精准的运行保障体系。

关键词 抽水蓄能; 机组故障; 机理分析; 关键检修; 运行保障

中图分类号: TM31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.017

0 引言

抽水蓄能作为当前电力系统中调节能力较强的储能形式之一, 其运行稳定性对新能源接入、电网安全与能效优化具有不可替代的作用。随着装机容量不断扩大与系统负载快速波动, 机组在高频启停与宽幅变工况中运行时间持续增长, 导致内部部件疲劳累积、振动幅值升高、故障频率明显上升。尤其在导叶控制、水轮转子、电气调节系统等关键环节中, 隐蔽性故障逐渐增多, 检修难度显著加大。针对这一现象, 需在明确故障演化路径的基础上重构技术响应机制, 构建具有预测性与精准性的检修方案, 从而提升设备可用率与运行安全性。

1 抽水蓄能机组典型故障机理分析

1.1 导水机构与水轮机系统常见故障

导水机构是调节水流方向与速度的重要装置, 主要由导叶、连杆、油压控制装置等构成。在频繁启停状态下, 导叶因持续承压而出现卡涩、偏移或局部变形, 运行时水力不均引起振动增幅, 造成调节响应迟缓。部分电站存在油压控制装置老化、密封不严的情况, 导致执行力不足, 调节行程误差偏大, 极易在高负荷下引起系统水击现象。连杆轴销长期运行磨损后会出现间隙积累, 连带引发导叶群动作不同步现象, 影响水力均衡, 增加转轮冲击负担。水轮机转轮叶片因结构复杂且承受强水力冲击, 是最容易发生疲劳破坏的部件之一。在长时间高转速运行中, 叶片受力点集中,

极易在焊缝、弧根处产生微裂纹。裂纹初期难以察觉, 但伴随流体激振持续作用, 会逐步扩展至临界尺寸, 出现频闪振动或水力脉动增大现象。

1.2 电气系统故障表现及其诱因

抽水蓄能机组的电气系统包含主变压器、励磁装置、高压断路器等关键设备, 是保证发电与调相切换的核心枢纽。主变压器在运行中承受较大热负荷与电应力, 若绝缘油长期未更换, 其击穿电压显著下降, 局部绕组处会出现电晕放电现象。在环境湿度大、温差变化快的情况下, 容易出现匝间绝缘薄弱区热崩溃, 进而引发绕组烧毁或强制停机。励磁系统调节器在负荷快速波动时频繁切换功率模块, 部分老旧机组存在电压反馈延迟问题, 导致励磁电流波动剧烈, 干扰同步状态保持。此类扰动在特定工况下可能导致电网侧谐波异常升高, 间接触发电气保护误动作。变速抽水蓄能机组的突出特点是采用交流励磁方式, 励磁电压高达数千伏, 受转子旋转离心力影响, 转子绕组发生短路故障概率较定子绕组更高^[1]。高压断路器作为机组电气连接的重要执行部件, 频繁动作状态下易出现灭弧触头过热、弹簧机构疲劳甚至动作失灵现象, 造成切换过程电弧延长、电流冲击异常, 严重时还会波及母线系统安全。

1.3 润滑与冷却系统异常工况机理

润滑系统直接关系到机组核心旋转部件的摩擦控制与温升状态, 在高负荷长周期运行中对运行稳定性

作者简介: 陈登会(1995-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 抽水蓄能机组检修。

影响显著。轴承座内润滑油若出现压力不稳或杂质混入，会在高速旋转时造成油膜断裂，轴颈部位出现干摩擦，极易引起金属表面拉伤或烧蚀。部分电站未定期清洗回油通道，积碳或杂质堵塞使回油不畅，油温升高，形成闭环恶性循环。冷却系统主要承担发电机定子绕组、轴承、励磁机等热源部件的散热任务。冷却器若因水垢堆积或微生物堵塞，其换热效率将明显下降，部分机组未设置冷却水流量监测装置，温升报警滞后，导致部分绕组区域处于长期过热状态。水冷回路中的管接头和软连接部位在机组启停频繁冲击下容易松脱，产生轻微渗漏甚至水汽短路问题，间接影响电气系统绝缘安全。

2 抽水蓄能机组关键部位检修技术分析

2.1 振动特征识别与故障预警技术手段

抽水蓄能机组在高水头、高转速工况下运行时，轴系、转轮及定子支撑结构会产生不同程度的振动波动，振动信号便成为研判机组健康状态的重要来源。为增强预警能力，运行单位普遍在主轴承、推力轴承和机架关键节点布设高频加速度传感器，采集不同方向的振动幅值和频率成分。依托小波包分解、短时傅里叶变换等时频工具，可从复杂噪声中剥离出早期异常的特征带^[2]。

2.2 导水及转动部件的无损检测方法

导叶、叶片及连接销轴长期承受水力冲击与交变应力，是最容易出现结构性失效的部位。为准确掌握材料状态，检修过程中广泛采用超声波检测、磁粉检测和涡流检测等无损方法。超声波检测适用于叶片厚度较大的区域，通过不同角度的探头扫描，可确定裂纹长度与走向。磁粉检测更适合导叶销轴、焊缝等表面开裂敏感区域，磁场吸附效果能清晰呈现细微缺陷。涡流检测则多用于导叶衬套和金属接触面，能在短时间内完成大面积排查。部分机组还可以建立缺陷档案，对每次检测结果进行编号比对，便于跟踪裂纹扩展速度与发生位置，为后续维修计划提供依据。

2.3 智能辅助系统在检修环节的集成应用

在复杂结构及狭窄空间条件下，传统检修较依赖人工经验，难以对关键部位做到全面覆盖。为提高检修精度，一些电站开始构建数字化辅助系统，在三维建模基础上建立机组数字孪生模型，并与运行参数进行实时联动。检修人员在系统中可进行虚拟拆解、部件定位和风险路径规划，从而减少现场误操作概率。巡检阶段引入可适应潮湿环境的便携式终端，能同步调用历史缺陷记录、振动趋势与温升信息，提高判断

准确度。部分区域还可以布设小型巡检机器人，用于拍摄深腔部位的结构状态，并返回温度、湿度及振动数据，实现人工达不到的深度巡查。借助 CMMS 系统完成工单流转与材料匹配后，检修作业形成了从信息采集到记录归档的连续闭环，检修质量与响应速度得到提升^[3]。

3 抽水蓄能机组运行保障的检修优化路径

3.1 建立部位分类精细化的检修分级机制

抽水蓄能机组结构复杂、运转频繁，不同部件的磨损规律、失效模式和运行风险存在明显差异。想要增强检修响应的精准性，就需按“风险等级+运行状态+结构特征”建立分级管理机制。一级结构如主轴、转轮叶片等应纳入高频巡检清单，制定专门的监测与检修周期，部分电站已采用月度微震检测与季度开盖检查相结合的制度。二级结构如导叶机构、冷却水回路等需结合负荷变化与水质波动规律，制定弹性维护窗口，非关键部位如外部冷却风机、辅助轴封部件则采用停机集中检查方式^[4]。检修级别与运行状态动态挂钩，对振动异常、温升偏高等数据实行“预警—确认—干预”三段式流程，从源头压缩风险扩散空间。

3.2 构建检修与运行数据融合的诊断平台

要实现提前介入、快速响应，需整合振动、电流、油温等运行参数与历史故障信息，构建一体化诊断平台。平台应嵌入数据清洗、特征提取与异常模式识别模块，具备趋势判断和风险预测能力。部分单位可以试点将报警频次与实际检修内容进行交叉对比，建立了“数据可信度评分”机制。检修人员在接收到系统推送的重点部位异常信号后，可直接查看对应历史维修记录、部件更换情况与检测图谱，缩短判断周期，此类系统不仅限于信息展示，又在于将技术判断逻辑嵌入算法内核，实现辅助决策的标准话。

3.3 优化人员配置与操作流程的联动模式

抽水蓄能机组检修往往涉及多工种协同作业，人员组织效率直接影响整体修复周期。建议以操作风险为导向，建立作业级别—工种组合—技能要求三位一体的人员调配机制。对高空、有限空间或高温作业区域，提前落实具备专项资质的人员清单与替补机制，确保现场任务在人员变动时不脱节。实际作业中可采用“技师带组、分段执行、全程复核”的流程，明确每个关键节点的责任人及检验标准，检修记录应由第三方抽查核验后归档。同时，建立故障处置时间节点表，从“发现—定位—拆检—复装—试运”全过程划分阶段任务，避免操作重叠、盲目等待等无效工时，压缩平均修复周期。

3.4 推动标准体系与应急预案的同步完善

机组长期稳定运行依赖于可执行、可追溯的技术规范与紧急响应机制。建议逐步建立各类检修作业的作业指导书、技术规程与检验标准，明确检修步骤、工具选型与合格判定依据，可推行“可视化检修包”制度，将操作卡、工器具、零部件与标准流程文件装入同一容器，提高现场规范执行力。在检修过程中，对新发现的结构缺陷或典型故障模式进行归档，实时更新标准文本，避免重复误判。针对突发性停机、水轮脱网、润滑系统失效等典型风险场景，应制定完整的应急预案，明确人员到位顺序、物资调配流程与应急恢复节点^[5]。

4 典型案例分析

4.1 案例背景与故障表现

某抽水蓄能电站在秋季高水头工况下，机组运行曲线呈现持续波动，主轴振动在部分工况点出现阶梯式上升，峰值接近保护整定线。运行日志记录显示，该机组在前一阶段承担了较密集的调峰任务，启停频次较往年同期增加约30%，导叶动作节奏随负荷变化出现轻微滞后。在现场巡视中，技术人员发现导叶连杆外侧金属面有明显干涩摩痕，润滑油回油口颜色偏深，说明内部可能存在油路污染或压力波动。该机组此前曾发生过轻度导叶不同步现象，运行部门判断此次故障可能同时包含机械结构疲劳、水力扰动与调节机构偏差等多重因素，需要从机电两个维度展开精确排查。

4.2 技术诊断与检修实施过程

检修团队依托机组原有振动监测网络，对主轴上下导、推力轴承外圈等关键节点布设临时高频传感器，以增强数据采样密度。在连续测取多工况振动波形后，时频审视结果显示倍频成分显著增强，并伴随少量高阶谐波漂移，这类特征通常与叶片局部不平衡或流道紊流加剧相关。进一步使用超声波探头对转轮叶片进行A扫与B扫联合检测，在两处弧根位置发现反射能量异常增强，判断为低深度疲劳型裂纹。对导叶机构的磁粉检测则在部分销轴连接区域呈现断续性色带，说明存在微小开裂，间隙量规测得的侧隙值较标准偏大。

为排除油路问题，技术人员对导叶伺服油缸进行压力校验，发现油压在调节过程中存在短暂下跌，进一步拆检发现过滤组件内杂质偏多，油质老化较明显。综合检修措施包括：对叶片裂纹区域进行局部打磨与补焊；更换磨损销轴及衬套；对导叶油缸完成抽芯检查与密封修复；对油路系统实施清洗并更换滤芯；在

复装过程中重新调整导叶同步配合角度。所有处理完成后，再依托数字测振平台开展复测，确认振动幅值及波形形态均恢复至正常参考区间，导叶动作时间差也回到可控范围。

4.3 效果评估与路径应用验证

机组重新进入负荷调节后，运行曲线表现平稳。振动监测数据显示，在连续满负荷运行阶段，主轴振动峰值较检修前下降约20%，倍频特征波段的能量分布明显收敛。导叶动作同步误差由检修前的0.35°降至0.21°，调节机构响应时间也更贴合调速系统设定值。水力室噪声明显减弱，低负荷段脉动声趋于稳定，冷却系统温升波动小于0.8℃，说明机组整体水力与热力环境得到明显增强。将检修前后数据录入诊断平台后，平台模型将该机组风险等级由“中等偏高”调整为“可控”，并在趋势预测中呈现较稳定的下降曲线。此次检修过程验证了“振动特征识别—无损检测—结构修复—动作校验—数字复核”这一路径的可行性，特别是在结构疲劳与控制偏差并存的情境下，数据融合与标准化检测手段为故障定位提供了高效支撑。

5 结束语

增强关键部件的故障识别能力与检修响应效率，不仅限于技术手段的叠加，又在于建立以数据驱动为核心的全周期协同机制。依托典型案例实践可知，故障特征的精准定位、有序执行的检修路径及标准闭环的复核体系，是保障机组高效运行的重要支点。未来应持续推进智能化检修平台建设，将运行数据、检修流程与风险预控机制深度融合，为抽水蓄能电站构建可预见、可跟踪、可干预的运行治理体系。

参考文献：

- [1] 陈俊,叶宏,李华忠,等.变速抽水蓄能机组转子绕组内部短路故障保护[J].中国电力,2021,54(12):121-127,136.
- [2] 王强强.基于本体的抽水蓄能机组故障知识获取与智能故障诊断[D].北京:华北电力大学(北京),2023.
- [3] 郁小彬,杨众杰,祁立成,等.抽水蓄能机组动静干涉与相位共振诱发振动故障机理及抑制方法研究[J].水电与抽水蓄能,2024,10(01):38-43.
- [4] 齐鹏,李永刚,马明晗,等.抽水蓄能机组励磁绕组匝间短路漏磁检测研究[J].电机与控制学报,2024,28(02):32-43.
- [5] 潘军伟,娄季献,吴龙,等.抽水蓄能电站机组无功功率过励限制技术优化设计[J].湖南水利水电,2022(02):83-87.

三相异步电动机用滚动轴承温升过高损坏的故障原因解析

张家春

(中擎电机有限公司(技术部), 安徽 六安 237000)

摘要 三相异步电动机是工业动力设备中使用最广泛的原动机, 它的工作可靠性关系到设备系统的安全性和稳定性。本文通过归纳三相异步电动机滚动轴承温升异常的典型表现, 结合润滑状态、装配工艺、负载变化、轴电流影响、环境因素等各方面对温升过高的原因进行详细分析, 并对温度监测、振动频谱、轴电流检测、润滑状态监测等诊断技术进行了系统的介绍, 最后提出针对性的预防和维护策略, 以期为电机现场维护人员和设备管理者提供技术参考。

关键词 三相异步; 电动机; 滚动轴承; 故障诊断

中图分类号: TM32

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.018

0 引言

在现代工业体系中, 三相异步电动机由于结构简单、运行可靠、成本适中, 被广泛应用于风机、水泵、压缩机、输送机械等设备中。滚动轴承是电机内部摩擦副的重要部件, 它支撑着转子, 承受径向和轴向的载荷, 还要保证转动平稳。所以, 轴承运转状态直接决定了电动机的寿命和效率。轴承温度是电机运行过程中反映其健康状况的重要参数, 轴承温度异常上升一般说明润滑不足、装配不当或者内部有损伤等故障正在发展, 如果不及时处理, 将会对电机造成不可逆的损害。高负荷连续运行的电机中, 轴承温升异常是最常见的故障隐患之一, 也是最容易造成严重后果的故障之一。本文就温度升高这一典型故障进行阐述, 从现象表现、原因分析、诊断技术及预防措施四个方面展开, 以期为提高故障查找效率和维修水平提供参考。

1 三相异步电动机滚动轴承温升异常的典型表现

1.1 温度突升及伴随振动变化

电机滚动轴承出现温度异常的时候, 最直接的体现就是温度在很短的时间内突然上升, 并且存在明显的持续上升趋势。在正常运行状态下, 轴承的温度应该保持在一个相对稳定的范围内, 即使负载发生变化也不会有太大的波动。但是当润滑脂失效、滚动体表面有损伤或者装配间隙不合适的时候, 摩擦阻力突然增大, 轴承温度持续升高。滚动体运行不平稳产生的冲击载荷会使得振动加剧, 特别是当轴承内圈、外圈

或者保持架出现磨损的时候, 振动频谱中就会出现特征性的倍频或冲击峰, 表现为振动幅值增大、振动频率不规则变化等。温度和振动同时变化的情况一般预示着轴承内部已经存在结构损伤。如果不及时停机检查, 很容易造成轴承烧毁以及进一步的损伤扩展。

1.2 壳体局部发烫与润滑油变色

轴承座外壳局部发热属于温升异常的一种表现。由于轴承温度从内部向外传导, 局部发烫区域一般与实际故障位置一致, 可以用红外测温仪或者人工触摸做初步判断。当润滑脂受高温作用而发生氧化、碳化或者析油的时候, 它的颜色就会从浅黄色渐渐变成褐色或者黑色, 黏度大幅度下降, 失去了润滑和冷却的功能。润滑脂变质之后, 不能在滚动体和轴承套圈之间形成足够厚的润滑膜, 金属接触面直接摩擦, 摩擦热急剧升高, 形成温度正反馈循环, 使温升进一步加剧。润滑脂如果被污染, 比如混入金属屑、灰尘或者水分, 它的颜色和均匀度也会发生变化, 进而影响润滑效果, 使温升问题更加严重。

1.3 噪声增大或运行异响

当轴承运转过程中出现内部间隙变化或者接触面有剥落的时候, 通常会伴随温度升高而出现运行噪声显著增大。轴承滚道局部出现疲劳点蚀时, 滚动体经过该处会形成周期性撞击, 从而发出“嗒嗒”声; 保持架变形或破损时, 则可能会有金属刮擦的声音; 润滑不足时就会产生尖锐的摩擦噪声。这些异响开始时

作者简介: 张家春 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 三相异步电动机用滚动轴承温升。

并不明显，但是随着温度的继续升高，润滑恶化，异响就会变得清楚可辨，这是判断轴承故障的重要依据。当温升和噪声同时异常的时候，说明轴承已经接近失效，应该立即停机处理^[1]。

2 三相异步电动机用滚动轴承温升过高的主要成因解析

2.1 润滑失效因素分析

润滑不良是造成滚动轴承温升过高的主要因素之一。在正常状态下，润滑脂会在滚动体和套圈之间形成一层稳定的油膜来减小摩擦系数、减少金属之间的直接接触。但是润滑脂使用时间过长、油脂老化、储存量不足或者润滑脂品质不合格时，油膜就难以维持，摩擦损失增大，轴承温度迅速升高。

此外，在高速运转或高负荷的情况下，润滑脂会因为剪切力、离心力的作用而被甩出摩擦面，造成局部干摩擦。同样，润滑脂被污染，混入水分、尘埃、金属颗粒等会破坏润滑脂的结构稳定性，使润滑效果变差。水分污染会造成润滑脂乳化，使润滑膜变薄，摩擦热明显增大。

2.2 轴承装配误差与安装工艺问题

轴承安装质量好坏直接影响到轴承运行是否稳定以及温度的高低。如果装配时没有很好地控制轴向游隙和径向间隙，安装偏斜、过盈量过大、敲打安装等都会造成轴承产生额外的内应力。这时滚动体的运动就不再理想了，会出现偏载、卡滞或者滚动不均匀的现象，导致摩擦热增大，产生温升异常。如果在安装轴承的时候施加了强大的冲击力，就有可能导致滚动体或者保持架出现细微的裂纹。这些隐藏的损害在运作时会慢慢发展并扩大，从而使得摩擦阻力以及温度逐渐升高。另外，安装时如果不能严格保证装配的清洁，灰尘或者异物被夹入轴承内部，也会破坏滚动体的运行轨迹，增大磨损并提高温度。

2.3 负载因素引起的温升变化机制

电动机的负载情况也会影响到轴承的温度。电机长期处于超负荷或者不均衡负载状态下工作，轴承所受的径向和轴向载荷都会增大，滚动体受力不均，摩擦损失增大，温度上升。另外，联轴器安装偏心、对中不良或者传动系统受到附加负载时，轴承负载会波动，滚动体运行轨迹变得不正常，产生附加能耗，温度持续升高。风机、水泵等设备的转动部件如果存在偏重或者系统有共振现象，就会使振动放大，轴承负载产生动态冲击，使温度变化更加剧烈。负载因素引起的温升特点之一是温度的变化与运行工况相关联，在高负荷下温度上升明显，低负荷下趋于稳定。

2.4 轴电流对轴承的电蚀作用

现代电动机变频调速技术应用广泛，轴承电蚀成了引起温度过高及损坏的又一重要因素。当电机采用变频器供电时，不对称的电磁场以及高频谐波会使微弱的电流在轴上流动。如果这些轴电流通过轴承滚动副导通，在接触点就会产生放电现象，造成滚动体表面出现电蚀坑、烧蚀斑点等损伤。电蚀破坏了滚道的平整性，产生局部微凸起和凹坑，滚动体经过时产生冲击摩擦，造成振动增大、温度升高，并加速润滑脂的分解。随着损伤的累积，轴承温度就会产生不可逆增长的趋势。如果没有采取绝缘措施或者旁路技术，轴承很快就会因为严重的电蚀而导致失效。

2.5 环境因素引起的温度异常

温度环境、湿度、粉尘、通风条件等外部因素也会影响轴承温升水平。在高温环境下，轴承本体的温度难以散发，润滑脂的热衰减加剧，温升趋势更加明显。电机通风不良、冷却风道堵塞、风扇损坏等都会使轴承周围温度长时间偏高，润滑条件变差。另外，湿度大时润滑脂吸水乳化，润滑能力下降；粉尘浓度高时，异物容易进入轴承，加剧磨损，引起温度升高。长期处于恶劣环境中运行的电机轴承如果不经常进行清洁和保养，就会容易出现温升异常^[2]。

3 三相异步电动机用滚动轴承温升故障的诊断技术与分析方法

3.1 温度监测与阈值判断

温度检测是判断轴承好坏最直接、最简单的诊断方法。采用热电偶、热敏电阻或红外测温仪对轴承座进行温度监测，实现轴承座温度变化的实时掌握。温度超过制造商规定的上限值或者出现持续上升趋势的时候，就可以初步判断轴承存在故障风险。为了提高监测精度，一些重要的设备上装有在线温度监测系统，采用数据采集卡与上位机联动的方式，对温度变化曲线进行实时记录并报警。当温度高于设定值（70 °C或80 °C）时，系统就报警或停机。通过对温度曲线趋势的分析可以判断故障的发展阶段，润滑逐渐恶化时温度缓慢上升，轴承损伤恶化时温度突然升高。

3.2 振动频谱分析技术

振动分析是诊断轴承故障最常用、最有效的一种技术。通过安装加速度传感器或振动速度传感器可以采集到轴承振动信号，并使用频谱分析方法提取特征频率。例如：外圈故障频率、内圈故障频率、保持架频率和滚动体通过频率等。轴承剥落、裂纹、磨损时在振动信号中会出现对应的特征峰值，幅值随着损伤的发展而增大。轴承损伤刚开始的时候，振动变化不

会很明显，但是利用包络解调技术，可以较好地识别出早期的故障信号。振动频谱除了可以判断故障类型，还可以区分是否由装配不良、负载不平衡等因素引起，为后续维护提供准确依据^[3]。

3.3 轴电流检测方法

利用变频驱动电机中常见的轴电流检测技术来判定电蚀故障是否存在。一般采用电刷接触法或感应法测量轴电压，若电压超过某一数值，说明轴承可能成为电流通道，存在电蚀的危险。严重电蚀的轴承，在拆卸之后可以观察到滚道表面有无麻点状电蚀坑或者烧蚀斑纹。新型轴电流监测设备可以对电流脉冲实施实时监测，依据脉冲波形来判定电蚀的程度，进而提前做好绝缘准备。

3.4 润滑状态监测手段

润滑分析包含取样检测润滑脂、可视化分析油脂和声发射监测等。通过采样检测润滑脂的水分含量、颗粒污染度、氧化程度和黏度变化可以判断润滑剂是否失效。声发射监测利用滚动体与滚道接触时产生的高频声信号判断润滑膜厚度与摩擦状态，当润滑不足时，高频信号显著增加。对关键电机采用智能润滑系统，对油脂供应量及压力进行监控，并自动调节润滑量，保证润滑状态稳定^[4]。

4 三相异步电动机用滚动轴承温升过高的预防与维护策略

4.1 润滑管理优化措施

良好的润滑管理可以防止轴承温度升高。根据轴承型号、转速、负载、环境条件选择合适的润滑脂，制定合理的换脂周期。高温、高速或者重载荷运行的轴承应选用高温合成润滑脂，并配合密封结构以提高保持性。润泽时严格控制注脂量，防止因过度润滑导致搅拌发热。长时间连续运转的电机，可以采用集中润滑系统，实现自动补脂、润滑状态监控，保证油膜始终处于最佳状态。

4.2 安装工艺与装配精度控制

轴承装配时应使用专用装配工具，严禁敲击滚动体和套圈。严格控制轴向预紧力和过盈量，使轴承在设计间隙范围内。装配前要保持工作环境清洁，不能有杂质进入轴承内。对于高速电机，应采用加热装配工艺，使内圈均匀膨胀后再套入，减小装配应力。中精度应满足制造技术要求，联轴器安装要保证同心度，不能产生附加的载荷。

4.3 负载管理与联轴器校正

运行过程中要保持电机负载的稳定性，不能经常重载启动或过载运行。如果负载设备有偏重或者转动

部件不平衡的情况，应立即进行动平衡处理。联轴器的安装需要做精确校正，使电机和设备之间同心，防止由于偏心引起周期性的冲击性加载。风机、水泵等设备要定期检查叶轮是否磨损、积灰，防止转子不平衡造成轴承额外发热^[5]。

4.4 防止轴电流的措施

对于变频器驱动的电机，应采用轴承绝缘或旁路技术，即使用绝缘轴承、加绝缘套或者装接地刷等方式，使轴电流不经过滚动轴承。高频谐波造成的轴电流，可以利用安装滤波电抗器或共模电感的方式来减小电压尖峰，进而减少轴电流的产生。

4.5 运行环境改善与定期巡检制度

改善运行环境是减少轴承温升的重要方法。高温环境下要加大通风散热力度，保证风道通畅；粉尘环境下要加强密封，定时清理过滤装置。建立定期巡检制度，对轴承温度、振动、润滑状况进行周期性检查，及时发现潜在故障。对于连续生产的情况，可以采取预测性维护的方式，使用在线监测系统来分析趋势，达到提前预警的目的。

5 结语

三相异步电动机是工业设备中不可缺少的动力源，它的滚动轴承运行状态直接影响生产连续性和设备安全。轴承温升过高是典型的、最危险的故障征兆之一，其原因复杂，与润滑、装配、负载、电磁环境及外部环境等各方面都有关系。本文从故障表现、原因分析、诊断和预防策略四个方面对问题进行了系统的论述，希望能给实际的设备维护和管理提供一些可操作的参考。随着智能监测技术的进步，未来电机保养将更多地依靠数据分析、智能诊断，使电机保养从以前的事后维修转变为预测性保养，最大程度保证电机的可靠性及使用寿命。

参考文献：

- [1] 陈金刚, 刘宝芳, 韩多峰. 电机运转异响和轴承温升过高的原因分析及处理措施 [J]. 电气防爆, 2023(03):16-18.
- [2] 陈金刚, 黄莉明, 张红枝. 三相异步电动机滚动轴承装配和运行故障解析 [J]. 船电技术, 2019,39(06):20-22.
- [3] 陈金刚. 电动机滚动轴承和润滑脂及故障预防 [J]. 电机技术, 2014(02):54-57.
- [4] 仲丛华. 轴承安装与维护保养措施 [J]. 黑龙江科学, 2022, 13(02):68-70.
- [5] 刘树林, 王建磊, 张执超, 等. 基于多源信息融合的电机滚动轴承故障诊断方法 [J]. 振动与冲击, 2021,40(15): 222-229.

水运工程深水基础大直径钻孔桩施工技术优化探究

李支洋

(连云港建港实业有限公司, 江苏 连云港 222042)

摘要 在水运工程(如港口码头、跨海大桥、航道枢纽)建设中,深水基础大直径钻孔桩因承载能力强、适应性广,成为核心基础形式。但深水环境(水流湍急、波浪影响大)与复杂地质(岩层、溶洞、砂层)导致其施工面临护筒沉设偏差大、泥浆护壁失效、钻孔效率低、混凝土灌注质量难控等问题。本文结合施工实践,梳理深水基础大直径钻孔桩的核心施工环节,分析现存技术难点,从钢护筒沉设、泥浆系统、钻孔作业、混凝土灌注、施工监测五个维度提出优化方案,旨在提升施工精度、效率与质量,为水运工程深水基础建设提供技术参考。

关键词 水运工程; 深水基础; 大直径钻孔桩; 钢护筒

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.019

0 引言

随着我国“交通强国”战略推进,水运工程向深水化、大型化方向发展,如离岸港口、跨海通道等项目中,深水基础大直径钻孔桩(直径常达1.5~3.0 m,水深超10 m)的应用愈发广泛。此类钻孔桩需在复杂水文地质条件下施工,既要抵御水流、波浪对施工设备的冲击,又要应对复杂地质对成孔质量的影响,施工难度远高于陆地或浅水基础。

当前,传统施工技术在深水环境中暴露出明显局限:钢护筒受水流扰动易倾斜,泥浆比重难以稳定控制导致孔壁坍塌,复杂地质下钻进效率低下,混凝土灌注因深水落差易出现离析断桩等。这些问题不仅会增加施工成本、延长工期,更可能影响基础结构安全,制约水运工程建设质量。因此,针对深水基础大直径钻孔桩施工技术进行优化,解决关键技术难点,对推动水运工程高质量发展具有重要的现实意义。

1 水运工程深水基础大直径钻孔桩施工核心环节与现存问题

1.1 施工核心环节梳理

深水基础大直径钻孔桩施工需统筹水文、地质、设备与工艺,核心环节可分为前期准备、关键工序与质量控制三部分。

1. 前期准备:核心是为施工奠定基础,包括地质勘察(通过钻探与物探明确地层分布,如砂层厚度、

岩层埋深、溶洞位置)、设备选型(根据水深与地质选择大型回旋钻机或冲击钻机,配备加长钢护筒、大功率泥浆泵,定制大直径钢筋笼吊装设备)、施工方案编制(明确护筒沉设顺序、泥浆参数、钻进速度、混凝土灌注流程,制定应急预案)。

2. 关键工序:是成桩质量的核心保障,涵盖钢护筒沉设(将钢护筒精准沉入指定位置,形成施工防护屏障)、泥浆制备与循环(配置符合要求的泥浆,通过循环携带钻渣、稳定孔壁)、钻孔作业(按设计孔径与深度钻进,控制钻进参数)、清孔(清除孔底沉渣,确保沉渣厚度符合规范)、钢筋笼制作与吊装(按设计加工钢筋笼,采用大型起重机精准吊装入孔)、混凝土灌注(通过导管将混凝土压入孔底,完成桩体浇筑)^[1]。

3. 质量控制:贯穿施工全程,重点包括孔径垂直度监测(确保桩体垂直,避免承载力下降)、沉渣厚度控制(沉渣过厚易导致桩底承载力不足)、混凝土密实度保障(防止出现蜂窝、空洞,确保桩体强度)。

1.2 现存主要问题

受深水环境与复杂地质影响,施工过程中易出现以下技术难点:

1. 深水钢护筒沉设问题:深水水流速度快、波浪冲击力大,钢护筒沉设时易受侧向力扰动,导致垂直度偏差超规范(常大于1%);若地质为砂层或卵石层,护筒入土阻力大,易出现入土深度不足,无法有效隔离江水,进而引发漏水漏浆,影响后续成孔。

作者简介: 李支洋(1988-),男,本科,工程师,研究方向:水运工程。

2. 泥浆系统问题：在深水环境下，泥浆受水流稀释与压力变化影响，比重难以稳定控制（传统泥浆比重波动范围达 $1.2 \sim 1.5$ ），护壁能力下降，易出现孔壁坍塌；同时，深水循环路径长，泥浆携渣效率低，钻渣易沉积孔底，增加清孔难度。

3. 钻孔作业问题：若遇岩层、溶洞或厚砂层等复杂地质，传统钻机钻进参数难以适配：岩层钻进时转速慢、钻头磨损快，单日进尺不足 2 m；溶洞地质易出现“漏浆”“卡钻”，需反复填充处理；砂层地质则易导致孔径超差（偏差达 50 mm 以上），影响钢筋笼吊装。

4. 混凝土灌注问题：在深水环境下，混凝土从导管顶部至孔底落差大（常超 10 m），易因下落速度过快出现离析；导管埋深控制依赖人工监测，若埋深过浅（小于 1 m）易导致断桩，埋深过深（大于 6 m）则易出现混凝土初凝堵塞导管，引发夹泥缺陷。

5. 施工监测问题：传统监测手段（如人工测绳测沉渣、靠尺测护筒垂直度）在深水环境中精度低、效率差，难以实时掌握孔内情况。例如：人工测沉渣误差可达 100 mm 以上，无法及时发现孔壁坍塌风险，易导致安全事故。

2 水运工程深水基础大直径钻孔桩施工技术优化方向

针对上述问题，需从设备、工艺、监测等维度进行技术创新，提升施工稳定性与质量。表 1 对比了传统技术与优化技术在核心指标上的差异。

2.1 钢护筒沉设技术优化

1. 新型导向设备应用：研发“深水护筒导向架+实时姿态监测系统”，导向架为型钢焊接三角形稳定

结构，通过预埋锚栓固定于施工平台，可适配直径 $1.2 \sim 2.0$ m 的钢护筒；护筒顶部周向装 3 个 GPS 定位模块与 2 个倾角传感器，1 次 / 秒采集位置及垂直度数据，垂直度偏差超 0.5% 自动声光报警，技术人员用导向架液压千斤顶（调节精度 ± 1 mm）动态校正，确保护筒垂直度误差 $\leq 0.3\%$ ，在水深 $15 \sim 30$ m 的深水工况下，返工率从传统工艺的 12% 降至 3% 以下，焊缝开裂风险降低 60%，单根护筒沉设周期缩短 2 ~ 3 小时。

2. 沉设工艺改进：砂层或卵石层采用“振动沉设+静压辅助”，高频液压振动锤（激振力 $300 \sim 500$ kN）先振动减阻，护筒入土 70% 后切换液压千斤顶静压（最大压力 $1\,000$ kN）至设计深度，入土深度比传统工艺增加 $1 \sim 2$ m，有效提升护筒抗浮稳定性；溶洞或岩层采用“钻孔引孔+护筒跟进”，牙轮钻机（直径小于护筒内径 100 mm）钻孔超岩层顶面 $1 \sim 2$ m，护筒底部设合金切削刃同步跟进，避免变形与漏水漏浆，在溶洞发育区施工合格率提升至 98%。

2.2 泥浆系统优化

1. 高性能泥浆配方研发：针对深水配制“膨润土+聚合物（聚丙烯酰胺，分子量 $800 \sim 1\,200$ 万）+加重剂（重晶石粉，密度 $4.2\text{g}/\text{cm}^3$ ）+防漏剂（沥青乳剂）”复合泥浆。正交试验确定最优配比：膨润土 $6\% \sim 8\%$ 、聚合物 $0.1\% \sim 0.2\%$ 、加重剂（水深 $10 \sim 20$ m 时 $5\% \sim 10\%$ ）、防漏剂 $1\% \sim 2\%$ 。该配方护壁压力提升 20%，粘度 $25 \sim 30$ s，携渣效率提升 30%，在砂层与溶洞地质护壁效果显著，孔壁坍塌率从 8% 降至 1.5% 以下。

2. 闭环泥浆循环系统构建：采用“泥浆净化船+管道循环”，循环管道为耐磨钢管（壁厚 $10 \sim 12$ mm），通过防腐涂层处理延长使用寿命；净化船配振动筛（筛

表 1 传统技术与优化技术在核心指标的差异

施工环节	技术类型	核心指标	传统技术水平	优化技术水平	提升幅度
钢护筒沉设	传统技术	垂直度误差	$> 1\%$	$\leq 0.3\%$	70% 以上
	优化技术	入土深度（砂层）	设计值的 85%	设计值的 $100\% \sim 105\%$	$15\% \sim 20\%$
泥浆系统	传统技术	泥浆比重波动范围	$1.2 \sim 1.5$	$1.3 \sim 1.4$	波动缩小 33%
	优化技术	钻渣去除率（ > 0.1 mm）	65%	95%	30%
钻孔作业	传统技术	岩层单日进尺	< 2 m	> 2.8 m	40% 以上
	优化技术	钻头使用寿命（岩层）	$50 \sim 80$ m	$120 \sim 150$ m	50% 以上
混凝土灌注	传统技术	混凝土离析率	15%	$< 5\%$	66% 以上
	优化技术	导管埋深控制精度	± 300 mm	± 50 mm	83%
施工监测	传统技术	沉渣厚度测量误差	± 100 mm	± 10 mm	90%
	优化技术	孔壁坍塌预警响应时间	> 10 min	< 1 min	90% 以上

网孔径0.3 mm)、除砂器(分离粒度 ≥ 0.074 mm)、离心机(分离粒度 ≥ 0.005 mm)，粒径 > 0.1 mm钻渣去除率95%；循环管道装在线密度计(精度 ± 0.01 g/cm³)、粘度计(精度 ± 1 s)与流量传感器，数据4G传管控平台，参数超标自动加药调节，泥浆利用率从60%提至90%，单根桩泥浆采购成本降低4 000~6 000元，施工污水排放量减少80%^[2]。

2.3 钻孔作业技术优化

1. 智能化钻机应用：配备“自动钻进系统+地质识别模块”的液压试旋钻机(最大扭矩800 kN·m)，地质识别模块通过钻头扭矩传感器(0~1 000 kN·m，精度 $\pm 1\%$)与振动传感器(0~50 Hz，精度 ± 0.1 Hz)分析地层硬度：岩层(150 MPa)扭矩超500 kN·m，砂层扭矩100~200 kN·m。系统自动匹配参数：岩层转速8~10 r/min、钻压30~40 kN、泵量50~60 m³/h；砂层转速15~20 r/min、钻压15~20 kN、泵量80~100 m³/h，复杂地质钻进效率提升40%以上，单孔钻孔时间缩短5~8小时^[3]。

2. 专用钻头改进：岩层用“牙轮—刮刀复合钻头”(牙轮硬度HRC60~65，刮刀厚20 mm)，寿命延长50%，可连续破碎岩层30~50 m；溶洞用“溶洞填充专用钻头”，遇溶洞(扭矩骤降识别)打开液压挡板，注水泥浆(水灰比1:1)静置30~60 min后关闭继续钻进，防漏浆卡钻，溶洞处理效率提升3倍；砂层用“螺旋—刮刀复合钻头”，孔径超差率从25%降至5%以下^[4]。

2.4 混凝土灌注技术优化

1. 灌注设备升级：用“深水混凝土输送泵+防离析导管”，输送泵为高压型(额定压力30 MPa，出量30 m³/h)，变频调控速度防离析；防离析导管为双层螺旋式，内层导流降速，外层加厚无缝钢管(壁厚12 mm)，接头双密封圈(丁腈橡胶，密封压力1.6 MPa)，混凝土离析率从15%降至5%以下，混凝土试块合格率达99%，断桩率从3%降至0.5%以下^[5]。

2. 灌注过程智能化控制：构建“导管埋深监测+混凝土面预警”系统，导管外装超声波传感器(0~10 m，精度 ± 1 mm)测埋深，孔内装液位传感器(0~50 m，精度 ± 5 mm)观测混凝土面；数据无线传管控平台，埋深 < 1.5 m提示提管， > 5 m提醒拆管(每次1~2节，每节2~3 m，保埋深2~4 m)；与搅拌站数据联通，实时掌握混凝土坍落度(控制在180~220 mm)与运输时长，防供应中断。

2.5 施工监测技术优化

1. 多维度监测体系构建：集成“孔内摄像+超声波测壁+光纤传感”，孔内摄像用1080PIP68防水摄

像头，可在水下50 m正常工作，实时传影像辨孔壁问题；超声波测壁仪(8探头，0.5~5 m)圆周扫描，1次/5 min测孔径垂直度，测量误差 ≤ 2 mm；分布式光纤传感器(± 0.5 °C/ ± 1 με)预铺钢护筒内壁，监测应力变形，全方位保障安全^[6]。

2. 数据可视化平台搭建：监测数据实时传“施工管控可视化平台”，BIM建钻孔桩三维模型，标关键参数，超限处变红告警；支持历史数据查询，产日周月报告析趋势预判风险；设移动端程序，管理人员手机查实时数据与预警，异常处理时长从1小时缩短至15 min，数据归档效率提升70%，人工管理成本降低30%。

3 结束语

本文围绕水运工程深水基础大直径钻孔桩施工技术的优化探索，针对钢护筒沉设、泥浆系统、钻孔作业、混凝土灌注、施工监测这五大关键环节的棘手问题，给出了包含设备革新、工艺改良、智能监控的优化举措，这些优化技术能够有效处理深水施工中的垂直度偏差、孔壁坍塌、混凝土离析等难题，将钢护筒垂直度误差限定在0.3%以内，促使泥浆护壁失效率下降60%，复杂地质钻进效率增长40%，把混凝土灌注合格比率从85%提升到98%，明显提升了施工质量与功效。随着数字化技术的进步，深水基础大直径钻孔桩施工技术将朝着“BIM+施工模拟”“无人智能钻机”方向前行：借助BIM技术预先模拟施工进程，预估地质隐患；运用无人钻机达成钻进、清孔、灌注全流程的自动化作业，进而降低人工干扰，提高施工精准度。这些技术革新为水运工程深水基础建造提供了更强劲的支持，进而促进我国水运工程往更高水准、更安全高效的方向发展。

参考文献：

- [1] 沈辉.桥梁钢板桩围堰施工要点及施工安全措施[J].居舍,202(28):63-64.
- [2] 熊陆锦.通航河道新建桥梁钢板桩筑岛围堰设计与施工技术[J].工程机械与维修,2022(05):93-95.
- [3] 贾阔.公路桥梁钢板桩围堰先支撑再抽水的施工技术[J].交通世界,2023(15):129-131,134.
- [4] 唐小珉.路桥工程深水基础钻孔灌注桩施工技术的应用[J].城市建设,2021,18(18):187-189.
- [5] 谢晓东.桥梁工程建设中深水基础钻孔灌注桩技术[J].中国高新科技,2021(09):41-42.
- [6] 杜志超.路桥工程深水基础钻孔灌注桩施工技术的应用[J].交通世界,2020(27):120-121.

水利工程中水库大坝防渗加固施工技术关键点分析

刘 强

(东营市垦利区水利工程公司, 山东 东营 257500)

摘要 水库大坝防渗加固施工效果直接影响着水利工程质量, 主要因为水库大坝一旦出现渗漏问题, 安全性和稳定性势必会受到影响, 降低工程使用年限。因此, 水利工程建设过程中需重视水库大坝防渗加固施工。基于此, 本文分析了水库大坝防渗特点、原因以及防渗加固施工技术关键点, 并且通过案例分析, 进一步验证水库大坝防渗加固施工技术的可行性。研究结果表明, 合理使用防渗加固施工技术, 可以降低渗漏问题发生概率, 保证水库大坝施工质量, 保证水利工程功能得以正常使用。另外, 通过案例, 可以进一步说明防渗加固施工的可行性, 提升水库大坝防渗效果, 保障水利工程的整体建设水平, 延长工程使用年限。

关键词 水利工程; 水库大坝; 防渗加固施工技术; 施工质量

中图分类号: TV62

文献标志码: A

D01: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.020

0 引言

水库大坝作为水利工程的重要组成部分, 主要起到调节水流、储存水资源等作用, 其正常使用以及结构的稳定性和安全性直接影响着人们日常生活和社会经济发展。但是, 由于外界环境的侵蚀, 长期使用材料老化以及施工不足等, 都会增加水库大坝渗漏问题发生概率, 影响水库大坝功能的正常使用, 增加安全事故发生概率, 浪费水资源, 降低水利工程质量。因此, 针对水库大坝渗漏类型以及特点, 确定该问题的成因, 采取行之有效的防渗加固措施, 以解决渗漏隐患, 保障水库大坝的稳定性, 提升其使用功能。另外, 目前防渗加固技术也逐渐成熟, 常用的技术有很多, 主要包括: 渗墙加固施工技术、碾压混凝土加固施工技术、帷幕灌浆施工技术等, 并且这些技术所适用的范围有所不同, 需要结合水库大坝渗漏的实际情况以及周围地质环境, 选择合适的防渗加固技术, 以保证良好的施工效果, 保障水库大坝结构的稳定性, 增强其抗渗性能, 促使水利工程质量达到相关要求。

1 水利工程中水库大坝防渗特点及其原因

1.1 水库大坝渗漏特点

水库大坝渗漏问题具有多样化, 一般可以分为表面和内部等渗漏问题, 其中表面渗漏主要发生在水库大坝迎水面和背水面, 水从表面渗出, 该渗漏问题存

在于表面很容易被发现; 然而, 内部渗漏指水通过大坝内部孔隙、裂缝等一些病害渗透出来, 影响水库大坝结构的稳定性和安全性, 并且该渗漏问题具有较强的隐蔽性, 需要借助专业检测设备精准定位, 以便问题得到及时解决。同时, 由于地质条件的不同, 水库大坝渗漏特点也存在着一定差异, 尤其是土质松软、透水性强等地区, 渗漏问题发生概率较高^[1]。另外, 渗漏形式也会因为季节变化或者水位变化表现出不同特征。例如: 雨季会增加水位, 渗漏发生概率有明显提升, 渗漏路径也会扩大, 给水库大坝造成严重损坏, 增加大坝安全风险。

1.2 渗漏原因

水利工程水库大坝渗漏问题成因较为多样化, 主要包括以下几点:

第一, 地质环境因素。地质环境因素是导致水库大坝渗漏问题的主要成因, 主要因为地区的不同, 地质条件也会有明显差异。例如: 土质松软、岩层破碎等, 这些条件都给渗漏问题发生提供了便利的条件。

第二, 施工因素。施工因素也是诱发水利工程水库大坝渗漏问题的主要原因, 在具体施工期间, 如果施工质量未达到相关要求, 如混凝土浇筑密实度较差、填筑材料不达标, 或者施工缝隙处理不合规, 这些都会诱发水库大坝渗漏问题, 降低水利工程建设质量^[2]。另外, 在水库大坝施工期间, 如果未按相关要求开展

作者简介: 刘强(1987-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

施工作业，如过度浇筑和振捣、超挖、超填等，这些都很容易对水库大坝结构造成损伤，因此诱发渗漏问题。此外，在水库大坝施工期间，坝体结构形式设置不当，防渗排水设施不完善等，都会影响水库大坝的抗渗漏性能。

第三，材料老化。水库大坝经过长期使用，很容易出现材料老化，诱发水库大坝渗漏问题。材料老化主要表现在混凝土碳化、钢筋锈蚀等，减弱水库大坝结构强度，降低工程安全系数。同时，水库大坝的长期使用，材料的防水性能也会有明显降低，无法隔阻挡水渗漏，导致渗漏问题发生。另外，环境因素（高温、冻融）的影响也会给水库大坝材料带来负面影响，加快材料老化速度，增加渗漏问题发生概率。

2 水利工程中水库大坝防渗加固施工技术关键点

2.1 防渗墙加固施工技术

防渗墙加固施工技术是水利工程中水库大坝防渗加固施工中常见的一种技术形式，通过该技术可以有效提升水库大坝的防渗能力，保障坝体结构的稳固性。在防渗墙加固施工期间，应结合实际情况，设置旋转桩防渗墙，并且在坝体内设置单排高压旋转桩体，以此实现良好的防渗加固效果^[3]。同时，在设置高压旋转桩体设置期间，应对桩体间距、深度以及旋转速度等参数进行严格控制，目的是保证桩体能够均匀充满在水库大坝，以形成连续防渗屏障，提升水库大坝的防渗性能。

高压旋转桩防渗墙设置完成以后，需要根据水库大坝渗漏损坏程度以及工程周围地质情况，设置混凝土防渗墙，目的是进一步增强水库大坝的抗渗性能，提升大坝结构的安全性和稳定性。防渗墙加固施工期间，一般需要先喷1序孔，随后喷2序孔，目的是实现分序目标。在具体施工期间，通过使用回旋式钻机展开钻孔施工作业，并且需要时刻关注钻孔阶段，应从上向下垂直钻孔，切记不能出现孔位偏差，满足后续施工要求。钻孔施工完成以后，应对钻孔内部进行清理，将残渣彻底清除，避免影响后续施工效果。在喷射施工期间，根据地质条件，合理设置喷射压力、速度等，并且泥浆喷射一定要匀速、连续，将泥浆均匀覆盖到孔壁表面，以形成良好的防渗层，避免出现渗漏问题。

2.2 碾压混凝土加固施工技术

碾压混凝土加固技术旨在利用碾压方式，提升混凝土高密度，以提升水库大坝高密度，进而提升坝体的稳定性和稳定性，保障水利工程建设质量。碾压混

凝土加固施工期间，应从以下几点展开：

第一，需要对施工现场进行清理，主要是将表面松散土层、碎石等彻底清除，为后续施工提供良好的条件。同时，需要对混凝土原材料进行检查，目的是保证水泥、砂石、骨料以及外加剂等材料符合相关要求，做到从源头上避免施工质量问题。根据相关要求，对混凝土进行合理配置，并且通过试验反复确定水泥、水、骨料以及砂石等用量，以保证碾压混凝土强度、力学性能、耐久性等指标均符合相关要求。

第二，碾压混凝土加固施工期间，需要选择合适的碾压设备型号、规格以及碾压参数，并且通过振动形式逐步完成混凝土碾压作业^[4]。但需要注意的是，根据混凝土的厚度以及压实要求，合理设置各项施工参数（碾压次数、速度、振动频率），并且应按照一个方向进行匀速碾压，避免出现漏压、过压问题。针对边缘位置或者结构复杂位置，应采取小型振动机、人工振动等方式进行碾压处理，以保证碾压的平整度。

第三，碾压施工完成以后，应立即进行养护施工作业，将保湿材料覆盖到表面，并且根据天气温度变化，定期洒水进行养护，以保证混凝土的湿润度，达到预期施工效果。

2.3 帷幕灌浆施工技术

帷幕灌浆施工技术将水泥或者化学等浆液注入坝体裂缝或者孔隙中，以此形成防渗帷幕，避免出现渗漏问题。在帷幕灌浆施工期间：

第一，对水利工程水库大坝进行勘查，确定渗漏位置、范围等，以制定完善的施工方案。同时，根据勘察结果，合理设置各项施工参数（孔距、排距、孔深），并且根据渗漏问题严重程度，确定使用哪种类型的浆液（水泥浆液、化学浆液），以保证帷幕灌浆施工效果。

第二，为保证帷幕灌浆施工质量，应严格控制灌浆压力、灌浆量以及灌浆时间等，将浆液填充整个渗透位置，形成防渗帷幕，防止水渗透到坝体内部，影响水利工程水库大坝的稳定性和安全性。在帷幕灌浆施工期间，应使用高压喷射灌浆设备，从下到上、分段匀速展开灌浆作业，确保灌浆施工质量^[5]。但是，在帷幕灌浆施工期间，应时刻注意浆液流动性，确保浆液进入水库大坝内部以后能够均匀分散，填充整个渗透通道，避免出现浆液堆积问题。

第三，所有帷幕灌浆施工工序完成以后，应立即展开质量验收工作，并使用钻孔取芯、压水试验等方式，检验密实度和防渗性等指标是否达到相关要求，如果不符应立即进行返工处理，只有达到相关要求，才能

保证增强水库大坝结构的强度以及安全性，增加大坝的使用年限。

3 实例分析

3.1 实例概况

本文以某水利工程水库大坝为例，该工程位于山区，自建成一直承担着防洪灌溉的艰巨任务。同时，该水库大坝主体结构由石坝组成，高度为 40 m，坝顶长度为 500 m，并且由于所在区域地质环境较为复杂，坝基存在一定厚度砂砾石层，透水性较强，这给该水库大坝防渗加固施工带来了一定难度。由于周边地势起伏较大，降雨量分布不均匀，夏季降雨量较大，导致水库在短时间内急剧上涨，进一步增加大坝渗漏风险。另外，随着该工程使用年限的增加，水库大坝出现不同程度的渗漏问题，尤其在雨季，渗漏问题更加严重，这样不仅影响水库大坝的使用功能，水利工程安全系数也会下降。对此，为解决该工程渗漏问题，将帷幕灌浆施工技术、碾压混凝土加固施工技术应用到其中，通过使用水泥灌浆方式，对大坝渗漏部位进行修补，以保证坝基的稳定性和强度。

3.2 渗漏加固方案实施

针对该工程水库大坝渗漏情况，经过讨论，一致认为通过帷幕灌浆施工以及碾压混凝土加固施工技术进行处理，具体内容如下。

第一，详细检查水库大坝渗漏部位的实际情况，确定渗漏位置以及范围。同时，通过利用帷幕灌浆施工技术将水泥浆液注入渗漏通道内部，以形成保护屏障^[6]。另外，在灌浆过程中，施工人员根据实际情况，灵活调整灌浆压力和灌浆量，确保浆体充满整个渗漏位置，以起到加固作用。

第二，水泥浆液注入完成以后，需要在表面均匀浇筑混凝土，并对其进行均匀、细致碾压，严格控制碾压次数、速度以及振动频率等，以保障混凝土密实度与强度达到规范。另外，针对工程针对边缘，以人工振动方式为主，实现补充碾压，确保整个水库大坝结构的稳定性。

第三，水库大坝防渗加固施工完成以后，需要对施工位置进行检查，该工程利用钻孔取芯方式进行检查，判断防渗加固施工位置不管是密实度，还是强度，或者是防渗性都符合相关要求^[7]。

3.3 防渗加固施工效果评价

该工程水库大坝防渗加固施工完成以后，施工人员展开多次的检验工作，但不管哪次检验结果都显示防渗加固施工后的水库大坝渗漏问题有明显改善，尤

其是雨季，未再出现渗漏问题，有效保证了水利工程水库大坝结果的稳定性和安全性^[8]。另外，通过利用专业设备，对该工程水库大坝结构密实度、强度、耐久性等指标进行检查，检查结果显示符合相关要求，证明通过帷幕灌浆施工技术、碾压混凝土加固施工技术可以有效解决该工程水库大坝渗漏问题。

4 结论

根据以上分析和研究，得出以下结论：

第一，水利工程水库大坝防渗加固施工具有一定的复杂性，直接关系到水库大坝结构的稳固性与安全性。对此，在水库大坝防渗加固施工期间，相关人员需掌握各项施工技术要点，确保各项施工技术得以合理运用，从根本上解决水库大坝渗漏问题，保证水利工程建设质量。

第二，本文通过某工程实例，对水库大坝防渗加固施工技术进一步研究，发现结合实际情况，将不同的施工技术进行组合，为水库大坝形成一层有效、坚实的保护屏障，并且根据后期多次验证，水库大坝渗漏问题得以改善，尤其是在雨季。另外，通过案例也充分说明，水防渗加固施工技术的有效性和可行性，为水利工程水库大坝的正常使用提供了技术保障。

参考文献：

- [1] 蒙剑婷. 水利工程施工中堤坝防渗加固技术的应用及研究[C]// 江西省工程师联合会. 第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(一), 汉中水利水电建筑勘测设计院有限公司, 2025.
- [2] 孙祥志, 王义坤, 诸卫卫. 水利工程施工中防渗漏技术研究[J]. 珠江水运, 2023(05):68-70.
- [3] 李昌宇, 戴林军. 防渗墙施工技术在水库大坝工程中的应用: 以水磨坑水库加固工程为例[J]. 工程技术研究, 2022, 07(23):64-66.
- [4] 潘圣卿. 浅谈水利工程施工堤坝防渗加固技术[C]// 上海篠虞文化传播有限公司 .Proceedings of 2022 Academic Forum on Engineering Technology Application and Construction Management(ETACM 2022)(VOL.2). 中国南水北调集团中线有限公司河北分公司, 2022.
- [5] 余荣贵. 旧水库大坝工程的防渗加固施工技术[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(10):69-72.
- [6] 关富娟. 水库大坝除险加固混凝土防渗墙施工技术[J]. 甘肃水利水电技术, 2022, 58(06):54-57.
- [7] 陈灿. 水库大坝加固工程防渗墙设计与施工技术探讨[J]. 水电站设计, 2021, 37(03):46-49.
- [8] 赵建军. 探究水利工程中水库大坝防渗加固施工技术[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(02): 13-16.

建筑工程项目风险识别与应对策略

余凤闪

(来宾市服务业发展中心, 广西 来宾 546100)

摘要 本文以建筑工程项目管理为研究对象, 站在维护项目安全、保障项目秩序的角度, 围绕建筑工程项目风险的识别与应对展开研究。首先, 对建筑工程项目风险管理的内涵、特征等内容进行了简要的理论概述; 其次, 在对建筑工程项目风险识别方法进行简要介绍的基础上, 结合建筑工程项目特点构建了一个基于项目全生命周期的风险识别框架; 最后, 着重介绍了几种常见的建筑工程项目风险应对策略, 包括风险回避、风险降低、风险转移、风险自留, 以期能够从不同的层面为促进建筑企业风险管理能力的提升提供借鉴, 进而保障建筑工程项目能够在安全、有序的环境下顺利实施。

关键词 建筑工程项目风险; 风险管理; 识别框架; 风险回避; 风险转移

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.021

0 引言

随着我国城镇化发展进程的加快, 建筑工程项目施工的规模、复杂程度日益提升, 使得建筑工程项目投资巨大、技术复杂、周期漫长、多方参与作业的特点愈发凸显, 同时也使得建筑工程项目从前期规划到正式竣工, 极容易受到多重因素的干扰, 导致整个项目在施工过程中充满了诸多的不确定性。这些不确定性正是项目风险的根源所在, 若不能对其作出有效识别与应对, 将对工程项目施工安全造成极大的威胁, 导致项目无法顺利交付。因此, 如何在推进项目的同时做好风险管控工作, 已成为现代建筑企业管理者面临的核心议题。

1 建筑工程项目风险管理理论概述

建筑工程项目风险指的是在建筑工程施工过程中, 受各方面因素的影响而致使工程实施方向偏离了既定的轨道, 与预期施工目标出现较大差异, 由此造成了一定的损失。这些风险包含技术风险、经济风险、合同风险以及组织管理风险等, 几乎涉及整个建筑工程项目施工的全周期。而风险管理就是要通过相应方法的运用, 来对上述风险做出准确的识别、分析、评估, 进而采取有效的管控措施将风险控制在一定范围内, 在尽可能降低风险损失的同时以最小成本保障工程项目目标的顺利达成^[1]。由此可以将建筑工程项目风险的特点归结为如下几点: 一是普遍性与客观性。建筑工程项目风险无处不在、无时不有, 从地基条件、水

文气象的不确定性到市场波动, 从设计管理疏漏到合同履约执行受阻, 建筑工程项目风险都一直存在、无法消除且不以人的意志为转移; 二是不确定性与偶然性。建筑工程项目风险事件何时、何地以何种形式发生? 造成的后果如何? 这些都是不确定的, 难以被精准预估, 甚至有时还会因风险最终处理结果、影响程度的不同, 而导致风险性质、后果出现变化; 三是阶段性与层次性。风险的类型以及主次关系、影响程度等都会随着工程项目实施进度而发生一定的变化, 从而产生一定的阶段性、层次性特征。例如: 投资估算风险主要发生在工程决策阶段, 而发展到施工阶段, 企业更多面临的是来自技术应用、安全维护、质量监管等方面的风险。

2 建筑工程项目风险的识别框架

2.1 项目决策与设计阶段的风险识别

决策、设计均是涉及建筑工程全局性、根本性的工作, 该阶段一旦产生风险, 其影响往往是根源性的, 后期需要付出极大的成本来弥补。基于对建筑工程项目立项审批流程的要求, 可以将该阶段的风险识别聚焦于: 因市场前景误判、可行性研究缺陷、投资估算失准导致的投资决策风险。针对此类风险的识别要将重点放在对各类参数、样本、数据的审查上, 并对当下的宏观经济波动、区域政策调整、法律法规限制等外部环境给项目带来的不确定性予以充分考量; 因地质勘察数据缺失、地理环境勘察不到位、设计方案技

作者简介: 余凤闪 (1986-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 项目投资综合管理。

术缺陷导致的勘察设计风险。针对此类风险的识别要重点审查各类勘察报告的完整性、可靠性，并组织多轮专家方案论证会，对项目的环保、安全、消防、节能等关键环节对照执行条文进行逐条审查，以此来确保项目在设计层面的合规性、科学性^[2]。

2.2 招投标与采购阶段的风险识别

招投标与采购阶段的工作主要围绕项目实施所需人力、物力、财力等资源的有效配置展开，因此该阶段的风险来源也主要是由资源配置问题引发的，多与信息不对称、市场波动、合同履约障碍等有一定的关联。具体包括：物资采购与供应链风险——重点对原材料供应链各个环节的不确定性、脆弱性予以识别。例如：关键原材料市场供应是否紧张？价格波动如何？是否存在供应短缺风险？对单一供应商、单一产地的依赖是否容易形成单点故障？这些都是在采购阶段风险形成的主要因素，建筑企业需要建立一套完善的供应链风险监控机制，对原材料供应的情况进行前瞻性预警与动态追踪，以此来扩大企业的信息感知网络，提升其风险识别能力；合同价格与条款风险——需要围绕合同本身所附带的经济、法律风险展开识别，警惕承包商的“不平衡报价”与“恶意低价竞争”行为，重点审查合同中权责不明、界限不清、程序模糊的条款，确保建筑企业能够在项目施工成本、质量控制中一直占据主动权。

2.3 项目施工与安装阶段的风险识别

施工阶段作为项目正式实施的重要阶段，各类资源相继投入使用、各项工作也均步入正轨，此时也是项目风险最活跃、最集中的阶段，属于风险高发期。对于本阶段的风险识别可以按照全面质量管理以及施工现场管理的相关要求，将重点放在对五大核心要素的监管上，即人员、机械设备、材料、方法、环境。在对这五大要素的风险作用机理进行深入分析的基础上，将该阶段需要识别的核心风险聚焦到：因人员技术不过关、状态不佳、作业沟通不畅等原因引发的安全风险，如高处坠落、触电事故、基坑坍塌、物体打击等；由设备老化、操作不当等因素引发的施工质量风险，如混凝土浇筑不均匀、焊接质量不合格、钢筋捆绑松动等；因管理人员对劳动力资源调配不应当、施工组织设计不合理，抑或是在遭遇恶劣天气前未做好应急预案所引发的施工进度风险，导致工期延误^[3]。这些风险的发生不仅会打乱正常的施工秩序，还会导致引发不同程度的成本风险，从而形成风险链式反应。

2.4 项目竣工与交付阶段的风险识别

进入项目进攻交付阶段，预示着项目即将进入收尾阶段，各项工作逐步完成的同时，人员、设备也陆续退场。对于该阶段的风险识别，需要将重点放在工程项目整体验收上，确保项目本身在质量、经济、法律层面的移交顺利。为此，对于该阶段的风险识别应聚焦于以下几个方面：验收风险——对建筑物整体展开全方位的质量检验，查看是否存在因前期工艺不当以及材料不佳而可能导致的墙体开裂、建筑渗水、设备失灵等质量隐患？并按照建筑施工专项验收标准对项目的消防、节能、环保、人防等情况进行检查，识别其中可能存在的无法达标的情况。同时，对竣工资料的完整性、合规性进行检查，识别其中是否存在签字盖章手续不全、资料管理混乱、竣工图与现场实际不符的问题；结算风险——识别施工过程中是否存在合作方拖欠工程款、工程量核算争议等风险；交付与移交风险——对照合同约定、设计要求就施工项目的实际状况进行检查，识别其中是否存在绿化景观不达标、配套设施未完成、交付物料不全等风险，以免造成业主拒绝接收的风险。

3 建筑工程项目风险的应对策略

3.1 风险回避

风险回避是指项目管理者在对风险做出有效识别后，考虑到风险的高发生率以及所引发的严重后果，采取主动放弃原定项目施工计划，从而完全消除风险的发生条件。相对而言，这种风险应对方式更为彻底且直接，但同时也意味着原定施工计划中所附带收益的消失。因此，风险回避通常适用于那些发生率极高且造成的损失、后果极其严重甚至超出建筑企业可承受范围的风险类型。例如：勘察结果表明建筑项目选址位于活动断裂带上，或者周围存在泥石流、滑坡等严重自然灾害隐患；验证结果表明项目采用的先进施工技术缺少充分的应用数据支撑，其安全性、可靠性难以得到保证；项目施工方案中审查结果显示其中存在明显违背法律法规的强制性规定，踏及国家关于环境保护、安全生产红线；施工项目审计中发现业主存在不良贷款记录、资金链断裂等严重问题等。这些情况下，任何侥幸心理的存在都会将建筑工程项目带入不可挽回的境地，此时采取风险回避的方式，通过放弃、变更原定施工方案不失为一种明智之举。

3.2 风险转移

风险转移是指建筑企业为避免风险造成的损失，通过合同转移、保险转移的方式，将风险合理合法地

转移给第三方，让第三方代在享受一定权益的同时代替建筑企业承担项目可能发生的风险。就合同转移来讲，是建筑企业在追求项目整体风险成本最小化、自身风险可控化的基础下，利用法律的约束效力，在项目各相关主体之间以签订合同的形式，对项目风险分配方案进行重新划分。该应对策略的核心逻辑并非是建筑方不负责任的“甩锅”行为，而是一种建立在比较优势理论下对风险防控工作的合理安排。例如：对涉及钢结构吊装、玻璃幕墙安装、防水防腐保温工程、机电安装工程、消防设施工程等为代表的分项工程，考虑到上述作业存在技术壁垒，对施工队伍的专业性要求较高的特点。为提高施工质量、降低风险，施工企业可以通过合同的形式将这些分项工程转移给更具专业优势的分包单位，让其凭借自身先进的专用设备、成熟的应对预案、丰富的施工经验，高效、安全地完成这些关键任务。而保险转移则是建筑企业通过向保险公司支付保费的方式，将以意外事故、自然灾害等为代表的一系列不可预见的巨大损失风险转移给保险人。在风险发生时让保险人能够帮助建筑企业承担部分损失，以此来降低风险对建筑企业造成的损失。目前，建筑工程施工中常见的保险项目主要有建筑工程一切险、安装工程一切险、第三者责任险，三者因其保障内容丰富、保障范围广泛等特点，成为建筑工程施工项目的“标配”。

3.3 风险降低与风险自留

相对而言，风险降低与风险自留所应对的风险等级、破坏程度、影响范围都较小，几乎都处于建筑企业可承受范围内。如果将风险回避、风险转移视作企业将风险这一“烫手山芋”扔出去，那么风险降低、风险自留则更像是一种为“烫手山芋”降温并接纳的务实性做法。“降温”的过程并非是消极的等待风险影响的降低，而是在对风险做出有效识别与科学预判过后，通过各种缓解性、预防性措施的实施，将风险掌握在可控范围内。例如：针对人员、设备、材料、方法、环境施工项目五大核心要素的风险防范，企业可以依据清晰的风险清单建立完善的内部管理体系^[4]，包括：加强施工人员安全技术培训和作业任务交底，为“人员”风险降温；定期开展脚手架、塔吊、车辆等设备的维护与检修，为“设备”风险降温；严格监管原材料进场与管理，为“材料”降温；制定科学应急预案、优化施工组织设计，为“方法”风险降温；实时利用大数据技术对天气变化情况展开实时的监控分析^[5]，做好恶劣天气施工应急预案防护准备，为“环境”风险降温。

除风险回避外，任何风险都是不可被彻底消除的，因此风险降低并不意味着风险影响力的彻底消失，而是预示着其威胁性、破坏力的降低。为此，就需要企业基于对自身抗风险能力、财务实力的客观分析，通过风险自留的方式主动消化并接纳这些“残余风险”。例如：对于经过前期“降温”过后依然存在的一些小范围返工、轻微材料损耗、可预见设备故障等，企业可以通过设立风险应急储备金的方式来应对这些风险，以此来赋予建筑企业在项目风险问题应对与处置上的灵活性，使项目管理者在识别到风险的第一时间能够更为便捷地组织资源，迅速地展开修复、补救活动，将风险控制在最小范围内。

4 结束语

建筑工程项目风险的本质特征在于其一直都贯穿于项目始终，并展现出了一定的阶段性、动态性。项目在不同阶段所面临的风险类型各异，即便是同一风险，在项目的不同阶段，其造成的影响和发生概率也是不同的。因此，对于建筑工程项目风险的识别与应对，决不能是一次性的、静态的，而是要建立一种能够贯穿于整个项目始终的全生命周期性的动态风险识别框架，并积极发挥管理作用，通过对风险回避、风险转移、风险降低、风险自留等策略的灵活运用，实现风险识别与管控前瞻性、精准性、有效性的提升。在未来的工作中，需要继续加大对建筑工程项目风险的研究，在不断推进行业交流、数据共享的基础上积极探索人工智能新兴技术在施工项目风险管理领域的应用，以不断提升建筑企业的风险免疫能力、抗击能力，使建筑企业能够逐渐在风险的识别与应对中占据更多的主动权。

参考文献：

- [1] 温咏.建筑工程项目管理中的风险识别与应对[J].广西城镇建设,2023(05):51-54.
- [2] 凌君棠.建筑工程施工管理中的项目风险识别策略[J].城市开发,2025(18):88-90.
- [3] 周波.建筑工程项目风险管理影响因素及措施探讨[J].住宅与房地产,2025(23):95-97.
- [4] 罗春阳,刘金荣.建筑工程项目全周期安全管理关键控制点研究[J].湖北应急管理,2025(18):38-40.
- [5] 苏宗宪.基于大数据的建筑工程项目风险管理策略研究[J].中华建设,2025(10):31-33.

水电厂运行效率提升策略与关键技术研究

方杨勇

(大唐陕西发电有限公司喜河厂站, 陕西 安康 725200)

摘要 在“双碳”目标引领以及新型电力系统构建的大背景之下, 水电厂作为清洁低碳能源体系中的核心构成部分, 其运行安全性、高效性以及经济性直接影响能源供给质量以及电网稳定。本文从水电厂运行系统的基本构成要素出发, 对影响运行效率的关键因素展开系统解析, 结合当下能源领域的热门技术, 设计有针对性的运行优化技术路径, 并且提出配套的管理策略, 以期通过技术与管理的共同作用, 实现水电厂运行状态的精准调控以及效能提升, 为水电厂适应新能源并网环境、发挥更大能源支撑作用提供参考。

关键词 水电厂运行系统; 水力特性; 设备运行状态; 调度运行模式

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.022

0 引言

水电是技术成熟、清洁且能控制的再生能源, 在我国能源结构中占据重要位置, 不仅是电力系统调峰调频的“稳定器”, 还是达成“碳达峰、碳中和”目标的关键依靠。随着电力体制改革推进和新能源发电规模迅速扩大, 水电厂运行面临多种挑战: 其一, 新能源发电不稳定、有波动, 对电网调峰能力要求更高, 水电厂要承担更多调节任务; 其二, 部分老旧水电厂有设备老化、控制方式落后等问题, 运行效率和安全保障能力亟需提高。在此情况下, 开展水电厂运行研究和优化, 挖掘运行潜力、提高调控水平, 对推动水电行业高质量发展、保障能源安全具有重要实际意义。

1 水电厂运行系统的基本构成要素

水电厂运行系统是由核心设备、控制系统、辅助系统和能源传输系统组成的整体, 各部分协同工作让水能变成电能并安全输出^[1]。

核心设备是能量转化的关键, 主要有水轮机、发电机和主变压器。水轮机接收引水系统送来的水流, 把水能变成机械能, 它的性能参数(如转轮效率、过流能力)直接决定了能量转化效率; 发电机和水轮机同轴相连, 把机械能变成电能, 它的励磁系统稳定性直接影响电能质量; 主变压器把发电机输出的低压电能升到电网输电电压等级, 让电能高效接入电网。

控制系统是水电厂运行的“指挥中心”, 以计算机监控系统为核心, 加上 PLC(可编程逻辑控制器)、SCADA(数据采集与监视控制系统)等技术, 能自动控

制机组启停、负荷调节、设备状态监测等运行环节。现在主流的控制系统能远程监控、无人值守, 通过实时收集运行数据并执行控制指令, 保证系统运行准确又稳定。

辅助系统保证核心设备安全运行, 有冷却系统、润滑系统、排水系统和消防系统等。冷却系统用循环水带走设备运行产生的热量, 防止设备过热损坏; 润滑系统给转动部件提供润滑, 减少摩擦损耗; 排水系统及时排出厂房和机组里的积水, 避免设备受潮; 消防系统针对电气设备、油系统等重点地方, 建立火灾防控体系, 保证设备和人员安全。

能源传输系统有引水系统、尾水系统和输电线路。引水系统由大坝、进水口、压力钢管等组成, 把水库里的水准确送到水轮机, 它的过流能力和压力稳定性影响水轮机工况; 尾水系统把水轮机排出的水引到下游河道, 保证水流循环; 输电线路把升压后的电能送到电网, 它的传输效率和可靠性决定了电能最终利用效果。

各部分相互关联、相互影响, 任何一个环节出问题都可能影响整个水电厂运行效能, 所以明确各部分的功能和运行特点是进行运行优化的基础。

2 水电厂运行效率的影响因素解析

2.1 水力特性因素

水力特性是影响水电厂运行效率的主要自然因素, 主要表现在水头变化、水流情况及水质状况三方面。水头是水轮机运行的主要动力参数, 等于水库水位和

作者简介: 方杨勇 (1976-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 水轮发电机运行。

尾水位的差值。水库水位因季节降水等因素会有变化，偏离设计水头时，水轮机工作状况变差，效率降低，还可能产生汽蚀等问题；尾水位受下游河道水位等影响，升高或降低都会影响水轮机运行。水流情况包括流速等，不规则水流会增加阻力，降低水能利用效率，还可能引发振动；含沙量影响设备寿命和效率，高含沙水流会磨损部件，使效率降低。水质状况除含沙量外，污染物会腐蚀部件，藻类会降低冷却效果^[2]。所以，掌握水力特性规律并针对性控制是提升效率的关键。

2.2 设备运行状态因素

设备运行状态是决定水电厂运行效率的内部主要因素，设备健康程度、老化情况及维护效果直接影响其运行性能。核心设备长时间运行会因磨损等原因出现性能降低，如转轮磨损、定子绕组绝缘老化会使效率降低、电能输出质量下降。设备运行负荷和启停次数也影响效率，低负荷运行会偏离最佳效率区，频繁启停会增加损耗、消耗多余能量。另外，设备维护效果很重要，定期维护能处理故障、恢复性能，维护不好或不及时会降低效率，还可能引发事故。例如：导水机构接力器卡住会降低发电效率。

2.3 调度运行模式因素

随着新能源接入电网规模变大，电网对水电厂调峰调频能力的要求更高，调度方式需要从“经验驱动”变为“数据驱动”，如果不能实时整合多种数据，就难以制定最佳计划。另外，调度指令执行效率也影响运行效率，信息延迟会让机组工况调整变慢。为显示差异，对比传统和智能调度方式核心指标（见表1）。从表1可知，智能调度方式在关键指标上比传统方式好，它通过整合多种数据和用智能算法优化来精准制定计划，证明了优化调度方式对提高水电厂运行效率的重要作用^[3]。

3 水电厂运行优化的技术路径设计

3.1 基于数字孪生的运行状态精准调控技术

数字孪生技术是现在工业领域常用技术，它通过建立和实际水电厂完全对应的虚拟数字模型，实现对运行状态的实时观察、仿真研究和准确控制，给水电厂运行优化提供关键技术帮助。数字孪生模型的建立要整合多种数据，有设备三维几何模型数据、运行历

史数据、实时观察数据（像设备振动、温度、压力、流量等）、水力特性数据以及电网调度数据等，通过数据中台完成数据的统一收集、清理和融合，给模型运行提供数据支持。

在实时观察方面，在水轮机、发电机、压力钢管等关键设备以及引水系统、冷却系统等关键环节布置物联网传感器，结合边缘计算技术，实现运行数据的实时收集和本地分析，把异常数据及时传到数字孪生平台，平台通过对比虚拟模型和实际设备的运行参数，准确发现设备故障隐患和运行偏差。在仿真研究方面，数字孪生平台能依据实时数据模拟不同运行情况下的系统反应，如模拟水头波动、负荷变化时水轮机的效率变化情况，或者模拟设备故障对整个系统运行的作用，通过仿真结果优化运行策略。在准确控制方面，数字孪生平台结合智能控制算法，根据电网调度要求、水力特性变化和设备运行状态，自动生成最佳控制指令，如调整导叶开度、优化励磁参数等，实现水轮机运行情况的实时优化，保证机组一直处于最佳效率范围^[4]。此外，数字孪生技术还能用于设备全生命周期管理，通过模拟设备老化过程，预测设备剩余寿命，给维护计划制定提供科学依据，防止过度维护或维护不够，降低维护成本。

3.2 水轮机与发电机的智能优化改造技术

核心设备性能提升是提高水电厂运行效率的直接办法。针对水轮机和发电机的智能优化改造要结合设备运行情况和先进技术，实现性能提升和智能化升级。

水轮机优化改造主要关注转轮和导水机构。转轮是水轮机能量转化的关键部件，其形状设计直接影响效率。用CFD（计算流体动力学）技术重新优化转轮形状，结合3D打印技术制造高精度转轮，能有效提高转轮的过流能力和抗汽蚀性能，让水轮机在更宽的水头和负荷范围保持高效率。导水机构优化采用智能伺服控制系统，取代传统机械控制方式，实现导叶开度准确、快速调节，减少因导叶调节延迟造成的效率损失。同时，智能伺服系统能实时监测导叶运行状态，及时发现卡涩、磨损等问题，保证导水机构稳定运行。

发电机优化改造重点在励磁系统和冷却系统。励磁系统采用智能励磁调节器，结合模糊控制、PID控制等先进算法，实现励磁电流准确调控，确保发电机输

表1 不同调度模式下水电厂运行关键指标对比

调度模式	负荷响应时间	水轮机平均效率	弃水率	单位电能耗水量
传统经验调度	≥ 5 min	75% ~ 82%	3% ~ 5%	3.8 ~ 4.2 m ³ /(kW·h)
数据驱动智能调度	≤ 1 min	85% ~ 90%	≤ 1%	3.2 ~ 3.6 m ³ /(kW·h)

出电能的电压和频率稳定，同时提高发电机的调峰调频能力。冷却系统优化采用智能温控系统，结合热管冷却、强制通风冷却等高效冷却技术，实时监测发电机定子、转子的温度变化，根据温度数据自动调节冷却强度，避免过度冷却造成能量浪费，同时防止冷却不足导致设备过热，提高发电机运行效率和寿命。此外，在设备改造过程中，可安装状态监测传感器和智能诊断模块，实现设备运行状态自我感知、自我诊断，为运行优化和维护提供数据支持。

3.3 基于 AI 算法的负荷智能调度技术

负荷调度的智能优化是适应新能源接入电网环境、提高水电厂运行效率的关键。基于 AI 算法的负荷智能调度技术通过整合多种数据，实现调度策略的准确制定和动态调整。该技术的关键是建立多目标优化调度模型，目标有最大化发电效率、最小化弃水率、满足电网调峰需求和保障设备安全等。模型的输入数据包括上游来水预测数据、电网负荷需求数据、新能源发电预测数据（如风电、光伏发电量）、设备运行状态数据和水文气象数据等。

为提高数据预测的准确性，使用 LSTM（长短期记忆网络）、GRU（门控循环单元）等深度学习算法，分别对上游来水和新能源发电出力进行准确预测。其中上游来水预测结合历史水文数据、实时降水数据和气象预报数据，新能源发电预测结合历史出力数据、天气预报数据及光伏板 / 风机运行状态数据，通过多模型融合提高预测精度，为调度决策提供可靠基础。

在调度策略生成方面，采用遗传算法、粒子群优化算法等智能优化算法，对多目标优化模型进行求解，生成最优的机组启停计划和负荷分配方案。例如：在新能源发电高峰期，算法可自动减少水电出力，优先使用新能源电能，同时避免弃水；在电网负荷高峰期，算法可根据设备状态和水力特性，优化各机组的负荷分配，使总出力最大化，满足电网需求。此外，负荷智能调度系统需与电网调度中心实现数据连接，实时接收电网调度指令，动态调整调度策略，确保水电厂运行与电网需求相匹配，提高电网整体运行效率。同时，通过建立调度效果评估体系，对调度策略的执行效果进行实时评估，根据评估结果不断优化 AI 算法参数，提高调度模型的适应性和准确性。

3.4 水电与新能源的协同运行优化技术

在新的电力系统中，水电和新能源协同运行是提高能源使用效率、保证电网稳定的重要方法。其关键是利用技术让两者优势互补，减少新能源发电不稳定

对电网的影响，同时提高水电厂的运行效果。协同运行的优化技术主要有风光水协同运行技术和储能协同优化技术。风光水协同运行通过建立联合调度平台，整合水电厂、风电场、光伏电站的数据，用 AI 预测算法准确预测风光发电和上游来水情况，制定协同调度策略^[5]。

当风光发电量增加时，减少水电发电，把多余的电送到电网，同时利用水电厂水库的调节能力，在风光发电少时增加水电发电，填补供电不足，保证能源供应稳定。储能协同优化技术是在水电厂建储能系统（如抽水蓄能、电化学储能），实现电能的时空转移，当风光发电过多或水电厂负荷低时，把多余的电存到储能系统；当风光发电不足或电网负荷高时，储能系统放电，和水电协同满足电网需求，储能系统还能帮助水电厂提高调峰调频能力，减少机组启停次数，降低运行损耗。此外，协同运行优化技术还要解决水电和新能源之间的通信延迟、数据不同等问题，通过建立统一的能源互联网平台，实现多能源主体的数据共享和协同控制，提高整体运行效率。

4 结束语

在“双碳”目标以及新型电力系统构建的时代背景下，水电厂运行优化已成为保障能源安全以及提升能源利用效率的关键课题。本研究对水电厂运行系统的内在机理展开深入细致剖析之后，从数字孪生、设备智能改造、AI 调度以及多能协同等多个维度提出创新技术路径，并且融合管理策略形成系统性解决方案，为破解水电厂所面临的调峰压力、设备老化等现实挑战提供理论参考。通过技术与管理协同创新推动水电行业朝着智能化、低碳化方向转型，对于构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系有深远的战略意义以及实践价值。

参考文献：

- [1] 李华取,周娜,吴滇宁,等.考虑收益风险的水电厂优化报价策略[J].水电能源科学,2023,41(06):216-220.
- [2] 唐世戡,王义.新形势下集控水电厂经济运行工作变化与对策[J].水电站机电技术,2022,45(10):173-176.
- [3] 刘正春.水电厂安全生产环境多级可拓评价研究[J].科技创新与应用,2022,12(26):81-85.
- [4] 彭俊先.大中型水电厂剪断销剪断保护优化设计[J].红水河,2022,41(03):143-147.
- [5] 陈超.浅析洪江水电厂降低综合厂用电率的控制措施[J].水电站机电技术,2022,45(06):88-89,102.

家用光伏发电与电动汽车充电结合模式探索

王以军

(江苏鑫迈德电力工程有限公司, 江苏 苏州 215100)

摘要 在全球能源转型与交通电气化加速推进的背景下, 家用光伏发电与电动汽车充电的协同利用, 已成为提升可再生能源消纳效率、降低碳排放的重要路径。本研究阐明了二者结合的技术基础, 涵盖光伏系统、充电设备及能量管理等核心构成, 还梳理出离网独立、并网协同与智能优化(V2G融合)三种主流模式, 揭示了它们的运行逻辑与适用场景; 剖析了协同调度精度不足、初始投资偏高、标准政策缺失等关键问题, 进而提出通过智能调度技术升级、经济激励机制创新与标准化体系建设推动二者高效融合, 以期为家庭能源系统的低碳化与智能化发展提供有益参考。

关键词 家用光伏; 电动汽车充电; 车网互动(V2G); 能量管理系统

中图分类号: TM61; U469.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.023

0 引言

在全球能源转型进程中, 可再生能源替代与交通电气化是两大核心方向。家用光伏发电作为分布式清洁能源, 虽具备灵活环保的突出优势, 却存在出力不稳定的问题, 容易造成能源浪费与电网冲击。与此同时, 电动汽车充电需求正快速增长, 若单纯依赖电网供电, 不仅会加剧电网负荷压力, 还会带来间接碳排放。将家庭光伏与电动汽车充电相结合, 实现“自发自用”, 既能有效提升光伏能源消纳率、降低用车成本, 还可借助车网互动技术参与电网调峰, 增强电力系统灵活性。当前相关技术基础已初步成型, 但协同调度机制、经济收益平衡及政策支持力度等方面仍需突破, �亟待通过系统性研究推动新型电力系统建设。

1 家用光伏发电与电动汽车充电结合的技术基础

1.1 家用光伏发电系统核心构成

家用光伏发电系统一般由光伏组件、逆变器、配电箱和监控系统共同组成, 其中光伏组件是能量转换的起点, 负责将太阳能转化为直流电能, 它的转换效率与运行稳定性直接关系到整个系统的发电能力。逆变器作为核心转换设备, 能把光伏组件产生的直流电转化为符合家庭用电需求的交流电, 就连电动汽车充电所需的电能质量也能通过它得到保障。配电箱承担着过流保护、漏电保护等关键安全功能, 为系统稳定运行筑牢安全防线, 监控系统则实时采集发电数据与设备运行状态, 为系统运维和能源调度提供可靠的数

据支撑^[1]。相较于集中式光伏电站, 家用光伏系统容量更小、接入电压等级更低, 对电网的冲击也相对较弱, 这种特性让它特别适合与分散的电动汽车充电需求相结合, 从而实现能源的本地化平衡。

1.2 电动汽车充电系统技术特性

电动汽车充电系统按功率等级分为慢充和快充两类, 家用场景中慢充系统更为常见, 其核心设备是交流充电桩, 这种充电桩自身没有整流功能, 需要依靠电动汽车的车载充电机将交流电转为直流电, 才能为动力电池补充电量, 它结构简单、安装成本低且对电网冲击小, 与家用光伏系统的出力特性恰好匹配。随着车网互动技术不断发展, 具备双向充放电功能的V2G充电桩开始兴起, 这类充电桩不仅能实现电网对电动汽车的充电, 还能在特定条件下把电动汽车动力电池储存的电能反向输送到家庭或公共电网, 让电动汽车从单纯的能源消耗者转变为“移动储能单元”, 为家用光伏能源的削峰填谷和电网辅助服务创造可能。

1.3 二者结合的核心技术支撑

家用光伏与电动汽车充电结合的核心技术支撑涵盖能量管理系统、储能技术及智能控制技术, 其中能量管理系统扮演着“能源管家”角色, 它通过实时采集光伏出力、电动汽车充电需求、电网电价等多维度数据, 动态制定能源分配策略, 实现光伏直供、储能调峰、电网兜底的协同运行。储能技术用于平抑光伏出力的波动性, 在光伏出力过剩时储存电能, 在光伏出力不足或充电需求高峰时释放电能以保障充电服务的连续

作者简介: 王以军(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

性，家用场景中常用的锂离子电池在能量密度、循环寿命与安全性上已能满足需求。智能控制技术则依托物联网、大数据分析等手段，实现对光伏、充电及储能系统的精准控制，确保各设备协同运行与安全稳定。

2 家用光伏发电与电动汽车充电结合的主流模式

2.1 离网独立模式

家用光伏与电动汽车充电的离网独立模式，是指两者构成不连接公共电网的独立能源闭环，完全依靠光伏能源满足充电需求，必要时由储能系统补充能源，其核心特征是能源自给自足，不会受电网供电质量和电价政策的影响。在技术配置上，该模式需要配备容量匹配的储能系统，以此解决光伏出力间歇性问题，确保充电需求稳定供给。而能量管理系统则承担核心调控作用，它通过预判光伏出力与充电需求，合理安排储能系统充放电时机，避免光伏能源浪费与充电中断。这种模式适合电网覆盖薄弱或电价较高的偏远地区，只是受储能容量与光伏出力限制，难以满足大规模或紧急的充电需求。

2.2 并网协同模式

并网协同模式是目前应用最广的能源结合模式，核心是让家用光伏系统、电动汽车充电系统与公共电网保持连接，构成光伏、电网、充电联动的多元能源供给结构，其中能量管理系统会依据光伏实时发电量和充电需求，动态优化能源的供给路径。当光伏发电量充足且能满足充电需要时，会优先用光伏电力直接为车辆充电，多余的电能既可以储存到储能系统中，也能并入公共电网^[2]；当光伏发电量不足时，公共电网就会及时补充供电，确保充电过程不会中断。这种模式不用依赖大容量储能系统，能有效降低初始投资成本，同时通过与电网的互动实现能源灵活调配，大幅提升系统的可靠性与经济性，而峰谷电价差的存在为光伏能源的错峰利用创造了条件，让该模式的经济价值得到进一步提升。

2.3 智能优化模式（V2G 融合模式）

智能优化模式是并网协同模式融入 V2G 技术后的高级形态，构建“光伏发电—汽车充电—电网互动”的全链条协同体系。电动汽车在此模式下不仅是光伏能源的消费终端，更凭借双向充放电功能参与电网调峰填谷和应急供电，成为能源系统中灵活的调节资源。其核心运行逻辑清晰明确：在电网负荷低谷或光伏出力高峰时，电动汽车可吸纳低价电网电能或富余光伏电能完成充电并储存能量；而当电网负荷攀升或光伏出力不足时，这些储存的电能又能反向输送至电网或

家庭负载，让用户获得峰谷价差收益或电网辅助服务补偿。能量管理系统通过精准预测光伏出力、电网负荷及电价波动，制定最优充放电策略，实现经济效益与能源利用效率的双重最大化。这种模式深度挖掘了电动汽车动力电池的储能潜力，显著提升了家用光伏能源的综合价值，是二者结合的未来主流方向，同时也对 V2G 充电桩、智能调度技术及相关标准规范提出了更高要求。

3 家用光伏发电与电动汽车充电结合的关键问题

3.1 协同调度与稳定性不足

技术层面的核心问题聚焦系统协同调度精度不足与运行稳定性欠缺，现有能量管理系统的调度策略多基于静态规则，缺乏对光伏出力、充电需求的动态预测能力，难以实现能源的精准匹配。光伏出力受日照、天气等自然因素显著影响，电动汽车充电需求则与用户出行习惯密切相关，二者的波动性容易导致光伏出力过剩时充电需求不足、充电需求高峰时光伏出力不足的错配问题。系统运行稳定性同样面临挑战，当光伏出力骤变或电动汽车突发充电需求时，易造成家庭电网电压、频率波动，进而影响用电设备安全。此外，在 V2G 模式下，电动汽车频繁充放电可能影响动力电池的循环寿命，如何在保障电池安全的前提下实现双向互动，已成为当前技术攻关的重点方向^[3]。

3.2 初始投资与收益平衡难题

经济因素是阻碍家庭用户参与的关键，核心问题在于初始投资成本高且收益回报周期长，家用光伏、充电桩特别是 V2G 充电桩与储能系统的组合投入，对普通家庭来说仍存在不小压力，尽管光伏上网电价和电动汽车运行成本的节约能带来一些收益，但受系统容量与利用效率限制，整体收益水平偏低，这就使得投资回报周期拉长，直接削弱了用户的参与意愿。收益机制的不完善则进一步放大了这种经济障碍，当前 V2G 模式下的辅助服务收益、峰谷套利收益缺乏明确计量与结算标准，用户难以充分获得电动汽车参与电网互动的经济价值，进而影响了智能优化模式的推广应用。

3.3 支撑体系不完善

政策与标准体系的不完善主要体现在三方面：一是并网标准不统一，家用光伏系统与 V2G 系统的并网接入缺乏统一技术标准与管理规范，不同设备厂商的产品兼容性差，既增加系统集成难度也提升运行风险；二是政策激励不足，现有政策多聚焦光伏系统与电动汽车的单独补贴，针对二者结合模式的专项补贴、电价优惠等激励措施较少，难以引导用户主动参与；三

是监管机制缺失, V2G模式下电动汽车与电网的双向互动涉及能源交易、电网安全等多重问题,当前缺乏明确监管主体与监管规则,制约模式的规范化发展。

4 推动家用光伏发电与电动汽车充电高效结合的路径探索

4.1 提升协同调度与运行稳定性

技术优化的核心在于突破智能调度与系统稳定两大关键技术。在智能调度领域,需着力提升能量管理系统的智能化程度,将机器学习、大数据分析等先进技术融入其中,实现对光伏出力与充电需求的精准预测,进而构建预测、调度、反馈的闭环调控机制,通过动态调整光伏直供、储能充放及电网交互的比例达成能源最优配置,同时推动V2G技术与储能技术的融合应用,借助电动汽车动力电池的分散储能潜力替代部分集中式储能设备,有效降低系统投资成本。在运行稳定性层面,既要加强设备技术升级,也要做好系统集成优化,光伏逆变器与充电桩需提升电压调节和谐波抑制能力以减少对电网的冲击。动力电池厂商则应开发适配V2G模式的电池技术,通过优化电池管理系统在保障电池寿命的前提下提升充放电循环性能。此外,还需建立统一的设备通信协议与数据标准,以此增强不同设备的兼容性并提升协同运行效率。

4.2 强化经济激励与市场化运作

提升用户参与意愿,核心在于构建完善机制,其中合理的收益分配机制与市场化交易机制尤为关键,二者共同构成用户参与的核心保障。在收益分配上,需明确V2G模式下用户的收益来源,既包括光伏自用节省的电费、峰谷电价差带来的套利收益,也涵盖电网辅助服务给予的补偿等。电网企业应构建透明的计量与结算体系,确保用户收益及时足额到账,同时推动车企与电池厂商建立电池质保兜底机制,通过经济补偿或延长质保等方式,彻底打消用户对电池损耗的顾虑^[4]。在市场化运作层面,可探索打造区域化家用光储充交易平台,鼓励用户借助平台深度参与能源交易,如光伏出力富余的用户可通过平台将多余电能出售给周边充电需求大的用户,或参与电网需求响应服务,实现能源市场化配置与价值最大化。此外,还应推动充电服务运营商参与模式创新,通过光伏加充电加储能的一体化运营,减轻用户初始投资压力,同时提升服务专业性。

4.3 完善标准体系与激励措施

家用光伏与V2G系统结合发展的政策保障,需聚焦标准制定、激励引导与监管规范三大核心,通过系

统性举措为产业发展筑牢支撑。在标准制定上,应加快完善技术标准体系,由行业主管部门牵头联合设备厂商、科研机构,共同敲定家用光伏系统与V2G系统的并网标准、设备兼容标准及数据通信标准等关键规范,推动全产业链实现标准化发展。在激励引导方面,需强化政策扶持力度,出台针对二者结合模式的专项补贴政策,对V2G充电桩、储能系统的安装给予额外资金支持;同时优化电价政策,进一步扩大峰谷电价差为用户创造峰谷套利空间,并将家用光储充系统纳入电网辅助服务市场,明确用户参与调峰填谷的补偿标准^[5]。监管规范层面则要建立健全监管机制,清晰界定能源监管部门、电网企业、用户等各方权责边界,既加强V2G交易安全监管确保电网稳定运行,又规范市场交易行为防范不正当竞争、保障用户合法权益,同时鼓励地方开展试点示范,总结可复制、可推广的经验模式,为全国范围内的规模化推广奠定坚实的基础。

5 结束语

家用光伏发电与电动汽车充电的深度融合,既实现了清洁能源的本地化高效利用,又推动了电力系统从单向供电转向双向互动的新模式。通过能量管理系统的统筹调度,光伏产生的电能会优先供给汽车充电,这大幅提高了电能自发自用的比例,降低了对电网的依赖和日常用电成本。而引入V2G技术后,电动汽车还能作为移动储能单元参与电网调峰填谷,进一步挖掘系统的灵活性与经济价值。当前这一模式虽在技术协同、成本控制和制度保障上仍有挑战,但随着智能算法升级、电池成本下降及政策体系完善,必将在新型电力系统建设中发挥关键作用。未来需加强跨领域协同创新与规模化试点,加速家庭能源生态的绿色升级。

参考文献:

- [1] 陈浩然,赵晓丽.考虑分布式光伏发电的电动汽车充电策略研究[J].中国管理科学,2023,31(04):161-170.
- [2] 冯永康,王梦欣.分布式光伏发电的电动汽车充电策略[J].大众汽车,2024(02):16-18.
- [3] 冯富国.协同光伏发电的电动汽车充放电控制策略[D].大连:大连交通大学,2023(07):75-76.
- [4] 王呈轩,宫瑞邦,樊艳芳,等.以光伏为电源的无线充电式新能源汽车控制研究[J].太阳能学报,2025,46(06):306-313.
- [5] 华一飞.计及分布式电源接入及电动汽车充电的配电网规划探讨[J].中国科技期刊数据库工业A,2023(02):23-24.

基于 AI 驱动的混合云 IDC 资源自动化与成本优化策略

闫崇喆

(北京飞机维修工程有限公司, 北京 100000)

摘要 本文设计了基于 AI 驱动的大型混合云 IDC 规划方案, 聚焦五大核心目标: 自动化资源需求预测、优化成本结构、提升资源利用率与弹性、强化多租户安全合规及加速业务上线与容量扩展。通过分阶段、数据驱动等技术, 分析混合云 IDC 架构的负载资源需求动态化、峰均比高、资源利用率偏低等情况, 提出“数据可观测性建设—初步机器学习预测—深度 AIOps 平台集成—多云联动全局优化”共计四个阶段演进路线, 推动混合云 IDC 资源规划从被动响应到主动预测, 手动式管理到自动化调度的转变。该方案基于核心目标提出具体实施策略, 同时提出团队能力建设与组织保障的建议, 以期对企业构建高效、敏捷、安全且成本可控的新一代混合云基础设施有所裨益。

关键词 混合云架构; AIOps; 资源优化; 成本控制

中图分类号: TP18; TP2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.024

0 引言

随着数字化转型的推进, 业务全球化下传统大型企业的 IT 基础设施建设方式日益复杂。混合云架构已成为既满足私有云的安全性、可控性, 又具有公有云的弹性、成本效益的主流 IDC 方案。但混合云架构仍需面临资源管理、成本控制和运维效率等方面的巨大挑战。为应对这些挑战, 并支撑企业业务的持续创新与增长, 本文聚焦五大核心能力: 一是自动化预测资源需求, 变被动扩容为主动规划; 二是优化成本结构, 通过精细化管理与智能调度降低 CAPEX 与 OPEX; 三是提升资源利用率与弹性, 打破孤岛并保障高峰服务质量; 四是强化多租户安全合规, 实现复杂共享环境下的数据隔离; 五是敏捷支撑业务上线与扩容, 缩短开发到上线周期。

1 大型混合云 IDC 规划面临的问题

1.1 工作负载特征复杂且动态

虚拟化与容器平台作为基础计算平台支撑着大量应用。在多租户环境下, 资源争抢可能导致性能变得异常波动。虚拟化层和虚拟机配置对性能有显著影响, 需要精细化设计。大数据分析的工作负载一般是周期性、计算密集型的, 如 MapReduce 任务, 其资源需求呈现明显的潮汐效应。AI 训练及推理是资源需求的“大

户”, 尤其消耗大量 GPU 等异构计算资源。且 GPU 需求通常是突发性的, 训练任务期间资源占用率极高, 而任务间隙则可能闲置。并且训练出的模型在转为推理使用后, AI 平台消耗的资源呈指数级降低。网络与安全设备等基础设施虽然自身计算需求相对稳定, 但其性能直接关系到所有业务的稳定性和安全性, 且会随时面临日益严峻的网络安全威胁。

1.2 普遍存在的资源管理挑战

云数据中心中的业务关键型工作负载, 其资源使用的峰值可能是平均值的 10 倍到 100 倍甚至更高。为了应对峰值, 传统规划方式往往导致资源在大部分时间里处于低利用率状态, 造成巨大浪费。工作负载具有显著的每日、每周的时间模式, 但不同资源类型(如 CPU、磁盘 I/O) 的模式各不相同, 增加了手动规划的难度。

1.3 人工智能应用成熟度

市场调研显示, 多数传统大型企业在 AI 赋能资源规划领域仍处于调研阶段。传统行业(如制造、能源)的资源规划高度依赖历史经验、政策合规及多维数据整合, 受数据标准化、决策透明度等瓶颈制约, 难以应用 AI 技术。同时, 企业普遍缺乏现成模型、工具及专业团队。此外, AI 研发对计算、数据等资源需求巨大, 因此需制定清晰可行的渐进式路线图, 而非一步到位部署复杂系统。

作者简介: 闫崇喆 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: IT 基础架构、混合云、智算中心。

2 AI 驱动混合云 IDC 规划方案与技术路线

本方案采用循序渐进的四阶段演进策略，从数据基础做起，逐步构建智能化、自动化的资源规划与管理能力。

2.1 阶段一：数据基础建设与全面可观测性建立

本阶段核心目标是构建混合云环境下统一数据采集与监控平台，实现对计算、存储、网络等全量资源及应用性能的全方位监控，为后续构建智能分析与预测模型提供数据基础。正如管理领域核心准则“无法量化，就无法管理”，精准的数据采集与监控是混合云高效运维的前提。本文将通过四大技术路线推进：第一，在物理服务器、虚拟机、容器及关键网络设备中部署统一监控代理^[1]（如 Prometheus Node Exporter、cAdvisor、Fluentd 等），实现数据全面采集；第二，构建含统一监控数据的时序数据库与日志聚合系统的中央数据湖，完成监控指标、日志及链路追踪数据的集中存储；第三，通过 Grafan 等工具构建多业务、多资源维度的多层次可视化仪表盘，支撑日常运维与工作负载行为分析；第四，系统性收集 CPU/ 内存利用率、I/O 性能、应用响应时间等关键指标，计算峰均比、波动性等统计特征，完成工作负载特征量化，为后续建模提供数据支撑。

2.2 阶段二：基于统计与机器学习的初步预测

本阶段核心目标是基于前期积累的历史数据，初步开发资源需求预测模型，推动混合云运维从被动响应模式到主动预警模式转型。策略将通过四大技术路线落地实施：第一，针对大数据分析、常规业务应用等具有显著周期性的工作负载，采用 ARIMA、指数平滑法等时间序列预测模型，实现未来 24 小时、一周等时段的资源使用趋势预测；第二，为各应用及服务构建资源消耗“健康基线”，运用 3-sigma 原则^[2]等统计方法或孤立森林等基础机器学习算法，自动识别资源使用的异常波动并及时预警；第三，开发“What-if”分析工具，支持业务部门输入用户增长预期、大促活动等场景参数，同时模型应能够基于历史数据粗略估算额外资源需求，为手动扩容提供数据支撑；第四，强化团队能力建设，使工程师能够深度熟悉企业数据特征与业务场景，为模型落地与迭代提供人才保障。

2.3 阶段三：AIOps 平台深度集成与智能调度

本阶段核心目标是构建并引入 AIOps 平台，融合预测能力与自动化控制技术，实现混合云环境下资源智能调度、弹性伸缩及故障自愈，显著提升运维效率与资源利用率。策略通过四大技术路线推进：第一，开发自定义容器调度策略，调度决策既要考虑当前资源余量，又要结合预测模型结果，提前调度高负载 Pod 至

资源充足节点，或在资源紧张时驱逐低优先级 Pod；针对 AI 训练负载，调度器需感知 GPU 拓扑与显存状态^[3]，结合任务优先级及预计运行时长实现排队调度，最大化 GPU 集群利用率；第二，基于时间序列预测结果实现预测性自动伸缩，在业务高峰前提前扩容实例，高峰后平滑缩容，避免滞后响应导致的服务质量下降或资源浪费；第三，借助机器学习模型分析监控指标、日志与告警的关联性，在性能异常时快速定位根本原因，同步触发重启服务、隔离故障节点等自动化自愈预案；第四，融入成本感知调度策略，集成公有云 IaaS、PaaS 等定价模型，将可中断批处理任务优先调度至低成本实例，实现成本优化，该路线需要深入掌握公有云服务特性为基础。

2.4 阶段四：多云联动与全局资源优化

本阶段以最终目标为锚点，制定持续优化路线。该阶段核心是将私有云与多公有云平台整合为统一逻辑的“无限”资源池，使得应用负载在多云环境的自由智能流动，实现成本、性能与安全合规的动态最优平衡。策略通过四大技术路线推进：第一，部署或开发云管理平台，实现混合云资源的统一纳管，提供标准化服务目录与资源编排能力，夯实多云协同基础；第二，构建 FinOps 体系^[4]，培育 FinOps 文化并搭建工具链，实现云成本透明化、精细化分摊与持续优化，满足 AI 项目及公有云预算与成本管理的核心诉求；第三，优化智能工作负载放置策略，AIOps 平台基于工作负载特征、数据主权要求、安全合规规则及各云实时成本，自动决策最优运行位置，如延迟敏感型业务部署于私有云，高弹性 Web 应用部署于公有云并实现多云平台智能比价；第四，攻克数据联动与一致性难题，解决跨云数据同步、一致性保障及网络延迟等问题，确保应用负载迁移后数据可访问性与性能达标。

3 针对核心目标的具体实施建议

3.1 自动化预测资源需求

从阶段一开始系统性收集数据，在阶段二应用时间序列模型进行趋势预测，并在阶段三引入更复杂的深度学习模型（如 LSTM）以提高预测精度，最终实现对计算、存储、网络需求的全面、精准预测。

3.2 优化成本结构（降低 CAPEX/OPEX）

成本优化是本研究核心价值之一，主要通过 CAPEX 与 OPEX 双维度实现精益管控。在 CAPEX 优化方面，依托精准的资源需求预测模型，规避数据中心过度采购问题。采购决策不再基于简单线性增长假设，而是以未来 6 ~ 12 个月的预测需求为核心依据，实现资源配置与实际需求的精准匹配。在 OPEX 优化层面，通过多

阶段技术落地层层递进：借助阶段三 AIOps 自动化能力减少日常运维人力投入；通过智能调度与预测性伸缩，将资源平均利用率从行业低位提升至 60%~70% 的目标水平，降低闲置成本；阶段四则通过多云成本套利策略，智能选用公有云实例等低成本资源，进一步压缩运营开支。需强调的是，AI 项目的云资源预算管理是成本优化成功的关键支撑。

3.3 提升资源利用率与弹性

提升资源利用率与弹性是本文核心价值体现。在利用率优化方面，通过智能调度器实施工作负载混合部署策略，将日间高峰在线业务与夜间批处理任务等错峰负载^[5]部署于同一物理集群，填补资源使用“波谷”，实现全天候资源高效利用。在弹性增强层面，以公有云无限资源池作为私有云弹性扩展补充，当 AIOps 平台预测流量洪峰超出私有云容量时，自动触发“云爆发”工作流，将部分流量或应用实例无缝迁移至公有云，充分发挥其快速扩展能力，保障服务稳定性。

3.4 加强多租户安全与合规性

AIOps 的价值不仅限于效率提升与成本优化^[6]，其数据分析能力可延伸至安全领域，核心支撑异常行为检测与合规性监控自动化。在异常行为检测方面，通过分析资源调用、网络流量与 API 访问日志模式，AIOps 平台能识别偏离正常基线的行为，为安全漏洞、恶意攻击及内部违规操作提供早期预警。在合规性监控自动化层面，将数据存储地理位置等合规策略编码为调度规则，确保工作负载部署自动满足合规要求。构建完善安全框架，是数字化解决方案落地的必要前提。

3.5 加速新业务上线与容量扩展

借助 AIOps 与基础设施即代码（IaaS）融合，新业务上线的资源申请、审批、配置及部署流程实现全自动化，交付周期从数周压缩至数小时乃至数分钟。并且利用 AIOps 平台的精准容量预测支撑“容量即服务”模式，助力基础设施团队提前规划扩容，保障业务部门资源按需供给，有效避免因资源短缺导致的新业务上线延迟问题。

4 团队建设与组织保障

4.1 团队技能图谱构建

组建跨职能的“云智能中心”团队，成员应包括：数据科学家/AI 工程师（负责开发和优化预测模型与调度算法）；应用运营工程师（负责 AIOps 平台的搭建、运维和与现有系统的集成）；云架构师（负责设计混合云和多云架构）；FinOps 分析师^[7]（负责云成本的分析、优化和预算管理）。

4.2 工具选型

在自研与采购之间取得平衡。核心的预测和调度算法建议自研，以贴合传统大型企业实际情况的独特业务模式。而监控、日志、告警等基础平台可优先考虑成熟的开源或商业解决方案。

4.3 文化变革

推动从传统的 IT 运维文化向数据驱动、主动预测的 AIOps 文化转型。鼓励实验、容忍失败，并建立清晰的量化指标（如资源利用率、平均故障恢复时间、单位业务成本）来衡量项目成效。

5 结束语

在数字化转型持续推进的背景下，承载复杂工作的传统大型企业正面临传统 IDC 资源规划模式的瓶颈，静态化、人工化管理方式已难以适应新业务快速迭代与弹性伸缩的需求。为突破企业运维困境、重构资源管理体系，人工智能驱动的 AIOps 模式提供了创新性解决方案，这种模式已成为降本增效与提升业务敏捷性的核心方向。本文构建的四阶段演进路线，为 AI 资源规划能力的从零构建提供了可落地的实施框架。通过稳步筑牢数据基础、融合应用机器学习与自动化技术，最终建成全局优化的智能混合云管理体系，既能高效应对当下业务挑战，又能夯实适配未来技术变革与市场波动的运维根基，推动 IT 基础设施实现从“成本中心”到“价值创造中心”的关键跨越。

参考文献：

- [1] 佚名. AI 与可持续性能力解决云转型难题 [J]. 软件和集成电路, 2023(01):64-66.
- [2] 孙磊. 人工智能推动交通银行数据中心向智算中心转型 [J]. 中国金融电脑, 2025(06):13-16.
- [3] 丁建仁, 吴俊, 张学亮, 等. 多架构计算与存储需求下 IDC 云平台资源优化配置与高效调度研究, 2025(03):69-72.
- [4] 熊俊. 人工智能算力中心网络建设探究 [J]. 中国安防, 2025(08):44-47.
- [5] 刘伟, 李朝阳, 史海超. 人工智能技术推动力源变革的政策体系和应用挑战研究 [J]. 信息通信技术与政策, 2025, 51(06):27-32.
- [6] 柳雨晨, 李涛, 王志佳, 等. 基于大语言模型的电信运营商数字化系统智能运维(AIOps)的设计与挑战 [J]. 广东通信技术, 2025, 45(04):37-41.
- [7] 周春云. 高性能多微云成本优化调度系统设计与实现 [J]. 通讯世界, 2025, 32(01):38-40.

煤矿井下工作面支护技术与安全高效开采

刘延东

(华亭煤业大柳煤矿有限公司, 甘肃 平凉 744100)

摘要 在煤矿井下开采作业中, 工作面支护技术是保障开采安全的核心, 安全高效开采方法是提升煤炭资源利用率与生产效率的关键。本文围绕煤矿井下工作面支护技术展开, 系统阐述了综放工作面、长壁工作面、切顶采煤、斜井开采等五种安全高效开采方法的工艺原理、技术要点与适用场景, 并重点解析液压支架技术在开采作业中的适配应用。结果表明, 科学匹配支护技术与开采方法, 可有效控制井下顶板风险、提升开采效率, 为煤矿井下规模化、安全化生产提供技术参考。

关键词 煤矿; 开采作业; 井下工作面; 井下工作面支护技术

中图分类号: TD82

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.025

0 引言

煤炭在我国能源体系中占据重要位置。煤矿井下开采工作存在地质状况繁杂、顶板坍塌风险较大、生产效能和安全保障难以均衡等问题。随着煤矿开采深度的加大以及规模化生产需求的提高, 传统的支护手段和开采方式已无法契合“安全第一、高效生产”的准则。工作面支护技术对顶板的稳定性和作业安全起着决定性作用, 安全高效的开采方式则关系到资源的回收比率和生产效益, 实现两者的协调优化是煤矿井下生产的关键议题。本文结合井下地质条件和生产实际情况, 全面剖析支护技术的重点内容和高效开采方式, 为煤矿井下生产技术的升级提供借鉴。

1 煤矿井下工作面支护技术

1.1 选择支护支架

支护支架的挑选要将井下地质状况、煤层赋存特点以及开采技术作为主要依据, 保证支架和作业环境相契合。对煤层厚度与倾斜角度的分析是首要环节, 在薄煤层开采时, 需选用体积较小、移架操作灵活的支架, 防止支架过多占用作业空间; 中厚煤层开采过程中, 要同时顾及支架的支撑力度和移架效率; 厚煤层开采则需考虑支架对分层开采或者放顶煤技术的适用性。顶板的稳固程度是支架选择的重要指标, 在顶板不稳定的环境中, 应选用掩护式支架, 这类支架通过护帮板与顶梁的共同作用来控制顶板变形; 在顶板中等稳定的环境下, 可选用支撑掩护式支架, 该类支架能够平衡支撑强度与防护范围; 在顶板稳定的环境

中, 可采用支撑式支架, 这类支架依靠较大的工作阻力来控制顶板下沉。

1.2 支架类型的确定

根据支架结构形式与工作原理, 煤矿井下常用支护支架分为掩护式、支撑式、支撑掩护式三类, 各类支架的技术特征与适用场景存在显著差异(见表1)。掩护式支架以顶梁、掩护梁与底座构成封闭防护空间为核心结构, 顶梁短、掩护梁长, 通过立柱支撑顶梁, 护帮板可伸缩控制煤壁片帮。支撑式支架由顶梁、底座与立柱直接构成支撑体系, 顶梁长、无掩护梁, 立柱垂直布置, 工作阻力高, 主要通过高强度支撑控制顶板下沉, 但防护范围有限, 对煤壁片帮与顶板垮落的防护能力较弱, 需要配套护帮装置使用。支撑掩护式支架融合掩护式与支撑式支架的结构优势, 顶梁长度适中, 掩护梁与顶梁铰接, 立柱呈倾斜布置, 兼具高工作阻力与宽防护范围的特点, 适用于煤层倾角10°~25°、顶板中等稳定的中厚煤层综采工作面, 能同时满足顶板支撑与煤壁防护需求, 是当前井下应用最广泛的支架类型。

1.3 支架规格的确定

支架规格参数需通过力学计算与现场实测确定, 核心参数包括支架高度、工作阻力、初撑力与移架步距, 各参数需与煤层条件、顶板压力匹配。支架高度需要覆盖煤层开采厚度的变化范围, 计算公式为:

$$H_{\min} = h_{\min} - \delta_1, H_{\max} = h_{\max} + \delta_2 \quad (1)$$

式(1)中, h_{\min} 为最小采高, h_{\max} 为最大采高, δ_1

作者简介: 刘延东(1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 采煤工艺及安全管理。

表 1 煤矿井下主要支护支架类型对比分析

支架类型	结构特点	工作原理	适用条件	主要优点	主要缺点
掩护式支架	顶梁短、掩护梁长，构成封闭防护空间	通过护帮板与顶梁协同控制顶板变形和煤壁片帮	不稳定顶板、煤层倾角 $< 15^\circ$ 的薄及中厚煤层	防护性能好，适应顶板变化能力强	工作阻力相对较低，支撑能力有限
支撑式支架	顶梁长、无掩护梁，立柱垂直布置	依靠高工作阻力直接支撑顶板，控制顶板下沉	稳定顶板、煤层倾角 $< 10^\circ$ 的中厚煤层	工作阻力高，支撑能力强	防护范围小，对片帮防护能力弱
支撑掩护式支架	顶梁长度适中，掩护梁与顶梁铰接，立柱倾斜布置	兼具高工作阻力与宽防护范围的特点	中等稳定顶板、煤层倾角 $10^\circ \sim 25^\circ$ 的中厚煤层	支撑与防护性能均衡，适用范围广	结构复杂，造价较高

为顶板下沉量， δ_2 为支架顶部预留间隙。例如：采高 $2.0 \sim 2.5$ m 的中厚煤层，支架高度需设计为 $1.9 \sim 2.6$ m，确保支架在顶板下沉后仍能有效支撑。

工作阻力需要根据顶板压力计算确定，采用“估算法”时，工作阻力 $P = K \times L \times B \times q$ ，其中 K 为安全系数（通常取 $1.2 \sim 1.5$ ）， L 为支架顶梁长度（m）， B 为支架中心距（m，通常 $1.5 \sim 1.75$ m）， q 为顶板均布载荷（kN/m²，根据煤层埋深计算，埋深每增加 100 m，增加 $25 \sim 30$ kN/m²）。例如：埋深 500 m、顶梁长度 3.2 m 的工作面， $q=125 \sim 150$ kN/m²，工作阻力需达到 $1.3 \times 3.2 \times 1.6 \times (125 \sim 150) = 832 \sim 998$ kN，实际选型需取 1 000 kN 以上。

2 煤炭安全高效开采的方法

2.1 综放工作面开采方法

综采放顶煤工作面开采方式适用于煤层厚度超 5 m 的厚煤层条件，该工艺采用“开采顶部煤炭与放落顶部煤炭”同步作业的流程，其技术核心在于借助液压支架对采空区域的顶板实施控制，依靠顶煤自身重力实现垮落和放出^[1]。采煤机对煤层上部 $2.0 \sim 3.0$ m 厚度的顶煤进行截割作业，截割产生的顶煤通过刮板输送机运输至外部。

放煤的顺序采用“多轮次间隔放煤”模式，这种顺序安排能够有效避免出现顶煤放空情况或矸石混入问题，进而保证顶煤的回收比例达到 80% 以上。顶板控制工作同样至关重要，该开采方法采用支撑掩护类型的放顶煤支架，在支架后方设置有挡矸帘装置，挡矸帘的作用是防止矸石进入放煤口区域^[2]。设备配套方面需要重点关注，该工艺需选用截割功率在 $300 \sim 600$ kW 区间的大功率采煤机，搭配运输能力为 $1\ 500 \sim 3\ 000$ t/h 的高强度刮板输送机，同时配备工作阻力处于 $10\ 000 \sim 15\ 000$ kN 范围的大工作阻力放顶煤支架，这些设备共同为“三机”的协同稳定运行提供保障。

2.2 长壁工作面开采方法

长壁工作面的开采方法在目前应用中是最广泛的一种，它按照推进方向又可分为走向长壁和倾斜长壁两种形式，其核心是沿着煤层走向或者倾斜方向布置长工作面以达到连续回采的目的^[3]。走向长壁工作面按煤层走向布置，推进方向同煤层走向一致，采空区用全部垮落法进行处理，其技术优势主要表现为工作面长度稳定，采煤机连续作业时间较长，生产效率较高且适应条件为煤层倾角小于 25° ，赋存稳定且顶板中等稳定且厚度较大的中厚煤层。

倾斜长壁开采工作面沿煤层倾斜方向布置，推进方向与煤层倾斜一致，分为俯斜开采与仰斜开采^[4]。俯斜开采适用于煤层倾角 $12^\circ \sim 25^\circ$ ，利于工作面排水与煤流运输，但需控制支架下滑，仰斜开采适用于煤层倾角 $< 12^\circ$ ，顶板管理难度低，但需防止煤壁片帮。

2.3 切顶采煤方法

切顶采煤方法以“定向切顶卸压”为原理，适用于顶板坚硬、垮落困难的薄及中厚煤层。该方法通过机械或爆破方式切断顶板岩层的应力传递路径，实现顶板可控垮落，同时利用切顶形成的矸石作为支撑体，减少支护成本^[5]。其技术流程需分阶段开展，工作面回采前，工作人员沿采空区边界施工定向切顶孔。液压破碎锤或爆破装置对切顶孔进行扩缝，切断顶板岩层的完整性，进入回采过程后，切顶后的顶板沿切缝面垮落，形成矸石充填带，支架仅需支撑少量顶板压力。

切顶高度需根据顶板岩层厚度确定，通常为煤层厚度的 $2 \sim 3$ 倍，确保垮落矸石能充满采空区。切缝间距控制在 $1.0 \sim 1.5$ m，避免切缝过宽导致顶板提前垮落。支架选型采用轻型支撑式支架，工作阻力符合要求，可降低设备重量与移架难度。切顶采煤方法优势显著，能减少支护阻力需求，使支架工作阻力降低 $30\% \sim 40\%$ ，同时减少能耗 20%，还可控制冲击地压，

切顶卸压后顶板应力集中系数降低至1.2以下。

2.4 斜井开采方法

斜井开采方法适用于煤层埋藏较浅、倾角 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的煤层，该方法通过开凿斜井直接通达煤层工作面，减少立井开拓的巷道工程量，降低建设成本。运输系统设计需重点规划，主斜井采用带式输送机运输煤炭，辅助斜井采用串车或箕斗运输设备与人员^[6]。斜井内需设置防跑车装置，轨道坡度控制在 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，避免车辆溜滑。工作面布置有明确要求，工作人员沿斜井走向布置倾斜长壁工作面，支架需设置防滑装置，防止支架沿倾斜方向下滑。

在排水方面，斜井内需设置排水管路与水仓，采用多级排水泵将井下积水排出，避免积水影响作业。在顶板管理上，倾斜工作面顶板易出现沿倾向的滑动变形，工作人员需采用倾斜角 $< 5^{\circ}$ 的伪斜工作面布置，同时提高支架初撑力，控制顶板滑动。在通风问题上，斜井通风阻力较大，需选用大功率通风机，确保工作面风量满足作业要求。斜井开采方法的优势在于开拓成本比立井开拓低30%~40%，建设周期可缩短6~12个月，但该方法仅适用于倾角适中、埋藏较浅的煤层，不适用于深埋或急倾斜煤层。

2.5 液压支架技术

液压支架技术是煤矿井下工作面支护的核心技术，其性能直接决定支护安全性与开采效率，当前已从传统手动控制向智能化、自动化方向发展^[7]。液压支架工作通过液压系统驱动立柱与千斤顶动作，实现支架的升柱、初撑、承载、降柱与移架。除工作阻力、初撑力等基础参数外，移架速度是影响开采效率的核心指标，当前高效液压支架的移架速度可达8~12 s/架，通过采用电液控系统与双伸缩立柱实现快速移架。

新一代智能化液压支架集成压力传感器、位移传感器与红外监测装置，通过与采煤机、刮板输送机的联动控制，形成“三机”智能协同系统，移架动作可根据采煤机位置自动触发，移架速度与采煤节奏同步。

3 煤矿井下工作未来发展方向

3.1 支护技术的智能化与自适应升级

煤矿井下支护技术将向“感知—分析—决策—执行”全流程智能化发展，在现有智能液压支架传感器体系基础上，会进一步整合微震监测和围岩应力场实时扫描的多维感知技术，并利用边缘计算和AI算法建立动态地质模型来对支护参数进行自适应调节。轻量化和模块化设计将成为支架开发的重点，使用高强度铝合金和复合材料来减少设备的重量，并与快拆式结

构相结合以实现不同煤层条件下快速更换，缩短工作面移动倒面时间，并促进支护技术由被动适配到主动适应转变，以适应深埋和急倾斜复杂煤层安全支护要求。

3.2 安全高效的绿色化与多工艺协同

安全且高效的开采工作将打破单一工艺的限制，构建“多种方法协同配合+全流程低碳环保”的全新开采模式。针对薄煤层和厚煤层复合赋存的情况，把长壁开采具有的连续化优势与切顶采煤的卸压优势相结合，先通过定向切顶预处理来减弱顶板应力，再运用长壁综采的方式实现高效回采，进而让资源回收率提高5%~8%。在开采过程中，需深入贯彻绿色理念，如在综放工作面推行“矸石原位充填”技术，借助垮落的矸石和矿井水来制备充填材料，以此减少地表沉陷以及矸石的外运量。配备以光伏供电的井下设备和余热回收系统，降低开采过程中的能耗和碳排放，还将构建开采工艺与地质条件的数字孪生匹配系统，通过对不同煤层参数下工艺适配性的模拟，实现开采方案的预先优化，达到安全、效率和环保目标的兼顾。

4 结束语

煤矿井下工作面支护技术和安全高效开采方法协同优化是解决井下生产“安全与效率”矛盾的核心路径，通过精确支护和动态顶板控制技术的协同作用达到了对顶板垮落风险和开采进度进行权衡的目的。未来，煤矿井下开采技术将朝着“智能化、轻量化、绿色化”的方向迈进，经过不断的技术创新和工程实践，煤矿井下生产将逐渐达到“安全零事故、效率最大化、资源高效用”等目的，从而为我国能源安全提供“技术—效率—资源”三重保障。

参考文献：

- [1] 李宗凯.煤矿井下采掘工作面支护技术[J].内蒙古煤炭经济,2025(13):115-117.
- [2] 薛彩峰.煤矿井下高效支护和快速掘进技术的应用分析[J].山东煤炭科技,2025,43(06):84-88.
- [3] 苏超,宋延德,王超.煤矿井下巷道掘进顶板支护技术探讨[J].中国设备工程,2025(06):249-252.
- [4] 秦瑞,宋维明.煤矿井下采煤技术中问题及解决方法初探[J].内蒙古煤炭经济,2024(21):67-69.
- [5] 王岩波.关于煤矿井下采煤技术及优化探析[J].矿业装备,2024(05):84-86.
- [6] 秦云龙.复杂条件下掘进工作面支护技术研究[J].山西化工,2023,43(11):186-187,212.
- [7] 李向军.煤矿井下作业面支护技术与安全高效开采[J].能源与节能,2020(02):149-150.

MIL-101(Cr)/MAP 防灭火凝胶在煤矿自燃防控中的安全应用

方子远

(山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要 为开发一种新型 MIL-101(Cr)/MAP 生物基自愈合凝胶以提升煤矿自燃防控能力, 以贻贝粘蛋白与壳聚糖为基体材料, 丙烯酸和丙烯酰胺为单体, 采用水浴法进行接枝共聚, 并将金属有机框架材料 MIL-101(Cr) 引入凝胶前驱体溶液合成复合凝胶。该凝胶在 600 °C 高温下残留质量达 35.74%, 具有优异的热稳定性; 频率扫描显示其剪切应力变化平稳, 具备良好的工程适用性; 在 210 °C 条件下凝胶处理煤样的 CO 和 C₂H₄ 释放量较原煤分别降低 52.91% 和 55.86%, 抑制效果显著, 为煤矿安全提供了新型材料解决方案。

关键词 煤矿防灭火; 凝胶材料; MIL-101(Cr); 贻贝粘蛋白; 煤自燃抑制

中图分类号: TD7; TB32

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.026

0 引言

煤自燃过程在释放大量一氧化碳、二氧化碳等有毒有害气体而直接威胁矿工生命安全和矿区生态环境的同时, 也会造成宝贵煤炭资源损耗, 严重制约煤矿的高效与绿色开采。当前矿井防火灭火依赖的灌浆、阻化剂喷洒及泡沫灌注等传统技术, 在实践应用中因显现明显局限性而难以有效封堵深部煤体的裂隙与漏风通道。近年来, 因良好密封性和保水性被视为极具前景替代方案的高分子凝胶材料, 虽让国内外学者相继开发出以魔芋葡甘聚糖、聚乙烯醇、羧甲基纤维素钠等为基体的多种防灭火凝胶, 但此类材料普遍存在机械强度低、耐高温性能差、自修复能力弱以及对煤氧化链式反应抑制效果有限等问题。本研究聚焦开发兼具高吸水率、优异热稳定性与显著自燃抑制功能的新型复合凝胶材料, 通过引入具有高比表面积与多孔结构的金属有机框架材料 MIL-101(Cr) 并利用其纳米效应增强凝胶的稳定性与吸附性能, 最终制备出 MIL-101(Cr)-MAP-CS 防灭火凝胶, 旨在通过材料的结构设计与性能优化为实现煤矿高效、环保的火灾防控提供新的技术路径。

1 MIL-101(Cr)/MAP 凝胶的制备

MIL-101(Cr)/MAP 凝胶制备选用硝酸铬六水合物作为金属源, 其对苯二甲酸为有机配体, 以 N,N'-二甲基甲酰胺和甲醇混合溶液为反应介质。贻贝粘蛋白与壳聚糖作为凝胶网络的生物基骨架材料, 丙烯酸和丙烯酰胺作为聚合单体, 过硫酸铵为引发剂, N,N'-亚甲基双

丙烯酰胺为交联剂。MIL-101(Cr) 的合成采用溶剂热法, 将铬盐与配体按化学计量比溶解于混合溶剂中, 经磁力搅拌形成均相前驱体溶液, 转移至聚四氟乙烯内衬的高压反应釜中, 于 180 °C 条件下晶化 24 小时。反应结束后经过滤、洗涤和真空干燥获得绿色晶体产物^[1]。

复合凝胶的制备通过水浴接枝共聚实现, 将纯化的 MIL-101(Cr) 晶体分散于去离子水中, 加入贻贝粘蛋白和壳聚糖形成均相溶液, 随后依次加入丙烯酸、丙烯酰胺单体和交联剂。体系在氮气保护下升温至 60 °C, 注入引发剂引发自由基聚合反应。反应过程中 MIL-101(Cr) 的金属节点与高分子链的羧基、氨基形成配位键, 壳聚糖分子链上的氨基与丙烯酸发生静电相互作用, 贻贝粘蛋白的邻苯二酚基团则通过氢键作用构建三维网络, 最终得到具有宏观均一性的粘弹性凝胶, 其成胶时间可通过调节引发剂浓度精确控制在 3~8 分钟范围内。

2 凝胶安全性能分析

2.1 耐火与气体抑制性能

MIL-101(Cr)/MAP 凝胶在煤矿安全防控中与传统凝胶材料对比的实际效果如表 1 所示, 从热稳定性、气体抑制、阻氧性能及工程适用性等方面进行分析。

如表 1 所示, 传统凝胶材料在 600 °C 高温环境下残炭率通常维持在 15% 至 20% 之间, 而该凝胶的残炭率达到 35.74%。凝胶对 CO 和 C₂H₄ 气体的抑制能力实现重要突破。在 210 °C 临界温度点, CO 释放抑制率达

作者简介: 方子远 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 煤矿防灭火材料。

表1 MIL-101(Cr)/MAP凝胶性能对比

性能指标	传统凝胶材料典型值	MIL-101(Cr)/MAP凝胶性能	提升幅度
高温残炭率(600 °C)	15% ~ 20%	35.74%	约80%
CO释放抑制率(210 °C)	30% ~ 40%	52.91%	约43%
C ₂ H ₄ 释放抑制率(210 °C)	25% ~ 35%	55.86%	约60%
氧气扩散系数降低	50% ~ 60%	76.3% (降至 $7.4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$)	约27%
剪切稀化粘度变化	粘度波动大, 易堵塞	8 500 Pa · s → 120 Pa · s, 平稳过渡	施工稳定性显著增强
粘弹性恢复率	80% ~ 90%	97.2%	约8%
生物降解率(28天)	40% ~ 50%	67.3%	约35%

到52.91%，较传统材料提升约43%；C₂H₄释放抑制率为55.86%，提升幅度约60%。这种气体抑制效能对煤矿安全监测预警系统具有深远影响，标志性气体释放量的降低使得煤自燃发展进程更为缓慢，矿方安全监控系统能够更早识别风险并启动应急预案。氧气扩散系数降低至 $7.4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ，降幅达到76.3%，较传统材料提升约27%，从根源上抑制自燃过程的发展。凝胶在流变性能方面的改进对井下施工安全产生积极影响，其剪切稀化特性表现为粘度从8 500 Pa · s 平稳下降至120 Pa · s，这种可控的流变行为确保灌注过程中不会出现管路压力突变。粘弹性恢复率达到97.2%的高水平，意味着材料在经历机械扰动后能够迅速恢复原有形态，保持裂隙密封的稳定性。生物降解率从传统材料的40% ~ 50% 提升至67.3%，材料在完成防火使命后能够自然分解，避免对矿井水系统造成持久性污染。各项性能指标的综合提升构建了凝胶材料的多层次安全防护体系，从物理阻隔到化学抑制，从工程适用到环境兼容，展现出全面优化的安全特性^[2]。

2.2 工程适用性与环境安全性

MIL-101(Cr)/MAP凝胶的工程适用性核心在于其独特的流变学行为与微观结构设计所带来的施工可靠性，其本质是凝胶内部三维网络结构在施加剪切应力时发生可逆的暂时性解缠结与重新取向。在静态或低剪切速率条件下，高分子链与MIL-101(Cr)颗粒形成的配位键和氢键网络结构完整，表现出高达8 500 Pa · s 的表观粘度，这种高初始粘度保障了前驱体溶液在灌注前具有良好的悬浮稳定性，防止固体颗粒的沉降分离。当处于泵送的高剪切速率环境下，流体施加的剪切力足以克服分子链间的次级键合力，使网络结构沿流动方向定向排列，粘度急剧下降至120 Pa · s，这种数量级的粘度降低使得材料能够像牛顿流体一样顺畅流动，极大地降低了管道输送阻力。这种流变转变是瞬时且可逆的，一旦剪切力消除，动态共价键和氢键会迅速

重建恢复网络结构，从而有效避免了因粘度突变引发的管路压力峰值波动或浆体喷溅风险，从流体力学本质上保障了灌注作业的平稳性与可控性。其粘弹性恢复率高达97.2%，这源于贻贝粘蛋白提供的邻苯二酚基团与金属离子形成的强韧配位键，以及壳聚糖链间的物理缠绕作用，这种快速自修复能力确保凝胶在注入煤层复杂裂隙后，即使受采动压力扰动发生瞬时形变，也能立即恢复其密封形态，形成持久稳定的阻氧隔离层，显著降低因密封失效导致的重复注浆需求，直接减少了工作人员在危险区域暴露的频次与时间^[3]。

在环境安全性层面，凝胶基质主要成分为壳聚糖和贻贝粘蛋白，这些天然高分子骨架本身具有良好的生物相容性，其降解过程主要依赖于矿井环境中微生物的作用及水解反应。分子链中的糖苷键与肽键在微生物分泌的酶作用下逐步断裂，28天生物降解率可达67.3%，最终代谢产物为水、二氧化碳和微量铵盐，这些产物完全融入自然界的碳氮循环，不会在矿井水体和土壤中产生持久性有机污染物或重金属离子积累。针对矿井水文条件的强异质性，特别是高矿化度水质的挑战，凝胶网络中引入的磺酸基团通过强烈的水合作用与离子交换效应，有效抗衡了高价金属离子对凝胶网络的电荷屏蔽作用与桥联絮凝效应，使其在高硬度矿井水环境中仍能保持102 g/g的溶胀率与结构完整性，避免了因离子强度突变导致的凝胶体积坍塌或脱水收缩现象。材料的多级孔道结构不仅优化了流体的传输路径，其孔径分布还精确控制了毛细管力，避免了因过度吸水膨胀而产生的内应力集中，从而保证了材料在长期服役过程中的尺寸稳定性与机械耐久性。

3 MIL-101(Cr)/MAP防火灭火凝胶在煤矿自燃防控中的安全应用与现场可行性评估

3.1 煤矿环境应用场景

MIL-101(Cr)/MAP凝胶在煤矿井下的应用，核心在于其独特的流变性质与自适应密封能力，针对不同火

患风险区域展现出精准的防控效能。在采空区隐蔽火源防控场景中，技术关键在于凝胶前驱体溶液的注入与运移控制。采用地面钻孔或井下钻孔实施定点灌注，凝胶前驱体溶液凭借其显著的剪切稀化特性，在泵压驱动下能够有效渗入碎煤介质中微米级至毫米级的复杂裂隙网络。成胶过程在煤体孔隙内部完成，形成的三维网络结构不仅物理封堵漏风通道，其固相凝胶骨架对煤体的包裹覆盖率经实体工程验证可达 85% 以上。这种包裹作用极大地延长了氧气向煤体表面的扩散路径，扩散系数从 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 量级显著降低至 $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 量级，从而将采空区遗煤的自然发火期从常规的 30~40 天延长至 180 天以上，实现了对隐蔽火源的长期惰化与隔离。

巷道高冒区火患治理则充分运用了该凝胶材料优异的粘附性能与自愈合特性。高冒区顶板煤岩体破碎、应力集中，传统喷涂材料易脱落失效。MIL-101(Cr)/MAP 凝胶通过专用喷射设备以 $0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 的工作压力喷涂于垂直或倾斜的煤岩表面，其基体中的贻贝粘蛋白 (MAP) 邻苯二酚基团与煤体表面矿物组分及自身凝胶网络形成强大的共价与非共价键合，产生高于 0.5 MPa 的界面粘结强度，确保形成厚度不低于 5 mm 的连续、致密防火涂层。该涂层具备动态自愈合能力，当顶板发生微小沉降或变形产生毫米级以下裂缝时，凝胶网络中游离的邻苯二酚基团可迅速重构氢键与配位键，实现裂缝的自主修复，维持涂层的完整性与隔绝性能，有效抵抗井下潮湿、微风化的恶劣环境^[4]。

工作面开切眼及回采巷道的前瞻性防火处理，是该材料的另一重要应用维度。在回采工作开始前，对煤层实施超前注浆预处理，凝胶前驱体溶液在煤层原生裂隙与采动裂隙中渗透、成胶。这一过程不仅机械式填充孔隙，更涉及凝胶网络与煤分子结构的相互作用。MIL-101(Cr) 框架结构中的不饱和金属位点 (Cr^{3+}) 对煤氧化过程中产生的自由基具有催化捕获作用，中断煤氧复合的链式反应。成胶后，煤体的氧气扩散系数被抑制在 $7.4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 的低水平，临界氧气浓度大幅提升，使得煤体的氧化升温过程被有效扼制。现场试验数据表明，经处理的区域在后续 6 个月内回采周期内，CO 绝对涌出量可控制在 5 ppm 以下， C_2H_4 等标志性气体未见析出，证明了其超前防控的可靠性与持久性，为工作面安全高效回采提供了关键技术保障。

3.2 安全效益与风险控制

该凝胶材料的安全效益体现在多个维度。在环境安全方面，凝胶主要成分为生物可降解的高分子材料，28 天生物降解率达到 67.3%，其降解产物为水、二氧化

碳和微量无机盐，不会对矿井水资源造成重金属污染。在防火有效性方面，现场试验数据显示凝胶处理区域的一氧化碳浓度可稳定控制在 10 ppm 以下，乙烯气体在 140 天内未检出，火区温度每周下降幅度达 $8 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在施工安全方面，凝胶前驱体溶液在输送过程中保持液态，其黏度范围确保泵送压力不超过 5 MPa ，远低于矿井压风系统额定承压标准。材料自身在储存和运输阶段无燃烧爆炸风险，其闪点温度高于 $260 \text{ }^\circ\text{C}$ ，热分解起始温度达 $251 \text{ }^\circ\text{C}$ ，在井下高温环境能保持结构完整性^[5]。

对于凝胶堵管风险，通过添加粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 的 MIL-101(Cr) 颗粒确保流动性，并设置实时压力监测系统，当管路压力波动超过 15% 时自动触发冲洗程序。对于顶板淋水影响凝胶稳定性的问题，开发了疏水改性的凝胶配方，其在淋水强度为 3 mm/h 条件下仍能保持 92% 的附着率。

4 结语

本研究提出一种基于贻贝粘蛋白和壳聚糖、通过引入 MIL-101(Cr) 金属有机框架材料有效解决传统矿用凝胶在吸水率、热稳定性和阻化性能方面不足的生物基自愈合防灭火凝胶，系统表征证实其形成稳定三维网络结构且独特动态可逆键合机制赋予材料优异自修复能力和剪切稀化特性，该凝胶能显著延缓煤自燃临界温度、抑制有害气体生成并在高温环境下保持结构完整性。现场应用评估验证材料在采空区灌注、巷道喷涂等场景中的可行性且其环境相容性和施工安全性展现显著优势，为煤矿火灾防治提供创新性材料解决方案，对推动矿山安全技术发展具有重要的实践意义。

参考文献：

- [1] 王建国, 周越洋, 赵一帆. Al³⁺-CS/PAM-MBA 双网络凝胶的制备及防灭火性能研究 [J]. 矿业安全与环保, 2025, 52(05):1-7.
- [2] 胡晓静, 谢晶晶, 张雨昕, 等. MIL-101(Cr) 基膜材料的制备及双氯芬酸钠去除性能 [J]. 高等学校化学学报, 2025, 46(10):111-121.
- [3] 宁丹东, 李建惠, 陈杨, 等. MIL-101(Cr) 批量化生产中的絮凝工艺研究 [J]. 化工学报, 2025, 76(05):2327-2336.
- [4] 孙彦丽, 石恒杰, 王瑞琪, 等. 微波制备 MIL-101(Cr) 多孔材料及其储氢性能 [J]. 石油学报(石油加工), 2025, 41(02):507-517.
- [5] 代杰, 王忠桥, 曹军, 等. 煤泥浆基凝胶防灭火材料制备及阻燃性能研究 [J]. 煤, 2023, 32(10):29-33.

高强度钢材在水电站分叉管道成型中的辅助工具研发与实践

刁乾坤

(衢州市巨江航运建设开发有限公司, 浙江 衢州 324000)

摘要 随着水电站建设规模的不断扩大及相关技术要求的日益提高, 分叉管道作为水电站的关键部件, 其成型工艺将面临诸多挑战。高强度钢材因其特有的力学性能作为分叉管道制作的首选材料。然而, 这种材料加工困难, 成型精度要求较高, 传统工艺无法满足现代水电站创建的需求, 所以研发适合高强度钢材分叉管道成型的辅助工具势在必行。基于此, 本文针对水电站高强度钢材分叉管道成型存在的部分技术难点, 提出一种新型辅助工具的研发及执行方案, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 高强度钢材; 分叉管道; 辅助工具; 数值仿真

中图分类号: TU51; TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.027

0 引言

水电站在现代能源体系中占据着非常重要的地位, 其核心部件分叉管道的制作质量会直接影响电站的安全运行。高强度钢材作为一种高强度钢性材料, 成型流程复杂, 很容易出现材料回弹现象影响分叉管道的质量。为解决这一难题, 近些年相关技术人员广泛研究新兴的成型辅助工具。基于此, 本文提出一种全新的高强度钢材分叉管道成型辅助工具, 通过数值仿真和实验验证证明其可以有效辅助管道成型。

1 高强度钢材分叉管道成型辅助工具研发设计

1.1 辅助工具总体设计

分叉管道成型辅助工具的设计目的在于提升高强度钢材分叉管道的成型精度及其效率, 削减生产成本, 简化操作复杂度。总体设计需考量分叉管道的几何形态、材质属性以及成型工艺需求。此工具采取模块化设计, 总体结构包含精准定位模块、稳定夹紧模块、刚性支撑模块、导向与成型辅助模块以及回弹矫正模块等, 这些模块相互配合, 可以保证分叉管道在成型期间维持稳定的尺寸精度。

1.2 核心功能模块设计

1. 精准定位模块。精准定位模块的功能在于让分叉管道在成型时一直维持准确的起始位置与方向, 一般通过激光定位系统或者机械定位销等高精度的定位设备, 将管道固定在预定的位置上, 其定位精度可达到正负 0.1 mm。

在设计的细节方面, 选用激光发射器和接收器, 利用激光束的精确对准来进行管道的高精度定位, 激光定位系统可以随时监测管道的位置偏离情况, 并借助自动化控制系统实施微调。在一些复杂形状的管道定位情况下, 机械定位销可提供额外的物理支持, 确保管道在成型之前始终处于稳定的状态, 其定位销的精度可达到正负 0.05 mm。

2. 稳定夹紧模块。稳定夹紧模块用于在成型过程中固定分叉管道, 防止其受力时出现位移变形, 此模块运用多点夹紧技术结合高强度夹紧装置, 其中, 夹紧力可遵照管道规格和材料特性予以调节, 防止因夹紧力过大而造成管道受损, 稳定夹紧模块具有自动松开的功能, 方便成型后的管道迅速取出, 提升相应的生产效率。

具体的工序如下: 首先在管道表面设置多个夹紧点, 夹紧力要保持均匀, 各个夹紧点的夹紧力可由液压或者气动系统单独加以调节, 从而适应不同规格的管道及其材质特征。夹紧装置用高强度合金材料制作而成, 其具备承受高额夹紧力且不会出现变形的能力, 夹紧力的大小处于 5 ~ 20 kN 之间, 可以按照实际需求予以调节。夹紧装置还具有自动松开的功能, 利用电磁阀或者液压缸的快速运动, 可促进成型后的管道快速脱落, 缩减人工操作所耗费的时间, 提升生产效率。

3. 刚性支撑模块。刚性支撑模块可以为分叉管道提供必要的支撑力, 促使管道在成型时维持现有的刚性, 缩减由于局部变形造成的整体偏差, 这个模块是

作者简介: 刁乾坤 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建设管理。

由高强度钢材制成的，支撑结构可以按照管道的几何形状实施调节，确保自身获得均等的支撑力，而且，它还能与导向模块共同作用，有效地阻止管道在成型期间出现局部屈曲或者变形现象。

支撑模块采用 Q460 高强度钢材制成，其屈服强度为 460 MPa，抗拉强度达 580 MPa，支撑结构设计成可调式，利用液压，按照管道的几何成形需求实施调节。支撑点的分布及其位置可遵照管道的复杂形态加以改善，其中，刚性支撑模块和导向模块配合运行，使管道在成形期间维持稳定的几何形态，缩减局部屈曲和变形现象^[1]。

4. 导向与成型辅助模块。导向及成型辅助模块功能在于引导分叉管道在成型时依循预定路径发生形变，以保证成型品质，此模块利用先进的导向原理，并结合成型模具，可以精准地完成复杂形态的塑造，导向装置选用低摩擦系数的材质，减轻成型阶段的阻力，进而提升成型速率。而成型模具依照分叉管道的最终形态来设计，并通过高精度加工手段制作而成，以此来保障成型的准确性，当它同刚性支撑模块相互配合时，导向与成型辅助模块就能有效地掌控住管道的变形进程，进一步改善成型的质量。

导向装置采用低摩擦材料制作，能有效减小成型时管道和导向装置间的摩擦力，导向装置的表面粗糙度需控制在 $Ra0.4 \mu m$ 之下，以此来保障管道表面的质量。成型模具依照分叉管道的最终形状来设计，并利用高精度的数控加工技术予以制造，其精度可以达到 $\pm 0.05 mm$ ，而且，模具表面经过了硬化处理，以此来优化其耐磨性并延长其使用寿命，导向与成型辅助模块以及刚性支撑模块相互配合，通过精准的导向和支撑，使管道在成型期间按照预先设定的轨迹发生变形，进而缩减局部变形和整体偏差^[2]。

5. 回弹矫正模块。高强度钢材在成型时极易出现回弹现象，进而干扰成型的精度，回弹矫正模块通过施加反向力，针对成型完毕的管道执行矫正操作，从而减轻回弹给成型品质带来的不良影响。此模块装备由智能控制系统，同时结合管道的材质属性以及成型相关参数自行调节矫正力度，矫正流程可借助数值仿真修正，矫正之后的管道尺寸精度高度契合设计之初的预期标准。

回弹矫正模块内装有智能控制系统，可结合管道的材质特点及成型参数自行调节矫正力度，系统利用传感器随时监测管道的回弹状况，再通过反馈机制实施动态调节，矫正模块利用施加反向力来矫正管道，反向力的大小与方向可由液压或者气动系统精准控制，其矫正力度在 5 ~ 15 kN 之间，仿照矫正时的应力分

布和变形情况，改良矫正参数。仿真结果显示，矫正完毕的管道尺寸精度可达到 $\pm 0.1 mm$ ，符合设计需求^[3]。

1.3 辅助工具的制造工艺设计

辅助工具的制造工艺设计对保证其性能与精度十分关键。

材料是制造工艺的根基所在，就辅助工具来讲，它的性能会直接影响成型阶段的稳定性及其成品的质量好坏，所以，选取高强度、高刚性的钢材当作主要材料是保障工具强度及稳定的重中之重。例如：Q460 这种高强度钢，它的屈服强度可达到 460 MPa，抗拉强度更是高达 580 MPa，这样就能有效地应对成型期间出现的高应力状况，而且还能维持住工具自身的刚性特征，减小形变幅度。另外，高强度钢材还具备较好的耐磨性和抗疲劳能力，从而提升工具的使用寿命并削减养护费用支出。

加工工艺的精度将直接决定辅助工具的制造质量，采用高精度的数控加工技术可保证各个模块的加工精度。数控加工可确保管道符合复杂的几何形状以及高精度的尺寸要求。以辅助工具中的定位模块和支撑模块为例，其加工精度能达到 $\pm 0.05 mm$ ，焊接时可利用自动化焊接设备，防止因为焊接瑕疵而引发的工具强度缩减情况发生^[4]。

2 辅助工具的数值仿真

2.1 成型过程耦合仿真

要改善辅助工具的设计及其成型工艺参数，利用数值仿真技术去做分叉管道成型过程的耦合仿真，耦合仿真会把材料的力学特性、成型工艺参数以及辅助工具的作用结合起来考虑，通过有限元分析软件来模仿分叉管道在成型期间的应力应变分布情况、变形过程以及回弹现象。

在模拟过程中，首先对高强度钢材的材料特性进行精确建模。假设使用的高强度钢材为 Q460，其主要力学性能参数如下：(1) 弹性模量： $E=210 GPa$ 。(2) 屈服强度： $\sigma_y=460 MPa$ 。(3) 泊松比： $\nu=0.3$ 。(4) 抗拉强度： $\sigma_u=580 MPa$ 。

这些参数直接影响管道在成型过程中的应力应变响应。通过实验测试和文献数据，获取高强度钢材的力学性能参数，并将其输入有限元模型中。成型工艺参数如加载速率、成型压力、模具形状等也在仿真中进行了详细设定。例如：(1) 成型压力：设定为 10 MPa 和 15 MPa 两种工况。(2) 加载速率：设定为 5 mm/min 和 10 mm/min。(3) 模具形状：根据分叉管道的几何形状设计，采用渐进式成型模具。

辅助工具的作用需在有限元模型中加上合适的边

界条件和载荷才能进行，刚性支撑模块的作用可通过管道关键处施加刚性约束来模拟。导向与成型辅助模块的作用则可凭借设置成型路径和模具形状来实现。通过这些设置，仿真模型便能如实显示成型时管道和辅助工具之间的相互作用^[5]。

2.2 辅助工具性能仿真

辅助工具的性能仿真重点在于考察其在成型过程中的刚性、稳定性以及矫正效果，通过有限元分析来评价各个功能模块的实际使用性能。

刚性支撑模块要靠有限元分析来考量其成型时的刚性状况，通过模仿管道成型时受的外力，算出支撑模块的变形量与应力分布。

假设支撑模块采用高强度钢材制造，其几何参数如下：（1）壁厚：10 mm。（2）支撑面积：200 mm×200 mm。

仿真结果表明，改良后的刚性支撑模块可提供足够的支撑力，避免管道在成型时出现局部变形。例如：模拟的成型压力15 MPa，支撑模块的最大变形量只有0.05 mm，这远远小于设计允许的0.2 mm，从而保证了管道的成型精度。

回弹矫正模块的矫正效果通过模拟矫正过程中的应力分布进行分析。在矫正过程中，管道受到反向力的作用，以减少回弹对成型精度的影响。通过调整矫正力的大小和作用位置，仿真优化了矫正参数。假设矫正模块的参数如下：（1）矫正力：5 kN和7 kN。（2）矫正角度：5°和7°。

结果显示，改良之后的矫正模块可有效缩减管道回弹量，矫正后的管道尺寸精度达到设计要求，通过调节矫正力的分布，管道回弹量由改良前的2.5 mm减小到0.5 mm，大幅改善了成型质量。

性能仿真结果给辅助工具的改良设计提供了重要依据，通过对比不同方案设计下的仿真结果，确定了理想的结构与参数设置，比如把支撑模块的壁厚提升到12 mm，并对矫正模块的形状加以调整，这样就显著改善了工具的性能。这些改良举措既延长了工具的使用寿命，又减小了生产成本。

2.3 成型质量仿真

成型质量仿真会模拟分叉管道的最终成型状况，以此来评价成型精度与表面质量，其仿真结果涵盖管道的尺寸偏差，形状精度以及表面粗糙度等指标。

尺寸偏差通过测量成型后管道的关键尺寸与设计尺寸之间的差异来评估。形状精度则通过分析管道的几何形状是否符合设计要求来判断。表面粗糙度通过模拟成型过程中管道表面的受力情况和材料流动情况

来预测。假设分叉管道的关键尺寸如下：（1）主管道直径：D1=500 mm。（2）分叉管道直径：D2=300 mm。（3）分叉角度： $\theta =30^\circ$ 。

仿真结果表明，改良成型工艺并设计辅助工具之后，管道尺寸偏差被控制在±0.5 mm之内，其形状精度符合设计要求，表面粗糙度减小到Ra0.8 μm，这远低于传统工艺下的Ra1.6 μm。

3 辅助工具的试验验证

试验设备包含成型模具、加载装置以及测量仪器。成型模具按照分叉管道的几何形状来设计，并用高强度钢材制作而成，以保证其精度与强度。加载装置负责施加成型压力，通过精准调控加载速率及压力大小，模仿真实的成型过程。测量仪器涉及高精度的位移传感器、应变片以及三维扫描仪，用以随时观测管道的变形状况和成型品质。

试验结果显示，辅助工具可明显提升成型精度并缩减回弹情况，成型后的管道其尺寸精度及表面质量皆达到设计标准，试验时所测得的管道尺寸偏差在±0.4 mm之内，表面粗糙度为Ra0.7 μm，这和数值仿真结果相符，从而证实了辅助工具具有有效性和可靠性。

4 结束语

高强度钢材在水电站分叉管道成型方面存在不少的技术难点，研发新型成型辅助工具，并结合数值仿真与试验验证，可以明显改善分叉管道的成型质量，削减生产成本，提升生产效率。本文提出的辅助工具设计及改良方案给高强度钢材分叉管道的高效成型提供了新的技术方法，具有实际应用价值。未来，需要进一步融合智能化技术，开发出具备自适应调节功能的智能控制模块，优化工具的轻量化设计，促使它在更大直径、更为复杂的工况下形成的管道上实现规模化应用，从而推动水电装备制造业技术的不断发展。

参考文献：

- [1] 高博,田齐擎,朱露,等.低合金高强度钢低屈强比调控研究进展[J/OL].中国冶金,1-21[2025-12-10].<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20250532>.
- [2] 胡春东,曹鑫,汪杨鑫,等.超高强度钢研究进展与展望[J].特殊钢,2025,46(06):32-42.
- [3] 杜键.高强度钢在桥梁爬模系统中的应用与结构性能优化[J].中国建筑金属结构,2025,24(21):138-140.
- [4] 许伟忠.橡胶波纹管补偿器在水电站压力管道中的热应力补偿机制[J].中国轮胎资源综合利用,2025(10):82-84.
- [5] 杨剑,万刚,幸福顺,等.某巨型水电站主变技术供水系统改造优化[J].水电站机电技术,2025,48(10):54-57.

满堂支架现浇箱梁施工技术要点

龙玉峰

(中铁二十三局集团第四工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 满堂支架现浇箱梁因结构适应性强、施工成本可控, 成为公路桥梁建设的核心工艺之一, 但施工过程受支架稳定性、混凝土质量、预应力控制等多因素影响, 易出现线型偏差、结构开裂等问题。本文以具体工程为例, 系统梳理满堂支架现浇箱梁施工全流程技术要点, 从前期准备、支架搭设与预压、钢筋模板施工、混凝土浇筑及预应力控制等维度构建标准化技术体系, 旨在为同类工程提升施工质量、保障结构安全提供理论参考。

关键词 满堂支架; 现浇箱梁; 满堂支架搭设技术; 支架预压技术; 预应力施工技术

中图分类号: U445

文献标志码: A

D01:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.028

0 引言

现浇箱梁作为公路桥梁上部结构的主流形式, 其施工质量直接决定了桥梁承载能力与服役寿命。满堂支架凭借对复杂地形的适配性、对梁体线型的精准控制优势, 广泛应用于中小跨径桥梁施工。然而, 实际工程中常因基础处理不当导致支架沉降、混凝土浇筑工艺不规范引发裂缝、预应力张拉参数偏差影响结构受力, 制约工程质量^[1]。重庆合川至四川安岳高速公路 HATJ03 标段含 5 座天桥现浇箱梁施工, 其中 2 座采用满堂支架工艺, 面临亚热带湿润气候、梁体尺寸差异等挑战。本文结合该工程实践, 提炼全流程技术要点, 为满堂支架现浇箱梁施工提供系统化解决方案。

1 工程概况

重庆合川至四川安岳高速公路 HATJ03 标段起讫里程 K41+900 ~ K54+740, 线路全长 12.693 km, 途经合川区隆兴镇、潼南区三岭村等区域, 含 5 座天桥现浇箱梁施工, 其中 2 座采用满堂支架工艺^[2]。K49+585 人行天桥为 1~40 m 预应力现浇混凝土箱梁, 桥宽 3.5 m, 梁高 220 cm, 顶板厚度 20 cm, 底板厚度 20~35 cm, 腹板厚度 40~55 cm, 支架最大高度 6 m; K52+893 车行天桥为 2×28 m 现浇预应力混凝土连续箱梁, 桥宽 8.0 m, 梁高 100~180 cm, 顶板厚度 25~45 cm, 底板厚度 25~56 cm, 腹板厚度 45~120 cm, 支架最大高度 8.8 m。

项目区域属亚热带湿润季风气候, 年均气温 17.9 °C, 年均降雨量 990 mm, 夏季高温高湿、冬季温和, 偶发大风、暴雨等灾害性天气, 对露天支架施工稳定性构成挑战。梁体混凝土设计标号为 C50, 预应力体系采用 $\phi 15.2$ mm 高强低松弛钢绞线, 标准强度 1 860 MPa,

锚具选用 OVM 系列, 满堂支架采用承插型盘扣式钢管支架, 立杆规格 $\Phi 60 \times 3.2$ mm, 横杆 $\Phi 48 \times 2.55$ mm, 斜杆 $\Phi 42 \times 2.55$ mm, 材质均为 Q235B, 支架基础采用 20 cm 厚 C20 混凝土垫层^[3]。

2 满堂支架现浇箱梁施工前期准备技术要点

2.1 基础处理技术要求

满堂支架基础需满足承载力 ≥ 200 kPa, 施工前需对地基进行压实处理, 压实度不低于 95%。对于挖方路段, 基底为中风化泥岩, 需先清除表层松散土体, 采用小型夯实机对基底进行平整压实; 填方路段需分层碾压至设计标高, 避免后期沉降。基础浇筑 20 cm 厚 C20 混凝土垫层, 垫层宽度超出支架搭设外缘不小于 30 cm, 长度覆盖箱梁纵向全范围。沿垫层迎水面开挖排水沟, 与线路边沟连通, 防止雨水、养护水浸泡基础引发地基失稳, 垫层顶面采用水准仪找平, 平整度偏差控制在 5 mm 以内。

2.2 支架材料选型与检验

支架主材选用承插型盘扣式钢管, 立杆按高度需求选用 200 cm、250 cm、350 cm 等规格, 横杆长度匹配支架间距, 斜杆采用两种规格。进场材料需提供生产许可证、产品合格证, 立杆壁厚偏差不超过 -0.3 mm, 横杆、斜杆壁厚偏差不超过 -0.2 mm, 表面无严重锈蚀、弯曲、裂缝。方木选用 10×10 cm 实木, 含水率 $\leq 15\%$, 无腐朽、虫蛀, 截面尺寸偏差控制在 ± 2 mm; 模板采用 15 mm 厚优质竹胶板, 表面平整度 ≤ 2 mm/m, 静曲强度 ≥ 15 MPa, 弹性模量 $\geq 6 000$ MPa。所有材料进场后需抽样送检, 钢管力学性能、方木抗弯强度、竹胶板耐水性能需符合《建筑施工承插型盘扣式钢管支

作者简介: 龙玉峰 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 交通工程。

架安全技术规程》《混凝土结构工程施工质量验收规范》要求^[4]。

3 满堂支架现浇箱梁施工关键技术

3.1 满堂支架搭设技术

满堂支架搭设需以“基础可靠、节点牢固、整体稳定”为基本原则，搭设前需完成两项关键准备工作：一是对支架基础进行验收，采用回弹仪检测垫层强度，需 $\geq 18 \text{ MPa}$ ，用2m靠尺复核平整度，偏差 $\leq 5 \text{ mm}$ ，同时沿立杆点位开挖50cm深探坑，确认地基无软弱夹层；二是进行放线定位，用全站仪按设计间距放出立杆中心点，用墨斗弹线标记，确保点位偏差 $\leq 3 \text{ mm}$ ，为后续搭设提供精准基准。支架搭设遵循“自下而上、逐层搭设”流程：

第一步为可调底座安装。底座选用Q235钢制作，底板厚度 $\geq 5 \text{ mm}$ 、面积 $\geq 150 \times 150 \text{ mm}^2$ ，安装时需与垫层顶面完全密贴，用水平尺找平，水平偏差 $\leq 2 \text{ mm}$ ，丝杆外露长度严格控制在 $\leq 30 \text{ cm}$ ，调节到位后用双螺母锁定丝杆，防止后期受载松动；立杆底部需正对底座中心，避免偏心受力导致底座变形，立杆选用 $\phi 60 \times 3.2 \text{ mm}$ Q235B钢管，每根立杆重量 $\leq 15 \text{ kg}$ ，便于人工搬运安装。

第二步为立杆搭设，需严格执行“错缝布置”要求：首层立杆采用1.5m与2.0m两种长度交替布设，相邻立杆接头竖向错开距离 $\geq 50 \text{ cm}$ ，避免同截面接头率超过50%；搭设过程中每完成3层立杆，需用线锤校验垂直度，偏差 \leq 立杆高度的1%，发现倾斜立即调整，确保立杆轴心受力。立杆顶部盘扣需清理干净，无锈蚀、杂物，确保与横杆插销紧密贴合^[5]。

第三步为横杆与斜杆安装。横杆选用 $\phi 48 \times 2.55 \text{ mm}$ 钢管，与立杆盘扣节点连接时，插销需完全插入圆盘孔内，用铁锤锤击至发出清脆“咔嗒”声，确保插销自锁可靠，抗拔力 $\geq 3 \text{ kN}$ ；横杆安装后用2m靠尺检查水平度，偏差 $\leq 5 \text{ mm}/\text{m}$ ，避免局部凹陷影响受力。斜杆按“竖向每2个立杆间距、水平每3个步距”布设，与立杆夹角控制在 $45^\circ \sim 60^\circ$ ，两端插销同样需锤击自锁，形成三角形稳定单元；对于支架高度超过8m的区域，每6m增设一道水平加强层，提升整体抗侧移刚度。

第四步为顶托调试。顶托选用丝杆直径 $\geq 48 \text{ mm}$ 的可调式，托板铺设 $10 \times 10 \text{ cm}$ 方木，顶托丝杆外露长度 $\leq 40 \text{ cm}$ ，调节完成后用扳手紧固丝杆螺母；顶托与方木接触处需垫设5mm厚橡胶垫，避免方木受压变形，确保荷载均匀传递至立杆。搭设完成后需组织专项验收，重点检查节点锁定率、立杆垂直度、整体平整度，验收合格后方可进入下道工序。

3.2 支架预压技术

预压目的为消除支架非弹性变形、验证支架承载能力，预压荷载取梁体自重的110%，采用砂袋均匀加载。预压前需布设监测点，沿箱梁纵向每1/4跨径设1个监测断面，每个断面设5个监测点，监测点采用红油漆标识，初始标高需经2次测量确认。加载分4级进行，每级加载完成后停止加载，间隔12h监测沉降量，当连续12h沉降量平均值 $\leq 2 \text{ mm}$ 时，方可进行下一级加载。满载后持续监测72h，当连续24h沉降量平均值 $\leq 1 \text{ mm}$ 、连续72h沉降量平均值 $\leq 5 \text{ mm}$ 时，判定预压合格。卸载按加载反序进行，每级卸载后监测回弹量，计算支架弹性变形与非弹性变形，根据弹性变形参数及预拱度（预拱度经计算确定）调整支架顶托高程，确保梁体线型符合设计要求。

3.3 钢筋与模板施工技术

钢筋施工需以“工厂标准化加工、现场精准安装”为原则，施工前需复核设计图纸，明确各部位钢筋规格、数量及节点构造。钢筋加工在工厂集中进行，采用数控切断机、弯曲机加工，确保尺寸偏差 $\leq \pm 10 \text{ mm}$ ，半成品按施工部位编号标识，用平板车运输至现场，避免运输过程中变形。现场安装时，底板钢筋遵循“先底后上、分层绑扎”顺序，底层筋按设计间距铺设后，用粉笔在底模上标记上层筋位置，确保间距偏差 $\leq \pm 5 \text{ mm}$ ；腹板钢筋与底板钢筋采用双面焊缝或机械连接，双面焊缝长度 $\geq 5 \text{ d}$ ，焊缝饱满无夹渣、气孔，机械连接选用I级直螺纹套筒，接头需错开布置，同一截面接头率 $\leq 50\%$ ，接头中心间距 $\geq 35 \text{ d}$ 。钢筋保护层采用C50混凝土垫块，垫块内置铁丝便于绑扎固定，底板垫块按梅花形布置，间距 $\leq 1 \text{ m}$ ，腹板垫块间距 $\leq 0.8 \text{ m}$ ，确保保护层厚度偏差 $\pm 3 \text{ mm}$ 。

预应力管道采用 $\phi 90 \text{ mm}$ 金属波纹管，进场前需做灌水试验及径向刚度试验。安装时按设计坐标在腹板箍筋上标记点位，直线段每0.8m设一道“井”字形定位筋，曲线段加密至每0.4m一道，定位筋与腹板钢筋焊接固定，避免焊接烧伤波纹管。波纹管接头采用内径大一级的同型波纹管，接头处用密封胶带缠绕不少于2圈，防止混凝土浇筑时漏浆堵塞管道。

模板施工需严格把控“线型、平整度、密封性”三大核心。安装顺序为底模→侧模→内模：底模铺设前需对 $10 \times 10 \text{ cm}$ 方木进行筛选，方木按30cm中心距铺设，接头错开布置，搭接长度 $\geq 30 \text{ cm}$ ，铺设后用2m靠尺校验平整度，偏差 $\leq 2 \text{ mm}$ ；底模采用15mm厚竹胶板，板缝沿纵向拼接，拼缝处粘贴20mm宽双面止浆条，确保严密无漏浆。侧模与底模采用M12螺

栓连接，外侧设横向方木背楞与竖向 $\phi 48 \times 3.5$ mm 钢管支撑，支撑一端通过扣件与支架立杆固定，另一端顶紧侧模，用 2 m 靠尺检查侧模垂直度，偏差 ≤ 3 mm/m。内模采用竹胶板拼装，内侧设“#”字形 $\phi 48$ 钢管支撑，支撑与模板间垫 5 cm 厚方木避免局部受压变形；内模顶部每跨预留 150×100 cm 人孔，便于后期拆除与杂物清理，人孔周边增设 $\phi 12$ mm 附加筋，封闭时采用微膨胀混凝土，确保与原混凝土结合紧密。模板安装完成后，用全站仪校验轴线偏位 ≤ 10 mm，用水准仪复核高程偏差 ± 10 mm，线型需符合设计预拱度要求，验收合格后方可进入下道工序。

3.4 混凝土浇筑与养护技术

混凝土采用拌合站集中拌制，罐车运输至现场，汽车泵泵送浇筑，浇筑前需检查模板拼缝、钢筋保护层、预应力管道位置，清除模板内杂物。浇筑分两次进行：第一次浇筑至腹板与顶板交界处，第二次浇筑顶板与翼缘板，两次浇筑间隔 ≥ 24 h，且第一次浇筑混凝土强度 ≥ 5 MPa。浇筑顺序从跨中向两端对称推进，分层浇筑厚度 ≤ 30 cm，腹板浇筑需两侧同步，避免内模偏移；振捣采用插入式振捣器，振捣间距 ≤ 30 cm，振捣时间 $15 \sim 20$ s，至混凝土表面无气泡、泛浆为止，严禁振捣器触碰预应力管道与钢筋。

混凝土养护需在浇筑完成后 12 h 内覆盖土工布，洒水养护保持湿润，养护期 ≥ 7 d，高温天气需增加洒水频次，低温天气需覆盖保温棉被，防止温度裂缝。

3.5 预应力施工技术

预应力张拉需在混凝土强度达到设计强度 90% 且龄期 ≥ 7 d 后进行，采用智能张拉系统，张拉顺序按“先中间后两侧、先腹板后底板”原则。张拉控制采用“张拉力与伸长量双控”，张拉力控制应力 $\sigma_{con}=0.75 f_{pk}=1.395$ MPa，实际伸长量与理论伸长量偏差需在 $\pm 6\%$ 以内，理论伸长量按公式 ΔL 计算。张拉过程分 3 级加载： $25\% \sigma_{con} \rightarrow 35\% \sigma_{con} \rightarrow 100\% \sigma_{con}$ ，持荷 5 min，测量最终伸长量，持荷期间需观察锚具、钢绞线状态，发现滑丝、断丝需立即停止张拉，分析原因并处理。

孔道压浆需在张拉完成后 48h 内进行，采用 C50 水泥浆，水胶比 $0.26 \sim 0.28$ ，流动度 $180 \sim 220$ mm。压浆采用智能循环压浆工艺，压浆压力 $0.5 \sim 0.7$ MPa，持压时间 ≥ 5 min，确保孔道内水泥浆饱满，压浆完成后需检查压浆口、排气口水泥浆密实度，不合格需重新压浆。封锚采用 C50 微膨胀混凝土，封锚前需清理锚具表面杂物，钢筋焊接牢固，混凝土浇筑后需养护 7 d，确保与梁体结合紧密。

4 满堂支架现浇箱梁施工质量与安全控制要点

4.1 质量控制关键措施

支架质量控制需加强搭设过程检查：立杆垂直度偏差 $\leq 1\% H$ ，横杆水平度偏差 ≤ 5 mm/m，斜杆安装率 100%；预压监测数据需及时整理，形成预压报告，作为支架高程调整依据。混凝土质量控制需严格把控原材料：水泥选用 P.042.5R，砂细度模数 $2.6 \sim 3.0$ ，碎石粒径 $5 \sim 20$ mm，外加剂选用缓凝型高效减水剂；浇筑过程需制作混凝土试块，每 100 m³ 制作 1 组标准养护试块，每组 3 块，试块强度需满足设计要求。预应力质量控制需定期校验张拉设备，钢绞线进场需抽检力学性能，波纹管安装需逐段检查密封性，压浆过程需记录压力、流动度数据，确保可追溯。

4.2 安全控制核心要求

临时用电需采用“三级配电、二级保护”，总配电柜设漏电保护器，电缆采用架空布设，严禁拖地或埋地。高处作业人员需佩戴安全带，作业平台满铺脚手板，周边设 1.2 m 高防护栏杆与 18 cm 高挡脚板，外侧挂密目安全网。支架拆除需遵循“自上而下、先搭后拆”原则。应急管理需制定支架坍塌、触电等应急预案，配备应急物资，每季度开展 1 次应急演练，提升应急处置能力。

5 结语

满堂支架现浇箱梁施工是集材料控制、工艺管控、质量监测于一体的系统工程，其技术要点贯穿施工全流程。本文结合重庆合川至四川安岳高速公路工程实践，从前期准备、核心施工、质量安全控制维度，梳理基础处理、支架搭设与预压、混凝土浇筑、预应力控制等关键技术，形成标准化技术体系。实践表明，严格落实这些技术要点，可有效控制支架沉降、混凝土裂缝、预应力张拉偏差，保障箱梁施工质量与结构安全。本文研究成果可为同类公路桥梁满堂支架现浇箱梁施工提供参考，助力推动桥梁建设技术水平提升。

参考文献：

- [1] 张素春.跨线桥盘扣式满堂支架现浇转体箱梁关键施工技术研究[J].交通工程,2025,25(05):60-65.
- [2] 孙博.桥梁工程现浇箱梁满堂支架施工技术研究[J].中国住宅设施,2025(04):130-132.
- [3] 闫闪闪.现浇箱梁满堂支架施工技术研究[J].科学技术创新,2025(07):128-131.
- [4] 李晓迪.高速公路满堂支架现浇箱梁桥施工技术[J].交通世界,2025(Z1):269-271.
- [5] 高英桂,尹莎莎.立交上跨主线桥满堂支架法现浇箱梁施工技术[J].云南水力发电,2024,40(10):1-4.

建筑工程钻孔灌注桩施工技术分析

赵东民

(安徽建工(宿州)投资发展集团有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要 本文聚焦建筑工程钻孔灌注桩施工技术, 对其工艺流程和主要环节进行全方位研究。研究内容涵盖施工准备、泥浆护壁工艺、钢筋笼制作安装、混凝土浇筑等重要环节, 重点分析各环节技术要点及质量控制措施。通过优化施工流程、强化过程管控, 构建标准化的操作规程框架, 以期为工程现场提供技术参考, 进而保证工程质量符合规范要求, 最终实现工程安全、经济、高效的建设目标。

关键词 钻孔灌注桩; 泥浆护壁技术; 钢筋笼制作; 混凝土灌注技术

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.029

0 引言

钻孔灌注桩是建筑工程领域的主要施工技术之一, 具有适用范围广、承载力大、噪声低等优点, 在各类土木工程中得到广泛应用。深入研究钻孔灌注桩技术, 对提高工程质量、保证作业安全有重要的现实意义。该技术中包含很多的理论知识和技术信息, 尚需进一步挖掘探究, 以便更好地掌握相关知识。本文将对钻孔灌注桩的核心技术进行全方位的分析, 并对钻孔灌注桩的未来发展进行探讨。

1 钻孔灌注桩施工流程分析

1.1 施工准备阶段

施工前场地准备工作是保证工程顺利进行的先决条件。清除施工现场的障碍物、废弃材料、旧建筑残骸等, 对软弱地基进行加固, 提高其承载能力, 保证设备稳定运行, 符合规范要求。

测量放样是确定桩位的准确步骤。用全站仪或精密经纬仪按设计文件要求标定桩位中心点, 设置永久性标识牌, 布置控制桩作为动态监测参照。施工期间不断观察记录桩位偏离数值, 并将桩位偏离数值控制在允许范围内。

根据工程规模、地质条件、设计要求选择合适的钻孔机械, 如旋挖钻机、冲击钻机、回转钻机等, 保证钻孔机械性能良好、运转正常。同时准备好钢筋加工设备、混凝土搅拌设备和吊车、导管等辅助设备。在材料上, 要控制好钢筋、水泥、砂石等原材料的质量。钢筋要有出厂合格证和复试报告, 水泥要达到一定的强度等级并符合质量要求, 砂石的粒径大小和含泥量要符合设计要求。

按照工程项目的实际需要来制订施工方案, 包含工艺流程设计、技术参数确定、质量控制要点和安全防护措施等内容。此方案要由企业内部的专业技术人员审查, 还要请外部的专家来论证评定。审核通过后提交给监理方、建筑单位存档备案, 取得同意批复文件后才可以开展具体工作。

1.2 钻孔施工阶段

根据地质勘查资料及工程设计标准, 慎重选择适合的钻孔设备。软土层施工时, 旋挖钻机效率高、成孔速度快, 故为首选; 硬岩或含大粒径卵石地层应采用冲击式钻进装置。安装设备时一定要按照相关的技术规范来, 基础的承载能力要足够, 还要准确校准水平度以及垂直精度参数, 这样才能保证后续的工作安全可靠。

泥浆在钻孔时起到护壁、携渣、冷却钻头的作用。根据地质情况选择合适的泥浆, 一般为膨润土、水、添加剂按一定比例混合。钻孔过程中要不断往孔内加泥浆, 使孔内的泥浆液面比地下水位高出一定的距离, 形成泥浆护壁, 防止孔壁坍塌。及时清除孔内排出泥浆中的钻渣, 保证泥浆性能指标合格^[1]。

钻孔的深度必须按照设计方案进行。施工时, 用测绳等工具定时检测实际进尺数据并做好记录。接近设计标高时, 降低转速以保证准确达到设计标高。桩基质量好坏主要看其垂直度是否准确, 可以在钻机上加装专门检测垂直度的装置来进行实时监测。

1.3 清孔与钢筋笼制作安装

清孔是钻孔灌注桩施工的重要环节, 其主要目的是彻底清除孔底沉渣、有效降低泥浆含砂量, 减小桩

作者简介: 赵东民(1980-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

端阻力损失、提高桩基承载力、改善混凝土浇筑质量。常用的清孔方法有三种：（1）换浆法适用于冲击或冲抓成孔，通过循环置换含砂量大的泥浆直至各项指标达标；（2）掏渣法采用人工或机械直接掏出孔底厚沉渣，多用于冲击钻成孔；（3）喷射置换法利用高压水枪或空气吸泥机冲排沉渣，常与其他方法配合使用；质量控制方面，需严格把控泥浆相对密度在 1.1~1.15 范围内、黏度 17~20 Pa·s、含砂率小于 2%、胶体率不低于 98%，同时确保沉渣厚度符合设计要求——端承桩不超过 50 mm，摩擦型桩不超过 100 mm。

钢筋笼制作要严格按照设计图纸进行准确的下料、加工。根据桩长及钢筋笼分节长度将钢筋切割成相应尺寸，然后按设计规定的钢筋规格、间距和搭接长度绑扎或焊接钢筋。制作时需保证钢筋笼整体刚度和稳定性，在钢筋笼内部设置加强箍筋，并每隔一定距离设置十字撑或者三角形支撑。

钢筋笼制作完毕后应严格进行验收工作。检查钢筋的品种、规格、数量是否满足设计要求，钢筋焊接或者绑扎是否合格，有无漏焊、虚焊现象。同时测量钢筋笼的直径、长度、主筋间距等尺寸偏差，保证在规范允许偏差内。另外，还要检查钢筋笼保护层厚度是否达到设计要求，一般在钢筋笼外侧设置混凝土垫块或者焊接耳筋来保证保护层厚度。

钢筋笼安装一般用吊装设备。作业时要准确控制升降速度，保证运行平稳，防止碰触孔壁造成坍塌或者变形。钢筋笼到达设计标高后，需要加固，可以在顶部加设拉结钢筋，用它来牢牢系在孔口横梁上，防止混凝土灌注时上浮。同时保证钢筋笼中心线与桩孔轴线相吻合，偏差数不超过有关技术标准所允许的偏差数值^[2]。

1.4 混凝土灌注阶段

混凝土配合比设计要按照桩身混凝土设计强度等级、耐久性要求和施工工艺等来开展。通过试验来确定各种原材料的用量比例，使混凝土具有较好的和易性、流动性和强度。搅拌时必须严格按照配合比投料，保证各种原材料计量准确无误，控制好搅拌时间，使混凝土充分搅拌均匀，一般搅拌时间不应少于最短规定值。

导管是混凝土灌注工程的设备，导管安装质量影响施工效果。导管材料应选用无缝钢管，内壁要光滑、圆整，各节之间连接要牢固、密封性能好。实际施工时要根据孔深和单根长度来选择组合方案，导管底部距离孔底的间距在 300~500 mm 之间。在正式灌注前，要对导管进行水密性检验、承压能力评定，对导管的

密封性和机械强度做全面检查，防止漏浆、破损等现象的发生。

混凝土灌注时要控制灌注速度、灌注高度。灌注速度过快会造成钢筋笼上浮、混凝土离析；速度过慢容易造成断桩事故。开始灌注时应减慢灌注速度，保证混凝土顺利充满导管底部及桩孔底部。随着灌注的进行，可以逐渐加快灌注速度，但是速度不能大于 2 m/min。

导管埋深一般控制在 2~6 m。埋深不够容易造成混凝土灌注过程中导管脱离浆面，引起断桩事故；埋深过大则会使混凝土上行阻力增大，引起钢筋笼漂浮或者管道堵塞等现象。拔管时要匀速平稳，单次提升高度最好控制在 6 m 之内，实际操作时要按照现场施工情况和实际埋深参数来定。

为了有效防止混凝土离析，必须注意和易性与流动性的协调平衡，严格控制配合比参数和搅拌时间。灌注施工中要不断检测并记录坍落度数据，保证符合设计规范要求。断桩危险，保持连续浇筑工作十分重要，任何意外停止都应控制在 30 min 内。建立健全的质量管理体系，对可能出现的各种问题进行跟踪观察，及时发现和处理堵管、钢筋笼上浮等问题，保证整个工程的各项质量指标都符合要求^[3]。

1.5 桩头处理与质量检测

混凝土灌注完毕后，要等待桩身混凝土硬化到设计强度，这是保证桩体稳定、承载力的重要环节。强度达标后，准确截断桩头超灌部分到设计标高，操作时保护桩身完整性。再清除桩头浮浆、松散混凝土、杂物，使表面平整干净，为检验验收做好准备。成桩质量检测不能马虎，低应变动力检测和超声波检测法常用，前者靠应力波反射来判定桩身完整性和缺陷所在，后者靠超声波参数变化来评判桩身密实度和缺陷。

2 钻孔灌注桩施工关键技术要点

2.1 钻孔技术要点

钻孔灌注桩施工时要充分考虑复杂地质环境，合理选择成孔工艺。在软土地层（淤泥、淤泥质土）中，旋挖钻机由于效率高、可靠性好而被首选，成孔速度快、地层扰动小、孔壁完整、效率高。对于砂土层，尤其是中粗砂地层，应优先使用冲击式钻机，冲击式钻机依靠不断振动来完成碎屑分离的任务，同时配合泥浆护壁技术防止孔壁坍塌，满足砂质地层的工程要求。硬岩区（强风化岩、中风化岩），牙轮钻机和潜孔锤钻机由于动力性能强，可以满足坚硬岩石的破碎要求，保证深部钻探的质量。

防止塌孔的首要措施就是保证泥浆性能参数符合

技术规范要求，根据地质条件调节泥浆的密度、黏度和含砂量。在易塌孔地层中，应适当增大泥浆比重，增大对孔壁的压力强度，保持稳定的护壁效果。同时控制钻进速度，防止过快造成孔壁土体应力释放过快引发坍塌事故。施工期间要不断向井内灌注泥浆，使液面标高始终高于地下水位标高一定数值，防止外部水力因素破坏护壁^[4]。

防偏孔措施，钻机安装时底座要水平、钻杆要垂直、钻头中心与桩位中心要一致，在允许误差内。钻进时，定时对钻杆垂直度进行检查，钻机上可装设垂直度检测仪器随时检测。发现偏孔立即调整钻机或采用上下反复扫孔的方法。对偏孔严重的，回填黏土或片石至偏孔上方0.5 m以上，再重新钻进。

2.2 泥浆护壁技术要点

泥浆配制要依据地质情况、钻探工艺和工程需求。一般以膨润土为主，加水和其它辅助剂（纯碱或纤维素）按比例混合均匀形成稳定的体系。软土地层中泥浆密度宜调到1.05~1.10，黏度保持在16~18 Pa·s；沙质土壤作业时，应将密度调到1.15~1.25，黏度提高到18~22 Pa·s；岩石类地貌中可以适当降低参数，密度保持在1.02~1.06，黏度维持在16~20 Pa·s。同时含砂量不能大于4%，胶体含量大于95%。

泥浆循环系统由泥浆池、沉淀池、循环槽、泥浆泵等组成。泥浆池和沉淀池要设置得当，容量要符合施工要求，一般泥浆池容量为钻孔体积的1.5~2倍。循环槽要有一定的坡度，使泥浆能顺畅地流动。施工时要对泥浆循环系统加以管理，定时观测泥浆性能指标，依照检测结果调节泥浆配比，及时清除沉淀池里的钻渣，防止影响泥浆品质；还要保持泥浆循环系统密封性，防止泥浆泄露造成污染。

2.3 钢筋笼制作与安装技术要点

钢筋笼焊接可以采用双面焊或者单面焊，长度和质量要符合规范的要求。双面焊时，焊缝长度不小于5d（d为钢筋直径）；单面焊时，应大于10d。焊接时焊缝必须饱满，无气孔，夹渣等。钢筋笼连接可以采用机械连接或者焊接，机械配件必须保证质量合格，焊接时要注意焊接效果。制作过程中应对焊接处进行抽查，并进行拉伸、弯曲试验，看是否达到设计规定的强度要求^[5]。

为保证钢筋笼保护层厚度满足标准，可在外侧加设混凝土垫块或者焊接耳筋。混凝土垫块要有足够的强度和耐久性，根据设计规范选择规格、间距，一般每2~4 m设一组垫块，每组不少于3个，均匀分布

在四周。焊接耳筋时要控制好尺寸精度和焊缝质量，保证钢筋笼与孔壁的保护层厚度达到设计要求，且不小于50 mm。

2.4 特殊地质条件下的混凝土灌注技术要点

特殊地质条件下的混凝土灌注有不同技术要点：在砂层地质条件下，因砂层透水性强易致泥浆失水、孔壁坍塌影响混凝土灌注质量，灌注前要确保泥浆性能指标符合要求，提高泥浆黏度和比重增强护壁效果，灌注时要严格控制速度，避免孔内压力急剧变化引发坍孔，增加导管埋深至3~6 m，增强混凝土对孔壁的压力，防止砂层塌落混入混凝土；溶洞地质情况复杂，灌注时易出现混凝土流失、桩基承载力不足等问题，施工前要通过地质勘察详细了解溶洞分布、大小和填充情况，小型溶洞可采用抛填片石、黏土袋等方法堵塞处理后再正常灌注，大型溶洞可采用钢护筒跟进至溶洞底部提供稳定支撑环境，灌注过程中要密切观察孔内泥浆面变化，发现混凝土流失及时补灌，确保桩身混凝土连续性和完整性；坚硬岩石地质条件下钻孔难度大、孔壁粗糙，混凝土灌注阻力大，灌注前要清理孔壁去除浮渣和松散岩石颗粒，适当调整混凝土配合比，增加流动性，以便填充孔壁与钢筋笼间空隙。灌注过程中要控制好灌注高度和导管埋深，避免因混凝土上行阻力过大导致钢筋笼上浮或导管堵塞等问题。

3 结语

钻孔灌注桩施工技术在建筑领域中占有非常重要的地位，工序规范及关键因素控制的好坏直接决定着桩基工程质量的好坏。分析各个环节的工艺流程，探究核心技术，可以明确每一个操作的具体要求以及相应的质量控制标准。在实际建设过程中，技术人员要按照规程进行工作，加大监督力度，及时消除存在的隐患问题。只有这样，才能使工程实现预定的目标，保证建筑物质量，促进我国建筑业向更高层次发展。

参考文献：

- [1] 丁冰峰,徐州,汪正鸣.建筑工程中钻孔灌注桩施工技术的应用要点分析[J].中国厨卫,2023(01):51-53.
- [2] 王睿.钻孔灌注桩技术在建筑工程施工中的应用探究[J].智能城市,2021,07(06):144-145.
- [3] 张磊.建筑工程中钻孔灌注桩施工技术的应用要点分析[J].安徽建筑,2022,29(08):27-28,101.
- [4] 唐文斐.钻孔灌注桩技术在建筑工程施工中的应用[J].住宅与房地产,2023(17):110-112.
- [5] 何斌.高层建筑桩基工程施工技术及管理[J].工程技术研究,2022(08):143-145.

公路改性温拌沥青路面施工技术运用

缪冬志

(江苏高速公路工程养护有限公司, 江苏 淮安 223001)

摘要 改性温拌沥青技术使沥青混合料拌和压实温度有效降低, 在确保路面性能合格的基础上能够减少能耗和排放。本文主要从公路工程改性温拌沥青路面施工实际出发, 深入分析温拌沥青混合料材料组成、设计原则以及关键环节控制要点, 重点研究内容为温拌剂类型选择、改性沥青配伍性验证、矿料级配设计、混合料运输、摊铺、碾压与接缝处理等关键工序。研究结果表明, 确定温拌沥青混合料拌和温度 $130 \sim 150^{\circ}\text{C}$, 压实温度超过 110°C , 并利用分阶段碾压工艺使温沥青混合料密实度、均匀性达到要求。温拌沥青路面施工技术具备较高的先进性, 其在一级公路、高速公路、重载交通路段具有一定的应用价值, 也符合现代社会低碳环保发展需求。

关键词 改性温拌沥青; 路面施工; 混合料设计; 碾压工艺; 接缝处理

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.030

0 引言

现代公路事业发展速度不断加快, 其公路领域对于资源节约、环境保护方面要求不断提高, 这促使温拌沥青技术不断应用到工程领域。该技术深入研究添加剂和发泡工艺, 降低沥青黏度, 促使沥青混合料以较低温度具备较高的施工和易性。温拌沥青混合料中加入改性沥青, 使材料高温稳定性、抗疲劳性能达到要求, 尤其在复杂气候条件、重载交通下依然能够满足道路通行需求。目前改性温拌沥青已经在多条国家级交通干线中建设实施, 其施工温度比常规沥青混合料温度低 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 并且路面具备较高的耐久性与压实质量。本文结合工程实践分析温拌沥青路面施工技术应用特点, 通过混合料组合设计方法与施工控制提高施工水平, 进而为今后同类型工程项目施工提供参考。

1 公路改性温拌沥青性能分析

1.1 高温稳定性

在改性温拌沥青混合料的高温性能检测中, 其主要利用车辙试验进行。通过制作改性温拌沥青混合料试件, 在 60°C 环境下施加 0.7 MPa 轮压碾压速度 $42 \text{ 次}/\text{min}$ 。温拌沥青混合料动稳定度测量值超过 $3000 \text{ 次}/\text{mm}$, 有些掺量 SBS 改性样本达到 $5000 \text{ 次}/\text{mm}$ 以上。而温拌沥青混合料车辙深度应在 60 min 内控制在 2.5 mm 以下, 复数剪切模量 G^* 在 64°C 下不小于 2.0 kPa , 相位角 δ 不大于 70° 。由此可见, 改性温拌沥青混合料未造

成高温性能衰减, 并且与相同配比方案的热拌改性沥青对比动稳定度差异在 $\pm 8\%$ 以内^[1]。

1.2 低温抗裂性

改性温拌沥青混合料低温抗裂性极为优越, 其需要通过弯曲梁流变试验和低温弯曲试验联合验证。改性温拌沥青混合料在弯曲梁流变试验 -12°C 下测定蠕变速率 $0.3001/\text{s}$ 以下, m 值则超过 0.300 。该混合料低温弯曲试验温度 50°C , 加载速率 $50 \text{ mm}/\text{min}$ 破坏应变不低于 $2500 \mu\epsilon$, 有些混合料样本在 -15°C 下依然能够保持 $2000 \mu\epsilon$ 以上的应变能力。与此同时, 改性温拌沥青混合料沥青胶结料在 -20°C 下延度超过 100 mm , 弹性恢复率在 25°C 下超过 75% 。温拌添加剂未造成沥青脆点升高, 弗拉斯脆点测试结果 $-22 \sim -26^{\circ}\text{C}$ 之间。

1.3 水稳定性

改性温拌沥青混合料采用浸水马歇尔试验和冻融试验测量水稳定性, 如下: 混合料浸水马歇尔试件在 60°C 保温 48 h 残留稳定度超过 85% ; 冻融劈裂试件经真空饱水、 -18°C 冷冻 16 h 、 60°C 水浴 24 h 后, 劈裂抗拉强度比不小于 80% 。渗水系数现场检测值在 $30 \text{ mL}/\text{min}$ 至 $60 \text{ mL}/\text{min}$ 之间。混合料空隙率控制在 $4\% \pm 0.5\%$, 沥青膜厚度不小于 $10 \mu\text{m}$ 。温拌工艺下沥青与集料的黏附等级经水煮法检验为 4 级或 5 级。水稳定性主要受矿料洁净度、沥青酸值及温拌剂亲水性影响, 有机类温拌剂对水稳定性无明显不利效应^[2]。

作者简介: 缪冬志 (1995-) , 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路工程。

2 温拌改性沥青混合料组成设计

2.1 温拌剂与改性沥青的配伍性验证

改性温拌沥青混合料中确定适宜的温拌剂类型，其主要包含有机降黏型、发泡型、蜡基型等。有机降黏型温拌剂利用降低沥青分子间作用力以降低黏度，其应用温度范围是120~150℃；发泡型温拌剂利用水蒸气瞬时膨胀形成沥青薄膜，其拌和温度达到110℃左右；蜡基型温拌剂在高温熔融后润滑集料表面，经过冷却后结晶增强沥青混合料的强度。改性温拌沥青混合料温拌剂确定后，需要展开其与SBS改性沥青的配伍试验。该试验使用旋转黏度仪测定135℃下复合体系黏度目标值在3Pa·s以内。同时，通过动态剪切流变试验检验复合体系，在64℃下复数模量G*不低于2.0kPa，相位角δ不大于70°。如果上述测量发现混合料流变或黏度指标未能达到要求，需要及时调整温拌剂加入比例或改变类型^[3]。

2.2 矿料级配设计

矿料级配采用密级配AC-13或AC-16类型，公称最大粒径分别为13.2mm与16mm。粗集料采用玄武岩或辉绿岩，压碎值不大于20%，洛杉矶磨耗损失不超过25%；细集料为机制砂，砂当量不低于60%；矿粉为石灰岩磨细粉，0.075mm通过率在75%~85%之间。级配设计以Superpave体系为基准，控制关键筛孔通过率：对于AC-13，2.36mm筛孔通过率为25%~35%，0.075mm筛孔为4%~6%；对于AC-16，2.36mm筛孔为22%~32%，0.075mm筛孔为4%~6%。设计空隙率目标值为4%，沥青膜厚度不小于10μm。通过马歇尔击实或旋转压实成型试件，验证级配的抗车辙性能与水稳定性^[4]。

2.3 最佳沥青用量确定

在改性温拌沥青混合料中，最佳沥青用量通过马歇尔试验或Superpave Gyratory Compactor方法确定。改性温拌沥青混合料试件制作时成型温度设定为140℃，击实次数75次，双面或旋转压实100次，而在具体测量作业阶段主要从毛体积相对密度、理论最大相对密度、空隙率、矿料间隙率、沥青饱和度以及流值等方面进行。空隙率控制在4%±0.5%，矿料间隙率不小于14%，沥青饱和度在65%~75%之间，流值范围为2~4mm。同时进行浸水马歇尔试验，残留稳定度不低于85%；冻融劈裂试验，强度比不小于80%。最终选定沥青用量为各项指标均满足要求的中值，温拌剂掺量按厂家推荐值固定，通常为沥青质量的1.5%~3.0%。

3 公路改性温拌沥青路面施工关键技术

3.1 混合料拌合施工

改性温拌沥青混合料在间歇式沥青拌合楼内进行生产，通常其生产能力达到240t/h。混合料中集料经过冷料仓初级配给后进入干燥桶内加热，其集料温度达到160~170℃，集料加热完成后利用振动筛分级后存储在热料仓内。SBS改性沥青专用罐预热达到175℃，利用计量泵按照规定配合比参数精准注入拌缸内。温拌剂使用液体有机型，利用计量系统在沥青喷洒后注入搅拌缸且加入比例为沥青用量的2.0%。矿粉由螺旋输送机计量投入。拌合顺序为：先投入热集料干拌5s，随后喷入沥青与温拌剂，湿拌时间不少于45s。总拌合周期为60~70s。成品混合料出料温度控制在140~150℃，每车检测温度，采用红外测温仪在卸料口测量三次取平均值。拌和楼控制室实时记录每盘材料用量、温度与拌合时间。混合料外观呈均匀黑色，无花白、结团或离析现象。首盘料废弃，正式生产后每500t取样一次进行抽提筛分与马歇尔试验^[5]。

3.2 混合料运输

改性温拌沥青混合料制作结束后，使用自卸卡车运输多作业现场前，需要先进行车厢清洗并涂抹非石油基隔离剂。混合料装载按照前、后、中三次进行，以防单一位置装载量过大引发混合料离析。改性温拌沥青混合料运输时材料表面上层铺设铝箔反射膜，下部铺设阻燃棉毡，厚度达到20mm以上。混合料出厂温度140~150℃，运输时间在60min以内。改性温拌沥青混合料运输作业现场后，混合料表面温度130℃以上、内部温度125℃以上。而在每次车辆运输到作业后由专人进行检测，确保改性沥青混合料温度始终超过120℃。

3.3 混合料摊铺

改性温拌沥青混合料现场摊铺使用双振捣、双夯锤的摊铺机设备进行，设定振捣频率15Hz、夯锤频率20Hz。摊铺施工中设备行驶速度2~3m/min，熨平板温度100℃以上，并且保证设备均匀连续作业。摊铺作业阶段改性温拌沥青混合料高度为螺旋直径2/3以上，且螺旋布料器旋转速度结合摊铺宽度、厚度做出调整。通常情况下，改性温拌沥青混合料摊铺厚度为松铺系数1.2~1.25控制，上面层松铺厚度50~60mm、中面层60~75mm。混合料摊铺阶段温度始终在125℃以上，并且间隔50m进行一次混合料温度检测。此外，摊铺过程中需安排专人跟踪监测摊铺层表面质量，及时清除局部离析、拖痕或粘料等缺陷。当发现混合料出现温度离析或色泽异常时，应立即暂

停摊铺，核查运输及卸料环节是否存在保温失效或等待时间过长问题。摊铺机起步前应预热充分，避免初始段温度不足导致压实困难。相邻摊铺带之间应设置 5~10 cm 热接缝，确保纵向接缝密实连续。为减少停机等待，现场应协调好拌合、运输与摊铺节奏，保证摊铺作业连续不间断，杜绝因断料造成施工冷缝。

3.4 混合料碾压

1. 初压。改性温拌沥青混合料摊铺结束后，使用双钢轮压路机以静压方式完成初压，整机质量 11 t 以上。初压阶段设备行驶速度 2~3 km/h，按照从低向高逐步进行，相邻位置重叠 200~300 mm 完成两个碾压行程。初压开始阶段混合料温度超过 120 °C，第二遍碾压完成后温度不能低于 115 °C。摊铺结束后在 10 m 范围内即可开展初压作业，禁止初压环节存在急停、急启、原地转向等情况造成路面结构损坏。初压碾压结束后路面没有压痕、横向推移、混合料堆积，路面达到均匀、密实的状态。同时，初压环节在压路机前方 5 m、后方 5 m 设置测点检测混合料参数值，一般在摊铺结束后 5 min 内完成初压即可。

2. 复压。改性温拌沥青混合料路面复压施工使用整机质量 25 t 的轮胎压路机进行，轮胎充气压力 0.6~0.8 MPa。复压环节设备行驶速度 3~5 km/h，相邻位置重叠轮迹带为碾压轮胎宽度 1/2，完成 4~6 个碾压行程。复压结束后，混合料温度超过 110 °C。该阶段完成时，混合料温度不能低于 90 °C。而在改性温拌沥青混合料加入 SBS 改性沥青时，需要在复压阶段开启双钢轮振动压路机碾压作业，设定振幅 0.4 mm、频率 30 Hz 完成 2 个振动碾压行程，该环节设备速度 2.5 km/h。复压结束后路面密实度达到设计标准，表面纹理均匀且连续。

3. 终压。终压使用双钢轮压路机，整机质量不小于 10 t，碾压模式为静压。行进速度设定在 3 km/h 至 6 km/h 之间，完成 2 个碾压行程。终压开始时混合料表面温度不低于 70 °C，结束时温度不低于 60 °C。压路机沿纵向匀速行驶，轮迹重叠宽度为 300 mm。碾压过程中不开启振动功能，避免对已成型表面造成扰动。终压结束后，采用激光平整度仪检测路面，标准差 σ 值不大于 1.2 mm；采用铺砂法测定构造深度，结果在 0.6~1.0 mm 区间内。终压作业在复压完成后 10 min 内开始，碾压轨迹覆盖全部车道宽度，包括路缘带与中央分隔带边缘。压路机停机时停放于已完成终压的路段，不在新铺层上停留或调头。

3.5 接缝施工

1. 横向接缝施工。改性温拌沥青路面横向接缝选择平接缝施工方式，每日施工结束后摊铺机继续向前

直到混合料自然终止，随后后退 1 m。施工人员在混合料未达到冷却状态时使用长度 3 m 直尺检测道路端面平整度，高差超过 3 mm 需要垂直切割并清理掉多余混合料。切割面清理干净后覆盖保温材料。次日摊铺前，接缝表面均匀涂刷改性乳化沥青，喷洒量为 0.3 kg/m²。摊铺机就位时，熨平板前端搭接在已铺层上，搭接长度为 500 mm，预热时间不少于 10 min。新混合料摊铺后，双钢轮压路机沿横向进行碾压，首遍仅碾压新铺部分 150 mm 宽，后续每遍向旧铺层延伸 100 mm，共完成 6~8 遍碾压。碾压速度为 2 km/h，压路机行驶方向垂直于车道中心线。接缝区域压实度检测值不低于 93%。

2. 纵向接缝施工。改性温拌沥青路面纵向接缝采用热接缝方式，相邻两台摊铺机间隔 10~20 m，后机摊铺带和前机重叠 50~100 mm。而对于路面重叠位置摊铺 5 min 内，使用双钢轮压路机跨缝碾压，并且保证碾压轮迹覆盖新铺层全宽度向旧层延伸 150 mm。该阶段碾压速度 2 km/h，完成 4 个碾压行程。若因施工组织原因形成冷接缝，则在先铺层冷却后，使用切割机沿纵向切齐边缘，清除松散颗粒，表面喷洒快裂型改性乳化沥青作为粘层油，喷洒量为 0.4 kg/m²。后铺混合料与先铺层搭接宽度为 30 mm，摊铺后采用与横向接缝相同的横向碾压方式，完成 6~8 遍碾压。接缝区域渗水系数检测结果不超过 80 mL/min。

4 结语

公路改性温拌沥青路面施工技术能够降低混合料温度，确保路面的性能不受影响，以增强道路施工的可行性。从本文分析结果进行分析，通过改性温拌沥青路面施工技术的应用，能够提高公路路面建设效果，降低沥青混合料拌和、碾压环节温度，从而使公路工程项目建设效果达到要求，且具备环保性、耐久性的应用价值。

参考文献：

- [1] 郑君. 高速公路加铺改性沥青路面施工技术研究 [J]. 四川建材, 2022, 48(03):145-146.
- [2] 曹京国. 公路工程 SBS 改性沥青路面施工关键技术研究 [J]. 交通世界, 2023(Z2):116-118, 130.
- [3] 张力. 公路工程 SMA 改性沥青路面施工技术 [J]. 交通世界, 2023(17):67-69.
- [4] 杨海燕, 盛轩. SBS 改性沥青路面施工技术在公路工程中的应用思考 [J]. 新型工业化, 2022, 12(07):116-119.
- [5] 冯艳. 温拌沥青施工技术在高速公路路面施工中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024(02):133-135.

办公建筑大空间空调系统性能优化分析

金松

(上海建工一建集团有限公司, 上海 200437)

摘要 为满足大空间的空调舒适度, 改善热空调的效果, 暖通系统采取的措施主要有大空间空调分层设计、中央空调与低温辐射地暖相结合、采用射流喷口等, 然而受建筑结构及装饰立面设计限制, 依靠传统的经验并不能很好地保证构筑物内大堂的热空调效果。基于此, 本文针对案例办公楼大堂大空间变风量热空调系统, 通过热空调设计与检测调试, 提出一套灵活实用的空调系统, 以期为相关人员提供有益参考。

关键词 办公建筑; 大空间; 空调箱; 风口; 阀门

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.031

0 引言

随着人类生活形态多元化及建筑功能需求的扩展, 各类如展厅、中庭、电影院、办公大堂等大空间建筑愈发受到人们的关注。为满足此类大空间的空调舒适度, 暖通空调技术也在不断革新, 如通过对大空间空调进行分层设计、中央空调与低温辐射地暖相结合、大堂区域采用射流喷口等措施, 来改善大堂热空调的效果^[1-2]。然而, 每个构筑物都有其独特性, 往往受结构及装饰立面设计限制, 依靠传统的经验并不能很好地保证构筑物内大堂的热空调效果。本文依托某超高层办公楼一层办公大堂的热空调设计与测评, 针对办公楼大堂大空间变风量热空调系统, 提出优化设计建议。

1 办公建筑大空间空调系统概述

某超高层项目位于上海市静安区, 项目总建筑面积 100 040 m², 其中汇集了约 64 350 m² 的国际甲级办公,

约 8 600 m² 精品商业复合业态, 为典型的上海老城区重建项目。该项目地处老城区, 空间狭小, 寸土寸金, 建筑设计中分配给机电系统安装的空间较为局促, 附近没有能源站, 即没有外接冷热源, 大楼内部需设置独立的冷热源设备, 建设方对装饰面如净空、墙体装饰面厚度、立面美观度等有极高的要求, 机电管线安装难度大, 超高层建筑、垂直跨度大, 空调排水管程长。

综合以上特点, 本项目空调系统采用以空气源热泵作为冷热源, 空气源热泵安装灵活, 无需固定能源站, 可满足室内外安装需求。VAVbox 变风量末端能根据负荷动态调节风量, 符合节能要求^[3]。空调水系统采用同程式设计, 可有效平衡各支路阻力, 避免因水程长导致的供冷 / 热不均^[4]。

空调水采用同程式系统, 设计参数如表 1 所示。其中, 办公大堂区域的空调箱设置于地下一层的空调机房内, 新风取自机房内的土建自然风道, 在空调机

表 1 阷北广场合并重建城市更新项目空调设计参数

建筑名称	房间名称	夏季		冬季		人均使用面 积 (m ² /人)	新风量 (m ³ /h•P)	噪声标准 dB (A)	备注
		温度 (℃)	相对湿度 (%)	温度 (℃)	相对湿度 (%)				
上海阳北 广场合并 重建城市 更新项目	办公	24	≤ 55	20	≥ 45	8	30	≤ 45	
	会议室	24	≤ 55	20	≥ 45	2.5	30	≤ 40	
	商业	24	≤ 60	22	—	2.5	20	≤ 55	
	餐厅	24	≤ 60	22	—	2.5	30	≤ 55	
	办公大堂	26	≤ 65	18	—	15	10	≤ 50	
	电梯厅	26	≤ 65	18	—	8	20	≤ 45	

作者简介: 金松 (1979-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑机电。

组送风侧接入回风段进行混合。送风管通过核心筒内的风管井上升到大堂顶部，沿大堂顶板敷设，再沿幕墙边梁柱下引至 6 m 高度。回风管经大堂柱边穿楼板下至地下一层，接至空调机房。

地下一层的采用单台风量为 32 000 m^3/h 、标准制热工况为 200 kW 的组合式空调机组作为空调送风设备，空调供回水温度 43.5 °C / 38.5 °C。地面辅以供回水温度为 45 °C / 40 °C 的低温辐射地暖。在标准工况下，地暖地面目标温度为 28.5 °C。一层大堂空调送风系统图如图 1 所示。

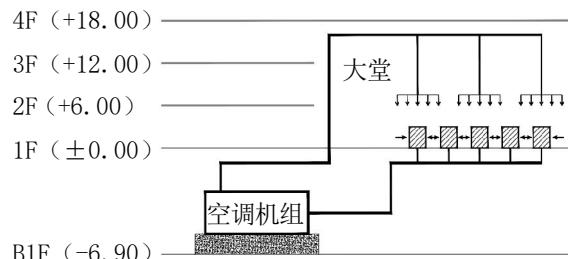


图 1 一层大厅空调送风系统图

由于本项目大堂立柱与梁板的设计限制，此空间无法布置分层的送风口，仅有 6 m 处靠近幕墙侧的横梁可以供给安装送风口。初始设计时，大堂空调送风口为大空间常用的球型射流风口，但因球型射流风口较厚，安装需要较宽的装饰包裹空间，无法满足建设方对装饰面的美观需求，故经设计院同意后调整为单层百叶风口。

2 原设计空调效果评测

为了验证大堂热空调的效果，制定了专项调试方案，对大堂进行了测试。在空调箱最大频率运行，水阀、风阀全开的情况下，通过电子温度计测量距地 1.5 m 处温度。在大堂区域选取四个点：p1、p2、p3、p4，当室外温度为 7 °C 时，分别量得温度为 16 °C、15 °C、14 °C、15 °C，大堂温度取平均值 15 °C（如图 2 所示）。

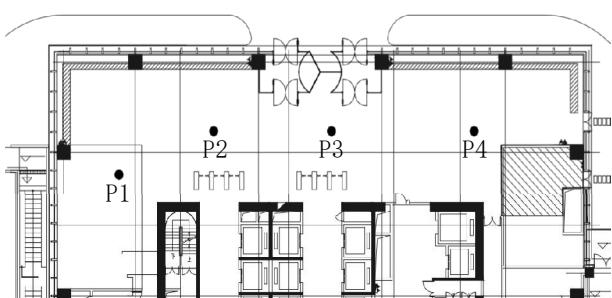


图 2 大堂测温点位

在室外大气湿球温度为 6 °C、空调供回水 44 °C / 39 °C 的情况下，测得温度分层情况如表 2 所示。

表 2 热成像仪测得空间温度

距地高度 (m)	最高温度 (°C)	最低温度 (°C)	平均温度 (°C)	设计目标温度 (°C)
0	31.6	27.9	29.8	28.5
1.5	15.7	14.8	15.3	18
3	15.9	14.9	15.4	18
4.5	16.2	14.9	15.6	18
6	20.1	18.7	19.4	18
9	22.9	21.4	22.2	18
12	23	23.6	22.8	18
15	23.8	23.7	23.8	18
18	24.3	24.1	24.2	18

其中，距地 0 m 即低温辐射地暖地板温度。送风口位于 6 m 处的靠近幕墙侧的横梁上，风口形式为单层百叶风口，测得风口出风平均温度为 31.5 °C。回风口平均温度 14.7 °C。根据表 2 可知，在地面 1.5 ~ 4.5 m 空间，温度低于设计目标值，6 m 以上满足或超过设计目标值，热量存在严重分布不均的情况。

至此，我们可以得出结论，原设计存在严重的温度分层问题，核心原因如下：

1. 烟囱效应：大空间垂直尺度大（18 m），热空气自然上升特性显著，单层百叶风口送出的热空气（出风温度 31.5 °C）无法到达下部空间，迅速上浮至顶部。

2. 风口性能不足：单层百叶风口射流系数仅 0.6 ~ 0.8（球型射流风口可达 1.2 ~ 1.5），射流距离短，无法将热空气输送至距地 1.5 ~ 4.5 m 区域^[5]。

3. 地暖辅助有限：地暖虽达到设计温度（29.8 °C），但热量仅能向上辐射 1 ~ 2 m，无法覆盖 3 m 以上区域，且与空调热风无协同作用。

需注意的是，原设计大堂单位面积热负荷为 80 W/m²，远高于《公共建筑节能设计标准》（GB 50189—2015）中高级办公楼大堂 60 W/m² 的限值，说明系统总供热量满足要求，问题根源在于气流组织不合理，而非设备能力不足^[6]。

3 办公建筑大空间空调系统性能优化方案

根据热空气上升、冷空气下降的空气对流基本原理，采用上送下回的空调送风模式时，一层大堂的空调在制冷工况下，可以很好地达成设计目的，人体舒适度感受良好。但同样的系统，在制热工况下，即使过剩的热负荷参数，消耗更多的能源，却无法满足人体对热空调的舒适度需求。

热空气自然上升的特性，若无喷流风口将热空气送至低处，则上送下回式布置的空调效果远不如下送上回式。基于上述情况，设计一种可以实现夏季上送下回，冬季下送上回的空调系统，就成为最优的解决方案。

为达成此目的，在不修改已完成装饰面区域的管线风口布置的前提下，对地下一层空调机房内的接管进行了优化。优化方案仅修改空调箱进出口处的风管，最大程度地保留了原有的系统路由。

优化后的空调机房内相比原设计方案，新增4个开关闭（若想实现远程控制，则可选用电动开关闭），夏季冷空调工况，1#与2#阀门开启，3#与4#阀门关闭，空调风路与原设计风管路由一致，当切换至冬季热空调工况时，1#与2#阀门关闭，3#与4#阀门开启，实现送风口与回风口的互换。冬季原6m处送风口变为回风口，原地面回风口变为送风口，夏季则相反（如图3所示）。

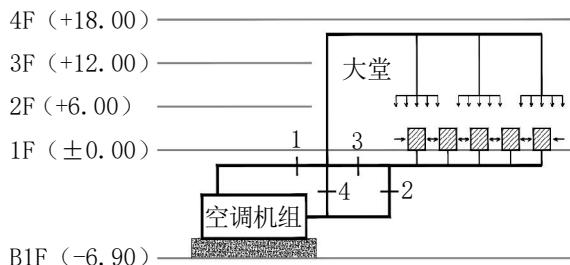


图3 一层大堂空调优化后送风系统图

4 办公建筑大空间空调系统性能优化效果

经过为期两周的空调机房风管改造，最终完成了上文所述的优化方案改造。

将阀门切换至制热工况，一层大堂空调顺利调整为了下送上回式送风空调。选取室外大气湿球温度5℃、水阀风阀全开的条件下，借助热成像仪同样对优化后的大堂空调进行了温度测量，结果如表3所示。

表3 优化后的大堂空间温度

距地高度(m)	最高温度(℃)	最低温度(℃)	平均温度(℃)	原平均温度(℃)	设计目标温度(℃)
0	33.7	31.2	32.5	29.8	28.5
1.5	26.4	24.8	25.6	15.3	18
3	25.9	24.7	25.3	15.4	18
4.5	26.7	24.2	25.0	15.6	18

通过测量结果可知，优化后的热空调效果在人体舒适度感知区域有了极大的改善，较原有空调该区域

平均提升空间温度10℃。且有较大的盈余空间，为后续大堂空调的节能目的留足了空间。

优化成果汇总如下：

1. 舒适度提升：距地1.5~4.5m区域平均温度从15.4℃提升至25.3℃，远超设计目标18℃，人体舒适度显著改善（PMV值从-1.8降至-0.3，达到“舒适”等级）。

2. 能耗优化：因温度达标，可降低空调箱运行频率（从50Hz降至35Hz），实测系统能耗降低18.5%，年节约电费约2.3万元。

3. 稳定性：连续1个月监测显示，系统温度波动范围≤±1.2℃，远优于原设计±3.5℃的波动范围，满足精密空调控制要求。

5 结束语

在民用建筑机电设计中，大空间空调系统因空间尺度大、负荷波动性强、功能需求多元等特点，导致设计参数难以精准匹配，成为影响建筑能效与舒适性的主要技术障碍。结合国内的建筑行业形势，大空间空调往往存在与超高层建筑大堂共通的难点。例如：建筑主体未预留分层空调送风口的附着点、风管管线过长、风向偏转角超过180°、建设方对装饰立面有特殊要求等。该优化方案不仅解决了该项目大堂空调舒适度问题，还为同类大空间建筑（如展厅、中庭、高铁站候车厅）空调系统设计提供了可参考的思路。未来可进一步结合AI控制技术，实现“工况自动切换+负荷动态调节+能耗实时监测”的智能化运行，推动大空间空调系统向“低能耗、高舒适、智能化”方向发展。

参考文献：

- [1] 杜雅婧.大型公共建筑暖通空调系统节能设计与运行优化研究[J].工程技术研究,2024,09(24):194-196.
- [2] 周科,李锦堂,张广秋,等.冷热双向全周期维度蓄能空调系统设计优化[J],建筑节能(中英文),2024,52(09):42-49.
- [3] 李红.建筑暖通空调系统节能优化设计分析[J].居业,2024(11):85-87.
- [4] 胡正璐,郑伟栋,张志光,等.空调器室内机风道结构优化设计与性能分析[J].家电科技,2024(S01):302-304.
- [5] 宋义华.空调系统节能优化与智能控制技术的应用研究[J].家电维修,2025(06):6-8.
- [6] 张军.建筑空调系统多目标优化设计研究[J].设备管理与维修,2025(02):54-57.

公路桥涵伸缩缝病害巡查与快速修复方法研究

秦光明

(云南省文山州麻栗坡县地方公路管理段, 云南 文山 663300)

摘要 公路桥涵伸缩缝病害直接干扰交通通行与结构安全, 当前巡查存在识别精准度欠佳、流程适配性不足及修复针对性薄弱等问题。本文认为可结合病害形成机理与巡查实际, 融入无损检测技术构建标准化识别体系, 完善分级分类巡查流程, 运用成因导向的针对性修复工艺, 切实改善病害识别精准度与巡查效率, 强化修复工程质量与结构耐久性, 为公路桥涵伸缩缝养护提供高效支撑方案, 提高交通基础设施养护精细化水平。

关键词 公路桥涵; 伸缩缝病害; 精准巡查; 快速修复; 养护优化

中图分类号:U445

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.032

0 引言

伸缩缝作为公路桥涵的关键构成部分之一, 起到协调结构形变、缓冲荷载冲击的核心作用, 其质量密切关系到路网通行安全与耐久性。在交通量持续攀升、环境条件复杂多变的态势下, 伸缩缝病害频发且整治难度加大, 传统巡查修复模式已难以满足精细化养护需求^[1]。秉持绿色交通与高质量发展导向, 围绕病害精准识别、作业流程优化与修复质量提升三大重点, 以技术革新与流程重构突破现存瓶颈, 可为桥涵伸缩缝养护构建科学高效的实施路径, 助力交通基础设施养护水准稳步提升。

1 公路桥涵伸缩缝应用背景与病害巡查现状

公路桥涵伸缩缝作为适配桥面温度变形与缓冲车辆荷载冲击的核心构件, 直接关系到行驶平顺性与桥涵结构安全稳定性。其长期暴露于复杂自然环境与高频交通荷载中易出现填料脱落、螺栓松动、钢板变形、缝隙堵塞等病害, 未及时处置将引发雨水下渗侵蚀梁体与墩台, 进而加剧结构损伤^[2]。当前病害排查多依赖人工目视检测, 受环境光照、人员经验等因素制约难以精准捕捉隐蔽病害, 且排查流程缺乏标准化规范, 存在重点区域遗漏、信息记录滞后等问题, 导致病害发现不及时、处置延后, 无法满足桥涵养护精细化发展需求。随着桥梁规模与交通需求持续增长, 传统巡查手段在数据获取广度、深度及实时性方面的局限愈发突出, 难以形成对伸缩缝运行状态的动态连续监测。隐蔽性病害在早期往往无明显表征, 如缺乏技术手段辅助识别, 极易错过最佳处治时机, 从而导致病害在短

期内迅速恶化, 进一步加大后期修复难度与养护成本。

2 公路桥涵伸缩缝病害及巡查核心问题

2.1 病害识别精准性不足及类型判定模糊

伸缩缝长期暴露于露天环境, 易遭泥沙、沥青等杂物堆积覆盖, 细微裂缝、内部螺栓松动、填料隐性老化等早期病害隐蔽性突出, 人工目视巡查难以穿透表层遮挡实现精准识别^[3]。不同病害表现形式存在交叉叠加特征, 填料脱落与钢板变形多伴随发生, 缝隙堵塞可能遮蔽内部结构损伤, 缺乏明确判定标准的情况下, 巡查人员难以精准区分病害主次关系与核心属性。伸缩缝病害程度分级缺乏量化支撑, 裂缝宽度、钢板变形量、螺栓锈蚀程度等关键指标判断依赖个人经验, 易出现轻度病害误判为重度或重度病害漏判的情形, 直接关联后续修复方案的合理性与针对性。隐蔽性病害若无法在早期得到有效识别, 往往在短时间内迅速扩展, 引发结构受力异常, 甚至导致伸缩缝功能衰减。巡查精度不足不仅影响病害评估结果, 还会造成修复决策滞后, 使得原本可控的轻微病害演变为更为复杂的结构性问题。

2.2 巡查流程适配性欠缺及效率短板

当前巡查流程多采用同质化模式, 未结合伸缩缝所在桥涵的结构类型、交通流量、服役年限等差异做差异化设计, 高交通负荷路段、服役较久桥涵等重点区域巡查频次与深度均显不足, 低风险区域巡查存在资源配置冗余^[4]。巡查缺乏标准化规程, 信息记录多依赖纸质台账或简易电子表, 数据录入不及时、核心参数缺失, 难以实现巡查数据实时同步共享。人工巡

作者简介: 秦光明 (1992-) , 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路桥梁养护。

查受地形、气象等环境因素制约明显，大型桥梁、复杂路况下的伸缩缝巡查存在巡查盲区，整体巡查效能偏低，无法满足大规模桥涵养护时效要求，导致病害处置周期拉长。巡查流程缺乏适配性不仅造成巡查覆盖率偏低，还会削弱病害预警能力，使部分处于早期阶段的隐性病害无法被及时识别。随着桥梁规模与管理数量不断增长，这一流程短板愈加凸显，进一步压缩养护部门的处置时限，影响整体养护决策效率。

2.3 病害成因复杂及修复针对性薄弱

伸缩缝病害的形成是多方面因素交织作用的结果，自然环境下温度交替诱发的伸缩疲劳、雨水侵蚀，交通荷载下车辆反复冲击造成的结构损耗，材料老化及施工环节工艺缺陷、选型适配性不足等，均可能单独或协同引发病害^[5]。缺少对成因的系统性溯源梳理，修复作业多局限于表层处理，未针对核心诱因采取针对性措施，仅对脱落填料进行简易填充，未能解决导致填料脱落的钢板变形或螺栓松动隐患，病害极易二次出现；盐蚀诱发的病害处置中，未采取针对性防腐措施，仅实施常规修复，难以从根源上增强伸缩缝的耐久性，最终造成修复资源无谓消耗与养护成本增加。若缺乏成因导向的综合研判，修复策略往往呈现被动补救的特征，使伸缩缝长期处于“反复损坏—反复修复”的循环之中，不仅增加养护工作量，也可能削弱结构整体性能。科学的成因分析对于制定精准修复方案至关重要，是实现养护提质增效的核心基础。

3 公路桥涵伸缩缝精准巡查与高效修复方案

3.1 病害精准识别与类型判定技术

借助无损检测技术与数字化手段构建多维识别体系。针对伸缩缝隐蔽性病害，运用超声波检测技术穿透表层杂质探测细微裂缝、内部螺栓松动等深层问题；以雷达探测采集伸缩缝内部结构密实度数据，评估填料老化程度与钢板锈蚀范围；融入图像识别技术，借助高清摄像头采集伸缩缝表面图像，经算法对图像实施灰度处理与特征提取，智能辨识填料脱落、钢板变形、缝隙堵塞等显性病害的形态与位置^[6]。构建标准化病害类型判定框架，界定不同病害的核心特征参数，裂缝宽度、钢板变形量、螺栓松动扭矩、填料老化程度等量化指标将病害界定为轻度、中度、重度三个等级，轻度病害涵盖裂缝宽度小于0.2 mm、螺栓轻微松动，中度病害为裂缝宽度0.2~0.5 mm、钢板局部变形，重度病害为裂缝宽度大于0.5 mm、钢板严重扭曲或螺栓大面积锈蚀。整合伸缩缝结构类型、服役年限等基础信息构建病害类型数据库，经大数据分析实现病害

特征与类型的智能匹配，降低人为经验判断的误差，保障病害识别与类型判定的精准性，为后续修复工作提供可靠依据。这些技术的融合应用显著提升了病害诊断的全面性，有助于实现对伸缩缝运行状态的持续跟踪与动态评估。

3.2 巡查流程优化与效率提升方法

构建桥涵差异化巡查机制（见图1），结合桥涵所在路段交通承载量、伸缩缝使用年限、结构类型等，将巡查区域划定为高风险、中风险、低风险三个等级。高风险区域涵盖高负荷交通路段、使用超15年的老旧桥涵、气候条件恶劣区域，提高巡查密度每月至少2次，运用无损检测配合人工复核；中风险区域每季度巡查1次，低风险区域每半年巡查1次，以人工巡查为核心方式。拟定标准化巡查操作规范，厘清巡查前设备准备、巡查中关键检查点位与操作步骤、巡查后信息记录要求，统一采用移动端巡查系统，实时录入病害位置、类型、等级等数据，自动生成巡查报告，实现数据实时同步与共享。引入无人机巡查技术，针对大型桥梁、复杂路况等人工巡查难以覆盖的区域，借助无人机搭载高清摄像头与检测设备，开展全方位无死角巡查，强化巡查覆盖范围与效率^[7]。构建巡查人员培训体系，常态化开展病害识别、设备操作、数据记录等专业培训，强化巡查人员业务能力，保障巡查流程规范执行，有效缩短病害发现与处置周期，满足大规模桥涵养护的时效性需求。



图1 桥涵差异化巡查机制流程图

3.3 成因导向的针对性修复工艺

针对温度交替与交通荷载引发的伸缩疲劳类病害，选用高弹性抗老化新型填缝材料。该材料需具备优良伸缩变形能力，可适配温度变化带来的伸缩需求，同步提升与钢板的黏结强度以抵御车辆往复冲击，修复前期需彻底清除缝隙内杂质与老化填料，经高压水枪冲洗后自然风干，保障修复面洁净干燥状态。针对雨水侵蚀与盐类腐蚀诱发的病害，修复流程中增设防腐处理工序，于钢板表面涂刷防腐涂料，螺栓连接处采用防腐密封胶，选用抗腐蚀性能优异的不锈钢配件，从根源上阻断腐蚀路径，已出现锈蚀的钢板与螺栓需

彻底除锈后再开展防腐及修复作业^[8]。针对施工工艺不当或选型不合理诱发的病害，重新核验伸缩缝型号与结构参数，保障与桥涵结构的适配性。施工阶段严格把控安装精度，保障伸缩装置平整度与牢固性，规避安装偏差诱发后续病害。钢板变形、螺栓松动等问题需及时更换受损部件，调整支座受力状态以保障伸缩缝与桥涵结构协同运作。修复完成后需开展养护管理工作，设置警示标识限制重型车辆通行，定期核查修复效果并及时处置潜在问题，提升伸缩缝修复质量与耐久性水平。

4 公路桥涵伸缩缝巡查修复实践效果

4.1 病害识别准确率与类型判定精准度提升

采用无损检测技术与可视化设备，高清内窥镜探查伸缩缝内部结构，借助超声波检测仪识别潜藏的螺栓松动、钢板内部损伤，搭配裂缝宽度尺等量化工具实现关键指标的精准量化^[9]。构建标准化病害识别体系，界定填料脱落、螺栓锈蚀、钢板变形、缝隙堵塞等病害的特征参数与判定阈值，厘清主次病害关联，规避交叉叠加病害的误判情形。针对不同服役年限、结构类型的伸缩缝，拟定适配性识别规范，明晰轻度、中度、重度病害的分级标准，降低人工经验判断带来的偏差。技术培训增强巡查人员对病害特征的辨识能力，依托典型病害案例库深化实操层面的认识，保障快速精准辨识早期潜藏病害，准确界定病害类型与严重程度，为后续科学制定修复方案提供可靠的技术支撑。

4.2 巡查流程适配性与作业效率改善

构建分级分类巡查机制，结合桥涵交通流量、伸缩缝服役年限、历史病害数据等因素界定巡查对象为高、中、低风险等级，高负荷路段、老旧桥涵等重点区域需提升巡查频次与深度实现资源精准投放^[10]。确立标准化巡查操作规范界定巡查步骤、关键检查点及必测参数，配备数字化巡查终端实现病害信息实时录入、照片上传与数据同步，规避纸质记录的滞后性与遗漏问题。融合地理信息系统与桥涵养护数据库构建可视化巡查管理平台，规划设计最优巡查路线实时跟进巡查进度，破解地形、天气等因素造成的作业盲区。数字化、智能化手段精简巡查流程，降低人工干预，提高单批次巡查覆盖范围与数据处理效率，压缩病害发现与反馈周期，契合大规模桥涵养护的时效性需求。

4.3 修复工程质量与耐久性保障

依托病害成因溯源结论，采用针对性修复工艺，交通荷载冲击引发的钢板变形先校正或更换受损钢板，再开展填料填补作业，盐蚀诱发的病害修复过程中添

加防腐添加剂并涂刷抗渗防腐涂层。甄选抗老化、抗疲劳、耐侵蚀的专用填缝料与结构件，保障材料性能与伸缩缝工作环境、结构要求精准适配^[11]。严格规范修复施工全流程，施工前彻底清理伸缩缝内杂物与破损基层，施工中精准把控材料配比与浇筑压实工艺，施工后检测压实度、伸缩性能等关键指标。构建修复后跟踪养护机制，定期监测伸缩缝工作状态，及时处置初期隐患，结合环境条件与使用情况优化养护周期。成因导向的修复工艺、优质适配的材料选择及全流程质量管控，可有效增强修复工程稳定性与耐久性，切实降低病害复发率和长期养护成本。

5 结束语

公路桥涵伸缩缝病害的精准巡查与快速修复，是保障桥涵结构安全、提升通行效率的核心环节。聚焦病害识别、巡查流程、修复工艺等核心问题，依托技术创新与流程优化形成的解决方案，可切实改善病害识别精准度、巡查作业效能及修复工程耐久性。成因导向的养护模式可从根源上减少病害复发频次，合理控制养护投入成本。未来需持续完善技术路径，结合实际应用场景迭代优化方案，为交通基础设施长效运维提供更为坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 杨文强.公路桥涵病害防治及养护管理措施研究[J].产品可靠性报告,2025(10):210-211.
- [2] 黄鲁明.公路桥涵病害防治及养护管理分析[J].科技创新与应用,2025,15(18):154-157.
- [3] 唐勇.高速公路桥涵常见病害特点及原因分析[J].运输经理世界,2025(15):101-103.
- [4] 李强.基于加权区间层次分析的混凝土梁式桥技术状况评定[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [5] 李剑雄.对桥涵构造物施工质量管理的研究[J].四川建材,2022,48(07):112-113.
- [6] 郑鑫.基于现有规范的钢管混凝土拱桥技术状况评定改进研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
- [7] 丁宏建.聚氨酯混凝土伸缩缝锚固区受力性能研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2022.
- [8] 朱岩.陕西省高速公路桥涵小修保养年公里生产消耗指标研究[D].西安:长安大学,2019.
- [9] 张佳念.装配式简支梁桥预防性养护试验研究[D].太原:太原科技大学,2019.
- [10] 陈旭芳.现有桥梁技术评估方法的改进研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [11] 陈敦,李国玉,牛富俊,等.喜马拉雅山区公路桥涵病害类型及特征研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(01):18-31,59.

水库水利工程施工现场管理问题分析及应对策略研究

邢科健

(黄山市月潭水库管理处, 安徽 黄山 245000)

摘要 水库水利工程是一项规模庞大、覆盖面广的系统工程, 其施工现场管理不仅关系到人民群众的生命财产安全, 还会对区域社会经济发展造成严重影响。加强施工现场的管理, 对于控制工程成本、保障施工进度和提高施工质量具有重要意义, 这不仅有助于满足施工行业良性发展要求, 还能促进更多优秀施工企业的发展。本文通过系统梳理施工一线存在的实际问题, 深入分析施工管理过程中的关键环节, 进而提出相应的优化对策与解决方案, 旨在为同类工程提供实践参考。

关键词 水利工程; 水库施工; 现场管理; 风险控制; 标准化

中图分类号: TV62

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.033

0 引言

水库工程是集蓄水、防洪、灌溉、发电与生态修复等功能于一体的重要基础设施, 不仅能有效保护人民群众的财产安全, 更能产生巨大的社会经济效益。但是这类工程多数是位于水文地质条件复杂的山区河谷, 存在建设工期漫长、技术环节交错、环境影响显著、参与方众多等现象。建设过程体现出系统性、复杂性与不可逆性, 以至于施工现场管理成为施工过程中的重要任务。在传统的水库建设管理中经常依赖施工人员的经验和执行行政命令, 导致信息传递和资源配置等方面存在严重的滞后性和偏差性, 造成施工过程中的效率低、安全事故多、成本居高不下、生态环境损害等一系列问题。随着新的基础建设战略推进和碳达峰的提出, 对水利施工提出了安全、绿色、高效、智能的要求。所以, 系统地诊断施工现场管理的难点, 创新管理模式和工具, 就成为水利行业转型升级的一个重要课题。本研究立足于水利工程施工管理的理论和行业一线的施工情况, 分析施工过程中存在的问题, 并提出相应的对策, 构建一套针对水库工程建设特点的现代化施工管理模式。

1 水库水利工程施工现场管理中存在的问题

1.1 现场作业人员缺乏安全意识

一是水库水利工程施工人员流动性大且普遍安全意识薄弱, 缺乏系统培训, 对安全事故风险缺乏清醒

的认识, 同时对水利工程特殊要求理解不足, 导致施工现场的安全事故频发; 二是一线作业人员(特别是特种作业和复杂技术工种)老龄化严重, 新生代技术工人供给不足, 流动性极高; 三是管理团队能力短板明显, 尽管学历层次有所提升, 但兼具水利专业知识、现代管理技能与复杂现场问题处置经验的复合型人才严重匮乏。由于一部分现场施工工人简单地认为凭借自己的经验或主观意愿就可以进行施工, 更加剧了安全风险的提升, 导致安全生产事故的发生。所以, 在施工过程中要不断地完善安全生产的规章制度, 确保制度没有漏洞, 工人按章操作, 有效杜绝违章作业, 避免事故发生。

1.2 施工现场的水库水利工程材料管理杂乱

在实际施工中, 水库的工程质量与施工过程中的材料质量有着重要关系^[1]。在施工过程中要对材料的管理和使用加以重视, 安排专职的材料员管理施工现场的材料, 确保材料质量。由于实际施工中经出场的材料的种类型号非常多, 如果不重视材料现场使用管理和堆放, 对于一些大型材料不进行定点堆放, 对一些损耗品不进行及时的清理, 就会使得施工现场的场地被大量占用, 影响施工作业, 还可能造成施工环境污染, 甚至导致安全生产事故的发生。材料采购计划与施工进度计划衔接不紧, 常出现材料积压占用资金或供应断档导致停工。大型机械设备调度粗放, 台班

作者简介: 邢科健(1992-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水库建设管理。

利用率低，设备闲置与突击抢工并存，综合使用成本高昂。同时，在水库施工过程中，由于对施工现场的材料没有进行合理的管理，导致施工企业的成本增加。

1.3 水库水利工程施工现场管理忽视安全问题

在实际水库施工现场，部分水库施工企业只关注工程本身的经济利益，而未根据建设项目设计特点及施工现场的具体情况做出合理的预算安排，一味地考虑降低成本^[2]。这不仅会导致施工现场的安全防护措施不到位，还可能给工程质量留下安全隐患，最终带来现场作业人员的风险增加和后期水库使用安全下降两重后果。另外，部分施工企业为了节省资金，未对施工人员进行必要的安全教育，加之施工设备老化，平时管理和使用施工设备没有遵循安全标准，这就更加容易引发安全事故。严重的安全事故不仅会导致施工项目严重滞后，更会对企业的形象产生不良影响。因此，企业在施工过程中要把安全放在首位，不盲目地追求经济利益，要重视施工人员的生命安全及施工设备的使用安全，把安全重于泰山牢记于心。

1.4 技术与管理手段创新与应用不足

在土石坝填筑碾压、高边坡开挖支护、大体积混凝土温控防裂、高精度金属结构安装等关键工序上，仍大量依赖传统工艺与“老师傅”经验，对新型材料、智能装备（如无人碾压机、自动摊铺机）、先进工法（如预制装配式）的引进和应用动力不足、能力不够。在施工过程中，进度计划（如横道图）与实际进展脱节；质量检验数据以纸质记录为主，难以进行实时分析与趋势预测；安全管理依赖周期性检查，缺乏对人员不安全行为、设备异常状态的动态感知。设计 BIM 模型、施工管理平台、监测自动化系统之间数据标准不一，互操作性差，形成“信息孤岛”。应急预案“纸上谈兵”，预案编制往往为满足合规要求，内容笼统，未能基于具体工点、具体风险源进行情景构建^[3]。应急资源储备地点、数量与实际风险不匹配，演练流于形式，一线人员对预案不熟悉，导致突发事件时指挥混乱、处置失当。

1.5 欠缺完善的质量监管体系

水库的建设不仅复杂，而且存在建设周期长^[4]、质量要求高的特点，一套完善的防控与监督机制不可或缺。常见的施工隐患防控手段主要是针对施工过程中常出现的“高空坠物”“机器操作不当”等风险，但是对水库工程特有的深基坑坍塌、围堰渗流破坏、库岸再造、爆破振动影响等系统性、隐蔽性风险分析不足，评估手段欠缺。加上不少的施工企业对工程质

量的管理重视性认识不足，没有建立完善的系统性监督机制。这些施工企业往往把经营业绩放在首位，突出经济利益最大化，为了降低成本，极力地压缩施工工期，简化相关风险防控措施，这就导致现场质量人员难以对水库工程中各分部、分项工程实施全面有效的质量管控，容易造成施工环节中的具体工艺与操作流程存在疏漏，使得最终工程质量难以得到可靠保障。

1.6 水库工程现场不重视环境保护

多数施工企业存在轻视环境的思想。在水库建设施工中不可避免地会产生工程建设的废弃物、扬尘和废水，对周边环境造成不良影响。例如：施工作业时会产生噪声污染，干扰附近居民的正常生活^[5]；扬尘对周边空气造成污染。但是，当前不少企业对这些问题的认识和管理存在薄弱环节，有些施工企业甚至为了节省成本，故意忽视上述问题，给当地生态环境带来了显著的损害。同时，在环境监测上通常是施工企业中各个部门各自负责，没有统筹管理机构，没有形成一套完整的环境影响的预警机制。

2 水库水利工程施工现场管理问题对策

2.1 提高安全意识

在水库的建设施工过程中，还有诸多隐藏的安全隐患，这就对管理人员提出了更高的要求。管理人员要有强化安全生产的意识，以“零事故”为目标，定期或不定期地开展安全知识培训，加大宣传教育工作，在开工前选派一批既有安全意识又有较高专业技能的管理人员进驻施工现场，为工程施工提供有效保障。同时，在施工过程中为作业人员提供及时指导，确保工程按计划顺利推进。在施工现场还需在显著位置张贴安全警示标识，明显提示禁止非施工人员随意进入，避免因无关人员闯入而引发的安全事故，降低事故发生的风险。

2.2 加强材料管理

施工企业在施工中可以成立相关的管理小组，对工地的材料进行统一的综合管理，从而加强对施工材料和设备的领用与收回等多个环节实施全过程的监督与控制。安排专人负责管理工作，履行职责的同时做到与现场人员有效沟通，确保施工材料合理规范使用及施工设备的正确领用。同时，还可以借助科技的力量，采用 BIM 的成本管理，结合时间、成本两个因素，显著提高施工进度，降低施工成本。推行周供应和日计划相结合，与主要材料供应商精准对接，根据施工进度准确供应物料，以大幅减少库存和资金的占用比例。

2.3 加强水库土建施工现场管控

生产安全贯穿水库施工全过程，不仅关系到施工工程开展顺利与否，还与施工人员的生命安全息息相关，是施工过程中的重中之重。因此，必须定期或不定期地开展检查和监督，对施工过程中的误差要按照规范标准进行严格把控，确保在合理的规范内，从而保证施工质量和安全。同时，还要加强施工现场作业人员的安全教育培训工作，提高他们的安全意识。此外，还可以建立健全长效机制，如网络化的管理责任划分机制，规范每个网络格子上的任务目标（安全、质量、进度、文明施工等），确保问题能得到最快速的处置，把问题解决在萌芽状态。通过建立完善的安全管理管控体系，保障水库建设过程有序规范地进行。

2.4 深化技术赋能

从“经验驱动”到“数据驱动”建设“数字孪生”工地，以高精度BIM模型为数字底板，集成物联网(IoT)感知数据（人员定位、机械状态、环境监测、视频监控）、无人机定期航测数据、施工过程数据，构建与物理工地实时映射、交互的虚拟工地。实现施工方案的可视化模拟与优化、进度形象的自动对比、物料需求的精准计算。推广智能建造装备与工艺，在碾压施工中应用具备GNSS定位和压实度实时反馈功能的智能碾压系统；在混凝土浇筑中应用智能温控与振捣系统；探索边坡开挖的智能监测与自动支护机器人等。另外，将老师傅的经验转化为可复制、可优化的算法模型。同时，打破部门壁垒，构建一个集成进度管理、质量管理、安全管理、成本管理、合同管理、资料管理模块的统一平台。所有数据源头一次录入、多方共享，利用BI工具进行多维度分析，为管理决策提供实时、精准的数据看板。

2.5 水库工程施工过程中的施工质量监管

水库工程施工过程中存在着紧密衔接的环节，各个施工环节都存在着质量与技术上的差异。为确保水库整体的工程质量，要对每一个施工环节进行严格的监督与管理，并建立全过程动态质量控制机制。采取动态质量管理模式，将总体质量目标逐层分解、细化，然后针对具体质量问题实施差异化分析和论证，构建施工中与相关人员匹配的监督体系。施工过程中一旦出现异常，管理人员必须第一时间赶赴现场开展检查，针对问题及时与施工人员现场沟通协调，保证工程质量安全可靠。同时，还需推行动态风险分级管控与隐患排查治理相结合的双重预防机制。运用JSA（工作安全分析）、LEC法等对全工序、全岗位风险进行动态辨

识、评估与分级，制定并公示“风险分布图”和分级管控清单。隐患排查采用信息化手段，实现手机端检查、自动推送整改、闭环验证。

2.6 水库水利工程施工现场的环境保护

在进行水库水利工程建设前，各参与单位都应该充分认识到环境污染是施工过程中面临的关键问题之一，要高度重视环境议题，并提前制定完善的环境保护预案，推行生态友好型绿色施工工法。水库水利工程建设过程中应全力避免对周边环境产生破坏性影响，减少对周围环境的破坏^[6]。优先采用低噪声、低振动的施工设备；实施施工区雨污分流与沉淀处理；利用开挖料进行场内平衡或生态修复，减少弃渣；对施工迹地实施“即损即复”的植被恢复。如果遇到破坏环境的污染事情发生，应立即采取合理的措施予以处理，并有效管理环境污染，将环保要求转化为具体的工艺参数和控制标准，进而提升企业的公众形象。

3 结语

水库水利工程施工现场管理是一项涵盖技术、管理、经济、社会的复杂系统工程。面对新时代的高标准要求，必须从根本上转变管理范，只有提升水库水利工程的现场管理水平，才能有效保障工程质量。因此，我们必须运用人工智能、边缘计算、区块链等先进技术，促使水利工程现场管理向着更高程度的自治化、透明化与智能化发展。同时，要注重管理创新，秉承“以人为本”和“价值创造”原则，以建设安全可靠、品质卓越、生态友好、效能领先的现代水利基础设施为目标，实现经济效益、社会效益与生态效益的协同提升，为经济社会可持续发展提供坚实的支撑。

参考文献：

- [1] 孟翔,孔雷.水利水电工程建设质量评估及控制技术探析[J].水利技术监督,2025(05):138-141,242.
- [2] 周荣灿.房屋建筑工程施工现场管理的问题及对策研究[J].江西建材,2021(11):188-189.
- [3] 王欢.地质勘查单位应急救援体系建立探索[J].安徽地质,2024,34(03):286-288.
- [4] 艾梅.水库建设管理中存在的问题和对策分析[J].低碳世界,2023,13(01):93-95.
- [5] 孙雨生.城市更新背景下排水管网改造问题[J].中国住宅设施,2025(05):7-9.
- [6] 李光荣.水库施工环境保护设计及其水源地水质保护措施研究[J].环境与发展,2020,32(05):211,213.

市政路桥工程沥青路面早期损坏的成因分析与防治措施

蔡必挺

(广东雄辉市政公用工程有限公司, 广东 佛山 528318)

摘要 在市政路桥工程中, 沥青路面凭借行车舒适、施工便捷等突出优势, 在实际建设中得到广泛应用。然而, 其早期损坏问题频发, 不仅显著缩短了路面的使用寿命, 还大幅度增加了后期养护成本。本文以裂缝、车辙、松散等典型早期损坏形式为研究对象, 结合相关规范要求, 从材料性能、施工工艺、设计理念、环境与荷载作用四个维度系统剖析早期损坏的深层成因, 同时提出涵盖材料管控、施工优化、设计完善、养护管理的全生命周期防治体系, 并通过工程实践案例验证相关措施的有效性, 以期为提升市政沥青路面耐久性提供技术参考。

关键词 市政路桥工程; 沥青路面; 早期损坏; 裂缝; 变形

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.034

0 引言

市政路桥作为城市交通网络的核心载体, 其路面性能直接关系到交通通行效率与行车安全。沥青路面凭借表面平整、减震降噪、维修便捷等特点, 在我国城镇道路建设中得到广泛应用。然而, 近年来多地市政道路沥青路面在通车后短时间内便出现裂缝、车辙、坑槽等早期损坏现象, 部分路段甚至因损坏严重需提前进行大修, 这不仅造成巨大经济浪费, 还对城市交通运行产生诸多不良影响。例如: 北方某省会城市的一条主干道, 通车不久后便出现大面积横向裂缝与网裂, 在夏季高温时段, 局部车辙问题已超出规范要求, 不得不投入大量资金实施应急养护。

1 市政沥青路面早期损坏的典型类型及特征

1.1 裂缝类损坏

裂缝是市政沥青路面最常见的早期损坏形式, 按形态可划分为横向裂缝、纵向裂缝与网状裂缝。其中横向裂缝多呈规则的横向分布, 间距通常为 5~15 米, 其形成主要源于温度变化引发的沥青面层收缩作用, 这一现象在北方严寒地区因温差剧烈而尤为突出。另外, 纵向裂缝则沿道路行车方向延伸, 部分还会伴随路面沉降问题, 其产生多与基层施工质量缺陷或路基不均匀沉降密切相关。此外, 网状裂缝则表现为交错的裂缝网络, 其初期呈细微裂纹, 后期逐渐发展为块状破损, 从本质上讲, 这是沥青混合料老化衰减与路

面结构强度不足两大因素共同作用的综合体现^[1]。

1.2 变形类损坏

车辙作为沥青路面最典型的变形类损坏, 主要表现为行车道轮迹处的纵向连续性凹陷, 且在交叉口、公交站点等重载集中区域尤为突出。在市政道路中, 公交车、垃圾运输车等重型车辆的反复碾压, 加上夏季高温导致的沥青软化, 极易引发车辙变形。此外, 部分路段若存在基层压实度不足的施工质量问题, 还可能诱发不均匀沉降型车辙, 其典型特征为凹陷区域边缘伴随轻微隆起现象, 进一步加剧路面破损程度。

1.3 松散类损坏

松散类损坏初期表现为路面集料轻微脱落, 进而形成“麻面”, 随着损坏程度的持续发展, 后期会逐渐演变为坑槽。从成因来看, 此类损坏的核心诱因是沥青与集料的黏结力的丧失, 具体可能源于施工阶段集料含水率超标、长期使用过程中沥青老化, 或是雨水渗入基层后引发的结构层剥离等因素。另外, 在雨季集中的南方城市, 松散类损坏往往与裂缝类损坏伴随出现, 雨水通过裂缝侵入基层, 进而破坏面层与基层的结合界面, 最终造成集料松散脱落^[2]。

2 沥青路面早期损坏的成因分析

2.1 材料性能缺陷

材料质量是决定沥青路面耐久性的核心基础, 其性能缺陷往往直接导致早期损坏。在沥青材料方面,

作者简介: 蔡必挺 (1976-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政路桥施工。

部分工程选用的基质沥青针入度偏小、延度不足，导致低温抗裂性能较差，冬季易在行车荷载与温度应力共同作用下产生横向裂缝。而聚合物改性沥青若储存温度过高或储存时间过长，则极易出现离析现象，进而导致路面局部抗老化性能下降。另外，在集料选择上，采用针片状含量超标的集料会大幅度降低混合料骨架强度，影响整体承载能力。

2.2 施工工艺不规范

施工环节的质量控制缺陷是引发早期损坏的关键诱因，其中主要包含混合料生产、摊铺、压实全流程。在混合料生产阶段，搅拌温度控制不当是常见问题，如果温度过高会加速沥青老化，从而降低黏结性能；而温度过低则导致混合料拌和不均匀，最终出现“花白料”问题。例如：在某城市快速路施工中，由于沥青混合料出厂温度波动范围超过 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，而未及时采取有效调控措施，导致道路通车后1年内便出现局部网裂与松散现象，这印证了生产阶段温度管控缺陷对道路耐久性能够产生直接影响。

摊铺与压实工艺作为沥青路面施工的核心环节，直接决定了路面密实度与平整度的控制效果。摊铺时若摊铺机速度忽快忽慢，就会导致面层厚度不均匀，进而在局部形成结构薄弱区域。而在压实环节，若压路机组合方式不合理或碾压遍数不足，不仅会导致路面压实度偏低，还会使空隙率超出规范要求，从而导致雨水易渗入路面结构内部，进而引发水损害问题。此外，基层施工质量对路面整体性能同样具有深远影响。以水泥稳定碎石基层为例，若其养护期未满足设计要求便提前开放交通，则基层易产生早期结构性损伤，该损伤会进一步向上反射至沥青面层，从而形成难以修复的反射裂缝^[3]。

2.3 设计理念不合理

设计阶段的考虑不周为路面早期损坏埋下隐患，主要体现在结构设计与参数选取两方面。在结构层设计上，部分市政道路因过度追求建设成本控制，采用的沥青面层厚度偏薄，从而无法承受重型车辆的反复荷载。例如：在北方某城市次干道设计中，沥青面层仅采用4 cm细粒式沥青混凝土+5 cm中粒式沥青混凝土的组合，该道路仅通车1年便在公交站点处出现明显车辙。

参数选取与实际工况脱节同样常见。设计时若未充分调研路段交通量构成，对公交车、重型货车等特殊荷载考虑不足，就会导致轴载预估偏低，进而导致路面结构层强度设计无法满足实际承载需求。此外，排水系统设计不完善亦是不可忽视的重要诱因，若路表排水坡度设置不足、边沟排水能力未达设计标准，

就会导致雨水在路面长时间滞留，进而通过路面裂缝或结构空隙侵入基层，最终引发结构层损坏^[4]。

2.4 环境与荷载作用

自然环境与交通荷载的耦合作用是加速路面早期损坏的外部诱因。其中，温度变化对沥青路面的影响尤为显著，北方地区年温差可达 60°C 以上，沥青面层在“低温收缩—高温膨胀”的反复循环中产生疲劳应力，最终形成温度裂缝。而在黑龙江省等严寒地区，冬季路面结冰后车辆碾压产生的冰层膨胀力会破坏集料与沥青的黏结界面，待春季融雪时水分易沿破损界面侵入路面结构内部，进一步加剧松散损坏。

交通荷载的影响具有双重性：首先，当前市政道路交通流量增长速度远超设计预期，且大型车辆超载现象较为普遍，导致路面承受的实际轴载长期超出设计标准。其次，交通流分布存在显著不均，交叉口、公交站点等区域易形成高频次荷载集中效应，进而加速局部路面老化进程。例如：某市中心商业区道路因日均大型货车通行量超设计值3倍，且公交站点密集，仅通车2年便出现深度超过2 cm的车辙，如此就需要进行铣刨重铺^[5]。

3 沥青路面早期损坏的防治措施

3.1 强化材料全流程质量管控

建立从材料选型到进场检验的全链条质量控制体系，是预防早期损坏的基础。在材料选型阶段，需结合地域气候特征进行针对性选择：对于北方严寒地区应优先选用针入度 $40\sim 60$ （ 0.1 mm ）、延度 $\geq 50\text{ cm}$ 的改性沥青，同时配合吸水率 $\leq 3\%$ 的碱性集料，以提升材料抗冻裂性能。而对于南方多雨地区则应选用水稳定性优异的SMA混合料，进而增强路面抗松散能力。此外，密封材料的选择必须符合相关标准和要求，其中加热型密封胶的破坏应变应 $\geq 300\%$ ，贴缝胶的常温黏结强度不应低于0.15 MPa。

在材料进场检验环节需严格执行“双检制度”，不仅要核查材料出厂合格证，还需按规范进行抽样检测。沥青材料重点检测针入度、延度、软化点三大指标，集料需控制针片状含量 $\leq 15\%$ 、含泥量 $\leq 3\%$ ，而混合料出场前必须完成马歇尔稳定度、流值及空隙率的检测，确保各项指标均符合设计要求。对于检测不合格的材料要实行“零容忍”原则，一经发现坚决清退出场，从源头保障工程质量安全^[6]。

3.2 优化施工工艺与质量控制

以精细化施工理念规范全流程操作，重点强化关键工序管控。在混合料生产阶段，通过引入智能温控

系统确保加热温度波动范围控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 内，同时其搅拌时间不少于 45 秒，以保证混合料拌和均匀。另外，在进入摊铺施工环节前，需先对下承层进行清理并涂刷黏层油，且黏层油用量要控制在 $0.3 \sim 0.5 \text{ kg}/\text{m}^2$ ，从而确保面层与基层黏结牢固。在摊铺作业过程中，摊铺机应采用匀速行驶模式，将行驶速度控制在 $2 \sim 6 \text{ m}/\text{min}$ ，以避免路面厚度出现不必要的波动。

压实工艺需结合混合料类型制定专项方案：对于 AC 型混合料应采用“初压静压 + 复压振动 + 终压静压”的组合方式，而 SMA 混合料因集料特性，需减少振动碾压次数，防止集料破碎。在压实度控制方面，要采用“双指标检测”体系，既检测钻芯样密实度，又通过无核密度仪进行现场连续检测，从而确保路面空隙率能够严格控制在 $3\% \sim 6\%$ 的合理范围。

基层施工质量控制同样关键，在水泥稳定碎石基层施工后需保证 7 天以上养生期，且养生期间严禁车辆通行。养生结束后需及时检测基层弯沉值，对于检测结果不合格的路段，必须立即采取返工处理措施，如此可从源头上避免反射裂缝产生^[7]。

3.3 完善设计方案与适应性优化

秉持“全生命周期设计”理念，提升设计方案的科学性与适应性。在结构层设计方面，应根据交通量等级合理确定厚度：主干道沥青面层厚度不应小于 12 cm ，采用“下面层粗粒式 + 中面层中粒式 + 上面层细粒式”的三层复合结构。而公交专用道等重载集中区域可增设 4 cm 厚的改性沥青玛蹄脂碎石（SMA-13）上面层，从而显著增强路面抗车辙性能。

参数选取需结合实际工况，通过现场交通量调查明确重载车辆比例，再采用轴载换算公式对设计轴载进行修正。另外，在气候适应性设计方面因地制宜，北方地区在下面层采用橡胶沥青混合料，并利用橡胶的弹性提升抗裂性能。而南方地区要优化排水设计，并增设边缘排水系统，以保障路面结构稳定性。

裂缝养护设计应严格遵循“早发现、早处理”原则，根据裂缝宽度选择对应措施：宽度 $< 5 \text{ mm}$ 的裂缝应采用贴缝胶处理，而宽度 $\geq 5 \text{ mm}$ 的裂缝应采用加热型密封胶灌缝。此外，设计文件中还需明确密封材料性能指标、施工工艺要求及质量验收标准，以确保养护效果符合规范要求^[8]。

3.4 建立精细化养护管理体系

为延长路面的实际使用寿命，需构建“监测—评估—养护”一体化的精细化管理体系，通过全流程闭环管控提升道路养护科学性与实效性。在建立常态化

监测机制时，应采用道路检测车每年进行 1 次全面检测，重点监测裂缝密度、车辙深度、平整度等指标，同时对交叉口、公交站点等重点区域每季度进行人工巡查，以记录损坏发展情况。

制定差异化养护策略，根据损坏类型选择对应技术：对轻微网裂采用稀浆封层处理，厚度控制在 $3 \sim 5 \text{ mm}$ ，对车辙深度 $1 \sim 2 \text{ cm}$ 的路段采用微表处养护，选用高模量改性乳化沥青增强抗变形能力。另外，对已形成的坑槽，可采用“切边—清理—喷洒黏层油—填补混合料”的标准化工艺修补，从而确保修补质量。此外，养护施工应选择适宜时机，加热型密封胶施工宜在 $5 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 环境下进行，以避免出现低温脆裂或高温流淌问题。

4 结束语

市政路桥工程沥青路面早期损坏，是材料、施工、设计及环境荷载多因素共同作用的结果，这不仅会缩短路面使用寿命，还会大幅度增加养护成本，从而直接影响城市交通运行。基于此，本文提出强化材料管控、优化施工工艺、完善设计方案及建立精细化养护体系的综合防治措施，同时秉持“预防为主、防治结合”的全生命周期管理理念，为提升路面耐久性提供了路径参考。未来，需不断研发和推广新型改性沥青材料和绿色养护技术，使市政沥青路面早期损坏问题得到更精准的管控，助力城市交通基础设施的高质量发展，为市民出行提供更安全、舒适的交通环境。

参考文献：

- [1] 李历民. 浅谈高速公路沥青路面的早期损坏与预防性养护[J]. 模型世界, 2023(09):76-78.
- [2] 李静一, 王浩. 沥青路面早期损坏原因及处治方法分析[J]. 技术与市场, 2021,28(09):131-132.
- [3] 罗磊. 市政工程沥青混凝土路面早期损坏原因及防治措施[J]. 工程建设与发展, 2025,04(08):16-18.
- [4] 胡晓宇, 陈辉亚. 沥青路面早期水损坏演化分析及评价指标研究[J]. 公路, 2022,67(07):130-134.
- [5] 胡晓宇, 单建飞, 姜正晖. 基于浸水汉堡车辙试验的沥青路面水损坏性能评价[J]. 公路工程, 2022,47(03):125-130.
- [6] 何鹏. 城市道路沥青路面早期损坏的成因分析与预防措施[J]. 建筑工程技术与设计, 2021(11):1262.
- [7] 李涛. 废旧沥青路面材料大比例再生利用技术[J]. 建材发展导向(上), 2021,19(05):172-173.
- [8] 赵家胜. 道路养护中沥青路面再生还原固封技术的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2023,46(05):94-96.

超长尺寸单元式幕墙安装技术研究

包立波

(上海建筑装饰(集团)有限公司, 上海 200062)

摘要 随着超高层建筑的不断发展, 单元式幕墙因其安装效率高、施工质量好等优点, 已成为超高层建筑幕墙的主流形式。然而, 超长单元板块的吊装与安装技术始终是该领域的技术瓶颈, 特别是在超高层建筑应用中, 面临着高空作业风险、板块尺寸与重量过大、运输难度高以及层高限制等多重挑战。本研究以国内某标志性超高层建筑项目为案例, 重点阐述了该工程中超长单元板块的吊装与安装工艺, 其研究成果以为同类超高层建筑的超长单元式幕墙施工提供实践参考。

关键词 单元式幕墙; 超长单元板块; 吊装技术; 超高层建筑

中图分类号: TU765

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.035

0 引言

超高层建筑不仅是城市经济发展的象征, 也是城市风貌的重要组成部分。超高层建筑最直观的特点就是它的外立面, 而单元式幕墙便是外立面的主要组成部分。因此, 其设计往往具有独特的美学价值, 能够显著提升城市的视觉形象。单元式幕墙的高效施工技术使得超高层建筑能够在有限的城市空间内实现更高的建筑高度和更大的建筑面积, 优化了城市空间的利用效率。而超长尺寸单元式幕墙的施工技术则在常规单元式幕墙的基础上进一步推动了建筑行业技术创新, 如单轨吊系统、起吊平台等技术的应用, 完善了幕墙施工技术的盲点。本文案例工程建筑塔楼高度约 597 m, 共计 130 层(除设备层外共 117 层)。该幕墙系统由半隐框(横隐竖明)单元式玻璃幕墙与百叶幕墙组成(最外侧为玻璃百叶/中层为铝合金百叶), 单元板块最大长度约 11 m, 主要位于塔楼 32 层、63 层及 94 层。

1 超高层建筑中超长尺寸幕墙的安装技术难点

单元板块的尺寸和重量: 超长尺寸幕墙板块通常具有较大的尺寸和重量, 这给施工工程中的运输与吊装带来了极大的挑战。该工程幕墙的超长单元板块高度可达 11 m, 重量超过 1 吨。这些板块的运输和吊装需要特殊的设备和技术支持^[1]。

垂直运输的选择与布置: 超长尺寸幕墙板块的垂直运输需要选择合适的方式, 并进行合理的堆场布置。由于板块尺寸和重量较大, 传统的货架与货梯无法满足需求, 需要采用塔吊和单轨吊等专业起重设备进行垂直运输。这些设备的布置需要考虑施工效率、安全

性和操作便利性, 确保吊装过程的顺利进行。

板块的起吊与翻转: 超长尺寸幕墙板块的吊运和翻转是安装中的关键环节。由于板块尺寸和重量较大, 导致建筑层高的限制, 幕墙单元板无法以传统方式直接从楼内出板、起吊与翻转, 需依靠单轨吊与特殊起吊平台的配合才能确保板块顺利到达安装位置。

2 单轨吊的布置与安装

2.1 单轨吊的构造与优势

在超高层幕墙安装工程中, 单轨吊系统凭借其机动性强、适应面广及施工效率高的特点, 展现出显著的技术优势。其作业流程为: 在设计楼层的楼板边缘预先安装单轨吊轨道, 悬挂自行电动葫芦, 将已完成清洁处理的单元板由楼层内部吊运至建筑外侧, 最终由楼层内作业人员进行定位安装^[2-3]。

(1) **机动灵活、适应复杂立面:** 单轨吊系统可根据幕墙板块尺寸及建筑外形灵活布置轨道走向, 有效适应超高层建筑立面变化, 实现不同角度和位置的精准吊装。

(2) **作业高效、减少设备依赖:** 相比传统塔吊, 单轨吊系统专为幕墙安装设计, 吊装流程更加直接高效, 且不占用核心筒内施工电梯资源, 大幅提升垂直运输效率。

(3) **同步施工、优化工序衔接:** 通过合理分段设置单轨吊系统, 可实现多楼层同步进行幕墙安装, 显著缩短整体施工周期。(4) **安全可控、降低作业风险:** 系统采用定点吊装模式, 避免了板块在空中的长距离摆动, 且作业区域相对独立, 有效保障了下方区域的安全^[4-5]。

为确保吊装作业顺利进行, 在安装前必须彻底清除楼层周边可能影响板块吊装路径的各类临时构件,

作者简介: 包立波(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑幕墙。

包括外挑工件、操作平台、防护挡板及安全网等，为幕墙安装创造无障碍作业空间^[6]。

2.2 单轨吊的安装

单轨吊系统通过其专业化、模块化的设计，为超高层幕墙安装提供了一种安全、高效、经济的解决方案，特别适用于建筑形态复杂、工期要求严格的现代化超高层项目。

单轨吊系统是一种组合型吊装设备，由悬挑于楼板外四周的电动葫芦及 I 型钢轨道组合而成。作为单元式幕墙吊装的专用设备，它在施工过程中操作方便、灵活性高，且便于安装^[7]。

根据现场施工区分段，分别在塔楼 35 层、66 层与 97 层设置针对该幕墙系统的单轨吊装置，以供超长尺寸单元板的吊运与安装。

整体施工顺序为从下至上，逐层向上安装，在每个施工段的相应楼层设置操作平台。

安装轨道的人员在楼板上按规定设置安全防坠钢丝绳，并将安全带牢牢扣在防坠钢丝绳上。防坠钢丝绳用卸扣固定在结构立柱上。使用订做好的单轨道（18#工字钢）运输到需要安装的楼层，分别放置在需要安装轨道的相应区域，并将钢支架锁固于幕墙预埋件或后置埋件上^[8]。

3 起吊平台的布置与安装

幕墙超长尺寸单元板与标准单元板最大的施工难度区别在于其尺寸。该幕墙系统单元板的尺寸为 11 m，是标准单元板的 3 倍至 4 倍长，由于建筑层高的限制，标准尺寸单元板通常可以直接从楼内进行起吊安装；而超长尺寸单元板的长度却限制了其楼内出板的条件，大幅度增加了起吊过程的难度。因此需要为该幕墙系统特别设置一个起吊平台。

3.1 超高层立面布置

根据该幕墙系统于外立面的分布，在塔楼 33 层、64 层、95 层（分别位于该幕墙系统的上一楼层）设置外挑起吊钢平台，以配合高空大堂超长单元板的吊装及安装。

3.2 起吊平台的构造

使用 20b# 工字钢作为起吊平台的主梁，外挑结构边缘 2 m，主梁与主体结构固定的方式采用 Ø12 mm 圆钢折弯的对穿螺栓与 L50×5 mm 角钢进行固定，下面垫上木方；次梁采用 10# 槽钢组成，上铺 3 mm 厚的钢板；起吊平台边缘用 φ48×3.6 mm 钢管架设 1.8 m 高防护架，工字钢边缘焊接定位销，定位销外插钢管套与工字钢焊接，并将钢丝网牢牢固定在钢管上。

3.3 起吊平台搭设要求

起吊平台搭设时应确保其结构具有足够的刚度、稳定性与承载能力。在荷载作用下，整体结构需保持

稳固，不产生显著变形或晃动，从而为高空作业提供一个安全、可靠的操作平台。

3.4 平台的安装及管理

1. 准备就位。首先，设置安全警戒区，施工机具与钢材半成品进场后堆放在安全区域内；其次，吊装工字钢就位，并完成槽钢的焊接安装；最后，对钢结构整体涂刷防锈漆。

2. 安装过程。主钢梁需安装于结构楼板外侧，操作前，应在楼板设置安全防坠钢丝绳，该钢丝绳通过卸扣固定于结构立柱，所有安装人员的安全带必须全程挂扣于此绳。

使用订做好的主钢梁（20b# 工字钢）运输到 33 层，分别放置在需要安装的位置旁边，并将钢支架锁固于幕墙预埋件或后置埋件上。

悬臂杆安装时，首先将绳索一端固定于上层楼板，另一端系于悬臂杆外端以辅助其就位。安装人员将其推出后，把内侧端部与预埋件进行螺栓连接，最终通过调节绳索松紧度来精确控制悬臂杆的水平度。（幕墙预埋件在土建施工时已完成。）

安装主钢梁周围的钢管，并固定安全钢丝网。所有悬臂杆件以相同方法安装在对应部位。安装次梁并铺设钢板。其中，位于楼板结构边缘的起吊平台处相应范围内的钢板为可拆卸平台板，根据超长单元板的尺寸，起吊平台每两根主梁之间将安置三块长 1 000 mm×宽 990 mm 的可拆卸钢板，以便安装起吊平台下方的幕墙单元板。

4 超长尺寸单元板安装方案

4.1 超长尺寸单元板安装措施

1. 单元板的垂直运输：由于该幕墙系统超长单元板的最大长度为 11 m，标准施工电梯轿厢的尺寸无法满足其要求，须结合单轨吊与塔吊的运力进行板块的垂直运输。

2. 单元板楼层内的贮存：按照标准层的做法，每一安装楼层的单元板原则上都存放于待安装的楼层内。由于该幕墙系统的特殊构造，其楼层内圈已安装完成钢结构的密集钢柱，导致完全阻断了楼内出板的路径，必须对于该超长尺寸单元板的存放采取特殊处理。因此，将高空大堂的超长尺寸单元板配合现场部署的施工段划分及安装顺序分批次吊运至安装楼层的上一层，由该楼层进行出板，从而解决楼内储存及出板问题。

3. 单元板的安装：借助单轨吊系统与起吊平台将其从贮存楼层移出，并水平移动至安装位置正上方。在确认该楼层作业人员准备就绪，且防风等安全措施已到位（严禁在风雨等恶劣天气下施工）^[9]之后，操

作设备使单元板保持平稳、匀速的状态，缓慢下降至目标楼层，完成最终安装。

4.2 超长尺寸单元板安装步骤

超长尺寸单元板层内出板→利用起吊平台起吊超长单元板→安装操作平台两侧位置的超长单元板→通过起吊平台翻板安装平台下方的单元板。

单元板块的现场安装需遵循精细化、标准化的作业流程，具体步骤如下。

1. 出板前准备。首先拆除单元板在货架上的固定装置，包括去除塑料保护膜，剪断木压块铅丝，卸下钢压板等固定件。随后进行安装前预处理：在楼板预埋件的铝牛腿弧形接触面粘贴保护薄膜，安装装饰条，并检查已安装铝挂件紧固件的锁紧状态。对板块表面进行初步清洁，去除灰尘与污垢。

2. 水平转运与吊具挂接。使用专用起板车将板块从货架吊起，平稳转移至平板车上，并运送至安装部位楼板边缘。将电动葫芦吊钩定位至板块上方，挂接专用手拉葫芦。在葫芦吊钩上悬挂两根1 m长、直径10 mm的专用吊装钢丝绳，钢丝绳另一端通过卸扣可靠连接至板块顶部的专用吊具，同时挂接备用葫芦吊钩。

3. 起吊与翻转。经施工人员全面检查确认连接可靠、吊装人员就位后，由指挥人员下令缓慢起吊。在起吊过程中，板块两侧需安排人员扶持，避免与货架发生刮蹭。当板块起吊至约45度倾角时，在底框料位置插入特制小推板车并撤走原平板车，随后继续提升板块至完全直立状态，确保双吊点钢丝绳均匀受力。板块在提升过程中需进行必要翻转，并由中间楼层人员全程协助看护。

4. 就位前处理。板块抵达安装楼层前，对安装位置的所有已固定构件（牛腿、螺栓等）进行彻底清洁。同时将单元板块竖框内侧保护膜自底部起剥离约30 cm，并完全去除底框内侧保护膜。根据需要，可在已安装板块的插接口处均匀涂刷润滑剂或肥皂水，以降低安装摩擦阻力。

5. 精准就位与调整。当板块吊运至安装位置附近时，楼层安装人员应及时扶稳板块，防止与楼板或已安装板块发生碰撞。在板块下降至距安装面约200 mm时，将板块向右侧推移，使其右边框母料竖框与相邻已安装板块的左公料竖框插口精确吻合。随后缓慢下降板块，全程监控水平度，确保板块水平下落并与两端钢牛腿均匀接触。出现尺寸偏差时，通过手拉葫芦进行微调，直至水平缝、垂直缝、高低差等各项指标均满足规范要求。

6. 固定与收尾。确认安装精度符合要求后，拆卸吊装卸扣。在单元板中间竖框的楼板连接铝牛腿上安

装制动铝块并按图纸要求可靠固定。最后进行接缝清洁，安装过桥构件并施打密封胶。完成上述工序后，即可转入下一单元板块的安装循环^[10]。

5 结束语

该工程超长尺寸单元式幕墙的成功实施，实现了超高层建筑复杂外围护结构施工技术的重要突破。该项目所面临的技术挑战已超越常规尺寸放大的范畴，其关键难点在于突破建筑层高与核心筒结构共同形成的空间限制，确保长达11 m的单元板块实现安全精准安装。为解决这一难题，本研究创新性地提出了“空间接力”系统解决方案：采用单轨吊系统作为三维运输通道，实现板块的精确定位与水平输送；同时设计外挑式起吊平台作为空间转换节点，通过突破建筑边界创造临时作业空间，并借助可拆卸平台板的动态设计，有效解决了“楼内无法出板”这一根本性技术难题。该技术体系不仅显著缩短了项目总工期，提升了经济效益，其“以动态施工系统突破静态结构限制”的核心技术思路，更为未来应对形态更复杂、施工条件更严苛的建筑项目提供了极具参考价值的技术路径参考。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑幕墙(GB/T 21086-2007)[S]. 北京：中国标准出版社，2007.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范(GB 50009-2012)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准(GB 50017-2017)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2017.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构焊接规范(GB 50661-2011)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工高处作业安全技术规范(JGJ 80-2016)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准(GB 50068-2018)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2018.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程(JGJ 82-2011)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构工程施工质量验收标准(GB 50205-2020)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2020.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 风力等级(GB/T 28591-2012)[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程测量规范(GB 50026-2020)[S]. 北京：中国计划出版社，2020.

绿色建筑施工技术应用与管理策略研究

马 超

(招商局积余产业运营服务股份有限公司北京公司, 北京 100022)

摘要 绿色建筑施工技术通过改进材料选用、设备配置以及智能管控等关键环节, 达成建筑工程节能降耗目标, 相关技术运用涉及高效保温材料、再生能源设施以及自动化监测系统等主要方面。实证分析表明, 综合技术方案能让工程能耗下降 30% ~ 45%、碳排放量削减 35% ~ 50%, 资源使用效率提高 25% ~ 40%, 总体节能效果达 57.3%, 质量监管体系、环保管控手段以及流程监控机制等管理方法保障技术实施的成效, 使故障处理响应时间缩短至 4 h, 环境合格率持续高于 98%。绿色建筑施工技术的系统化应用为建筑领域可持续发展奠定了坚实的技术基础。

关键词 绿色建筑施工技术; 节能材料; 环保设备集成技术; 智能控制系统; 环保管理

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.036

0 引言

建筑领域属于能源消耗与碳排放的关键行业, 面临着严峻的环境挑战, 传统建造方式会造成资源损耗严重与生态污染等问题。绿色建造技术作为应对当前挑战的可行方案, 依靠技术革新与流程优化实现建筑全过程的生态化发展, 目前绿色施工在材料选用、设备协同以及智能调控等层面已取得突破性成果, 但技术规范不统一、管理机制不健全等短板仍有待补齐。系统探究绿色施工技术的应用及管理对策, 对促进建筑业转型升级具有十分深远的价值。

1 项目案例绿色办公楼工程概况

某大型企业总部绿色办公楼项目位于未来科技城核心区, 总建筑面积 7.9 万 m², 主体采用框架结构形式, 包含地上六层与地下一层的布局, 该项目被列为省级绿色建筑示范项目, 设计达到三星级绿色建筑标准, 施工环节全面贯彻低碳环保理念。项目施工场地位于城市科技园区内, 需在保障周边园区正常运营的前提下作业, 项目应用绿色建材比例达 91.4%, 超出国家标准要求, 综合技术方案实现工程能耗下降 30% ~ 45%、碳排放量削减 35% ~ 50%, 资源使用效率提高 25% ~ 40%, 总体节能效果达 57.3%。建成后将为企业提供现代化办公等综合服务功能, 同时承担绿色建筑技术示范推广的重要使命, 为同类型项目提供技术参考依据。

2 绿色建筑施工技术应用

2.1 节能材料选择与应用

绿色建材在该项目中的应用比例达到 91.4%, 超出国家标准(70%)的使用要求。该项目中选用导热系数低于 0.024 W/(m·K) 的聚氨酯泡沫板作为高性能保温材料, 经优化外墙保温系统构造层次设计, 有效避免热桥现象的产生^[1]。混凝土拌合时掺入 30% 粉煤灰与 15% 矿渣粉等工业废料, 在改善混凝土施工性能的同时减少了水泥用量, 减少 CO₂ 排放量约 25%, 结合 BIM 技术优化排版方案, 将钢筋损耗率控制在 1.12%, 显著低于行业定额标准。建筑材料就地取材率达到 99.2%, 通过构建完善的余料分类回收体系, 结合智慧管理平台统一调度, 实现 98.28% 的材料回收再利用率, 达到资源高效利用目标。

2.2 环保设备集成技术

施工现场专门配置 8 套环境监测装置, 实时跟踪空气温湿度、PM2.5、PM10 及 TSP 等环境数据, 一旦污染物数值超过预设阈值时立刻触发喷淋除尘系统。如图 1 所示, BIM+4D 技术在复杂施工环境中发挥核心作用, 塔吊群布局借助三维空间算法进行优化, 在城市规划 120 m 高度限制条件下精确计算塔吊作业半径、水平间距以及安装高度, 确保三台塔吊维持 150 m 安全间隔与 40 m 垂直高差, 有效预防碰撞风险并提升施工效率^[2]。设备能耗计算采用综合能效评估模型:

作者简介: 马超(1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑施工管理。

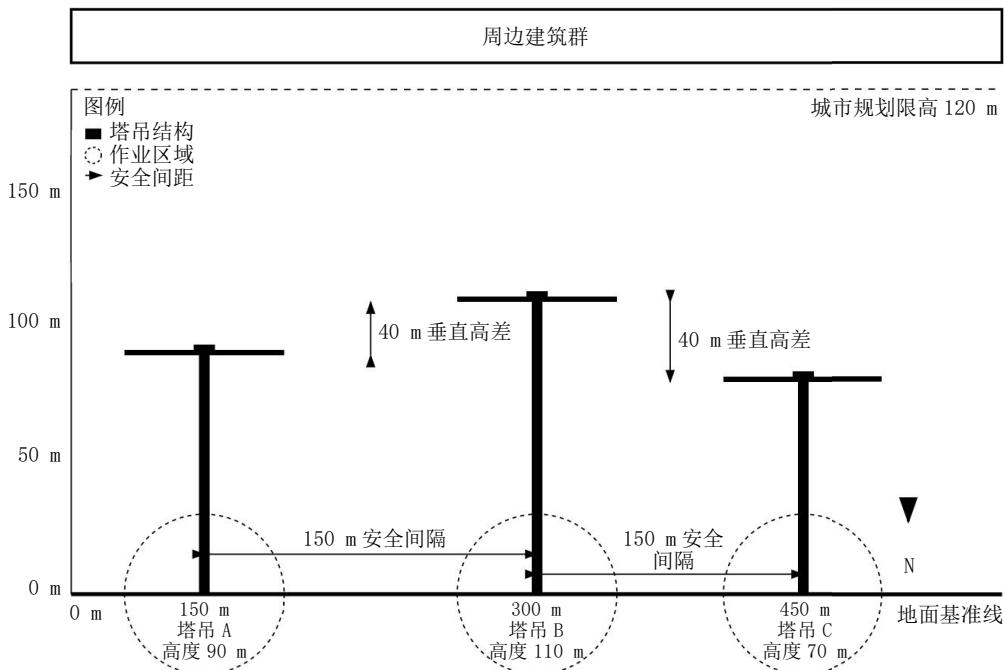


图 1 BIM+4D 塔吊群布置优化示意图

$$E = \sum (P_i \times t_i \times \eta_i) \quad (1)$$

式(1)中, E 为总能耗, P_i 为设备额定功率, t_i 为运行时间, η_i 为设备效率系数, 采用 LED 照明取代传统灯具, 并结合智能感应功能实现按需照明, 空气能热泵为现场供应生活热水, 通过光感控制实现泥浆净化重复利用, 显著降低了污染排放。

2.3 智能控制系统部署

BIM+4D 技术是施工管理方面的关键支撑力量, 依靠跨专业协同建模能够完成图纸联合审查工作、建材用量精细化统计以及施工进度实时跟踪^[3]。塔吊集群规划采用三维空间优化方法, 在城市规划 120 m 高度限制条件下, 借助 BIM 技术精确测算塔吊作业半径、水平间距以及安装高度, 在预防碰撞风险时提高施工效能。碳排放量化计算公式为:

$$C = \sum (M_i \times F_i) + \sum (D_j \times F_j) + \sum (E_k \times F_k) \quad (2)$$

式(2)中, C 为总碳排放量, M_i 为材料用量, F_i 为材料碳排放因子, D_j 为运输距离, F_j 为运输碳排放因子, E_k 为施工能耗, F_k 为能源碳排放因子。智慧工地平台融合物联网架构, 连接各专业设备、现场监控装置、环境监测仪器以及深基坑传感器, 通过 5G 网络与混凝土供应商、机械设备租赁方以及材料厂商实现数据实时交互, 确保施工全流程的高效调度与协同管理。

3 施工技术效果评估分析

3.1 能耗降低效果量化

绿色建筑施工技术的综合应用在该项目中产生显著的节能效果, 各项技术措施节能效果存在显著差异, 照明系统采用 LED 智能化改造释放出最大节能潜力, 空调供暖系统凭借空气能热泵技术取代传统电加热方式实现关键性突破。

如表 1 所示, LED 智能照明系统应用感应控制及变频调速技术后, 使建筑单位面积照明能耗从传统模式 $120 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^2$ 缩减到 $36 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^2$, 机械设备能耗也从 $85 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^2$ 降低至 $64 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^2$, 空气能热泵系统取代原有的电加热方案使热水系统能耗显著降低。

表 1 施工阶段能耗对比分析表

技术措施类别	传统施工能耗	绿色施工能耗	节能率(%)	单位
照明系统	120	36	70.0	$\text{kW} \cdot \text{h/m}^2$
机械设备	85	64	24.7	$\text{kW} \cdot \text{h/m}^2$
混凝土搅拌	45	34	24.4	$\text{kW} \cdot \text{h/m}^2$
空调供暖	95	24	74.7	$\text{kW} \cdot \text{h/m}^2$
热水系统	32	8	75.0	$\text{kW} \cdot \text{h/m}^2$

3.2 环境影响指标评价

环境监测结果已证实绿色施工技术在污染物防治上成效显著, 8 套环境监测系统联动自动喷淋装置成功

实现施工现场空气质量精准管控, PM_{2.5} 浓度相比传统工艺下降了 65%, TSP 浓度维持在国家标准范围之内。通过优化设备选型以及科学安排施工时间, 噪声问题得到有效遏制, 昼间噪声能够控制在 70 dB 以内, 夜间噪声控制在 55 dB 以下, 完全满足城市建筑施工的环保标准。废水处理系统采用三级净化工艺, 使得出水水质达到回用标准, 回用率达 75%, 大幅降低新鲜水取用量, 累计减量化处理建筑垃圾 4 364 t, 既缓解了周边交通压力, 又有效减轻了环境负担。

3.3 经济效益综合分析

通过全生命周期成本分析评估绿色施工技术的经济效益。旋挖挤土钻头技术不仅能减少土方外运, 还可优化混凝土用量, 有效降低成本并减少碳排放, 其投资回收期仅需 0.8 年。而超重钢筋笼吊装技术省去了焊接工序, 显著节省了工时与人工成本, 其回收期是 1.5 年。三角桁架钢模板体系利用自身可组合与自行走的特性, 降低了施工费用, 同时还缩短了工期, 能够实现较快的成本回收。而混凝土裂缝控制与智慧管理平台分别通过提升质量与优化效率, 能在合理的周期内收回投资。综合分析表明, 绿色施工技术既取得了环境效益, 又具备良好的经济可行性, 能为行业推广提供有力的支撑。

4 绿色建筑施工管理策略

4.1 质量控制体系构建

质量控制体系借助 BIM 技术构建全流程质量管理机制, 依托三级技术安全交底制度保障各施工环节质量标准执行, 钢筋集中加工车间配置全套自动化设施来实现各类钢筋制品规范化制造。混凝土质量管控采用智能养护系统, 通过温湿度传感器实时采集养护环境数据, 自动喷淋装置依据监测结果精准补水, 有效调控混凝土内外温差波动, 材料进场检验严格执行绿色建材标识认证标准并建立材料质量追踪机制, 将不合格材料退货率控制在 0.5% 以内。施工工艺质量控制通过标准化作业指引及可视化技术交底, 把返工率从以往的 8% 压缩至 2%, 将质量事故发生率控制在 0.1% 以下。

4.2 环保管理措施优化

环保管理体系构建起扬尘控制、噪声防治、废水净化以及固体废弃物处置四大管理模块, 打造立体化的环保保障体系^[4]。扬尘治理运用封闭式施工与智能喷淋系统协同的治理方案, 当总悬浮颗粒物监测数据超出限定标准时, 系统会自动触发降尘设备, 噪声治

理选用低噪声设备并科学安排作业时间, 让周边敏感区域噪声达标率稳定保持在 95% 以上, 未对周边园区正常运营造成任何干扰。废水处理采用分类收集与多级净化的处理工艺, 经三级处理后的污水实现现场循环利用, 处理效率达到 95%, 同时节约新鲜用水 40%, 建筑垃圾分类准确率达到 92%, 危险废物合规处置率达到 100%, 此期间未出现任何环境污染事故。

4.3 施工过程监控机制

智慧工地管理平台构建起实时数据采集与分析的机制, 对质量安全、环境保护以及成本进度等核心指标开展动态跟踪。该平台由数据采集层、5G+ 物联网传输层、智慧管理平台以及外部系统接入这四部分构成, 形成完整的监控架构。数据采集层借助 5G 网络实现数据的实时传输。智慧管理平台整合数据处理、智能预警与控制执行三大功能模块^[5]。5G 物联网技术打通施工现场与商品混凝土站、机械设备租赁方、材料供应商的数据通道, 使物料配送效率提高 35%。碳排放管理系统对施工全程的碳排放进行动态监测, 通过一键算碳功能量化管控建材消耗、运输及施工建造三个阶段的碳排放。

5 结束语

绿色建筑施工技术应用效果显著, 管理策略实施有效。节能建材、环保设备与智能控制技术相融合使建筑项目实现了能耗大幅降低、环境影响显著减少以及经济效益明显提升; 质量管控体系确保了施工品质; 环保管理方案抑制污染物的排放; 过程监督机制保障了技术落实。未来, 绿色施工技术会朝着标准化、智能化且集成化的趋势发展, 管理模式也需持续进行优化改进。建筑行业应当强化技术研发工作, 改进管理方式方法, 促进绿色施工技术的普及应用进程, 为建筑业实现碳达峰与碳中和目标做出积极贡献。

参考文献:

- [1] 张凡, 代昱阳. 绿色建筑技术在工程管理中的应用策略探讨 [J]. 新城建科技, 2025, 34(10): 52-54.
- [2] 王勇. 物联网 +BIM 技术在绿色建筑工程施工全过程管理中的应用 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2025(09): 56-60.
- [3] 闵恺文, 曹宇. BIM 技术在绿色建筑施工管理中的应用 [J]. 建筑技术开发, 2024, 51(02): 44-46.
- [4] 黄容. BIM 技术在绿色建筑施工管理中的应用研究 [J]. 房地产世界, 2023(20): 126-128.
- [5] 张亚楠. BIM 技术在绿色建筑施工管理中的应用 [J]. 大众标准化, 2023(18): 163-165.

关于铁路路基抗沉降新材料的应用研究

潘凯斌

(中铁上海工程局集团第一工程有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 随着铁路建设的不断发展, 路基沉降问题成为影响铁路运行安全与稳定的要点。近年来, 材料科学技术不断发展, 促使高性能土工合成材料、新型轻质填料、高强度复合材料和智能材料等抗沉降新材料全面推广, 并在铁路路基工程中得到一定的应用, 有效解决了传统路基处理方法所存在的问题。本文从铁路路基抗沉降新材料的种类与特性入手, 通过剖析高性能土工合成材料、新型轻质填料、高强度复合材料和智能材料等抗沉降新材料的优势, 探讨这些新材料用于铁路路基抗沉降时取得的效果, 以期为铁路路基工程的设计和施工提供参考。

关键词 铁路路基; 抗沉降; 新材料; 土工合成材料

中图分类号: U214

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.037

0 引言

铁路是国家重要的交通基础设施, 在国民经济和社会发展中起着无可取代的作用。随着铁路创建规模持续扩充、列车运行速度逐步加快, 国家对铁路路基的稳定性与可靠性便有了更高要求。路基沉降是影响铁路管理安全与舒适性的关键因素, 特别是在软土地基、膨胀土地基、高填方路基以及特殊环境路基等复杂地质状况下, 沉降现象更为明显, 以往的路基处理手段可以在某种程度上改善沉降情况, 然而当遇到复杂地质状况和高速铁路的高标准时, 仍然存在不少局限之处, 所以研究并采用新的抗沉降材料对于提升铁路路基的抗沉降能力十分关键。

1 抗沉降新材料的分类与特性

1.1 高性能土工合成材料

土工格栅是高强度的土工合成材料, 由聚丙烯、聚酯等高分子材料制成, 具有较高的抗拉强度与低延伸率, 可以承担比较大的拉应力, 进而有效地分散并传递路基中的应力。

土工布是透水性优良的土工合成材料, 主要应用于路基的排水及过滤功能, 其可有效防止土体中小颗粒随水流冲走, 又允许地下水得以顺畅排出, 进而减小土体的孔隙水压力, 缩减由水造成的路基沉降^[1]。

土工膜作为土工合成材料, 具有防水与防渗的功能, 常被用作路基防渗处理之选, 用于某些特定环境下的路基中。通过铺设土工膜, 就能够较好地防止水分渗透及迁移, 减少由于水分改变而造成的路基沉降

和冻胀状况。土工膜还具有较好的耐化学腐蚀能力以及抗老化特性, 可以应对多种复杂的自然环境状况。

1.2 新型轻质填料

近年来, 新型轻质填料逐步被应用到铁路路基工程中, 其中, 泡沫混凝土、聚苯乙烯泡沫塑料因具有密度低、强度高和压缩量小等特性, 得到广泛应用。

泡沫混凝土是通过向水泥浆中注入诸多细小气泡而形成的一种轻质混凝土材料, 其密度可依工程需求调节, 大致处于 $300 \sim 1200 \text{ kg/m}^3$ 区间, 泡沫混凝土具有良好的抗压强度与抗剪强度, 符合铁路路基的承重需求。由于其内部存在大量气泡, 所以弹性模量较小, 变形能力较强, 可以部分吸收并缓和列车行驶过程中产生的震动能量, 减轻对路基的冲击影响, 而且, 泡沫混凝土还具有较好的保温隔热特性, 能够有效地阻止路基土体出现冻胀及融沉情况, 非常适宜于寒冷地区的铁路路基工程项目。

EPS 是由聚苯乙烯树脂颗粒经加热发泡制成的一种轻质高分子材料, 其密度低、强度较高、隔热性能佳, 在铁路路基施工时, EPS 常作为路堤填料使用, 可以大幅减小路基自身重量, 减小地基上多余的应力, 进而减小路基沉降量。

1.3 高强度复合材料

高强度复合材料是由两种或者更多种不同性能的材料合成的一种新型材料。常见的高强度复合材料包含钢塑土工格栅、玻璃纤维加强土工格栅等。

钢塑土工格栅是一种复合土工格栅, 利用钢丝做

作者简介: 潘凯斌 (1986-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 铁路施工新材料应用。

加强材料，并外层包裹聚乙烯之类的高分子材料制作而成。这种材料具有高强度、低伸长率以及良好的抗疲劳特性，可以承受比较大的拉应力和剪应力，从而有效地提升路基的整体稳定性^[2]。

玻璃纤维加强土工格栅是以玻璃纤维作为加强材料，外层包裹聚酯等高分子材料而制成的一种复合土工格栅，其具有高强度、高模量、低伸长率等特性，可以有效分散并传递路基内部的应力，提升路基的整体稳定性。另外，玻璃纤维加强土工格栅还具有良好的耐热性与耐化学腐蚀性。

1.4 智能材料

智能材料是一类可感知并响应外部环境改变的新型材料，在铁路路基防沉降方面具有宽广的应用远景。

形状记忆合金是智能材料，具有形状记忆效应，即在外力作用下发生变形之后，在特定条件下可恢复原本形态。在铁路路基方面，形状记忆合金可用于制造路基变形检测设备以及自修复装置，将形状记忆合金制成的传感器植入路基内部，就能随时掌握路基的变形状况，一旦路基出现变形，形状记忆合金传感器便会感应到，并发出警示信号，为路基的保养与加强提供及时的参考依据^[3]。

压电材料是智能材料的一种，具有将机械能转换成电能的良好压电效应和逆压电效应。在铁路路基方面，压电材料可用于制造能量采集装置以及智能检测系统。将由压电材料制成的传感器安装在路基表面或者内部，就能将列车行驶过程中产生的振动能量转变成电能，为路基检测设备供应能源。

2 铁路路基抗沉降新材料的性能优势

2.1 强度高

抗沉降新材料强度高，可承受较大荷载，符合铁路路基的承载需求。其中，高性能土工合成材料中的土工格栅、高强度复合材料中的钢塑土工格栅和玻璃纤维加强土工格栅的抗拉强度和抗剪强度远远大于传统土工材料。在软土地基和高填方路基下，这些高强度材料能有效分配并传递路基内的应力，提升路基的整体稳定性，减少不均匀沉降。

2.2 抗压缩能力强

抗沉降新材料的压缩性低，长时间承压不易发生变形，可减小路基沉降量。例如：泡沫混凝土、EPS 等新型轻质填料的压缩性小，受压时体积基本维持不变，进而减轻路基压缩沉降状况。高性能土工合成材料及高强度复合材料具有较好的抗压缩性能，可以约束土体横向与纵向的变形，提升路基的抗压缩能力。形状

记忆合金、压电材料等智能材料，利用自身形状记忆功能和压电特性，随时调节并控制路基变形，进一步优化路基的抗压缩性能。

2.3 抗腐蚀性强

铁路路基工程往往处在复杂的环境之中，极易引发腐蚀现象。然而，抗沉降新材料具有良好的抗腐蚀能力，可以在恶劣环境下长时间维持自身性能。例如：高性能土工合成材料中的土工格栅、土工布和土工膜等的主要原料为高分子材料，抗化学腐蚀以及抗老化的能力比较强。

2.4 施工便捷

抗沉降新材料的施工工艺较为简单，其施工速度较快，可以有效缩减施工工期并降低施工成本。高性能土工合成材料以及高强度复合材料常常具有较好的柔韧性和可加工性，能够按照路基的形状与尺寸实施裁剪及铺设，施工便捷快速。泡沫混凝土、EPS 等新型轻质填料，可在现场直接浇筑或者铺设，施工效率较高，而且无需大量机械设备和复杂施工工艺。智能材料的施工也比较简单，只要将传感器或者装置安装到路基内部或者表面即可。

3 铁路路基抗沉降新材料的应用

3.1 软土地基处理

软土地基是铁路路基工程中频繁出现的复杂地质状况，极易引发路基沉降过多和不均沉降现象。在对软土地基实施治理的过程中，采用抗沉降新材料可以有效地提升路基的稳定的能力。

在软土地基表面铺设土工格栅和土工布，会形成复合土工材料，土工格栅可有效限制土体的侧向变形，提升路基的整体稳定性。而土工布能改良路基的排水性能，减小土体的孔隙水压力，减少由水造成的路基沉降^[4]。利用土工格栅与土工布共同作用，可以有效地优化软土地基的承载能力，削减路基的沉降量，实现较好的抗沉降效果。

在软土地基上用泡沫混凝土和 EPS 这种新型轻质填料来做路堤填筑，可以大幅减轻路基自身重量，减小地基上的附加压力，进而减小路基沉降量。泡沫混凝土和 EPS 密度小、强度大、压缩量小，符合铁路路基的承载需求，而且还能有效地缩减路基的压缩沉降幅度。

3.2 膨胀土地基处理

膨胀土地基是具有膨胀性与收缩性的特别土壤类型，它在吸收水分的过程中体积会变大，失去水分的过程中体积就会减小，这很容易造成路基出现不均匀沉降以及开裂现象。

在膨胀土地基表面铺设土工格栅和土工膜，二者共同形成复合土工材料。土工格栅可有效约束土体的侧向变形，提升路基的整体稳定性。土工膜能防止水分渗透与迁移，减轻由于水分变化而产生的土体膨胀及收缩变形。土工格栅和土工膜配合使用，可以有效地控制膨胀土地基的变形，缩减路基的沉降量并减小裂缝出现的概率，从而取得较好的抗沉降效果。

在膨胀土地基上采用新型轻质填料泡沫混凝土和EPS进行路堤填筑，可以减轻路基自身重量，减小地基附加应力，减小路基沉降量，有效地阻止由于土体温度变化而产生的膨胀与收缩变形。

在膨胀土地基中采用高强度复合材料，可提升路基的强度及其稳定性。玻璃纤维加强土工格栅具有高强度、高模量、低伸长率等特性，可以承担比较大的拉应力和剪切应力，起到有效分散并传递路基内部应力的作用。如果在膨胀土地基中设置玻璃纤维加强土工格栅，就能约束土体的膨胀形变，减小不均匀沉降，增强路基的承载能力。

3.3 高填方路基处理

在高填方路基填土层中设置土工格栅和土工布，可形成复合土工材料，有效约束土体的侧向变形，提升路基的整体稳定性，提升高填方路基的承载能力，削减路基的沉降量。

在高填方路基中使用新型轻质填料EPS来做路堤填筑，可以明显减轻路基自身的重量，减小地基所承受的额外压力，进而减少路基沉降的情况，还能有效地控制路基因压缩而产生的下沉幅度，得到理想的防沉降效果。

在高填方路基中采用高强度复合材料，能够有效地提升路基的强度及其稳定性，可以承担比较大的拉应力和剪切力，从而有效地将路基内部的应力予以分散并传递出去。在高填方路基上铺设钢塑土工格栅的过程中，就能够约束土体发生侧向位移，减少不均匀沉降现象，进而改善路基的承载能力，最大限度地发挥它抵抗沉降的效果^[5]。

3.4 特殊环境路基处理

盐渍土路基是含有诸多盐分的特别土质路基，极易致使路基发生沉降与损坏。在盐渍土路基的处理方面，可利用土工膜以及高强度复合材料来进行处理。土工膜能有效防止盐分的渗透与迁移，减少由于盐分改变造成的路基沉降与损坏；而钢塑土工格栅、玻璃纤维加强土工格栅之类的高强度复合材料，则可提升路基的强度及其稳定性，优化路基抵抗盐胀与腐蚀的

能力。将土工膜和高强度复合材料结合运用，能够很好地解决盐渍土路基出现的沉降及破坏状况，从而改善路基的稳定性和耐久性。

冻土路基是在低温环境下形成的特别路基，极易引发路基不均匀沉降甚至破坏。在冻土路基的处理方面，可以利用土工膜以及新型轻质填料来处理。土工膜可有效阻止水分渗透与迁移，减少由于水分冻结及融化造成的路基冻胀与融沉现象。而泡沫混凝土、EPS等新型轻质填料具有较好的保温隔热效果，能有效规避路基土体因温度改变而出现的冻胀和融沉情况。将土工膜和新型轻质填料结合应用，能够较好地解决冻土路基存在的冻胀和融沉难题，从而提升路基的稳定性及其抵抗沉降的能力。

湿陷性黄土路基是遇湿易陷并出现沉降的特别路基，极易引发路基不均沉降甚至损坏。在应对湿陷性黄土路基时，可以利用土工格栅以及新型轻质填充材料来处理。土工格栅可有效约束土体侧向位移，提升路基整体的稳定性；而像EPS这样的新型轻质填充物，则能削减路基自身重量，减小地基额外压力，进而缩减路基由于湿陷而产生的沉降量。

4 结束语

铁路路基抗沉降新材料的应用为解决铁路路基沉降问题带来了新思路与方法。高性能土工合成材料、新型轻质填料、高强度复合材料以及智能材料这些抗沉降新材料，具有强度高、抗压能力突出、耐腐蚀性强、施工方便等性能优势，在软土地基、膨胀土地基、高填方路基以及特殊环境路基等各种类型的路基处理中起到了重要作用。随着材料科学技术持续发展革新，抗沉降新材料的性能将会不断提升，其应用范围也会不断拓展。

参考文献：

- [1] 杨超,黄婉青.高性能金属材料在路基加固中的应用与性能分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(16):4-6.
- [2] 邵慧君,陈李峰,戴第伟,等.基于无机材料复合改良淤泥质土用于铁路路基的技术研究[J].科技与创新,2025(12):152-155.
- [3] 梁经纬,蔡德钧,闫宏业,等.逆断层错动对土工格栅加筋铁路路基变形的影响[J].铁道建筑,2025,65(06):13-18.
- [4] 何宝利,赵晓海,范肖伟.铁路路基抗沉降新材料的研究与应用[J].中国高新科技,2025(07):132-134.
- [5] 胡永良.铁路路基土工合成材料的分类和应用[J].路基工程,2025(03):8-12.

新能源发电企业应急预案编制与实操研究

张大立

(江苏省兴安科技发展有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 新能源发电具有间歇性和地理分散性, 传统应急模式需适应新风险。为构建科学预案体系并强化实操能力, 减少突发事件损失, 本研究聚焦应急预案编制与实操性提升, 通过分析新能源发电企业的应急预案编制要点、评估方法与改进机制, 提出应急实操能力提升的关键路径。研究结果表明, 专项技能培训考核、智能监控预警流程优化、政企协同资源共享机制能有效提升应急响应效率和可靠性。

关键词 新能源发电企业; 应急预案; 实操性; 评估规范; 应急管理

中图分类号:F425

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.038

0 引言

随着全球能源转型的加速推进及新能源发电产业的快速发展, 风电、光伏等可再生能源装机规模持续扩大, 电力系统结构发生深刻变化。且因新能源发电具有间歇性、波动性和地理分布广泛等特点, 传统电力应急管理模式面临新挑战, 如设备故障、自然灾害、网络安全事件等突发事件可能引发大面积停电或生产安全事故, 进而对能源安全和社会稳定构成威胁。而当前部分企业应急预案存在与实际脱节、实操性不足等问题, 演练培训机制不完善, 政企协同资源整合能力较弱, 智能监控预警技术应用不充分, 影响应急处置效率。本研究基于现有法规标准并结合新能源发电企业实际, 探讨应急预案编制与实操优化路径, 以提升企业应急响应能力, 保障电力供应安全。

1 新能源企业应急预案编制体系设计

1.1 面向新能源特点的预案体系架构

新能源发电企业应急预案体系应严格遵循相关标准要求, 深度融合风电、光伏等新能源发电的技术特性与风险特征, 采用三级架构, 由总纲性的总体预案、聚焦特定风险的专项预案以及直接指导现场操作的处置方案构成。企业级总体预案作为纲领性文件, 确立应急管理的核心原则、组织指挥体系及协调联动机制, 明确应急指挥中心的组成与职责, 规定信息报告与预警发布的标准化流程, 统筹企业内外应急资源的调配原则。厂站级专项预案针对不同类型场站的核心风险量身定制: 风电场专项预案重点覆盖风机超速、倒塔、叶片结冰、集电线路故障等典型场景^[1]; 光伏电站专

项预案则聚焦光伏阵列火灾、逆变器群故障、大面积遮挡等突发事件; 储能电站专项预案核心在于电池热失控、火灾爆炸、电气保护失效风险的应急处置。各专项预案均需明确具体的应急指挥分工、处置程序要点及关键资源部署方案。现场处置方案是体系架构的操作基石, 要求具有可操作性, 方案内容细化到具体设备单元的操作步骤。例如: 针对单台风机着火、单组光伏支路故障、单个储能变流器过载等。方案明确现场人员的立即行动措施、紧急隔离方法、初期救援方法以及向上级报告的关键信息要素。该层级方案直接与日常巡检、操作制度相结合, 实现应急与生产的无缝衔接。

1.2 预案核心要素编制要点

应急预案应在风险评估、应急资源调查和案例分析基础上开展编制。风险评估主要聚焦新能源发电企业特有风险, 识别风机叶片断裂、光伏逆变器故障、储能电池爆炸等可能性, 评估次生灾害如电网脱网、环境污染物泄漏等。风险分析应量化概率和影响, 考虑地域因素如沿海风电场台风风险、沙漠光伏电站沙尘暴影响。应急资源调查需要全面盘点企业资源, 包括专用应急救援队伍、风机检修设备、太阳能板清洗工具、备用发电机组。调查可扩展至合作资源, 如电网公司支援、气象部门数据共享、无人机巡检服务等, 为制定应急响应措施提供依据。案例分析主要针对行业内典型突发事件, 总结经验教训, 为预案的编制提供参考。编制过程应注重职责明确性, 应急组织机构及各级人员职责划分清晰, 预防措施和应急程序步骤明确、具体, 从事件报告到现场处置, 强调可操作性。

作者简介: 张大立 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 安全管理。

要确保预案要素完整性，附件包含地图、联系人清单、设备清单等，信息准确无误。

1.3 预案编制流程优化

企业应成立以主要负责人为组长的预案编制工作组，工作组须吸收生产、技术、安全、后勤、外聘专家，确保多元视角。评审过程需保证预案的合规性、要素完整性和措施针对性，预案发布后应及时备案，并纳入年度培训计划，定期组织应急演练，评估效果并及时改进。流程优化注重信息化技术应用，推进预案管理创新，提高效率。新能源发电企业因技术更新快和环境依赖强，需更频繁地修订和演练，流程优化应突出灵活性和响应速度。优化后的流程强调预案编制与企业管理体系的深度融合，将预案要求的培训、演练、资源维护等内容直接纳入企业年度工作计划和预算保障，避免预案与实际管理“两张皮”。最终目标是将预案管理融入企业日常运营，形成闭环，增强企业整体应急能力。

2 新能源发电企业应急预案实操性评估与动态管理

2.1 预案实操性静态评估指标应用

预案静态评估是企业应急能力建设的重要环节。这些指标基于预案文本本身进行评价，聚焦预案的内在质量和预先设计的可行性，主要包括合规性、基本要素完整性、预防措施针对性、组织体系科学性、响应程序可操作性、保障措施实用性和预案体系有效衔接等方面。合规性要求预案严格遵循国家法律法规和行业标准，确保每一项内容都有法可依、有章可循；基本要素完整性检查预案是否涵盖应急组织机构、职责分工、预防程序、响应流程、保障资源和附件信息等核心组成部分；预防措施针对性强调预案必须对准企业特定风险点。例如：对于光伏发电企业，需重点考虑组件火灾或逆变器故障风险；组织体系科学性评估指挥结构是否层级清晰、权责匹配，避免交叉或空白；响应程序可操作性测试步骤是否具体可行。例如：报警触发条件、人员疏散路线、资源调度指令是否明确无误；保障措施实用性验证物资装备、救援队伍、应急场所等资源是否真实可用、数量充足；预案体系有效衔接要求企业内部预案之间与企业外部政府预案、社区预案协同一致，防止脱节或冲突。企业应建立标准化评估表，组织专家评审组逐项核查，形成书面评审意见，作为预案发布前的质量把控^[2]。

静态评估指标体系的构建与实施必须植根于企业的具体业态与独特风险图谱，实现真正的量身定制与

深度契合。对于新能源发电企业，特别是风电场这类典型代表，传统的安全评估框架已显不足，必须将视角拓展至风机结构完整性、塔筒基础稳定性、叶片疲劳损耗等关键硬件失效模式，并高度关注其对电网带来的频率波动、电压闪变、谐波污染等电能质量挑战，以及伴随智能化运维而来的数据泄露、远程控制被劫持等网络安全威胁。指标的设计思维需要前瞻性地囊括分布式光伏的逆功率保护、孤岛运行风险，以及配套储能系统的电池热失控、功率转换系统效率衰减、循环寿命预测等具体技术难点。整个评估活动绝非项目审批环节的孤立节点，而应深度嵌入应急预案从构思、编制、演练到修订再生的全生命周期脉络。所有这些评估行为产生的海量数据，包括历次评分、薄弱环节记录、整改措施效果追踪，都应依托企业统一的信息化平台进行结构化存储与管理，形成可随时调取、分析的动态数据库。

2.2 基于演练与访谈的预案动态评估方法

动态评估是检验预案在模拟真实应急情境下有效性的关键手段，其核心在于超越文本审查，通过实战化方式评估应急响应各环节的流畅性与有效性。在演练过程中，评估人员观察关键环节如应急启动速度、指挥协调效率、资源配置准确性、信息沟通流畅度等，记录偏差和问题。演练后结合访谈进行评估，访谈对象涵盖应急指挥员、操作人员、后勤支持人员及外部合作单位代表，探讨预案在实际执行中的适用性、瓶颈和改进点。评估输出包括演练效果报告、问题清单和修订建议，所有内容书面归档。动态评估弥补了静态评估的不足，将文本预案转化为行动检验，可识别出设计阶段未预见的问题，如资源冲突或程序冗余。

2.3 预案持续改进机制

预案持续改进机制确保应急预案随内外部变化而迭代优化，形成闭环管理。企业应建立定期评估制度，每三年结合应急能力建设评估分析预案的针对性、实用性和可操作性，修订触发条件包括法律法规变化、组织机构调整、风险演化、资源变动、演练或应急处置中发现的重大问题^[3]。当修订涉及指挥体系、处置程序等核心内容时，需重新履行编制、评审、发布流程，非核心修订可简化处理。改进机制可依托信息化建设，如利用预案管理系统跟踪修订历史、监控评估指标，实现数据驱动的决策。经费和专人保障是基础，企业应将相关成本纳入预算，指定责任机构协调全过程。持续改进与培训、演练、监管无缝衔接，如演练评估的

修订意见融入下次培训内容，监管检查督促落实进度。

3 提升新能源发电企业应急实操能力的关键路径

3.1 专项应急技能培训与考核体系构建

新能源发电企业专项应急技能培训与考核体系的构建需立足岗位职责和风险评估结果，形成分层分类、精准施训、严格考核、持续改进的闭环管理系统。该体系通过整合企业风险数据库、应急预案体系、岗位说明书及历史事件教训，明确从企业负责人、应急管理人、应急救援队员到一线运维人员等不同层级、不同岗位的差异化技能要求，进而开展培训需求分析。在此基础上，构建包含培训计划制定、培训课程开发、培训组织实施、培训效果考核与档案管理五大核心模块的完整体系^[4]。

培训计划应具备年度性、系统性，内容覆盖应急法规制度、应急预案流程、风险辨识与预警、自救互救技能、特种设备应急处置、信息报告程序等，并针对新能源领域增设储能电站火灾扑救与抑制、风机高空救援与逃生、有限空间作业事故救援、涉网事故应急操作等专项技能培训。培训课程开发应坚持理论教学与实操实训相结合，充分利用虚拟现实、增强现实技术模拟高风险应急场景，开发针对性课件，编制实操手册，制定考核标准。培训组织实施应采取内训与外培、线上与线下、课堂与现场相结合的模式，确保覆盖全员并保证学时。考核体系是检验培训效果的关键，应建立笔试、口述、实际操作相结合的多维度考核方式，重点考核员工对应急预案的熟悉程度、应急器材操作的熟练度及在模拟险情中的应急处置能力，考核结果与员工绩效、安全上岗资格直接挂钩，并建立个人培训档案。

3.2 融合智能监控与预警的应急响应流程优化

新能源发电企业应构建集成气象、电网、地质、设备状态、视频图像等多源数据的智能监测预警平台，融合智能监控与预警技术作为优化应急响应流程、提升响应速度与精准度的核心手段。该平台利用大数据分析、人工智能算法对海量数据实时处理与智能识别，自动研判风险趋势，实现从被动响应向主动预警的转变。一旦发出预警，系统自动触发预警信息推送至相关责任人，并依据预设规则建议或自动启动相应级别的应急响应，应急指挥人员借助平台提供的实时数据、态势推演和辅助决策方案进行更科学的指挥调度，现场处置人员通过移动终端接收指令、查看设备参数和现场视频以提高处置效率。

3.3 政企协同与应急资源共享机制的有效运作

政企协同与应急资源共享机制的有效运作是应对超出企业自身处置能力的重大突发事件的关键保障。新能源发电企业，特别是地处偏远、周边应急资源相对薄弱的风电场、光伏电站，必须主动融入地方应急管理体系。企业应依据相关规定，与所在地市、县级人民政府应急管理、能源监管、消防、公安、卫生、气象、水利、自然资源等主管部门建立常态化沟通协调机制，明确信息报送、救援请求、协同指挥的标准程序与对接负责人^[5]。企业应定期参与政府组织的区域性综合应急演练，熟悉政府应急指挥流程和资源配置模式，磨合协同配合能力。在应急资源共享方面，企业要全面掌握自身可用的应急装备、物资、专家和队伍资源，建立详细台账并使其保持良好状态。另外，还应调查了解周边相邻企业可提供的应急资源类型与数量，通过签订互助协议建立区域性应急资源池，实现大型特殊救援装备、专家技术力量的共享共用。

4 结束语

本研究分析了综合预案、专项预案、现场处置方案的三级预案架构，详细阐述应急预案核心要素编制要点与流程优化方法，提出结合静态评估指标核查与动态演练访谈的实操性评估体系及与之配套的持续改进机制，明确构建专项应急技能培训考核体系、融合智能监控预警技术优化响应流程、政企协同与应急资源共享机制这三项关键路径，为从根本上提升新能源发电企业应急响应实效、保障电力系统安全稳定运行提供实践参考。

参考文献：

- [1] 冷晓辉,孙小龙,王伟东,等.新能源发电企业应急处置工作的规范化管理[C]//吉林省电机工程学会.2025年吉林省电机工程学会年会论文集.吉林中广核风力发电有限公司,2025.
- [2] 熊泽坤,韩玮.新能源发电企业财务风险预警指标体系的构建[J].产业创新研究,2025(19):148-150.
- [3] 郑必江,李剑波,褚建华,等.灰色层次分析法在发电企业应急能力建设评估中的应用[J].电力安全技术,2025,27(04):1-4.
- [4] 王辉,何文.基于模糊综合评价法的发电企业应急能力评估[J].电力安全技术,2022,24(06):12-15.
- [5] 曹凯,汪洵.发电企业应急准备常见问题及对策[J].电力安全技术,2022,24(01):69-71.

天然气开采对地下水环境的影响及保护策略

李小俊

(中国石油化工股份有限公司西南油气分公司, 四川 成都 610095)

摘要 在勘探、开发天然气资源规模不断扩大的背景下, 不仅优化了能源结构、提高了经济发展的质量, 同时也对开采区域的地下水环境造成了一定的影响。地下水在民生用水、生态系统维系中发挥着不可忽视的重要价值, 地下水环境与区域的可持续发展存在着密切的关系。基于此, 本文针对天然气开采的各个环节(如钻井、压裂、采气、废水处置等)进行了梳理, 并分析了天然气开采可能对地下水环境产生的不良影响, 提出了从优化开采工艺、加强套管管理、动态监测的维度保护地下水环境, 旨在为提高天然气开采的绿色化水平和协调保护地下水资源提供有益参考。

关键词 天然气开采; 地下水环境保护; 钻井液; 套管

中图分类号:X74

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.039

0 引言

天然气是清洁能源的一种, 天然气的开发在能源消费转型中发挥着不可忽视的重要作用。近些年, 非常规天然气的开采(如页岩气、致密气等)逐渐规模化, 开采范围不断扩大, 现场地质条件越来越复杂, 开采过程中面临着诸多的地下水环境风险。一旦地下水环境被污染, 不仅面临着较大的治理困难, 还需要花费较长的时间, 很容易对生态环境以及经济发展造成不可逆的损害。所以, 在开发、利用天然气资源时, 需大力保护地下水环境, 精准地识别天然气开采中潜藏的破坏地下水环境的风险因素, 并通过有效措施的实施做好防控工作。本文全面梳理开采天然气工艺的主要特征和地下水环境的脆弱性, 并针对天然气开采对地下水环境的影响展开了探究, 同时提出对地下水环境进行全程化、多层次保护的策略, 以期为提高天然气开采的绿色性与安全性提供参考。

1 天然气开采工艺与地下水系统的关联性

1.1 开采天然气工艺的主要类型

常用的开采天然气的工艺有常规钻井工艺和非常规钻井工艺、多分支钻井工艺等^[1]。其中常规工艺主要应用于垂直井, 其天然气储层较为集中、井体结构较为简单, 目前该技术已经较为成熟, 且成本较低, 但是对于复杂结构的井体, 该工艺的应用存在较大局限性。针对致密气、页岩气等的开采, 适宜选择采用非常规开采工艺。其中水平井开采工艺的运用, 可增加气藏和井眼之间的接触面积, 不仅可增加开采量,

还可提高开采效率; 多分支井开采技术则是在主井眼的基础上设置多个不同的分支, 对于气藏分布较为分散的区域, 适宜采取该工艺进行高效开采。但是, 这些开采工艺的应用, 不仅需要深度钻井, 还需穿越含量较多的水层, 所以在应用这些开采工艺时, 需要注意保护地下水环境。

1.2 地下水系统的生态与服务功能

地下水是区域水循环的重要组成部分, 具有重要的生态支撑功能与服务价值。在自然生态系统中, 地下水是维系湿地、泉水与河流基流的关键水源, 对区域生物多样性保护与水生态健康具有不可替代的作用。在人类社会层面, 地下水是许多地区城乡居民饮用水、农业灌溉和工业用水的主要来源, 尤其在北方干旱半干旱地区, 其资源战略地位尤为突出。地下水环境一旦因人为活动受到污染, 不仅威胁公众健康与社会稳定, 还可能引发跨境、跨流域环境问题, 治理成本高昂且恢复周期漫长。

2 天然气开采对地下水环境的主要影响

2.1 钻井液泄漏导致地下水化学污染

钻井液在钻井过程中承担着润滑钻头、携带岩屑、稳定井壁与控制地层压力等多重功能。其组成通常包括基础液相(水基、油基或合成基)、重量材料(如重晶石)、黏土矿物(如膨润土)以及各类化学添加剂(如增粘剂、降滤失剂、防腐剂等)。其中, 油基钻井液因其良好的耐高温高压性能和润滑效果, 在复杂地质条件下应用广泛, 但其基础油(如矿物油、柴

作者简介: 李小俊(1980-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 环境保护。

油) 以及部分添加剂含有烃类等物质, 在钻井过程中, 若井身结构存在缺陷、套管密封不严, 或钻遇断裂带、裂隙发育区, 钻井液可能发生漏失并进入含水层, 导致地下水巾石油类、盐分及有机污染物浓度升高, 造成水质恶化^[2]。

2.2 防范套管破損、腐蚀污染地下水环境

天然气开采中套管的使用, 可将产气层和含水层有效地隔离开, 为了保证其隔离作用的充分发挥, 需保证套管的完整性。经过长时间的天然气开采, 套管很容易在地层应力、电化学腐蚀、酸性气体等的作用下, 发生腐蚀或者破損, 导致套管出现孔隙, 隔离作用失效。气层内的凝析油、烃类气体以及矿化度较高的地层水很容易向饮水层流窜, 致使饮水层浑浊、出现异味, 同时还会增加其可燃性, 甚至可能诱发爆炸风险。气层内逸出的甲烷, 会对地下水的氧化还原环境造成破坏, 导致重金属(如锰、砷等)释放, 使水质更加复杂, 治理地下水环境的难度将进一步增加。

2.3 开采废水回注对地下水水质与动态的潜在影响

在气田开发过程中, 压裂返排液和采气废水产生量大, 且成分复杂, 常含有高浓度盐类、石油类及残留化学药剂。为处置这类废水, 部分气田采用深层回注方式, 将其泵入与淡水含水层相隔离的深层地质构造。然而, 若回注井建设不规范、固井质量差, 或目标层与上部含水层之间存在天然通道(如断裂、裂隙), 回注液可能发生迁移并进入饮用水含水层。其所引入的高盐度、高化学需氧量(COD)、有机物等组分将改变地下水化学特征, 导致水质变化, 且污染羽可能随地下水水流扩散, 造成大范围、长期性的环境影响, 恢复治理极为困难。

2.4 防渗失效及渗漏污染地下水

在天然气开采现场, 如果防渗处理不到位(如接缝位置未做密封处理等)或者质量不达标(如防渗层破損、老化等), 很容易出现污染物跑冒滴漏的情况, 含油污水、钻井废水以及压裂返排液等将向地下水渗漏, 造成地下水污染。除此之外, 如果储罐接口位置、运输管道等密封性失效, 污染物也可能发生滴漏, 并向地下渗入。因渗漏造成的地下水污染不仅隐蔽, 而且扩散速度较慢, 所以很难在初期阶段察觉, 会对地下水資源造成较大危害。

3 系统化保护地下水环境的有效策略

3.1 加强对开采工艺和钻井液的优化, 从根源减少污染

为了避免在开采天然气时钻井液污染地下水环境, 需优先选择使用环保型钻井液, 不仅需严格控制化学

添加剂的有害物质含量, 还需保证钻井液的生物降解性。对于容易发生天然气渗漏的地层, 需注意强化井壁, 并加强随钻堵漏技术的运用, 从根源上避免因为钻井液渗漏而影响地下水环境^[3]。同时, 对井身结构设计加以完善, 保证套管深度可将地下主要含水层有效隔离开, 在设置技术套管、中间套管时, 需针对现场的地质条件、天然气开采安全性要求进行综合分析。在天然气开采关键环节, 通过智能监控和大数据技术的运用, 动态获取井筒情况与钻井液的性能参数, 并对风险进行自动预警。

大力研发性能较高的环保型钻井液, 是升级天然气开采工艺的主要方向。可将特殊的聚合物添加至钻井液内, 以此提高钻井液的热稳定性与抗盐性^[4]。该类钻井液在盐度、压力与温度较高的地层中, 依然可维持稳定的性能。除此之外, 还可将纳米材料加入钻井液中, 该材料物理、化学性质较为独特, 可使钻井液更具稳定性, 最大化降低泄漏风险。另外, 对钻井设备进行升级、改造也十分关键。提高钻井设备的科技含量, 可明显提高开采作业的精确度, 防止人为疏忽或者操作失误而污染地下水环境。

3.2 加强套管管理, 避免套管破損引发层间窜漏

在实施套管管理的过程中, 需构建覆盖套管整个生命周期的完善管理体系(主要包括设计环节、施工环节、运行环节和报废环节)。在设计环节, 设计人员需结合现场的地质条件、介质腐蚀性选择适宜材质的套管, 优先选用具有良好耐腐蚀性的复合材料或合金材料。在施工环节, 需加强对固井质量的控制与检测, 保证水泥环封固施工的质量。在运行环节, 通过超声波成像技术、多臂井径技术、电磁探伤技术等的运用, 定期检测套管的运行、腐蚀和壁厚情况^[5]。尤其是对于腐蚀风险系数较高的区域, 需做好防腐蚀处理, 常用的防腐处理措施有阴极保护、加注缓蚀剂等。在报废环节, 需严格按照规定对开采井进行封井, 避免窜漏风险。

3.3 严格处理废水和加强回注管理, 防止次生污染

对于天然气开采中的回注废水, 需严格对其进行预处理, 保证其与要求标准相符, 尤其需加强对回注废水中微生物、腐蚀性离子、悬浮物以及石油类浓度的控制。在选择回注井的地址时, 需对现场的水文地质进行精细勘探, 保证饮水层和目标层间的隔水层有足够的厚度和较低的渗透性, 并且与活动断裂层距离较远。为了避免注入压力超出要求标准, 引发流体窜层、裂缝扩大, 需构建动态化回注压力、水质以及流量监测体系, 防止次生污染情况的出现。

3.4 强化防渗漏处理，阻断地面污染

针对天然气开采现场关键区域，联合使用抗渗混凝土、膨润土防水毯以及高密度聚乙烯膜等材料进行防渗漏处理，以此形成多重防护结构。对于储罐基础与污水池等区域，需先压实再铺设防渗衬垫，接缝位置需采取热焊接处理，并通过充气检测，保证其严密性。同时，构建完善的防渗检测机制，明确全面巡查天然气开采现场防渗层的周期、防渗检测仪器（如超声检测仪、电法探测仪）、重点检测区域（如管道接口位置、污水池、阀门等部位）。一旦发现防渗层破损、老化或者接口位置密封失效需及时重新进行防渗处理。除此之外，加强对泄漏应急设施的完善。在易发生渗透污染的区域设置应急收集池、导流槽以及围堰，一旦出现跑冒滴漏的情况，可及时对污染物进行收集，防止其向地下水扩散。

4 天然气开采与地下水保护的技术治理路径

4.1 加强人工智能与预警技术的运用，实时监管地下水环境

随着科技的不断发展与进步，在保护天然气开采区域地下水环境时，需加强人工智能与预警等技术的运用，以此实现对地下水环境的实时性监测，尤其是对于重点开采区域的地下水更加有必要对其参数进行动态化监测，监测参数主要有气体浓度、水位以及水质等，并通过大数据技术的运用，实现数据的高效传输和综合分析。通过构建地下水环境模型，根据数据分析结果，对天然气开采对地下水环境造成的破坏与污染进行预测与预警，同时针对治理决策的制定提出可行性建议。

在开采天然气的过程中，通过人工智能技术的运用，对地下水环境进行动态化监测，其主要目的为将地下水环境污染防控工作进行前移，由以往的事后治理转变为事前预警和主动防范。而传感器则是实现实时监测的主要设备之一，尤其是可同时监测多个参数的智能传感器，可同时对地下水环境的多个重要指标进行精准监测（如酸碱度、溶解氧、电导率以及重金属含量等）。该类传感器在灵敏性、精确度方面有明显的应用优势，可精准地获取地下水环境的细微改变，并实时将监测数据向监控中心传输。一旦某一指标超出系统预先设置的阈值，系统将立即发出预警，提示工作人员立即进行整改^[6]。

4.2 从多元的角度治理地下水环境

在进行天然气开采的过程中，需积极地构建多方协同治理体系，从多元的角度保护地下水环境^[7]。在

开采天然气时，保护开采区域内的地下水环境，仅凭借开采企业单一的力量，并不能够达到理想的保护效果，企业需联同科研机构、政府相关部门和社会群众等多方协同治理。其中，政府相关部门的主要职责为加强对有关天然气开采标准体系以及法律法规的完善，明确天然气开采审批流程与标准，同时加强对开采过程的监管，一旦发现问题立即要求开采企业做出整改。开采企业则是保护地下水环境的责任主体，其需在整个开采的过程中贯彻落实绿色开采理念，大力引进环保型开采工艺。科研机构需加强对地下水环境治理、修复技术的研究，以此助力天然气产业朝着绿色化的发展方向发展。

5 结语

天然气的开采与应用对我国能源结构优化与安全有着不可忽视的价值。在开采天然气的过程中，大力保护地下水环境，不仅可助力生态文明建设，还可促进社会的可持续发展。为此，在开采天然气时，需在早期阶段精准地识别影响地下水环境的主要因素，并通过优化开采工艺、精准防控、实时监测、多元治理策略的实施，最大限度地避免天然气开采对地下水环境造成的不良影响。未来，随着科技的不断发展，需加强智能化技术的融入，以此为地下水环境的监测与治理提供先进的技术支撑，持续推动天然气开采行业的绿色化发展，为人类和自然之间的和谐共生提供重要保障。

参考文献：

- [1] 彭丽梅,李波,曾久聪.浅析天然气采出水预处理工艺[J].中国井矿盐,2025,56(04):11-13,19.
- [2] 张继红,金家良,谭欣剑,等.自生热体系开采天然气水合物藏作用机理[J].当代化工,2025,54(06):1388-1392.
- [3] 郭克星,闫光龙,张晨琰,等.天然气水合物开采技术研究现状[J].天然气与石油,2025,43(02):49-57,98.
- [4] 徐欢欢.深层天然气开采安全保障与环保技术协同应用研究[J].化工安全与环境,2025,38(04):108-110,114.
- [5] 陈小刚,李晓玲,侯建炜,等.天然气开采中排水采气技术的应用研究[J].能源与节能,2024(10):91-94,111.
- [6] 孙铭伟.基于节能理念的非常规天然气开采技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(15):190-192.
- [7] 吕晓航,刘源,薛元杰,等.不同地貌天然气开采工程对土壤流失及其养分组成的影响:以四川地区为例[J].绿色科技,2024,26(12):13-16.

地下水挥发性有机物 (VOCs) 污染快速检测技术

顾余滨

(华设设计集团环境科技有限公司, 江苏 泰州 225300)

摘要 地下水 VOCs 污染具有来源复杂、迁移性强和检测困难等特征, 传统实验室检测虽精度高但难以满足快速监测需求。针对此问题, 本文综述了光学传感、电化学传感、微流控芯片及光声光谱等快速检测技术的原理与应用, 并提出传感器阵列融合、样品预处理优化及智能算法校准等策略, 以期为实现地下水 VOCs 污染的高效、实时与定量检测提供技术参考。

关键词 地下水污染; 挥发性有机物; 快速检测; 光学传感; 电化学传感

中图分类号:X52

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.040

0 引言

地下水是工业生产与居民生活的重要补给水源, 但在化工制造、金属清洗、油品储运等活动中, 挥发性有机物 (VOCs) 易通过泄漏、渗透等路径进入含水层, 形成隐蔽性强、迁移范围广、治理周期长的复合污染。现有检测模式仍以实验室分析为主, 周期长、操作复杂, 难以满足应急处置、污染溯源和修复动态监管对“现场、快速、定量”监测的迫切需求。系统研究地下水 VOCs 快速检测技术, 对提升污染场地调查效率、支撑风险管控决策、推动环境监测装备智能化具有重要的工程应用价值。

1 地下水 VOCs 污染空间分布与浓度特征

在典型工业场地中, 地下水 VOCs 污染表现出明显空间非均质性。在石化工业区浅层地下水里, 苯、甲苯、乙苯、二甲苯 (BTEX) 浓度达到 $50 \sim 500 \mu\text{g/L}$, 氯代烃类污染在电镀和干洗场地超 1 mg/L 。污染羽流长度和地下水流速、渗透系数及污染源持续性关联紧密, 如在渗透系数是 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 的砂质含水层中, TCE 污染羽流水平扩散能延伸到 300 m , 垂向扩散深度约 10 m , 采样点间距和含水层非均质性, VOCs 浓度存在 $2 \sim 3$ 个数量级的差异, 这对检测技术提出了高灵敏度和快速响应两重要求^[1]。

2 传统检测技术综述

2.1 实验室分析方法

实验室检测是当下 VOCs 高精度定量分析的权威方法, 尤其是气相色谱—质谱联用 (GC-MS) 技术在定性

识别和定量测定中有独特优势, 采用顶空进样 (HS-GC/MS) 时, 常在 80°C 平衡 20 min 后取 10 mL 样品做气液分配, 检测限能低到 $0.05 \mu\text{g/L}$ 。针对低浓度或复杂基质样品, 固相微萃取 (SPME) 是常用预处理办法, 把 PDMS 或 PDMS/DVB 复合纤维涂层厚度控制在 $100 \mu\text{m}$ 左右, 控制萃取时间 ($10 \sim 15 \text{ min}$) 及搅拌速率 (400 转每分钟) 能让富集倍率提高到原始样品的 10 倍多。部分实验还把热脱附装置和冷阱系统结合起来, 在 -30°C 冷凝富集下实现更高灵敏度, GC-MS 在氮气流速 1.0 mL/min 情形下分离分辨率好于 1.5, 且谱峰保真度高, 但设备成本高 (约人民币 $80 \sim 150$ 万元), 运行维护要在恒温、洁净及稳定供气的环境, 限制了其在现场环境中的推广应用。

2.2 现场便携检测方法

现场检测以便携式气相色谱仪 (portableGC) 及光离子化检测器 (PID) 为主, PID 以 10.6eV 紫外灯为光源, 经光电离产生离子流信号, 实现 $0.1 \sim 2000 \text{ ppm}$ 范围里 VOCs 的迅速反应, 典型响应时间少于 3 s , 重复率优于 $\pm 3\%$ 。然而, PID 对不同分子离化能响应不同, 对氯代烃类灵敏程度较低, 便携式 GC 系统用微型柱分离和 MEMS 检测单元, 配有 1 L 容量微型氦气瓶及锂电池来供能, 持续工作时间达 6 h , 检测限一般处于 $5 \sim 10 \mu\text{g/L}$, 适用苯、甲苯、乙苯、二甲苯等污染物初筛。部分设备合并 PID 和热导检测器 (TCD), 能实现多组分一同检测, 应对野外环境干扰, 系统常加入温度补偿模块

作者简介: 顾余滨 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 环境监测。

和自动基线修正算法，但仍受色谱柱寿命（约300次循环）和载气稳定性限制。

3 地下水 VOCs 快速检测技术

3.1 光学传感技术

光学检测因非接触、快速响应、抗电磁干扰等优点，被视作地下水 VOCs 快速检测里较有前景的技术路线之一。这类技术原理主要依据 VOCs 分子在特定波长范围的吸收、散射或荧光发射特性。例如：在红外吸收光谱分析中，C-H、C=O 及 C-Cl 等基团的特征吸收峰处在 $2\ 800 \sim 3\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 650 \sim 1\ 750\ \text{cm}^{-1}$ 及 $700 \sim 800\ \text{cm}^{-1}$ 区域，能当作定量识别凭据，采用可调谐二极管激光吸收光谱（TDLAS）时，能凭借扫描波长锁定特征吸收线，实现 $1\ \mu\text{g}/\text{L}$ 级的检测限及亚秒级的响应速度^[2]。在苯检测中，405 nm 激发的荧光石英光纤传感器能捕获 260 nm 荧光峰，信号强度和浓度相关系数 R₂ 达到 0.995，有较好的线性特性与重复性。

在系统设计上，光纤传感系统一般由稳定光源、信号调制器、光路传导组件及光电探测器组成，传感端用溶胶—凝胶技术加入荧光敏感分子，膜厚控制在 $1 \sim 5\ \mu\text{m}$ 范围内，确保响应时间少于 3 s。凭借锁相放大技术给信号做相位滤波，搭配温度漂移补偿算法，能将系统噪声降到 0.02 nA，让检测灵敏程度比传统 PID 提高 20 倍多。此外，用光纤布拉格光栅（FBG）和表面等离子体共振（SPR）一起检测的复合结构，能实现多波段吸收和反射特征融合，提升对混合 VOCs 组分的选择性辨别能力。

3.2 电化学传感技术

电化学检测技术具备反应灵敏度高、设备简化、成本较低等优点，广泛应用于地下水 VOCs 现场剖析。典型装置构造是三电极体系，包含工作电极、参比电极及对电极，针对氯代烃类污染物，常采用金修饰工作电极和 Ag/AgCl 参比电极组合。纳米金颗粒平均粒径是 30 nm 时，在 -0.75 V 处的还原峰最为显著，检测界限能达到 $2\ \mu\text{g}/\text{L}$ ，线性范围处于 $2 \sim 100\ \mu\text{g}/\text{L}$ 内，提升识别选择性。研究者通过分子印迹聚合物（MIP）技术于电极表面构建特异识别位点，模板分子和目标 VOCs 有高度匹配空间结构。

电化学阻抗谱（EIS）用来辨认多组分 VOCs 体系，经由拟合电荷传递电阻变化率 $\Delta R_{\text{ct}}/R_0$ ，能体现不同成分子于电极表面的反应特性，如混合样里苯和甲苯比例改变的时候，Nyquist 图半径变化约 15%，展现出不

错的辨别能力。最新研究把石墨烯 / 金属氧化物复合膜用于工作电极制备，通过增添电活性表面积及电子传导路径，使响应电流提高约 3 倍。

3.3 微流控与芯片检测技术

微流控芯片检测技术具有微型化、自动化和高通量特性，为 VOCs 快速检测提供了新的技术方向。基于 PDMS（聚二甲基硅氧烷）材料的芯片一般有气液平衡通道、样品注入口和集成传感单元。通过设计宽度 $100\ \mu\text{m}$ 、深度 $50\ \mu\text{m}$ 的微通道架构，能在 $5\ \mu\text{L}$ 样品体积里完成气液相转化和传输，芯片中集成的光学检测窗口和纳米光纤传感元件能实现对 VOCs 的荧光响应检测，全程分析时间少于 2 min，系统用气液分离膜把地下水样品气化后送进检测腔，内置荧光光谱模块（200 ~ 400 nm 波长范围），能同步辨认 6 种典型 VOCs 组分，检测限约 $3\ \mu\text{g}/\text{L}$ ^[3]。

在工程实现上，芯片制备通常靠软光刻和等离子体键合实现，制造精度控制在 $\pm 2\ \mu\text{m}$ ，芯片大小是 $12 \times 8 \times 4\ \text{cm}$ ，功耗低于 8 W，能靠移动电源供电，检测腔体内用纳米 ZnO 量子点或 CdSe 荧光材料作敏感层，使信号强度和稳定性提升。因芯片采用一次性封装结构，有效避免交叉污染问题，适合大范围污染普查和应急监测，最新发展方向含“芯片 + 无线模块”模式，能实现数据的远程上传及多点联动，为构建地下水污染监测网络提供重要支持。

3.4 光声光谱与质谱快速检测方法

光声光谱 PAS 技术通过测量吸收光能转成的声压信号实现对 VOCs 的高灵敏检测，典型系统用 1.2 kHz 调制频率的激光源和 MEMS 麦克风阵列检测声信号，苯浓度是 $10\ \mu\text{g}/\text{L}$ 的时候，可产生约 $1.5\ \mu\text{V}$ 的声压响应，信噪比能达到 40 dB。结合冷阱（-20 °C）气体预浓缩模块后，检测限能再降到 $0.5\ \mu\text{g}/\text{L}$ ，应用多谐波检测技术（WMS-2f）能提升系统抗背景干扰能力，使光声池体积缩减到 10 mL 且不影响信号质量。

质谱检测技术于快速识别和定量分析方面同样表现出色，便携式离子迁移谱（IMS）和微型质谱（mini-MS）联用系统成为应急监测的重要发展方向。IMS 检测时间仅需 5 s，迁移时间分辨率约 0.1 ms，能分辨苯、甲苯、氯仿等常见成分；mini-MS 采用离子阱结构，质量分辨率 m ； $\Delta m \approx 300$ ，检测限能到 $1\ \mu\text{g}/\text{L}$ 。通过算法拟合迁移谱和质谱双信号，系统能实现准定量分析及自动组分识别。

4 快速检测技术优化与校准策略

4.1 传感器阵列与多参数融合

为克服单一传感器挑选性差、响应易偏移等问题，传感器阵列和多参数融合逐渐成为 VOCs 快速检测系统关键优化方向。典型阵列系统通常由 5~10 个响应机制不同的敏感单元构成，如基于金属氧化物半导体 (SnO_2 、 ZnO 、 CuO 、 TiO_2) 和碳纳米管 (CNTs) 复合膜的多层架构。各个单元通过表面吸附—脱附反应或电荷转移效应，对特定挥发性有机物展现不同响应特点。在实际构建中，各灵敏层的厚度控制在 100~300 nm，为保证响应灵敏度与恢复速度的平衡，阵列信号经多通道采集系统实时传输。数据处理模块借助主成分分析 (PCA) 和线性判别分析 (LDA) 做特征降维，能有效分开多组分信号，分类准确程度能达到 97.8%，对复杂混合样品里苯、甲苯、乙苯和三氯乙烯 (TCE) 等污染物都能做到高可靠识别。

阵列系统常结合支持向量机 (SVM) 或随机森林算法给信号矩阵建模，实现定量预测和漂移补偿，凭借多参数融合策略，把温湿度、响应电流、光学吸收等多维数据集成输入模型，能大幅提高检测稳定性和抗干扰能力，系统于不同温度梯度 (15~35 °C) 下的漂移误差能控制在 3% 以内，响应时间维持在 90 s 以内^[4]。此外，通过引入多传感模态融合架构，实现信号协同解码和模糊聚类算法辨认，为下一代智能化地下水 VOCs 检测提供数据融合和自校准的技术基础。

4.2 样品预处理与浓缩技术

地下水 VOCs 含量一般在 0.1~50 μg/L 范围内，直接检测很容易受溶解性有机质、离子及颗粒物干扰，所以样品预处理和浓缩技术于快速检测系统里相当关键，当今主流预处理办法涵盖微型冷阱富集及膜萃取法。基于 TenaxTA 吸附剂的微型冷阱装置大小是 20×30×10 mm，典型工作温度为 10 °C，吸附时间约 2 min，解吸温度 200 °C、时间 10 s，能实现 10~20 倍的富集倍数，它和光声光谱系统一起用时，苯类化合物检测限能从 5 μg/L 降到 0.5 μg/L。

膜萃取技术依靠 VOCs 在气液两相间扩散传质，用 30 μm 厚的 PDMS 膜，气液两相传质系数大概是 1.5×10^{-4} m/s，能在 1 min 内实现 90% 传质平衡。为了提高选择性，膜表面能复合分子印迹聚合物 (MIP) 或金属有机骨架 (MOF) 层，提高目标化合物吸附效率及抗干扰性能。

4.3 数据处理与智能分析

快速检测系统输出信号常伴着温度漂移、湿度波动、基线噪声和信号交叉干扰，传统线性标定方法很难精准解析，智能算法和数据驱动模型成为保障检测精度的重要环节。基于反向传播神经网络 (BP-NN) 的非线性标定模型于样本数据量 ≥ 200 组时，能把预测误差控制在 ±5% 以内^[5]。模型训练中引入 L2 正则化项和自适应学习率 (0.001)，有效避免过拟合，针对繁杂光谱信号，能用卷积神经网络 (CNN) 结构进行自动特征提取和浓度预测。

为保证现场长久稳定性，系统常联合动态校准模块和漂移补偿算法，在检测回路里引入内标气体做比值校准，能有效消除温湿度致使的信号偏移。部分高端系统采用在线自学习机制，按照检测数据时序特征实时更新模型权重，适应不同地质水化学状况下的信号改变。结合云端数据库历史样本做对比分析，能实现污染种类辨别和异常报警作用，使快速检测系统朝智能化、自适应方向发展，为地下水 VOCs 污染监测提供更高精度保障及决策支持。

5 结束语

地下水 VOCs 污染检测从实验室分析向现场、智能化方面转变。光学、电化学、微流控和光声质谱等快速检测技术各具优势，其中光学和微流控适宜实时小型化应用，电化学和质谱于痕量检测中表现出色。未来发展要聚焦三个方面：一是构建标准化传感器阵列数据库，支持多场景模型迁移；二是研发低功耗高集成检测平台，提高野外适应性；三是把 AI 算法和物联网相融合，实现地下水 VOCs 动态监测及网络化管理。

参考文献：

- [1] 姜雪, 赵琳. 挥发性有机物污染的环保治理新思路探讨 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 06(14):115-117.
- [2] 刘录华, 胡红菲, 张春超, 等. 土壤中 VOCs 的污染特征及成因研究 [J]. 环境科学与管理, 2021, 46(12):54-57.
- [3] 宋恒鑫, 杨瑞芳, 姜玉喜, 等. 地下水农药污染源原位选择性定量检测系统构建及方法研究 [J]. 光子学报, 2025, 54(08):195-210.
- [4] 贾真. 光纤传感技术在大气污染实时监测中的应用研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 06(13):115-117.
- [5] 郎洁, 马欢欢, 莫晓洁, 等. 地下水中挥发性有机物的样品预处理及常用检测技术阐述 [J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 05(09):183-185.

基于遥感与 GIS 技术的流域水资源时空分布特征及演变规律

贺俊伟

(青海省水文水资源测报中心, 青海 西宁 810000)

摘要 为揭示流域水资源时空演化规律, 以某流域为研究对象, 基于 1980-2020 年长时间序列遥感数据、气象水文实测数据和基础地理数据, 采用遥感反演模型和 GIS 空间分析等方法, 对流域核心水资源要素空间分异特征和时空演化规律进行系统研究, 旨在为流域水资源的合理开发、优化配置和可持续管理提供参考。研究结果表明: 流域水资源在空间上由西向东逐渐增大, 平原区水资源密度比山地和丘陵区都大, 与地理因子如海拔、植被盖度等相关; 水资源总量在时间上呈现出明显的波动下降趋势, 年均下降 $0.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1998 年出现了一个突变点, 在此之后, 下降速度进一步加快。

关键词 水资源; 时空分布; 遥感; GIS 技术

中图分类号: TP7; X87

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.041

0 引言

水资源是生态系统稳定和区域发展的核心要素, 时空分布特征和演化规律直接关系到水资源的供需平衡和可持续利用。受气候变化和人类活动的共同影响, 流域水资源演变过程变得更加复杂, 供需矛盾更加突出。遥感和 GIS 技术以其高效率、宏观性和动态性等优点, 成为研究水资源时空分布规律的核心技术手段。本文以某流域为研究载体, 构建多源数据体系, 采用遥感反演和空间分析相结合的方法, 对流域水资源的空间分异规律和时空演化特征进行分析, 为流域水资源的精细化调控和科学管理提供理论依据。

1 案例流域背景与数据准备

某流域面积为 8260 km^2 , 地形为西北高东南低, 呈阶梯状分布, 地形类型包括山地、丘陵和平原等多种类型, 其土地利用类型主要为耕地、林地、草地和建设用地, 在空间分布上表现为山地林地密集, 平原耕地和建设用地密集。该流域为温带大陆性季风气候区, 年降水量 586 mm , 降水多在 6-9 月, 汛期降水量超过 72%, 枯水期水资源补给不足, 区域水资源供需矛盾突出。该流域水系发育良好, 干流及支流贯穿上下游, 形成枝状水系网络, 为区域工农业生产 and 生产生活提供重要水源。利用 1980-2020 年多源遥感数据 (Landsat 5/7/8/8) 和 MODIS 等多源遥感数据, 用于反演降水、蒸发、土壤含水量等核心水资源要素; 同时采集 12 个

气象站点的气温和降水数据、1:10 万土地利用图、1:25 万水系图、行政区划图等基础地理数据。对所采集的数据进行格式转换、离群剔除、投影归一化和时空尺度匹配, 以保证数据的完整性、一致性和准确性, 为后续的遥感反演、GIS 技术的空间分析和演化规律研究打下坚实的基础。

2 案例流域水资源遥感反演与 GIS 数据构建

2.1 核心水资源要素遥感反演模型

以降水、蒸发和土壤含水量这三个核心水资源要素为研究对象, 构建适用于流域下垫面特性的遥感反演模型。降水反演采用改进型增强植被指数—降水模型, 表达式为 $P=a \times EVI^2 + b \times EVI + c \times LST + d$, 其中 P 为降水量, EVI 为增强植被指数, LST 为地表温度, a 、 b 、 c 、 d 为经实测数据校准的模型参数, 分别取值 -0.82 、 3.65 、 -0.04 、 $28.31^{[1]}$ 。以 SEBS 模型为基础, 利用遥感数据提取地表反照率、植被覆盖度等参数, 与气象数据相结合, 反演实际蒸散发。本文拟以微波植被光学厚度模型为基础, 采用 MODIS 微波数据和光学数据联合反演土壤含水量, 引入地表粗糙度校正系数, 提高反演精度。

2.2 遥感反演结果验证与精度评估

利用该流域 12 个气象站点及 8 个水文观测站点的实测数据, 对遥感反演结果平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 和决定系数 (R^2) 进行定量检验。结

作者简介: 贺俊伟 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水文与水资源工程。

果表明，各核心要素反演结果与实测数据吻合较好，可满足后续研究对数据精度的需求。表 1 显示了具体的验证结果。

表 1 具体验证结果

水资源要素	平均绝对误差 (MAE)	均方根误差 (RMSE)	决定系数 (R ²)
降水	18.6 mm	25.3 mm	0.89
蒸发	12.4 mm	16.7 mm	0.85
土壤含水量	3.2%	4.5%	0.83

在反演过程中发现，地形复杂地区的降水反演精度略高于平原地区，主要原因是地形遮挡对遥感数据灵敏度的影响。

2.3 基于 GIS 的流域水资源空间数据库构建

以 ArcGIS 为技术平台，建立基于 GIS 的流域水资源空间数据库。基础地理数据层由 DEM、土地利用、水系分布、行政区划等矢量及栅格数据组成，统一采用阿尔伯斯投影系统^[2]。遥感反演数据层分别存储了 1980–2020 年不同季节的降水、蒸散发和土壤含水量的栅格数据，空间分辨率达到 30 m。实测数据层将气象站点、水文观测站点的长时序实测数据进行融合，构建属性与空间位置相关的矢量数据集。以地理信息数据库为基础，构建数据索引与关联规则，实现不同类型数据的高效查询、叠加分析及时空可视化，为水资源空间分布特征分析提供数据支撑。

2.4 数据标准化与时空尺度统一处理

针对多源异构数据在时间与空间上的差异，开展标准化与尺度统一处理。在时间尺度上，将遥感数据与气象实测数据进行统一插值，利用线性插值方法对部分缺失数据进行补全，利用滑动平均方法对数据中的噪声进行平滑处理，保证时间序列的连续性与一致性^[3]。在空间尺度上，将多源遥感数据整合到 30 m 空间尺度上，利用最近邻法进行再采样，利用双线性内插的方法提高空间细节。在数据标准化方面，对降水、蒸发等要素进行极值归一化处理，消除量纲差异带来的影响；同时，利用投影变换，实现全部空间数据的坐标统一，保证空间分析精度。

3 案例流域水资源空间分布特征分析

3.1 核心水资源要素空间分异规律

流域核心水资源要素在空间分布上表现出明显的梯度分异。降水的空间分布从西北到东南逐渐增大，高值区集中在平原—丘陵过渡带，年均降雨量 650 ~ 700 mm；低值区位于西北山区，年平均降雨量 420 ~ 480 mm，区域差异可达 280 mm。西北地区由于海拔高、风速大，

蒸发量 850 ~ 920 mm，而东南部平原区由于植被覆盖率高和湿度大，蒸发量在 680 ~ 750 mm 之间。土壤含水量的空间分异受到地形、植被等因素的影响，在平原和河谷地区，土壤含水量含量高（18% ~ 25%），而山地林地和丘陵坡地土壤含水量含量低（10% ~ 16%），空间分异系数为 0.32。

3.2 不同地貌单元水资源分布差异

各地貌单元水资源分布存在显著差异，表现为平原（丘陵）山区的梯度分布。平原地形单元具有平坦的地形，具有较强的降雨入渗能力和较好的集流条件，年平均水资源总量为 $42.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水资源密度为 $51.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ；同时，耕地与建设用地是植被覆盖的主要类型，蒸发损失小，水资源供需状况良好。由于地形的影响，降水时空分布不均匀，局部地区存在季节性缺水现象。山地地形单元具有高海拔、高坡度等特点，降雨以径流的形式流失，多年平均水资源总量只有 $19.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

3.3 不同土地利用类型下水资源空间匹配特征

不同土地利用类型和水资源在空间上的匹配性差异较大。林地多分布于山区，虽然总降水量少，但是植被涵养水源的能力很强，土壤含水量和植被的需水匹配系数达到 0.78，水资源利用率高。耕地集中于平原丘陵地区，雨量充沛，水资源丰富，但是农业用水量大，灌溉方式粗放，供需匹配系数仅为 0.65，在一定程度上造成了水资源浪费。草地分布于丘陵坡地，降雨条件中等，植被需水量小，水资源匹配系数 0.72，总体供需平衡；建设用地多分布于平原河谷地区，水资源丰富，但人口密度高，产业密集，用水量大，污水排放影响水质，水资源质和量的综合匹配系数只有 0.58，是水资源供需矛盾最为突出的土地利用类型^[4]。

3.4 水资源空间分布与地理环境因子关联性分析

水资源空间分布与地理环境因子有较强的相关关系，经 Pearson 相关分析发现，海拔、坡度、植被盖度和土壤类型是影响水资源空间分布的主要因素。海拔与降水量之间存在着显著的负相关关系，相关系数为 -0.81；在高海拔地区，强辐射和强大风条件下，水分蒸发增强，相关系数达 0.76。随着坡度的增大，降雨入渗减少，地表产流速率加快，土壤含水率降低。研究结果表明，植被覆盖率和水资源储量之间存在着显著的正相关关系，相关系数达 0.68，表明植被覆盖率较高的地区可以通过截雨和缓流来提高土壤的蓄水能力。壤土区域水资源储量最高，砂壤土次之，砂土最低，不同类型土壤持水能力的差异对水资源的空间分布有直接影响。

4 案例流域水资源时间演变规律分析

4.1 水资源时间序列变化特征

1980—2020年流域水资源总量呈现波动下降趋势，年际变化幅度较大，变异系数为0.23。不同年代水资源总量变化特征存在差异，具体变化情况如表2所示。

从季节尺度来看，水资源总量呈现夏季>秋季>春季>冬季的分布特征，夏季为45.2%，冬季为8.3%；

表2 1980—2020年流域水资源总量变化情况

时段	多年平均水资源总量(×10 ⁸ m ³)	最大值(×10 ⁸ m ³)	最小值(×10 ⁸ m ³)	极差(×10 ⁸ m ³)
1980—1989年	89.6	108.3	72.5	35.8
1990—1999年	82.4	97.6	68.9	28.7
2000—2009年	76.8	92.4	63.2	29.2
2010—2020年	71.5	85.7	58.6	27.1

小于显著性水平0.01对应的临界值-2.58，显示出流域水资源总量在不断减少。Sen's斜率估计值为-0.42×10⁸ m³/年，即每年水资源总量减少0.42×10⁸ m³。采用滑动t检验方法对突变点进行分析，1998年是总水资源变化的突变年，1998年后下降速率增至-0.53×10⁸ m³/年，突变后下降趋势更为显著，与区域气候变化和人类活动强度增加密切相关^[5]。

4.3 不同时段水资源演变差异

不同时间尺度的水资源演变，变化速度、波动特征及空间格局均存在显著差异。在1980—1998年间，该地区的水资源总量由92.3×10⁸ m³下降到80.5×10⁸ m³，累计下降11.8×10⁸ m³，下降速度较慢，在空间上表现出全域均衡下降的特点，各地区的降幅相差不大，最大差值不超过10%。1999—2020年是流域水资源急剧下降时期，流域水资源总量由79.8×10⁸ m³降至71.5×10⁸ m³，累计下降了8.3×10⁸ m³，下降速度比上一时期高70.9%，空间上呈现差异化下降特征，平原建设用地集中区域下降幅度最大，达15.2%，山地林地面积下降幅度最小，仅6.8%。另外，在前一段时间内，水资源的年变异系数为0.27，而后一段时间的变异系数为0.18，显示出水资源系统的稳定性处于逐渐变化的状态。

4.4 时间演变与气候因子响应关系

流域水资源时空演化与气象要素之间存在着明显的响应关系，利用灰色关联度分析方法，得出降水、温度和相对湿度是影响流域水资源演化的主导因子，相关系数分别为0.87，0.72，0.68。流域降水量与总水资源之间存在着显著的正相关关系，相关系数为0.883，1980—2020年，流域年均降水量以年均-1.2 mm/年的速度递减，这直接导致了地表径流及地下水补给的减少，是流域水资源减少的主要气候驱动因素。气温升高使蒸

发量每年增加0.8 mm，水资源损失加剧。相对湿度与总水资源之间存在着显著的正相关关系，相关系数达0.65。极端气候事件频发，干旱年份增加，暴雨强度增加，对水资源时空演化有重要影响，加剧了水资源供需矛盾。

4.2 水资源演变趋势检验

采用Mann-Kendall非参数检验法和Sen's斜率估计法，对1980—2020年流域水资源总量时间序列进行趋势检验。研究结果表明，Mann-Kendall统计量Z=-3.86，

流域水资源总量变化情况

发量每年增加0.8 mm，水资源损失加剧。相对湿度与总水资源之间存在着显著的正相关关系，相关系数达0.65。极端气候事件频发，干旱年份增加，暴雨强度增加，对水资源时空演化有重要影响，加剧了水资源供需矛盾。

5 结束语

本文以遥感和GIS技术为主要技术手段，对流域水资源时空分布特征和演化规律进行研究。从空间上看，水资源具有明显的地域分异，受地形地貌和植被覆盖等地理环境因素的综合作用；不同土地利用类型和水资源在空间上的匹配性存在显著差异，其中建设用地供需矛盾最为突出。从时间上看，1980—2020年，流域水资源总量呈现明显的下降趋势，且存在1998年的突变点，其主要驱动因子为降水减少和气温上升。本文所构建的技术方法和数据体系，对类似流域的水资源优化配置和可持续管理具有积极的意义和应用价值。

参考文献：

- [1] 尚雨.基于多源遥感数据的渭河流域水资源模拟研究[D].西安:西安科技大学,2020.
- [2] 钟绍卓.洱海流域水资源价值核算和生态补偿机制研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [3] 陈伊娜.流域水资源横向生态补偿方法研究[D].南京:南京师范大学,2019.
- [4] 聂兵兵.安宁河流域水资源脆弱性评价研究[D].成都:四川师范大学,2019.
- [5] 王月健.干旱区湖泊流域水资源变化及其对生态安全的影响研究[D].新疆:新疆大学,2018.