科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

（1993 年创刊 · 旬刊）

2026 年 10 月 第 28 期（总第 653 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　罂　官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353　64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：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 10 月 5 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录 Contents

科技博览

001　配电网故障定位与故障恢复技术仿真分析 ..... 王　军

004　新能源并网电力系统自动化协同调控技术 ..... 蒲玉林

007　基于 MSP430F5529 的环路电流检测装置设计 ..... 胡光昊

010　电力系统中光伏—光热互补发电集成技术分析 ..... 梅思佳

013　风光一体化新能源集控平台功能设计与应用研究 ..... 杨凤华

016　基于全寿命周期的光伏支架结构设计与制造技术研究 ..... 朱志岩

019　基于模糊控制的储能优化调度在智能配电网中的应用研究 ..... 陆　乐，许吉强，陈浩飞

智能科技

022　PLC 控制下通信供电系统故障联锁保护技术运用 ..... 程鹏飞

025　基于模块化预制的火电机电安装施工技术优化研究 ..... 赵智慧

028　基于数据驱动的多工艺协同优化及效率提升机制研究 ..... 陆建国，金俊伟，饶胜云

031　基于 VB 语言的架空输电线路工程塔基断面图自动成图软件 ..... 宋朝峰

034　多晶硅厂区电缆桥架巡检无人机搭载式红外检测系统研究 ..... 潘多明

037　多业务混流下 PVE 超融合集群网络抖动与脑裂问题治理研究 ..... 钟乐鹏

040　工业机器人视觉引导系统在精密装配线上的应用可靠性分析 ..... 吴建亭

目录 Contents

应用技术

043 市政给排水长距离顶管施工技术研究……朱国权
046 公路高填方路基不均匀沉降防控施工技术……陈荣飞
049 深基坑支护施工技术及安全风险防控研究……刘德新
052 软土地基条件下闸站深基坑支护施工技术分析……周兴俊，吴文君
055 山区高速隧道软弱围岩段开挖支护施工技术应用……李　超
058 水利工程超深竖井地表帷幕灌浆防渗优化设计与应用……阮　超
061 建筑工程混凝土框架结构关键节点的施工质量控制措施……徐雪峰

科创产业

064 建设项目前期报建阶段风险识别与防控……李园园
067 同步磁阻电机节能改造技术及工业应用实践……王　伟
070 能源行业电气自动化设备故障监测与管理研究……王　毅，赵佳丽，刘晟钰
073 AI 赋能下建筑企业全链条安全精细化管控体系构建研究……翁绍铭，唐燕斌，陈育萌，余红乐，俞善文
076 光伏电站施工现场全过程统筹管控技术与成本优化策略研究……岑立奇
079 新质生产力背景下阳江绿色能源企业数字化转型的实践路径研究……王亚娟，谭永奖
082 适配源网荷储协同体系的电力负荷精细管理与虚拟电厂高效运营研究……杨彩虹

技术管理

085 高速公路工程水土保持监理要点分析……成举荣，常　猛，葛　波，郑　康
088 配电变压器运行隐患排查及维护管理策略……黄永权
091 高墩连续梁挂篮悬臂浇筑工序质量控制要点……杨海波
094 港口与航道工程监理的安全风险管理机制研究……董振华，王　赟
097 抽水蓄能电站输水隧洞施工质量控制技术研究……赵江涛，赵　能
100 AI 视频监控技术在智慧工地安全管控中的应用……王占泰，王晓兴
103 高速公路桥梁工程桩基施工技术及质量控制研究……邱龙波

科学论坛

106 新能源场站电气事故预防机制优化研究……田　涛
109 高强钢药芯焊丝熔敷金属扩散氢含量与冷裂……覃素志
112 一二次融合成套环网箱技术创新与应用分析……彭　昆
115 电气工程中新能源发电接入的关键技术研究……刘雨朦
118 供配电系统电气安全风险识别及防范措施研究……崔明罡
121 柔性直流换流站阀冷系统运行特性分析及优化控制……郭安琪，杜　杨，饶友元，周晓炜
124 复杂地形条件下互通立交线形优化与土石方平衡算法研究……裘鹏立

配电网故障定位与故障恢复技术仿真分析

王 军

（中国能源建设集团江苏省电力建设第一工程有限公司，江苏 南京 210001）

摘 要 针对配电网运行过程中故障定位困难、恢复过程复杂等问题，开展故障定位与恢复技术仿真分析。以典型配电网故障场景为基础，构建故障定位分析流程，通过多源信息采集、故障特征提取和定位模型构建实现故障区段识别；进一步结合故障区域隔离、供电拓扑重构、负荷转供等方法，建立故障恢复仿真过程，并对定位误差和恢复运行性能进行分析，以期为推动配电网智能化运维和自愈控制技术应用提供参考。结果表明，基于信息融合和智能控制的故障处理方法能够提升配电网故障识别与恢复协同性，为复杂运行条件下的供电可靠性保障提供技术支撑。

关键词 配电网；故障定位；故障恢复；仿真分析；自愈控制

中图分类号：TM727 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.001

0 引言

随着新能源接入规模扩大和新型电力系统建设推进，配电网结构与运行模式不断变化，多源接入和负荷波动使故障影响因素更加复杂，传统故障处理方式难以适应智能化运行需求。围绕故障快速识别、精准定位与可靠恢复开展技术研究，已成为智能配电网领域的重要方向。故障定位与恢复技术能够支撑配电网自愈运行，提高故障处理效率和供电可靠性，开展相关技术分析，对于完善配电网运行控制体系、保障电力系统安全稳定具有重要意义。

1 配电网故障定位方法分析

1.1 典型故障场景解析

配电网故障定位需要基于实际运行场景开展分析，通过典型故障案例来明确故障特征与定位需求。利用监测设备记录下的异常运行状态和故障呈现特征，再结合线路运行条件、故障发生过程、电气响应规律，能够对故障类型和影响范围加以描述，明确定位分析需要关注的关键状态量。通过对故障形成条件和表现形式进行梳理，可以进一步确定适用于配电网故障定位的分析路径，为定位方法建立提供场景依据。

1.2 多源信息采集处理

在故障场景明确后，故障定位需要依托多类型运行信息对故障状态进行综合描述。在配电网运行期间，相量测量装置（PMU）、故障录波装置、行波测距装置、配电自动化终端能够从不同方面获取故障信息，其中电压、电流相量、暂态信号、动作时序以及空间位置数据一起构成了定位分析的基础[1]。PMU 借助同步测量技术采集节点电压和电流相量，并且利用故障前后电气量的变化来提取特征信息，以此为故障区段判断提供数据来源。行波测距装置记录故障暂态传播的过程，雷电定位系统和故障指示器信息能够补充故障空间位置方面的特征。多源信息采集处理环节将不同来源的数据进行关联整理，让故障状态从单一电气响应扩展到多维信息表达，为后续定位模型建立提供完整数据基础。

1.3 故障定位模型构建

基于多源信息处理结果，故障定位模型围绕故障特征与线路区段之间的映射关系展开，将采集到的电气参数、时序信息以及空间特征转化成位置识别的依据。在模型建立的过程中，要结合配电网的拓扑结构、线路参数、故障响应规律，对不同运行状态下的特征信息做综合分析，让故障数据能够对应到相应的线路区段[2]。相关仿真分析先是建立 10 kV 配电网模型，然后配置 PMU 模块来采集故障发生前后的电压、电流数据，接着利用这些特征数据进行故障区段定位。这一过程承接前端信息采集环节，把分散的运行数据转化成具有定位意义的信息，为后续的故障隔离、网络重构和恢复控制提供基础支撑。

2 配电网故障恢复技术仿真

2.1 故障区域隔离控制

基于故障定位结果，配电网恢复过程进入故障区域隔离阶段。针对已识别的异常线路区段，控制系统

作者简介：王军（1973-），男，本科，高级工程师，研究方向：电力工程。

借助保护动作方面的信息、开关运行时的状态以及线路拓扑关系，来对故障边界加以划分，并且配置相应的开关控制逻辑。以某110 kV线路遭遇雷击故障作为典型案例，对该故障发生的过程和电气表现展开解析。该线路受到雷电冲击之后，保护装置、故障录波系统、自动化监测设备记录了异常运行状态，故障呈现出单相接地的特征，故障相电压发生了明显变化，线路电流出现了突变现象[3]。结合线路运行条件、故障发生过程、电气响应规律，能够对故障类型和影响范围进行描述，明确定位分析所需要关注的关键状态量。配电网故障定位的整体流程如图1所示。

2.2 供电拓扑重构方法

故障区域隔离后，原有供电网络结构发生变化，此时需要依照线路之间的连接关系来重新规划供电路径。供电拓扑重构是围绕联络开关状态的调整、备用馈线的接入、节点供电关系的变化而展开的，通过改变网络连接方式形成适应故障状态的运行结构。并通过开关组合调整改变电能传输方向。在拓扑重构的过程中，可以采用潮流计算来描述节点功率的变化，其表达式如下所示：

$$P_i=U_i\sum_{j=1}^{n}U_j(G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij}) \quad (1)$$

式（1）中：P_i表示节点i的有功功率，单位为W；U_i表示节点i电压幅值，单位为V；U_j表示节点j电压幅值，单位为V；G_{ij}表示节点i、j之间线路电导，单位为S；B_{ij}表示节点i、j之间线路电纳，单位为S；θ_{ij}表示节点i、j之间电压相角差，单位为rad。通过节点功率关系分析不同网络结构下的运行状态，为供电路径调整提供计算依据。相关故障恢复技术提出考虑电网安全裕度与经济运行的复电控制模型，对故障后的网络结构进行分析。

2.3 负荷转供协调策略

完成供电网络结构调整后，恢复过程进一步面向负荷侧供电关系进行协调。对于负荷转供，会依据负荷类型、线路承载能力、备用供电条件，为不同用户节点配置供电路径，以此让受影响区域能够借助可用线路获取电能。然后依据负荷的重要性程度、线路的运行参数来规划转供路径，并借助遥测、遥信、遥控等功能达成控制信息的传递。对于那些有着多条备用馈线的配电网络而言，要综合考量各线路的运行状态、负荷分布情况，协调不同供电方向之间的功率分配关系[4]。负荷转供环节承接拓扑重构的结果，把网络结构的变化转化为用户侧的供电调整，使恢复过程从线路方面的控制进一步延伸到负荷方面的协调。

2.4 恢复流程仿真构建

在故障隔离、供电拓扑重构和负荷转供流程形成后，需要将各控制环节纳入统一仿真环境，构建配电网故障恢复运行模型。该仿真模型是依据线路拓扑结

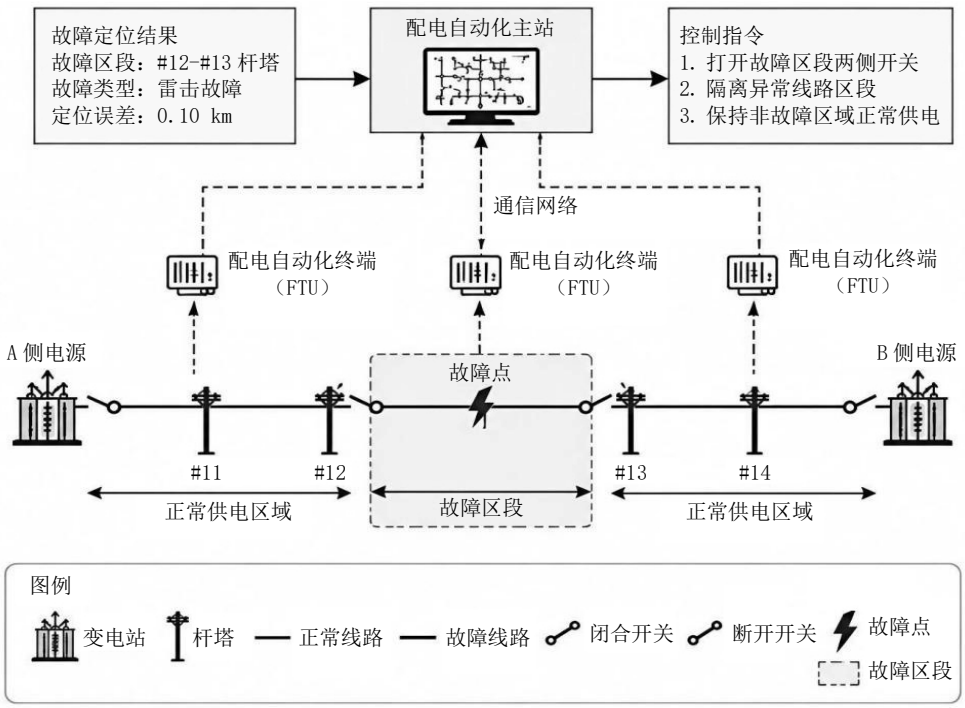


图1 配电网故障定位流程示意图

构、开关设备状态、负荷节点参数、控制逻辑来设置的，它会把故障信息输入、控制指令执行、网络状态变化建立起相应的对应关系[5]。故障定位结果作为流程启动条件，与故障隔离、拓扑重构、负荷转供模块依次关联，形成连续的故障处理过程。在仿真过程中，故障状态触发后，隔离模块依据故障区段信息调整开关状态，拓扑重构模块根据线路连接关系改变供电路径，负荷转供模块完成供电节点重新配置。通过流程化模型建立，让故障定位信息、控制动作、网络状态变化形成关联，为配电网故障恢复过程仿真提供完整模型基础。

3 仿真结果与性能评价

3.1 故障定位误差分析

基于前述故障定位模型构建过程，仿真结果评估着重于故障位置识别精确度。以某 110 kV 线路雷击故障为例，把行波测距、雷电定位、故障指示信息所形成的定位结果当作分析对象，对故障位置计算结果同实际故障点间的空间偏差加以评价。经由多源定位信息融合，能够逐步缩小故障区段，并结合线路地理位置与设备编号进行位置校核。行波测距计算得到的故障位置与实际杆塔位置具有较高一致性，定位误差处于较小范围。

由表 1 可知，多源定位方式借助距离信息、空间信息、时间信息这三个维度来描述故障位置特征。其中行波测距定位误差是 0.10 km，误差比例为 1%，这表明基于暂态信号传播特征的定位方式能够比较准确地反映故障区段。雷电定位的空间偏差控制在 320 m 范围内，可以进一步辅助杆塔位置判断。故障确认时间是 4.22 min，这意味着定位信息融合之后能够形成连续故障研判流程，为后续隔离控制和恢复运行提供位置依据。

表 1 故障定位结果评价指标

评价指标	单位	评价结果
行波定位距离误差	km	0.10
定位误差比例	%	1.00
雷电定位空间偏差	m	320
故障确认时间	min	4.22

3.2 恢复运行性能评估

在完成故障位置识别后，故障处理流程进入隔离、重构、负荷恢复阶段，恢复运行性能评价着重分析故障恢复期间的供电连续性、运行状态变化。以某 110 kV 线路雷击故障恢复过程为结合点，评价内容聚焦故障隔离时间、负荷恢复比例、恢复控制效果，通过对故障处理各个环节的时间节点和供电变化状况进行分析，来判断恢复技术对于配电网运行状态调整所产生的作用。

由表 2 可知，故障恢复过程通过隔离控制、供电路径调整、负荷转供等方式建立起连续处理流程。故障隔离时间是 8.53 min，这表明定位结果能够为后续运行控制提供支持。恢复供电时间被控制在 40 min 之内，说明恢复流程有着较强的连续性。恢复负荷比例达到了 80%，显示出恢复策略能够覆盖主要供电需求，以此提高故障后的恢复能力。经过恢复性能评价，可进一步验证故障定位与故障恢复技术之间的协同性。

表 2 故障恢复运行性能评价指标

评价指标	单位	评价结果
故障隔离时间	min	8.53
恢复供电时间	min	40
恢复负荷比例	%	80
复电效率提升倍数	倍	48

4 结束语

配电网故障定位与故障恢复技术通过多源信息采集、故障特征分析、定位模型构建以及恢复控制策略协同，实现了故障处理过程的优化。基于 PMU 等设备获取运行状态信息，结合智能识别方法能够提高故障区段判断能力，通过故障隔离、供电拓扑重构和负荷转供等技术，可实现故障后的供电恢复。随着新型电力系统建设持续推进，配电网运行环境将更加复杂，未来可进一步融合人工智能、大数据分析和数字化运维技术，提升故障预测、自主决策和协同恢复能力，推动配电网向更加智能、高效和可靠的方向发展。

参考文献：

[1] 刘家棋.基于图神经网络的配电网故障区段定位方法研究 [J]. 电工技术 ,2026(11):122-124.
[2] 韩君孝,范钟,李永清,等.考虑配电网电源侧故障的区域检修负荷转移方法 [J].沈阳工业大学学报,2026,48(03):32-39.
[3] 韩砚月.配电网故障中的快速定位与恢复技术分析 [J].电子技术 ,2025,54(12):316-317.
[4] 蒋赢,尹航,白忠勇.故障定位与快速恢复技术在配电网调控中的应用 [J]. 电力设备管理 ,2025(23):4-6.
[5] 罗会平.配电网故障精准定位与快速恢复技术应用研究 [J]. 电力设备管理 ,2025(23):7-9.

新能源并网电力系统自动化协同调控技术

蒲玉林

（四川蜀道清洁能源集团有限公司运维分公司，四川 成都 610041）

摘 要 随着我国“双碳”目标的稳步推进，风电、光伏等新能源发电装机规模持续扩张，高比例新能源并网已成为电力系统发展的必然趋势。新能源出力受气象条件直接影响，具有强随机性、波动性与间歇性特征，给传统电力系统的功率平衡、电压稳定与调度运行带来诸多挑战。本文通过搭建源网荷储多主体协同的层级化调控架构，阐述多时间尺度调度决策与故障自适应防控的运行机制，包括出力预测、资源聚合、调度优化、闭环校正四个关键技术，旨在为高比例新能源接入下的电网调控升级提供参考。

关键词 新能源并网；电力系统；自动化协同调控；源网荷储

中图分类号：TM76；TM732 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.002

0 引言

在能源转型的整体发展背景下，我国新能源发电产业保持高速增长态势，截至2025年底，风电与光伏累计装机容量已突破18亿千瓦，在电力系统电源结构中的占比持续提升。新能源出力依赖光照、风速等自然条件，日内波动幅度大、预测难度高，大规模并网后会显著加剧电网的功率波动，增大频率控制、电压调整与调度计划编制的难度。传统电力系统调控多以常规火电为主要调节手段，调控模式偏于被动响应，且源网荷各环节缺乏有效联动，自动化协同水平不足，难以适配高比例新能源接入后的运行需求[1]。因此，开展新能源并网电力系统自动化协同调控技术研究，对提升电网运行稳定性、促进新能源高效消纳具有重要的现实意义。

1 新能源并网电力系统自动化协同调控的体系架构

1.1 源网荷储多主体的层级化调控架构

源网荷储多主体协同调控采取三级层级化结构，从高到低依次是全局调控层、区域调控层和场站执行层，各层级权责分明，互相配合形成上下联动的分级响应机制。

全局调控层设在省级及以上电力调度中心，统筹全网新能源消纳和跨区功率调配，依靠全量电源、负荷和预测数据来制定长周期调度方案，向下发布调控目标和运行约束，保证全网功率平衡。区域调控层处于枢纽地位，将上级下达的指令传送到辖区内的场站、储能和可调负荷上，再根据辖区内的实际情况来制定出实时的调控指令，并且在本地处理局部故障，提高响应速度。场站执行层是终端单元，接到指令后利用自身自控系统执行并把运行状态、执行结果反馈给上级。

1.2 全域数据互通的自动化信息交互体系

数据互通是实现自动化协同控制的前提条件，只有各个主体运行数据能够实时准确地交流，才能达到全局最优的调控决策。目前，电力系统已经建立了覆盖主网的专用通信网络，但是配网侧、用户侧的资源数据采集和交互能力还存在不足，需要建立全域覆盖的自动化信息交互体系[2]。

该体系依靠电力光纤专网、5G电力切片等通信技术，创建起包含新能源场站、变电站、储能电站、负荷聚合商以及分布式电源在内的全域数据采集网络，从而实现新能源出力、电网潮流、节点电压、储能充放电功率、负荷可调容量等数据的秒级采集和上传。区域调控层设置边缘计算节点，对采集到的大量数据做初步的清洗、筛选和特征提取工作，减少全局调控层的数据传输以及计算量，提高数据处理速度。

体系采用统一的通信协议和数据标准，对各种厂商、各种类型设备的数据格式以及交互逻辑做标准化处理，消除各个系统之间信息化的壁垒。通过数据加密、权限控制等措施保证数据传输和存储安全，在保证数据共享的前提下防止数据泄露风险，给协同调控决策提供可靠全面的数据支持。

1.3 多时间尺度的协同调度决策机制

新能源出力的波动覆盖从毫秒级到日级的多个时间尺度，单一时间尺度的调控无法全面平抑不同频率

作者简介：蒲玉林（1993-），男，本科，工程师，研究方向：电力系统及其自动化。

的功率波动，因此自动化协同调控采用多时间尺度的调度决策机制，通过不同周期调控的相互衔接，实现对新能源波动的分层平抑。不同时间尺度的调控任务在周期、主要任务、参与主体与响应要求上存在明显差异，具体参数对比如表 1 所示。

表 1　多时间尺度自动化协同调控任务对比

时间尺度	调控周期	主要任务	参与主体	响应要求
日前调度	24 小时	编制次日发电计划与新能源消纳方案，优化储能充放电时序	常规火电、新能源场站、集中式储能	分钟级响应
日内滚动调度	15 分钟～ 4 小时	修正发电计划偏差，平抑新能源短时波动，调整区域功率分配	新能源场站、储能电站、可调负荷集群	秒级响应
实时调控	1 秒～ 15 分钟	实时调整系统功率平衡，参与一二次调频，控制节点电压	快速响应储能、工业可调负荷	百毫秒级响应
紧急防控	毫秒级	故障场景下的快速功率支撑，维持系统频率电压稳定	新能源场站、储能装置、快速切负荷装置	十毫秒级响应

适应协同防控的逻辑，调动多种主体一起参与到故障处理当中，从而加强系统对故障的抵御能力。

电网发生线路跳闸、大容量电源突然脱网等故障的时候，广域测量系统可以在几十毫秒内完成故障定位和运行状态采集，协同调控系统会自动进入应急响应模式。系统会对故障严重程度及影响范围作出判断，然后按其高低和大小自动执行相应的新能源场站低电压穿越、高频穿越能力调整，再触发储能电站的快速功率支撑功能来补偿系统的功率缺口，如果必要的话还会对一些可中断负荷进行切除，从而迅速达到系统功率的平衡。

整个故障处理过程不需要人工干涉，系统可以按照实时运行情况自适应地改变调控手段，首先使用响应时间短、供电影响小的调节手段，降低故障对用户的供电影响。故障消除之后，系统就会自动评判电网恢复情况，逐渐退出应急防控模式，重新步入正常的协同调度流程，达成故障处理的全部自动化以及最优化。

2　新能源并网电力系统自动化协同调控的关键实现技术

2.1　新能源出力超短期精准预测技术

超短期出力预测属于源网荷储自动化协同调控的前置支撑，提前知晓出力变动趋向，可以预先制订出调控策略，从而减轻实时调度的压力。目前新能源短期预测精度已经比较高，但是 15 分钟到 4 小时尺度的超短期预测受到局地气象突变的影响比较大，精度波动较大，不能满足精细化协同调控的要求。

该技术使用的是物理机理打底、AI 算法修正的双层结构，时间分辨率为 1 分钟级，每隔 15 分钟做一次全量滚动更新。光伏侧融合分钟级卫星云图、地面辐照实测数据和组件温度损耗模型，用卷积神经网络提取云团移动特征，预估云层遮挡造成的辐照衰减幅度；风电侧结合风机秒级运行数据和尾流衰减模型，修正数值天气预报的风速偏差，用长短期记忆网络捕捉局地湍流短时规律，同时给出预测置信区间。

应用后超短期出力预测准确率可以达到 92% 以上，预测结果可以和调控平台自动对接，给日内滚动调度提供可靠的输入，提高协同调控的主动性、前瞻性[3]。

2.2　分布式资源集群的自动化聚合调控技术

随着分布式光伏、用户侧储能、电动汽车充电桩等分布式资源的快速增长，配网侧已积累大量可调节资源。但这类资源分布分散、单个体量小、接入点多，无法直接接入主网调度系统参与协同调控，因此需要通过自动化聚合调控技术将分散资源整合为可统一调度的调节单元。该技术依靠区域调控平台或者负荷聚合商系统，构建“台区边缘聚合 + 区域统筹调度”的两级架构，采用 IEC 61850、MQTT 等标准化通信接口，对分布式资源进行批量接入并加以监测，单平台可实现万台级分布式设备的同步接入与管控。系统依靠标准化的通信接口自动识别接入的分布式资源，及时获取它的运行状况、可调容量以及响应速度这些参数，进而对单个设备和整个区域的调节能力做出评价，同时按照响应特性将资源划分为毫秒级调频资源、秒级调压资源、分钟级调峰资源三类资源池。当接收到上层调控指令的时候，聚合系统就会使用智能分配算法，按照各个资源的调节成本、响应速度和可用容量来把调控指令分发给每一个设备，不需要人工一一地进行

1.4　故障场景下的自适应协同防控逻辑

高比例新能源并网之后，系统转动惯量减小，抗干扰能力下降，故障之后频率、电压的波动幅度增大，传统的依靠切机切负荷的故障防控方式会造成较大的供电损失。自动化协同调控体系创建起故障场景下自

配置，指令下发时延控制在100 ms以内。聚合过程可以在几秒钟内完成，指令下达之后系统会自动检测执行结果，通过边缘终端实时回传设备运行数据，对执行偏差超过5%的设备进行自动替换或者补充调用。采用自动化聚合调控，把分布在各个地方的分布式能源集中起来形成几十兆瓦的虚拟电厂参与电网的调峰、调频、调压，充分发挥配网侧的调节潜力，扩大协同调控的资源覆盖面。

2.3 源网荷储动态优化的协同调度算法

协同调度算法是自动化协同调控的关键支撑，其作用是在满足电网安全运行约束的前提下，统筹多元调节资源，生成最优的调控指令方案，实现新能源消纳与运行成本的平衡。针对不同时间尺度的调控需求，算法采用差异化的优化逻辑，适配不同的调控场景[4]，整体形成“日前统筹—日内滚动—实时校正”的多时间尺度嵌套优化体系。针对日前调度场景，算法采用混合整数规划方法，以系统日运行成本最低、新能源消纳量最大、碳排放总量最少为多优化目标，将常规机组出力约束、储能充放电约束、线路传输容量约束、节点电压约束、机组爬坡速率约束等作为边界条件，求解得到次日各电源的发电计划、储能的充放电计划与可调负荷的调用计划，同时预留一定比例的旋转备用应对预测偏差。

针对日内滚动调度而言，用滚动优化的办法，设置4小时的前瞻优化窗口，15分钟一次更新新能源预测数据和系统运行状况，重新计算优化模型来调整后面一段时间的调度安排，平抑新能源的短时波动。实时调控情况下用模型预测控制的方法，取5分钟控制步长，根据当前系统的实时运行数据，在满足快速响应的要求下，滚动优化未来15分钟内调控指令序列，不断跟踪系统功率平衡目标。所有的算法都自带电网安全校验模块，可以自动对生成的调控方案进行潮流计算和N-1安全校核，如果方案存在线路过载、电压越限等风险就会自动修正，保证调控方案的安全性和可行性。

2.4 调控效果的在线评估与闭环校正技术

自动化协同调控要形成一个完整的闭环链条，才能不断改善调控效果，适应不断变化的系统运行环境。在线评估和闭环校正技术就是对调控执行效果进行实时监测和评价，根据评价结果自动修正之后的调控策略，从而达到调控能力不断迭代提升的目的[5]，整体构建“决策、执行、评估、校正、迭代”自优化闭环。在线评估模块依靠广域量测系统以及数据采集网络，每15分钟执行一次动态评估，每天形成调控效果日报，从新能源消纳、频率品质、电压状况、运行成本这四个层面创建评价指标体系，自动算出新能源弃电率、频率最大偏差、电压合格率、单位调节成本等关键指标，与调控目的做对比，评判调控成效是否达成预期。当评估结果出现偏差的时候，闭环校正模块就会用到偏差溯源算法，对偏差产生的原因进行分析，将时序数据的偏差特征与之对比，从而判定是由于新能源出力偏离预测、调节资源响应不足，还是算法参数设置不当等原因造成的。根据不同的原因，系统会执行相应的校正策略，即对于预测偏差，会修改后面预测权重和备用容量的比例；对于资源响应不足，会改变资源调用的优先级和补偿系数；对于算法参数问题，会触发模型参数在线自优化。依靠“决策、执行、评价、校正”的闭环运转模式，协同调控系统可以对系统运行特性发生的变化做出即时反应并加以改进，从而不断地改善调控的精确度和适应性。

3 结束语

本文围绕高比例新能源并网带来的电力系统调控难题，系统梳理了自动化协同调控技术的整体框架与实现路径，构建了三级层级化的多主体调控架构，明确了多时间尺度调度决策与故障自适应防控的运行逻辑，阐述了四项关键支撑技术的实现方式与应用价值。研究结果表明，自动化协同调控可有效整合源网荷储多元调节资源，提升电力系统对新能源波动的适配能力，在保障电网安全的同时提升新能源消纳水平。未来可进一步探索智能算法在调控决策中的深度应用，完善跨区域协同调控的交互机制，推动调控技术向更智能、更高效的方向发展，为新型电力系统的建设提供坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 刘昕,汪洋.新能源接入下电力系统自动化的挑战与对策[J].电子元器件与信息技术,2026,10(05):45-48.
[2] 王霄.高比例新能源并网下县级电网电力系统调度自动化方案设计与应用[J].光源与照明,2026(04):185-187.
[3] 赵劭博.新能源并网电力自动化控制系统的优化路径[J].能源新观察,2026(01):99-100.
[4] 魏滔.电力系统自动化技术在新能源并网中的应用研究[J].电气技术与经济,2026(01):119-121.
[5] 方辉.电气信息技术在集中式并网光伏电站中的集成控制方法探究[J].中国设备工程,2026(01):232-234.

基于 MSP430F5529 的环路电流检测装置设计

胡光昊

（武汉工程大学邮电与信息工程学院，湖北 武汉 430073）

摘　要　为检测环路电流信号的幅度及频率，本研究设计了一种以 MSP430F5529 单片机作为控制核心的电流检测装置。该装置通过功率放大电路实现信号的采样和处理。借助 FFT 算法，将连续信号变为离散信号序列，得到电压、电流和频率。单片机通过数据采集和模数转换，在液晶屏上显示出检测波形的电压、电流和频率。该装置兼顾检测精度与运行稳定性，可适配电力配网、工业自动化等场景下的环路电流长期在线监测需求。

关键词　环路电流监测；MSP430F5529 单片机；电流信号；基波；FFT

中图分类号：TM933　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.003

0　引言

在检测环路电流时，不能将检测电路直接接入环路电流，否则会引入额外的回路阻抗，直接影响电路的正常工作状态，因此本设计采用非侵入式的电流采样方案。基于成本的考虑，本装置选择 MSP430F5529 单片机作为核心控制器。该型号 MCU 具备低功耗特性与丰富的外设接口，可在满足采样、运算与通信全流程功能需求的同时，大幅压缩硬件整体物料成本。

1　环路电流检测装置总体结构

AD9851 用作信号源，互感线圈用作电流互感电路。TL082 用作放大电路加滤波电路[1]，TDA2030 与设计电路相配合，使输出电流减小[2]，最后经过 LM311 整形电路后，方波信号传给 MSP430F5529 进行数据处理，显示在液晶屏上。总体方案如图 1 所示。

2　环路电流检测装置设计方案详述

为了检测非接触式电流，可参考以下几个案例。陈贺采用磁平衡式电流传感器、PCF8591AD 转换模块和 80C51 单片机实现电流的测量[3]；陈淼介绍了 MSP430 单片机的应用，且进行了采样原理的分析[4]；郭霞基于 STM32F103 单片机设计出了电流检测电路，可在低功耗的基础上高效检测电流峰值和频率[5]。

2.1　电流信号频率测量方法

选用 MSP430F5529 单片机的定时器 A 的三个通道，选用 1M 的晶振，可以达到的测量范围为 0 ～ 65 535，得到最小的测量频率，f_{min}=1/65.535 ms=15 Hz，最大频率为 1 MHz。频率计算 $f_{测}=f_{max}/(f_b-f_a)$，单位 μs。

2.2　电流信号峰峰值测量方法

利用 MSP430F5529 单片机的 AD 采样通道在一个周期内进行打点采样，再将采到的点的数值进行比较。频率为 50 Hz 时采样时间为 20 ms，频率为 1 kHz 的时候采样时间为 1 ms。采到的数值取出最大值和最小值进行相减得到峰峰值，即 $V_{pp}=A_{max}-A_{min}$。

2.3　基波及谐波频率

信号被预先处理后，对采集的信号进行 FFT 变换。设定采样频率为 F_c，采样点数是 $N=2^n$ 个。FFT 变换后，某一点 n 的频率为 $F_n=((n-1)\times F_c)/N$，该点的模值除以 N/2 就是对应该频率下的信号的相位。输出的 N 个数中，前 N/2 个和后 N/2 相同，只需要前 N/2 个数据，记第一个数代表直流分量，也称零次谐波；第二个数代表基波，也称一次谐波；第三个数代表二次谐波，再将任意信号输入前面所用的处理电路中，测得其频率以及幅值。总体流程图如图 2 所示。

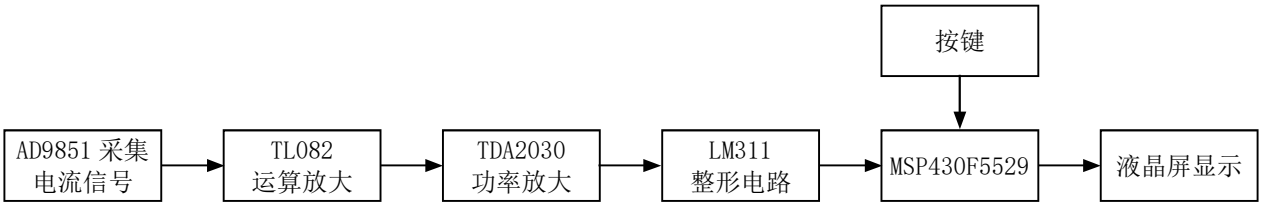


图 1　总体方案

作者简介：胡光昊（1995-），男，硕士研究生，助教，研究方向：检测技术与自动化装置。

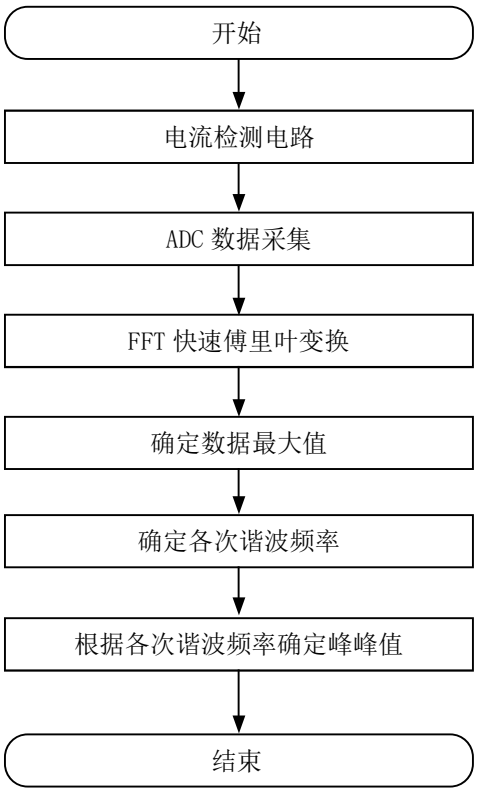


图2 总体流程图

3 环路电流检测装置硬件设计

3.1 信号源电路设计

AD9851芯片可以产生所需要的模拟正弦波，可直接作为基准信号，是验证检测精度的有效参考。

3.2 运算放大电路

TL082运算放大电路将小于5 V的信号缩小20倍，并且反相输出，如图3所示。V_{OUT}=(-R6/R5)*V_{IN}=(-100/2 000)*V_{IN}。

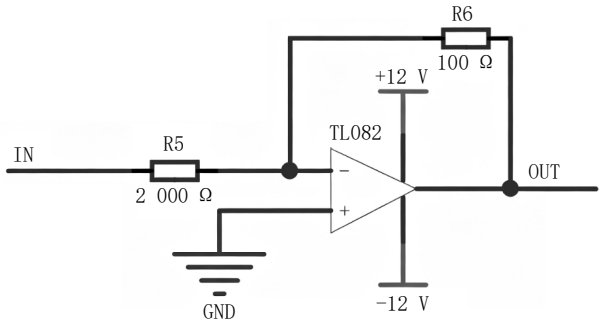


图3 运算放大电路

3.3 功率放大电路

TDA2030是音频功放电路，具有体积小、输出功率大、谐波失真和交越失真小的特点。C1起到输入隔直的作用。将前一级的电压信号进行功率放大，使输出的电流值为第一级放大电路输入电压值的0.1倍。设计电路中R7和R8均为100 Ω，使得VOUT:VIN=1:1（见图4）。

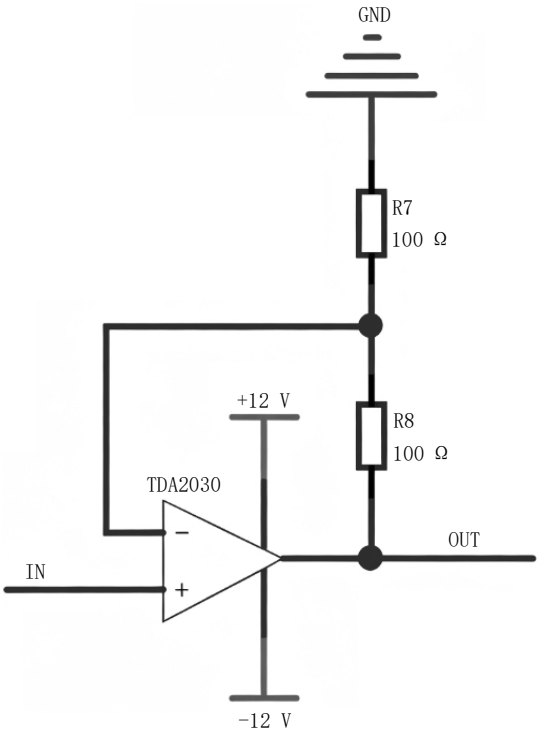


图4 功率放大电路

3.4 整形电路

整形电路由线性比较器LM311和电阻电容构成。正弦波信号由2脚输入，转换为方波输出，接入引脚P6.0，可用于测量频率。LM311输出的方波信号为5 V，但是控制器P6.0的工作电压为3.3 V，故增加R11和R12实现分压。整形电路如图5所示。

3.5 核心处理器介绍

核心处理器为MSP430F5529芯片，P2.3测试AD采样频率，P1.7定时器捕捉输入，P6.0AD采样输入，P1.1光标下移，P1.2确定按钮，P1.3返回按钮，P1.4刷新按键，P1.5选择控制AD采样频率值。

3.6 液晶显示电路

12864液晶显示电路，八位数据输入口连接MSP430F5529单片机的P7口，使其显示测得的频率和峰峰值。

4 环路电流检测装置软件设计

装置连接电源后，给各变量赋初始值，然后对采样到的数据进行FFT分析，最后通过按键显示对应的采集数据。主流程图如图6所示。

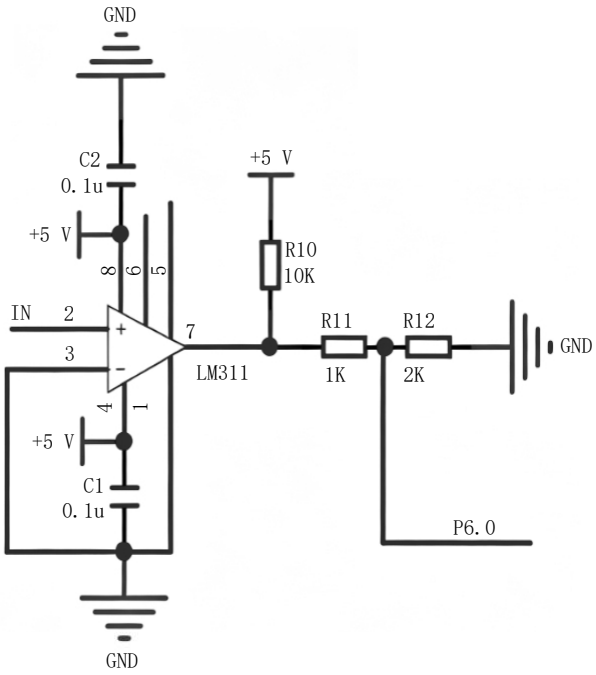


图 5 整形电路

5 环路电流检测装置测试结果与结论

在输入 1 kHz 的正弦信号时，分别改变输入电流的值。用第一级的运算放大电路将小于 5 V 的信号缩小 20 倍，将其送入功率放大电路，使其输出电流的值为输入信号的 0.1 倍。测试过程中用 ±12 V 的电源供电，输入峰峰值为 5 V 的信号。分别输入不同的电流，测试结果如表 1 所示。根据表中的误差显示，该装置测量所得数据与信号发生器信号参数误差在 2% 以内，达到了功率放大波形不失真的效果，电流信号的检测精度高。

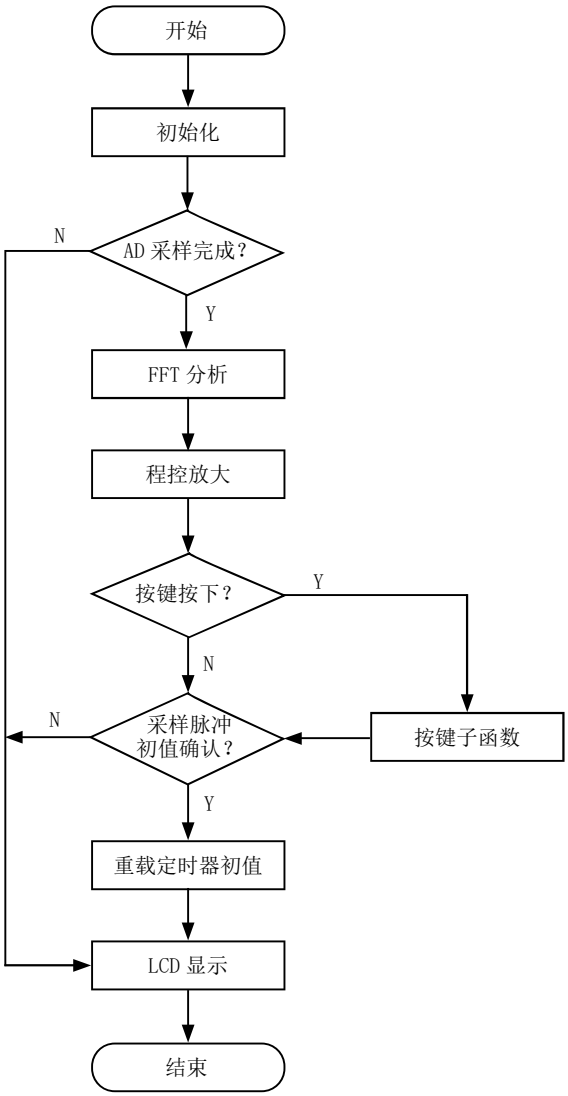


图 6 软件流程图

表 1 1 000 Hz 时不同电流测试结果

实际电流（mA）	10	50	100	400	600	800	1 000
显示电流（mA）	10.2	50.6	101.2	405.6	607.4	807.6	1 007.4
误差 %	2	1.2	1.2	1.4	1.2	0.9	0.7

参考文献：

[1] 季小榜,孙雷明.基于STM32F103RCT6的虚拟示波器硬件电路设计[J].河南工程学院学报(自然科学版),2020,32(01):37-40.

[2] 舒宁.一种基于TDA2030A的有源二分频音频放大电路设计[J].中国科技信息,2023(08):70-73.

[3] 陈贺,王利军,张少如,等.非接触式电流检测装置[J].电子世界,2019(13):91-92.

[4] 陈淼,羊开云,张胜利.基于MSP430的非接触式电流检测装置设计[J].集成电路应用,2023,40(05):306-309.

[5] 郭霞,何诚刚,张艳肖.基于STM32的非接触式环路电流检测装置的设计[J].电子设计工程,2019,27(16):185-188.

电力系统中光伏—光热互补发电集成技术分析

梅思佳

（中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院，安徽 合肥 230088）

摘 要 光伏发电出力随太阳辐照变化，间歇性与波动性特征突出，高比例接入后将显著增大电力系统的调节压力。光热发电依托熔盐储热与同步发电机的固有特性，可在光伏出力不足时段实现平稳接续供电。本文从互补发电的技术基础与并网要求、互补发电的集成方式与容量配置、联合出力控制与运行调节等维度展开分析，提出针对性协同技术，并结合实际案例验证互补系统在提升光伏利用率、改善系统调节能力方面的实际效果。结果表明，光热作为调节型电源与光伏协同运行，可在不大幅增加系统调节成本的前提下，有效提升新能源消纳水平。

关键词 光伏发电；光热发电；互补集成；容量配置；出力控制

中图分类号：TM73 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.004

0 引言

光伏发电装机规模持续扩大，已成为我国新增电源的主体。按照《光伏发电站接入电力系统技术规定》（GB/T 19964-2024）要求，并网光伏电站须具备功率预测、有功无功调节与故障穿越能力，以满足系统安全运行需要[1]。光伏出力完全取决于太阳辐照，日内出力随辐照先升后降，阴雨天气出力骤降，与负荷曲线错位明显。装机规模扩大之后，午间大发时段消纳紧张、傍晚高峰时段出力退出的矛盾愈发突出，弃光现象在部分高渗透率地区时有发生，系统需要常规机组频繁调节才能维持平衡。光热发电提供了另一条太阳能利用路径。它以反射镜将太阳光聚焦加热熔盐，把太阳能先转化为热能储存，需要时再驱动汽轮机组发电。与光伏相比，光热机组属于同步发电机，具备转动惯量与调频调压能力，熔盐储热系统可连续储放热8小时以上，夜间与阴天仍能维持出力。按照《光伏发电站接入电力系统技术规定》（GB/T 19964-2024）规定，光热电站的集热场规模与储热容量需根据场址辐照资源与负荷特性配置。两类电源在出力时序上存在天然互补关系，将光热作为调节电源与光伏协同运行，成为提高新能源消纳水平的工程选择。现有研究多从单一环节讨论互补问题，或单独分析调度策略，或单独测算经济性，较少把集成方式、容量配置与运行控制作为一个整体考察，导致方案之间缺乏衔接，工程应用时出现配置失当、调节效果低于预期的情况[2]。本文研究电力系统中光伏—光热互补发电集成技术，旨在为同类互补电站的设计与运行提供技术方案。

1 互补发电的技术基础与并网要求

1.1 出力特性与互补机理

光伏电站出力由组件功率、辐照强度与温度决定，组件布置方案按《光伏发电站设计规范》（DB45/T 2365-2021）规定执行[3]。晴天条件下，出力自日出后逐步上升，正午前后达到峰值，午后逐步回落，夜间为零；多云天气出力随云层移动快速波动，短时间变化率可达装机容量的60%以上，以5分钟级采样计算。光热电站出力由集热场5量与储热状态决定。集热场在白天吸收太阳直射辐射并加热传热工质，多余热量存入储热系统；发电功率可在储热容量范围内按调度要求调节，爬坡速率受汽轮机热应力限制，通常控制在每分钟2%至5%的额定功率以内。两类电源的出力时序差异构成互补基础。光伏在白天大发，光热可压低出力为光伏让路；傍晚光伏衰减，光热依靠储热接续供电；夜间光伏零出力，光热继续维持基荷或调峰出力。按《电力系统安全稳定导则》（GB 38755-2019）的要求，电力系统应具备充足的调节能力以应对新能源出力波动[4]。互补系统的调节资源来自光热机组的宽负荷调节范围与储热装置的跨时段转移能力，二者配合可覆盖光伏出力的日内波动。光热机组的调节能力还受集热场热量供应限制，连续满发时长取决于储热容量，调节性能随储热量的下降逐步减弱，运行策略须预留合理的储热量裕度。

1.2 并网技术要求的差异

光伏电站与光热电站的并网技术要求不同。光伏电站按《光伏发电站接入电力系统技术规定》（GB/T 19964-2024）执行，须具备功率预测、有功功率控制、

作者简介：梅思佳（2000-），女，硕士研究生，助理工程师，研究方向：新能源。

无功功率调节与低电压穿越能力，逆变器接入方式决定其对系统惯量贡献有限。光热机组直接与同步电网耦合，具备与常规机组相当的惯量响应与一次调频能力，并网运行还需满足机组启停、最低技术出力与设备振动等层面的约束。上述差异使两类电源在系统中的作用定位不同：光伏提供电量，光热提供电量与调节能力。互补集成就是将二者的作用组合进同一套系统，利用光热的可控性补偿光伏的波动性。

2 互补发电的集成方式与容量配置

2.1 调度协同型集成

调度协同型集成保持两类电站独立建设、独立并网，由调度机构统一安排出力。日间光伏大发时段，光热机组压低出力甚至停机，为光伏保留发电空间；傍晚光伏出力衰减，光热机组逐步提升出力，接续晚高峰供电；夜间光热依靠白天储存的热量维持出力。这一方式对现有电站改动最小，光热机组运行灵活，负荷调节范围宽，能够快速响应调度指令，但缺陷是两套系统独立配置，储热与发电设备的利用率未必最优。调度协同依赖准确的功率预测，光伏出力预测提前一日给出日间曲线，光热电站按预测安排储热与发电计划，日内根据实时辐照滚动修正。预测精度越高，光热需要预留的调节裕度越小，系统整体利用率越高[5]。

2.2 电转热耦合型集成

电转热耦合型集成在调度协同的基础上增加能量转移环节。光伏出力超过并网限值时，富余电力经电加热器转化为热能存入光热储热系统，待光伏出力不足时释放发电。这一方案把光伏的瞬时富余电量转化为光热的跨时段热量，相当于为光伏配置了一套大容量、低成本的储热设施。运行逻辑明确：光伏功率高于并网限值时启动电加热，低于限值时停运，由光热机组补足差额。电转热的效率损耗客观存在，电加热器热效率一般按 90% 以上计，以常规设备参数核算，但相比弃光，这部分电力得到保留，系统整体利用率上升。电转热通道的容量需与光伏弃电时段的最大富余功率匹配，储热罐容积按连续运行小时数校核，罐体保温损失按日散热量控制在储热量的 2% 以内。

2.3 一体化建设型集成

一体化建设型集成把光伏阵列、光热集热场与储热系统纳入同一基地统一规划，光热电站不再孤立运行，而是作为大基地的调节电源存在。2025 年投运的全国最大“光热 + 光伏”协同项目，光热部分以 26 万块反射镜聚光加热熔盐，集热系统可实现 8 小时储能，与 90 万千瓦光伏电站深度互补，白天由光伏满足基础负荷，夜晚或阴雨时段由光热储热系统衔接供电。一体化建设的优势在于统一接入与统一调度，送出通道利用率高，调节资源与新能源装机比例可按基地整体最优配置；建设周期与投资规模相应增大，对场址直射辐射资源与电网接入条件要求较高[6]。

三种集成方式技术特点对比如表 1 所示。

2.4 容量配比与储热时长配置

互补系统的装机配比需按场址辐照资源、负荷曲线与电网调峰需求测算，不存在适用于所有条件的固定比例。直射辐射资源好的地区适合扩大光热占比，光伏资源一般、调峰压力大的地区则应侧重储热时长。以高原光热资源区为例，光伏装机与光热装机的配比取 4:1 至 6:1，光热额定功率按晚高峰时段需补足的出力缺口确定，储热时长按 4 小时至 8 小时选取，兼顾调节需求与投资造价。储热时长超过 8 小时后，增加储热罐容积带来的调节收益递减，造价上升明显，配置时应结合全年逐时光资源模拟结果权衡。配比取值属于工程初步配置，最终需以全年逐时光资源模拟与系统潮流校核结果为准。

3 联合出力控制与运行调节

3.1 出力平滑控制

互补系统的运行目标是使并网点联合出力满足限值要求。以某配置为例，光伏单独出力在 0 MW 至 250 MW 之间波动，夜间为零；光热机组按调度指令调节出力，使联合出力稳定在 200 MW。光伏出力高于目标值的部分经电加热转入储热，低于目标值的部分由光热机组补足。实际运行调控中可搭建毫秒级的实时功率数据采集机制，对光伏瞬时出力、机组运行负荷、并网点功率参数进行不间断采样，细化数据采集的时间粒度，实现出力波动的精细化捕捉。同时，为确保出力平滑

表 1 三种集成方式技术特点对比

集成方式	互补深度	技术特点	适用条件
调度协同型	运行层面	光伏与光热出力曲线叠加互补，平滑外送功率波动，依赖功率预测精度与调度平台	光伏与光热分址建设，依托既有电网通道打捆外送
电转热耦合型	能量层面	弃电转热储存，利用率高，依赖电加热效率	弃光时段集中，储热容量富余
一体化建设型	系统层面	统一规划接入，配置最优，投资规模大	新建大基地，场址与接入条件好

得到有效控制，还可依据光伏出力波动幅度划分不同调控等级，匹配对应的储热启停、机组负荷调整标准，细化不同工况下的调控执行细则；而针对日间光伏出力溢出的工况，设置阶梯式电加热储能投切参数，根据富余功率的大小调整电加热设备的运行档位，分层完成电能转储操作，避免单一调控模式造成的能量资源闲置；针对光伏出力缺口工况，建立储热系统分级释热机制，结合实时功率偏差数值，动态调节释热速率与光热机组进气参数，循序渐进调整机组出力负荷。最后，建立工况预判调控机制，结合短时气象监测数据，统一规范机组调控操作流程，固化功率偏差核查、设备参数调整、运行数据，以此提前预判光照变化带来的出力波动，提前预设机组运行基准参数与储热系统启停预案，确保并网功率稳定运行的调控要求。

3.2 运行调节策略

联合运行按日前计划与日内滚动修正两级组织。日前计划根据功率预测确定次日各时段的光热出力目标与储热策略；日内根据实测辐照与负荷变化，按预设优先级调整电加热启停与光热机组负荷。光热机组具备宽负荷调节能力，可长期在最低 15 MW 负荷下运行承担调峰，也可快速爬坡至满负荷 100 MW 填补缺口，两种工况切换顺畅。光热机组的启停次数与爬坡速率受设备寿命约束，调度策略需在调节性能与运行损耗之间权衡，减少不必要的频繁变负荷。工程验收环节，互补电站的联合出力性能按《光伏发电工程验收规范》（GB/T 50796-2012）的规定进行考核，验收数据作为运行调整的依据[7]。

4 工程应用与效果分析

4.1 典型工程配置

已投运的互补项目验证了上述集成方式的有效性。以青海、甘肃等地的大基地项目为例，光热电站与光伏电站统一接入汇集站，光热机组承担调峰与惯量支撑，光伏承担电量主体，电转热通道用于消纳午间富余电力。工程运行表明，互补配置下光伏弃电率较独立运行明显下降，光热机组的年利用小时数因协同调度而提高，联合出力曲线较单一光伏平滑，送出通道利用率相应提升，基地整体发电量增加。

4.2 运行效果与经济性分析

从运行数据看，互补系统对电网的支撑价值大于单纯的电量贡献。光热机组在光伏大发时段让出空间、在夜间与阴雨时段接续供电，同时提供转动惯量与调频调压支撑，减少了对常规火电调节的依赖。经济性方面，光热发电的单位造价高于光伏，但互补后光伏弃电减少、利用小时数上升，光热机组的容量利用率也因协同运行而提高，综合度电成本低于两个电站独立运行。光热装备国产化与规模化推进后，造价呈下降趋势，这一差距仍在收窄。上述结论基于公开工程数据与典型配置测算，不同项目的实际效果以投产后的运行数据为准。

5 结论

本文围绕光伏与光热互补发电的集成技术问题，完成了集成方式分析、容量配置方法与运行控制策略的梳理，主要结论如下：（1）集成方式层面，调度协同、电转热耦合与一体化建设分别对应运行、能量与系统三个层面的互补深度，工程上按场址条件、电网需求与投资约束选择。容量配比与储热时长决定互补系统与当地资源、负荷的匹配程度，需以逐时模拟与潮流校核确定，无固定比例；（2）运行控制层面，联合出力控制使并网点功率趋于平稳，光热机组的宽负荷调节能力与储热装置的跨时段转移能力，使互补效果落实到逐时运行。典型工程证明，光热作为大基地调节电源，能够在光伏大发时让出空间、在夜间和阴雨天接续供电，并为电网提供转动惯量与调频调压支撑。本文基于规范分析与公开工程数据，具体性能数值有待各项目运行数据进一步验证。未来研究可从配比优化方法、电转热效率提升与调度策略精细化方向深入，建立互补系统的定量设计方法。

参考文献：

[1] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 光伏发电站接入电力系统技术规定:GB/T19964-2024[S]. 北京：中国标准出版社，2024.

[2] 齐军，杜锦昉，邬竞方，等. 基于动态调压策略的高渗透率光伏接入电网电压优化研究[J/OL]. 内蒙古电力技术，1-12[2026-09-09].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=NEcF25qTR9BHcvlfXEqX_FaWfYyPZALN_U8aY1ul6k2x5Jw1CUTtby9HvT0XUH3H2mOFynEasnU9VBsxqw1MuAQ2Lq0BxBghG0CXDR2hEwq7VztcwYGXP4LLzCnFuWO3Q975_TlAImV2h_HWiNY1nKHNP7R34E121xWNbjr0cM4jhsUtojuYxQ==.

[3] 傅宇辰，唐海慧. 智能技术在电力自动化系统集成中的应用[J]. 电子技术，2025,54(03):264-265.

[4] 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则:GB38755-2019[S]. 北京：中国标准出版社，2019.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 光伏发电工程验收规范:GB/T50796-2012[S]. 北京：中国计划出版社，2012.

[6] 董良. 新能源电力系统中的储能技术选择与电气集成方案设计[J]. 高科技与产业化，2024,30(09):32-33.

[7] 陶英健，李士洲. 自动化技术在电力系统中的应用[J]. 集成电路应用，2024,41(08):164-165.

风光一体化新能源集控平台功能设计与应用研究

杨凤华

（中电建新能源集团股份有限公司云南分公司，云南 昆明 650200）

摘 要 针对风光新能源场站地理位置分散、设备型号异构、出力随机波动，传统单场站独立管控模式存在运维成本高、多源数据难以互通、集群协同调控能力不足、与电网调度联动适配性差等现实问题。本文梳理了风光集群业务场景和管控需求，构建“云－边－端”分层分布式总体架构，完成平台逻辑分区与通信规约体系设计；从多源异构数据融合、全景智能告警、多时间尺度功率预测、风光集群协同调控、设备健康评估与智能运维等模块开展核心功能设计，以期为区域风光新能源集群规模化管控提供工程参考。

关键词 风光一体化；新能源集控平台；“云－边－端”架构；协同调控；智能运维

中图分类号：TM734 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.005

0 引言

风能、太阳能作为可再生能源，受自然条件影响，发电出力呈现出显著的随机波动性与间歇性特征。为了能平抑输出功率的波动，常选择在新能源电源出口处安装储能设备。风力、光照条件良好时，将多余电能储存起来；在风力、光照不足时，储能系统中的电能释放可保证向负荷供电的稳定性和连续性。随着风电、光伏等新能源装机规模持续增长，新能源场站呈现数量多、地域分散、运行工况复杂等特点，传统单场站监控模式在多源数据汇聚、运行状态集中感知、功率预测及集群协同控制等方面逐渐受到限制。基于此，本文将围绕风光集群业务场景与管控需求，设计“云－边－端”分层集控平台架构，重点研究多源数据融合、智能告警、功率预测、协同调控和智能运维等核心功能。

1 风光集群场站业务场景与管控需求

风光混合集群场站具备地域布局分散、发电设备异构化、出力强随机波动的典型特征，涵盖风机与光伏阵列发电、升压站变电运行、气象环境感知、电网调度交互以及现场运维处置等多元业务场景。传统单场站独立管控模式下各场站数据相互割裂，难以实现集群层面的统一态势感知与资源统筹调配。为适配规模化风光集群运行，集控平台首先要实现海量多源设备数据的标准化接入，保障实时数据采集传输的时效性与数据质量。同时需要支撑全景状态监视与分级告警处置，满足远程遥信、遥测、遥控、遥调业务执行要求。平台应具备多时间尺度功率预测能力，承接上级调度指令完成风光集群有功无功协同优化分配，实现场站间功率互济平抑出力波动[1]。除此之外，还需要覆盖设备状态评估、缺陷闭环处置、生产指标统计等智能运维业务，兼顾电力监控系统安全防护要求，打通监视、调控、运维全业务链条，支撑风光集群实现集中监视远程调控和少人值守运行模式。

2 风光一体化新能源集控平台总体架构设计

2.1 “云－边－端”分层分布式总体架构

面向风光混合集群地域分散、设备异构、出力随机波动的运行特征，以集中监视、协同调控、安全可靠、灵活扩展为核心设计原则，采用分层分布式技术路线，构建“云－边－端”协同硬件软件体系，具体架构如图 1 所示。

终端感知层部署在各个风光场站现场，实现全域设备原始信息采集，接入风力发电机组、光伏逆变器、箱式变压器、升压站一二次设备，同步对接气象监测终端、电能量计量装置，实时采集电气运行参数、设备状态信号、故障事件、辐照风速环境数据。边缘网关层部署于各场站就地位置，承担协议解析、数据清洗预处理、本地时序缓存任务，对采集数据完成初步异常甄别与噪声过滤[2]。集控主站云平台层部署于集

作者简介：杨凤华（1989-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：光伏、风力发电及运维，新能源集控运行。

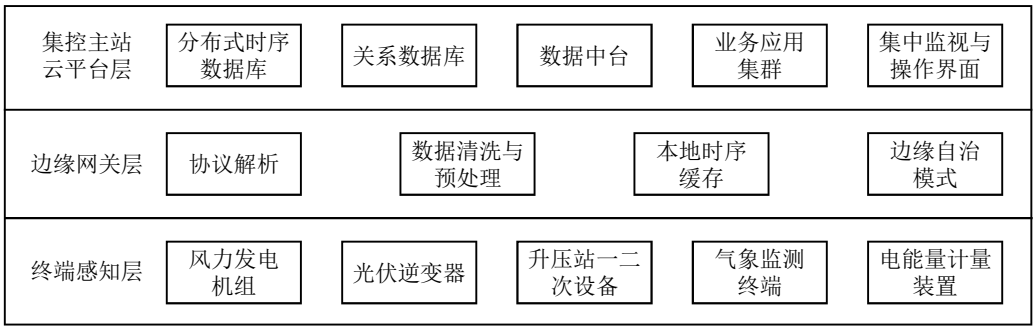


图1 风光一体化集控平台

控中心机房，由分布式时序数据库、关系数据库、数据中台、业务应用集群共同组成，接收各边缘网关上送的标准化数据集，完成全集群数据集中存储、深度计算与业务逻辑运算。云端侧重开展集群级功率预测、多场站有功无功协同优化、全局生产统计分析，生成全局调控策略并下发至各场站边缘网关落地执行制。

2.2 平台逻辑分区与通信规约体系

平台依据电力监控系统安全防护要求划分生产控制大区与管理信息大区，生产控制大区进一步划分控制区和非控制区，各区域间通过隔离网闸实现安全隔离与数据交互。针对风光场站设备协议异构问题，采用IEC 61400-25、IEC 61850、MQTT及IEC 104等规约，建立统一通信接口与协议转换机制，实现多厂商设备标准化接入，并结合报文校验和身份认证保障数据传输安全，为平台监视、预测、调控和运维提供可靠通信支撑。

3 风光一体化新能源集控平台核心功能设计

3.1 多源异构数据采集与融合处理功能

多源异构数据采集与融合处理功能作为平台业务底层底座，完成各风光场站多类型设备的数据接入、清洗对齐与标准化存储。面向风机、光伏逆变器、箱变、升压站、气象站、电能量计量装置的异构测点，通过边缘网关完成多协议解析转换，统一输出标准化测点数据集。基于时间戳完成跨场站时序对齐，消除不同设备采集周期不一致带来的时序偏差。时序数据库承载秒级实时运行数据，关系数据库存储设备台账、缺陷记录、计划工单等静态业务数据，为上层监视告警、功率预测、调控运算、设备评估提供可靠的数据输入来源。

3.2 全景监视与分级智能告警功能

全景监视模块汇聚全集群场站的出力、设备状态、气象条件、电网运行参数，实现场站级、集群级两级可视化展示，支持远程遥信遥测遥控遥调操作，配套操作防误闭锁逻辑，规避误操作风险。分级智能告警改变传统阈值简单触发模式，引入事件关联抑制算法，通过关联度计算实现告警降噪，告警综合评判公式见式（1）：

$$S=\omega_1 A+\omega_2 B-\omega_3 C \tag{1}$$

式（1）中，S为告警综合危险度；A为设备故障严重等级；B为故障影响发电容量占比；C为关联抑制因子；ω_1、ω_2、ω_3为各项指标权重系数。平台依据计算得到的告警危险度划分紧急、重要、一般、提示四个告警等级，完成SOE事件顺序记录，对连锁衍生告警做抑制过滤，避免大量重复告警造成信息淹没，同时支持告警信息多渠道推送，引导运维人员优先处置高风险缺陷[3]。

3.3 风光多时间尺度功率预测与发电计划编制功能

风光多时间尺度功率预测与发电计划编制功能模块融合历史发电数据、气象预报数据，构建超短期、短期双层功率预测模型，超短期实现0小时至4小时分钟级预测，短期实现1日小至3日日前预测。综合预测评价采用平均绝对百分比误差作为精度评判指标，计算公式见式（2）：

$$MAPE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|P_{pi}-P_{ri}\right|}{P_{ri}}\times 100\% \tag{2}$$

式（2）中，$MAPE$为平均绝对百分比误差；P_{pi}为第i时刻预测出力；P_{ri}为第i时刻实际出力；n为统计样本数量。基于功率预测结果，平台接收上级调度下发的发电指令，自动生成日前发电计划与日内滚动修正计划，完成计划出力与实际出力的偏差统计分析。

3.4 风光集群协同调控与调度协同功能

平台承接电网AGC与AVC调度指令，开展全集群有功无功的优化分配，将全局调控目标解耦分解至各个风光场站，依托边缘网关完成场站层面执行。有功调控层面充分利用风光场站出力互补特性，实现场站间功率互济，平抑集群整体出力波动；无功调控统筹风机变流器、光伏逆变器的无功调节资源，实现集群

电压的协同稳定控制[4]。针对限发、设备故障等特殊工况，平台可快速下发降功率指令，保障调度指令可靠落地。

3.5 设备健康评估与智能运维管理功能

平台基于设备运行时序数据，提取温度、振动、电气参数等特征量，建立风机、光伏逆变器的健康评估模型，实现设备潜在故障的提前预警，定位故障发生的部件与诱因。平台搭建运维工单闭环流程，接收告警与设备预警信息自动生成运维工单，完成工单派发、现场处置、结果回传、缺陷销号全流程闭环管理[5]。同时，对全集群生产运行指标开展统计计算，输出发电量、设备可用率、弃风弃光率等统计报表，量化评估各场站设备运行水平。

4 风光一体化新能源集控平台应用与效果分析

4.1 工程项目与平台部署情况

西南某风光混合集群包含 4 座风电场与 3 座集中式光伏电站，总装机规模 1 280 MW，场站地域分布跨度大，设备品牌型号繁杂，此前采用各场站独立就地管控模式，存在数据分散、协同调控能力不足等问题。按照“云－边－端”架构完成集控平台建设，在 7 个场站分别部署边缘网关设备，完成风机、逆变器、升压站、气象终端、电能量计量装置的全部测点接入，集控中心部署数据中台、业务应用服务器以及安全隔离网闸，严格遵循电力监控系统安全防护规范完成分区配置，打通场站到集控中心的专线通信链路，实现全部场站数据统一汇聚。

4.2 平台主要功能应用

平台上线后落地多源异构数据融合处理、全景分级告警、多时间尺度功率预测、集群协同调控、设备健康评估与智能运维全部业务模块。平台实现集群层面统一全景监视，完成告警降噪分级推送，改变场站分散监盘模式；功率预测模块输出超短期与短期预测结果，支撑调度计划编制；承接上级调度 AGC 与 AVC 指令完成风光有功无功联合分配，依靠边缘网关实现通信中断条件下就地兜底控制；依托设备时序数据开展故障预警，生成闭环运维工单，推行集控远程监管加片区现场运维的运行模式，减少各场站就地值守人员配置，实现少人值守运行。

4.3 风光联合运行控制效果分析

选取平台投运前后连续两个月的运行数据开展对比，从功率预测精度、AGC 调节性能、出力波动、弃电率几个维度开展量化评估，风光联合运行控制效果如表 1 所示。

表 1 平台投运前后风光集群运行控制效果对比

评价指标	平台投运前	平台投运后
超短期功率预测平均绝对百分比误差 /%	14.6	8.7
AGC 指令平均响应时间 /s	11.2	4.3
集群出力 10 分钟最大波动幅值占装机比例 /%	12.4	6.1
集群综合弃风弃光率 /%	7.8	3.6
AGC 调节合格率 /%	87.2	97.5

表 1 数据表明，一体化新能源集控平台投运之后，风光集群超短期功率预测误差显著下降，AGC 指令响应速度明显提升，集群整体出力波动得到有效平抑，综合弃风弃光率实现大幅下降，AGC 调节合格率满足并网运行考核标准。得益于风光资源时空互补特性，平台充分挖掘场站间功率互济能力，降低单一场站出力剧烈波动对电网带来的冲击。同时平台分级告警与智能运维功能有效降低无效告警数量，缩短设备故障平均处置时长，在提升集群调控性能的同时优化运维人力投入。

5 结束语

本文针对风光混合集群多场站分散运行、数据异构及协同调控能力不足等问题，梳理场站运行监视、功率预测、调度控制和设备运维等业务需求，构建“云－边－端”分层分布式集控平台总体架构，完成数据融合处理、全景监视与智能告警、功率预测、集群协同调控及智能运维等核心功能设计。工程应用表明，风光一体化新能源集控平台能够提升风光功率预测精度和运行监视效率，改善 AGC 调节性能，降低集群出力波动及弃风弃光水平，并为多场站少人值守运行提供支撑。未来可进一步拓展储能协同调控能力，完善多源联合优化算法，提升平台复杂工况适应性。

参考文献：

[1] 颜现波,彭远方,何栩,等.多流域水风光蓄电力集控一体化平台设计与实现[J].水电站机电技术,2024,47(12):46-49.

[2] 徐箭,潘如湘,廖思阳,等.水风光一体化运行控制策略及其参与电网调频方法[J].电力系统自动化,2026,50(14):116-131.

[3] 何茜儒,韩冰,孙允伟.风光储一体化电力并网稳定性控制策略[J].电气技术与经济,2026(01):410-413.

[4] 秦柯,胡江,刘小江,等.多能互补风光水火储一体化系统装机容量规划及协调控制方法研究[J].太阳能,2025(05):81-87.

[5] 金文苏,焦海侨,吴凯.风光储一体化发电站稳定性控制策略[J].电力设备管理,2026(02):155-157.

基于全寿命周期的光伏支架结构设计与制造技术研究

朱志岩

（江苏国电新能源装备有限公司，江苏 常州 213300）

摘 要 光伏支架作为光伏电站的重要承载结构，其设计水平与制造质量直接影响发电系统安全稳定运行及全寿命周期经济效益。本文针对光伏支架全寿命周期的设计需求，分析服役环境、寿命影响因素、结构设计原则，结合结构优化、材料选型、制造工艺、防腐维护等关键技术，建立覆盖设计、制造、运行维护全过程的技术模式，并且通过工程应用来对结构性能、制造质量以及综合效益进行评价，以期为提高光伏支架的耐久性、运行可靠性、资源利用效率、工程建设质量提供技术参考。

关键词 光伏支架；全寿命周期；结构设计；制造技术；耐久性

中图分类号：TM615 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.006

0 引言

光伏发电装机规模持续扩大，光伏支架长期处在风荷载、雪荷载、温度变化、湿热腐蚀等复杂环境中，其结构安全、耐久性能和制造质量直接对电站运行稳定性、全寿命周期成本控制有影响。传统设计模式更多关注初始建设阶段，对于服役性能、维护管理及寿命评价统筹不足，容易致使后期运维成本增加、结构性能衰减速度加快。全寿命周期理念融入光伏支架结构设计与制造过程，有助于统筹材料性能、结构优化、工艺控制、运行维护，实现全阶段技术协同，推动光伏支架朝着高可靠、长寿命、低成本的方向发展。

1 光伏支架全寿命周期设计需求分析

1.1 光伏支架全寿命周期设计理念与技术要求

全寿命周期设计将光伏支架的时间轴线划分为制造加工、物流运输、现场安装、运行维护、退役处置五个阶段，各阶段性能目标与约束条件存在显著差异。在制造阶段重点在于尺寸精度、焊接质量，在运输阶段着重关注构件刚度、包装防护，在安装阶段强调装配效率与临时稳定，在运维阶段聚焦腐蚀控制、疲劳损伤，在退役阶段涉及材料回收、残值评估。全寿命周期设计要求在设计初始阶段即统筹各阶段的技术需求，将后期运维数据和制造经验反向导入设计环节，形成闭环反馈机制[1]。核心技术要求包括建立与设计基准期匹配的荷载取值体系、明确构件重要性分级并分配差异化安全裕度、预留运维检修所需的通道空间与可更换节点接口。

1.2 光伏支架服役环境及寿命影响因素分析

光伏支架服役环境具有显著的地域差异性与多因素耦合特征，内陆荒漠地区主要受风沙磨蚀、极端温度循环的影响，风荷载长时间脉动致使连接节点出现累积疲劳损伤，日温差与年温差交替导致构件热胀冷缩产生的次生应力不可忽略。沿海及近海区域面临着高浓度氯离子的侵蚀，盐雾沉降在支架表面形成电解液薄膜，加快镀锌层的电化学腐蚀进程，工业区周边的酸性气体与冷凝水结合生成酸性溶液，对镀层、基体金属构成持续的腐蚀威胁[2]。风致疲劳是影响柔性支架寿命的关键力学因素，温度变化主要影响紧固件预紧力保持能力，地基沉降差异让支架体系产生附加内力重分布。不同服役环境对应的腐蚀性等级与镀锌层厚度要求见表1。

1.3 全寿命周期导向下光伏支架结构设计原则

在全寿命周期导向下的结构设计原则中，将时间维度引入传统承载能力与正常使用两类极限状态之外，增设耐久性极限状态作为独立的设计控制条件。在此原则基础上，在设计阶段就要明确构件在服役期间的性能退化轨迹，并据此来确定初始性能裕量，结构设计要遵循可检测、可到达、可更换这三项准则，保证关

作者简介：朱志岩（1979-），男，本科，工程师，研究方向：光伏支架结构设计。

表 1 不同服役环境的腐蚀性等级与镀锌层厚度要求

环境类型	腐蚀性等级	推荐镀锌层厚度（μm）	典型区域
内陆干燥	C2	≥ 65	西北荒漠与戈壁
城镇工业区	C3	≥ 85	工业园区及周边
沿海潮湿	C4	≥ 100	近海 5 km～10 km 范围
高盐雾海洋	C5	≥ 120	离海小于 1 km 及海上

（注：镀层厚度依据《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》（GB/T 13912-2020）及《钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》（ISO 1461:2022）对大气腐蚀性等级的分类要求确定。C2 等级环境下镀锌层厚度不小于 65 μm 可满足 25 年设计基准期要求；热镀锌工艺可实现平均 85 μm 镀层厚度达到 C5 等级防腐要求；在 C5 腐蚀等级环境下，锌铝镁镀层测算的 27 年腐蚀深度为 20.5 μm ~ 27.3 μm，实际工程中推荐使用 600 g/m^2 镀层重量。）

键节点、易损构件在运维期间具备可维护性。荷载取值方面，要区分施工阶段临时荷载、运行期常规荷载、极端灾害荷载，分别给予不同重现期与分项系数[3]。构件重要性分级制度将支架构件分为主承载构件、次承载构件、辅助构件三个等级，针对不同等级制定不一样的疲劳设计方法与腐蚀裕量分配方案，以此实现全周期内安全性与经济性的统一。

2 基于全寿命周期的光伏支架结构设计与制造关键技术

2.1 光伏支架结构优化设计技术

结构优化设计的核心在于建立以用钢量最小化为目标函数，以强度、稳定、变形及疲劳寿命为约束条件的数学规划模型。优化变量涵盖立柱间距、檩条截面、斜撑布置角度、节点连接形式等多个方面[4]。在风荷载作用下对支架体系进行动力响应分析时，需要考虑自振频率与风荷载卓越频率的比值，避免出现共振现象。柔性支架体系优化重点在于索系预应力取值与锚固端构造设计，连接节点疲劳寿命评估采用 Miner 线性累积损伤理论。构件所承受的交变应力幅值、循环次数需要满足式（1）所示的疲劳累积损伤条件：

$$D=\sum_i \frac{n_i}{N_i} \le 1.0 \qquad (1)$$

式（1）中：D 为总疲劳损伤累积值，量纲为 1；n_i 为第 i 级应力幅对应的实际循环次数；N_i 为第 i 级应力幅对应的疲劳破坏循环次数，由材料 S-N 曲线确定；i 表示应力幅水平的分级编号。当总损伤值达到 1.0 时，认为构件已经达到了疲劳寿命极限。

2.2 光伏支架材料选型与耐久性设计技术

材料选型要全面考虑力学性能、耐腐蚀性能、加工性能、全周期经济性四类指标。热镀锌钢应用范围最广，屈服强度等级一般选用 Q235B 或者 Q355B，镀锌层厚度依据表 1 所示环境腐蚀等级确定。铝合金支架凭借轻质高强与优异耐腐蚀性能在潮湿环境中具有竞争优势，耐候钢通过添加合金元素形成致密且稳定的锈层来阻止腐蚀介质渗透，构件承载力验算要考虑到腐蚀致使截面有效厚度逐年减薄。轴心受压构件的稳定性承载力满足式（2）要求：

$$N \le \varphi \cdot A_{eff} \cdot f_y \qquad (2)$$

式（2）中：N 为构件轴心压力设计值，单位为 kN；φ 为轴心受压构件稳定系数，按长细比及截面类型由钢结构设计标准查取，量纲为 1；A_{eff} 为构件有效截面面积，考虑腐蚀减薄后按设计基准期末期取值，单位为 mm^2；f_y 为钢材屈服强度设计值，单位为 MPa。该验算确保构件在设计基准期终点时仍具有足够的受压稳定性储备。

2.3 光伏支架制造工艺与质量控制技术

制造工艺质量直接影响构件几何精度、连接可靠性及防腐层附着性能，冷弯成型需控制板材回弹量对成型角度影响，通过模具补偿法将角度偏差控制在 ±1° 以内。冲孔定位精度决定了现场装配效率，孔位偏差累积会导致连接耳板无法对中并且产生强制装配应力，自动熔化极气体保护焊的热输入量控制直接决定了焊缝区域微观组织、残余应力分布，焊接变形控制采用的是对称施焊与分段跳焊相结合的工艺策略[5]。镀前处理过程中的酸洗和助镀工序需要严格把控时间与温度参数，在制造过程中设置下料尺寸复检、冲孔位置抽检、焊缝外观检测、镀层厚度测量四类质量控制停点。

2.4 光伏支架防腐与全寿命维护技术

防腐体系设计寿命要和结构设计基准期相匹配，热镀锌层厚度按照环境腐蚀性等级预留足够的腐蚀裕量。涂层体系适用于高腐蚀环境或镀锌层受损修补场景，常用环氧富锌底漆与聚氨酯面漆组合方案，全寿命维护技术模式包括定期检测、状态评估、维修决策三个层次，定期检测会以目视巡检与仪器抽检相结合，检测的对象有镀层厚度减薄率、螺栓预紧力衰减率、焊缝表面开裂状况、支架整体倾斜度变化。关键节点

焊缝采用磁粉或者渗透检测方法来探查表面开口缺陷，维护决策依据建立在检测数据之上的健康状态档案来进行，对于性能退化超出预期的构件实施提前更换或者补强处理。

3 光伏支架工程应用与全寿命周期评价

3.1 光伏支架工程应用方案与实施流程

云南易门药光互补项目采用柔性支架技术方案，该项目选址在陡坡山地地形，坡度范围处于20°至55°之间，传统的刚性支架因为基础工程量大、地形适应不足而很难实施。柔性支架模式采用预应力索网结构，以钢绞线作为主承载构件，借助端部锚固系统施加初始预应力，施工流程依次为锚固端基础浇筑、端柱与中间立柱安装、钢绞线张拉至设计预应力值、索网节点定位与组件安装。安装时采用分级张拉工艺，在每级张拉后观测索网线形变化来保证预应力均匀性，此方案能够避开陡坡区域密集基础施工，减少土方开挖量和植被破坏面积，施工工期显著缩短。

3.2 光伏支架结构性能与制造质量验证

支架结构性能验证采取现场载荷试验、长期监测相结合的方式，现场载荷试验会用堆载法模拟均匀雪荷载工况，分级施加荷载至设计值的1.5倍，对支架整体变形、节点相对位移进行观测，最大变形量符合规范允许值规定。组件安装之后EL隐裂检测没有发现电池片隐裂缺陷，制造质量验证从镀层厚度检测、焊缝质量抽检这两个方面来执行，镀层厚度使用磁性测厚仪按批量抽取10%构件进行检测，平均值不低于表1对应等级要求值。焊缝目视检测覆盖所有焊缝，主承载构件对接焊缝辅以磁粉探伤抽检，抽检比例为20%，所有抽检焊缝均达到Ⅰ级合格标准。

3.3 光伏支架全寿命周期综合效益评价

全寿命周期综合效益评价从装机增益、材料消耗及长期运维成本三个维度展开，柔性支架方案在相同土地面积下实现装机容量较传统固定支架提升25%，直接增加了发电收益。基础工程量减少了31%，从而降低了前期土建投资、施工周期，柔性支架钢绞线与索锚体相比刚性型钢框架，钢材节约了大约28%。运维方面柔性支架活动部件较少，主要工作集中于锚固端预应力监测与索网线形复测，年度运维工时大概是刚性支架的60%。综合全寿命周期内的初始投资、运维支出、发电收益这三项经济指标，度电成本比传统方案降低了约12%，展现出全寿命周期设计理念的经济效益优势。不同防腐方案在全寿命周期内的性能表现与成本差异见表2。

表2 三种防腐方案的全寿命周期性能与成本对比

对比维度	热浸镀锌	热浸镀锌+增强涂层	耐候钢
防腐性能	中等	优良	良好（依赖稳定锈层）
初期投资	低	较高	居中
施工速度	快	中等	快（免涂装）
焊缝修补便利性	不可直接修补	容易	困难（焊接工艺要求高）
全寿命维护需求	定期检测镀层减薄	涂层复涂+镀层检测	需监测锈层致密性
预期寿命	20年～25年	25年～30年	25年～30年

（注：热浸镀锌为行业应用最成熟的防腐工艺，成本较低但焊缝及破损部位修补困难；热浸镀锌+增强涂层方案防腐性能优良，焊缝及破损点易于修补，但初期投资较高；耐候钢通过添加铜、铬、镍等合金元素形成致密稳定锈层实现“以锈止锈”，省去涂装环节但在焊接难度和外观控制方面存在局限。）

4 结束语

全寿命周期理念贯穿于光伏支架结构设计、材料配置、制造加工、运行维护、综合评价的整个过程之中，有助于实现结构性能、制造质量与运维管理协同优化。结构优化设计能够提高承载能力、材料利用效率，制造工艺控制保障了产品质量稳定性，耐久性设计与维护管理能够延长服役寿命，综合效益评价为技术优化提供了科学依据。全寿命周期技术模式持续完善，将会进一步推动光伏支架制造水平的提高，为光伏电站的安全运行、降低成本并增加效益、产业高质量发展提供更加坚实可靠的技术支撑和实践保障。

参考文献：

[1] 杨洋.基于3D打印快速制造的光伏支架立柱拓扑优化设计方法[J].光源与照明,2023(09):56-58.
[2] 王新居.光伏电站全寿命周期管理优化策略研究[J].光源与照明,2022(12):94-96.
[3] 仲雅娟,赵大乐,赵鹰.光伏电站内不同光伏支架形式数量占比的研究[J].太阳能,2022(09):90-96.
[4] 吴迪,田密,廖心言.四川省某光伏发电项目的光伏支架选型设计[J].太阳能,2022(08):84-91.
[5] 李灵强.复合材料光伏支架梁结构优化分析[J].光源与照明,2021(08):100-102.

基于模糊控制的储能优化调度在智能配电网中的应用研究

陆　乐，许吉强，陈浩飞

（国网丹阳市供电公司，江苏 镇江 212300）

摘　要　随着新能源发电规模的不断扩大，风光互补发电在智能配电网中越来越多地被使用，但是风能、光伏发电的间歇性、波动性也给电网功率平衡、电能质量带来了挑战。分布式储能系统可以很好地解决负荷的波动问题，起到削峰填谷的作用，从而提高电网运行的可靠性。本文提出一种以模糊控制为基础的储能优化调度算法，将储能系统的状态、负荷需求以及新能源发电功率结合起来，用模糊控制规则对储能进行充放电的优化。利用建立的智能配电网仿真模型，对典型负荷曲线以及新能源发电数据进行模拟，可以验证该方法对降低功率波动、提高储能利用率以及系统稳定性的效果。结果表明，模糊控制可以处理系统的非线性以及不确定性，从而达到储能调度的高效、自适应的目的。

关键词　储能系统；智能配电网；模糊控制；优化调度；分布式储能

中图分类号：TM73　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.007

0　引言

新能源的快速发展和智能配电网建设推进了电力系统的深度转型。风电和光伏发电具有间歇性和波动性，其输出不确定性对电网功率平衡和电能质量提出挑战。传统电网调度策略难以快速响应这些波动，容易导致电压波动、功率浪涌和储能过度充放电等问题[1]。储能系统具有调节功率输出和充放电能力，对改善新能源的波动有较好的抑制作用，并能提高智能配电网的运行稳定性。

智能配电网依靠信息化手段达成电源、负荷以及储能系统之间的协同控制，从而加强储能调度的即时性和准确性。分布式储能系统布局在负荷中心或者新能源接入节点，用合理的容量和调度策略来改善系统的经济性以及运行稳定性。但是传统的优化方法对于多状态变量、不确定因素等的适应性较差。模糊控制可以处理非线性、不确定的信息，使储能系统动态自适应调度[2]。

1　储能优化调度理论与方法

1.1　智能配电网中分布式储能的功能

分布式储能系统在智能配电网中具有削峰填谷、频率调节、无功支撑和应急备用等作用。通过合理控制储能充放电状态，在负荷高峰期释放电能、低谷期进行储能，可缓解电网供电压力，提高电力资源利用效率。同时，合理配置储能布局和容量能够降低线路损耗，改善电网运行效率，并减少设备长期高负荷运行造成的损耗。此外，储能系统可提供电压支撑和频率响应服务，平抑新能源出力波动，提高配电网运行安全性、稳定性和对负荷变化的适应能力[3]。

1.2　储能优化调度的核心问题

储能优化调度的主要目标是实现功率平衡、提高运行经济性并满足系统安全约束。在实际调度过程中，需要综合考虑储能容量、SOC 限制、充放电速率、电网功率约束以及新能源出力变化等因素，根据实时运行状态制定合理的充放电策略。由于新能源发电和用户负荷具有随机性、波动性，储能调度面临较强的不确定性，传统固定策略难以适应复杂运行环境。因此，储能优化调度不仅需要保障设备安全运行，还需兼顾电网整体运行效率和经济成本，通过建立优化模型和控制算法，实现储能状态动态调整，提高智能配电网运行可靠性和适应能力[4]。

1.3　模糊控制方法

模糊控制是用模糊数学理论以及专家经验知识来设计智能控制的方法，把精确的输入变量转换成模糊的集合，再利用模糊规则做逻辑推理，得到相应的控制输出。储能优化调度中用到模糊控制，可以考虑到

作者简介：陆乐（1994-），男，本科，工程师，研究方向：电力工程技术。

储能运行状况、电网负荷变动、新能源出力波动等各方面因素来调节储能的充放电。输入变量有储能荷电状态（SOC）、负荷偏差、新能源出力变化率等，用来反映系统的能源供需状况；输出变量是储能的充放电功率，通过调节储能的运行状态来达到削峰填谷、平抑新能源波动、提高系统稳定性的目的。模糊控制设计主要包括以下几个步骤：

1. 变量模糊化。把SOC、负荷偏差、新能源出力变化这些连续变量转变成模糊语言变量，然后分成低、中、高等隶属度等级。根据储能状态、电网运行状态的不确定性来建立相应的隶属函数，为模糊推理打下基础。

2. 规则库创建。按照储能运行特性、电网调度需求、专家经验来制订模糊控制规则，建立输入变量和输出控制量的对应关系。当SOC较高、负荷大时，增大储能放电功率来减小峰值负荷；当SOC低、负荷小时，增大充电功率来补充电能，从而达到不同运行状态下自适应调节的目的。

3. 推理和去模糊化。用模糊推理对输入变量进行综合分析，根据规则库得到储能充放电控制量，用质心法等方法把模糊输出转化为实际功率值，达到储能系统精确调节的目的。

模糊控制具有很强的适应性，可以处理系统非线性、不确定和动态变化的问题。在智能配电网储能调度中，不需要建立精确的数学模型，根据实时运行状态来改变控制策略，提高储能响应能力及运行灵活性，达到自适应调度的目的，提高新能源消纳能力、电网运行可靠性。

2 分布式储能布局与调度优化

2.1 储能布局原则

储能系统布局需要综合考虑负荷中心、线路容量、电网拓扑结构以及新能源接入位置等因素，通过合理规划安装位置，提高储能设备对电网运行调节的支撑能力[5]。将储能装置配置于负荷集中区域或新能源接入节点附近，可降低电能传输损耗，减少远距离供电压力，提高系统响应速度和调节效率。同时，储能容量设计应结合区域负荷变化规律、新能源出力特征以及电网运行需求进行综合优化，以满足不同时间尺度下的充放电需求，实现能源高效利用[6]。

2.2 数学模型

储能优化调度可建立如下目标函数：

$$\min J=\sum_{t=1}^{T}[C_{grid}(t)+\alpha\cdot(P_{load}(t)-P_{gen}(t)-P_{ess}(t))^2] \quad (1)$$

式（1）中，$C_{grid}(t)$ 为电网侧综合运行成本，α 为功率平衡惩罚权重系数，$P_{load}(t)$ 为负荷功率，$P_{gen}(t)$ 为新能源出力，$P_{ess}(t)$ 为储能充放电功率，T 为调度周期。约束条件包括：

1. SOC安全运行区间约束：$0\le SOC\ min\le SOC(t)\le SOC\ max\le 1$。

2. 储能充放电功率边界约束：$P_{ess,min}\le P_{ess}(t)\le P_{ess,max}$。

3. 电网安全运行约束：$|V_i(t)|\le V_{limit}$，$|I_{ij}(t)|\le I_{limit}$。

该模型结合SOC动态约束、线路容量约束及电压限制，确保储能调度在安全范围内实现优化。

2.3 模糊控制规则设计

1. 模糊控制输入输出变量设置。储能调度模糊控制规则主要依据储能运行状态、电网负荷变化和新能源出力情况制定，其中SOC、负荷偏差和新能源出力变化率为主要输入变量。SOC反映储能剩余电量及充放电能力，负荷偏差体现电网功率供需状态，新能源出力变化率用于描述风电、光伏等新能源波动情况。模糊控制过程中，将连续输入变量转换为低、中、高等模糊语言变量，并利用隶属函数描述变量变化特征。输出变量为储能充放电功率，根据调节需求设置大放电、中放电、小放电、充电和小充电五种控制状态，实现不同运行条件下的自适应调节。

2. 模糊控制规则库构建。模糊控制规则库是储能优化调度实现智能控制的核心，主要依据储能运行状态、电网调节需求以及新能源出力变化规律建立。通过确定输入变量与输出控制量之间的映射关系，使储能系统能够根据运行状态自动调整充放电策略。当SOC较高且负荷较大时，储能具备较强放电能力，应提高放电功率以降低峰值负荷；当SOC处于中等水平且负荷稳定时，采用适度放电策略，在满足调节需求的同时避免能量过快消耗；当SOC较低且负荷较小时，应增加充电功率，提高储能能量储备。

3. 模糊推理与控制策略优化。完成模糊变量划分和控制规则建立后，通过模糊推理对输入信息进行综合分析，根据规则库确定储能系统充放电控制量。模糊推理综合考虑储能SOC、负荷偏差和新能源出力波动等因素，根据规则匹配结果确定控制策略。由于推理结果为模糊输出，需要通过去模糊化处理转换为实际充放电功率。本文采用质心法进行去模糊化计算，获得连续控制量，实现储能系统平滑调节。相比传统固定充放电方式，模糊控制能够根据运行状态动态调整控制参数，减少频繁切换造成的运行损耗。

3 仿真分析

3.1 仿真平台与参数

在MATLAB/Simulink的仿真环境中建立智能配电网模型，分为典型负荷节点、光伏和风力发电节点和分布式储

能单元。储能系统初始 SOC 设为 50%，容量为 500 kWh，最大充放电功率为 200 kW。仿真周期 24 小时，步长大于等于 1 分钟。负荷曲线取城市配电网典型日负荷曲线，光伏发电按晴天工况出力变化，风力发电用随机波动模式。该仿真设置可以较好地体现储能调度对于负荷的调节以及新能源随机性的影响。

为了直观地表示出调度特性，在表 1 中给出了典型的充放电功率示例数据，可以反映出储能自适应响应的特点。

表 1　储能系统充放电功率数据

时间（h）	负荷功率（kW）	光伏出力（kW）	储能功率（kW）	SOC（%）
6:00	1 200	0	-50	55
9:00	1 800	200	-120	48
12:00	1 600	400	50	50
15:00	1 500	350	30	52
18:00	2 000	100	-150	42
21:00	1 400	0	80	50

（注：负值表示放电，正值表示充电。）

3.2　调度策略效果

从仿真结果可知，用模糊控制策略可以很好地控制负荷峰谷的波动，可以根据负荷的变化自适应地调节储能充放电功率。相比固定充电放电的方式，本方案使总功率减少大约 15%，线路、变压器的负担也减小了。SOC 曲线表明，储能系统全天工作时 SOC 值处在 20% ～ 90% 之间，可以保证安全稳定的运行。与没有储能或者采用简单的定值控制策略相比，系统的功率波动大大减小，电压的波动范围也变小了，说明所提调度策略可以提高电网动态稳定性。

表 2 展示了不同调度策略下负荷峰值与系统电压波动的对比情况，进一步说明模糊控制策略在调度优化中的优势。

表 2　不同调度策略下负荷峰值与电压波动对比

调度策略	峰值功率（kW）	峰谷差（kW）	电压波动范围（p.u.）
无储能	2 100	900	0.92 ～ 1.08
固定充放电策略	1 900	750	0.94 ～ 1.06
模糊控制策略	1 650	650	0.96 ～ 1.04

3.3　系统稳定性与经济性

模糊控制策略对于电网频率、电压的响应有较好的动态特性。储能系统可以迅速调节充放电功率，减小电压波动的幅度，保证系统的频率稳定。从经济性上讲，削峰填谷、峰谷电价套利可以使得仿真结果日运行成本降低约 8%。该结果说明模糊控制策略既可以保证储能系统的运行安全，又在成本效益上具有明显的优势，给智能配电网大规模新能源接入提供可行的技术支持。

4　结束语

本文提出一种基于模糊控制的储能优化调度方法，针对智能配电网分布式储能系统充放电控制问题展开研究。以储能 SOC、负荷偏差和新能源发电波动作为核心输入变量，建立储能充放电策略的模糊控制规则，实现储能调度的动态优化和连续控制。MATLAB/Simulink 仿真结果表明，采用模糊控制策略能够有效减小负荷峰谷波动，使储能系统峰值功率下降约 15%，SOC 在全天运行过程中保持在安全范围内，同时降低电压波动幅度。在峰谷电价调度和削峰填谷控制下，系统日运行成本下降约 8%，验证了该方法在提升系统经济性和稳定性方面的有效性。研究结果表明，模糊控制能够适应智能配电网储能系统中的非线性、随机性和外部环境不确定性，实现高效、自适应的储能调度。分布式储能与模糊控制策略结合，不仅能够提高电网运行稳定性，还可以改善功率质量和储能利用效率，为新能源消纳和能源管理优化提供有效方案。未来研究可进一步结合机器学习算法和预测模型，对模糊控制规则进行自适应优化，提高负荷及新能源出力预测与响应能力。同时，可在多目标优化框架下综合考虑储能寿命、运行经济性和电能质量等因素，进一步研究储能与需求侧响应、微网协同运行以及不同应用场景下的优化调度策略，提高智能配电网应对高比例新能源接入的能力。

参考文献：

[1] 刘吉庆，赵景波，侯睿．基于变分模态分解 - 模糊控制的混合储能系统SOC控制策略[J]．青岛理工大学学报，2025,46(06):114-122,133.
[2] 邓皓．基于模糊聚类分析的储能系统控制环路电气设计[J]．电气技术与经济，2025(12):207-210.
[3] 路巧玲，徐省，李娜，等．智能配电网中分布式储能布局优化配置研究[J]．江西电力，2025,49(01):63-66.
[4] 杜剑峰，朱明媛，庄镇宇．智能配电网中分布式储能布局优化配置分析[J]．现代工业经济和信息化，2022,12(10):268-270.
[5] 章哲玮．智能配电网中分布式储能布局优化配置分析[J]．电气技术与经济，2024(08):342-344,354.
[6] 任锐焕．智能配电网中分布式储能布局优化配置研究[J]．电气应用，2021,40(04):31-35.

PLC控制下通信供电系统故障联锁保护技术运用

程鹏飞

（漯河技师学院，河南 漯河 462000）

摘 要 为保证通信供电系统的长期稳定运行，本文提出在可编程逻辑控制器（PLC）控制下应用故障联锁保护技术。通过介绍通信供电系统常见故障以及故障联锁保护要求，为系统优化设计提供指向性。随之从硬件设计、PLC故障联锁保护程序设计、系统软硬件协同设计三个维度，总结故障联锁保护要点，并进行系统调试与测试。测试结果表明，在可编程逻辑控制器控制下，通信供电系统应用故障联锁保护技术，能降低设备故障率，缩短故障响应时长。

关键词 可编程逻辑控制器；通信供电系统；联锁保护技术

中图分类号：TM773 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.008

0 引言

通信供电系统为工业通信、移动通信基站等提供关键动力支持，系统结构包括高压配电、直流供电回路、稳压模块和通信传输接口等，不仅设备的分布密集，链路也相对复杂。如果该系统出现局部运行故障，势必会造成严重后果，如电压崩溃、设备损坏等。对比普通供电系统，通信供电系统故障的危害更大，需要进一步增强保护系统实时性和精准性。为达到这一要求，建议采用可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller，PLC），在PLC控制下，以自定义联锁逻辑为依托实时采集设备故障信息，并对故障进行精准判断、分级联锁与自动隔离。基于此，本文在PLC控制下，分析通信供电系统的故障联锁保护技术，总结该技术应用方法，保证通信供电系统的运行安全。

1 通信供电系统故障类型与要求

参考通信供电系统的运行工况，系统常见故障主要有电压异常、电流故障、电源模块故障、设备工况故障、通信链路故障、人为操作故障，这也是PLC联锁保护的重点对象[1]。根据通信供电系统常见故障，联系通信供电系统的不间断运行需求，采用PLC控制的故障联锁保护技术，应满足如下要求：（1）快速响应，要求故障信号采集周期不超过10 ms，联锁逻辑运算耗时小于5 ms，故障触发保护动作总时长在20 ms以内；（2）精准识别、判断故障，做到延时防抖与信号冗余检验，能精准区分瞬时干扰和实际出现的故障；（3）联动闭锁，确保系统多回路、多设备以及多电源均能实现交叉联锁。如果是单一节点出现故障，能与联动的关联设备隔离；（4）容错自愈，通过系统的故障记忆、分级保护、声光预警以及自动复位等功能，系统出现轻微故障可以自愈复位，若为严重故障，即强制性闭锁停机，保证系统连续运行的同时，也能兼顾安全性。

2 PLC故障联锁保护系统设计

2.1 硬件设计

实现联锁保护功能的关键之一是硬件，无论是选择硬件型号和接线方法，还是设计电路、配备模块，均要以工业标准为依据进行硬件系统的设计[2]。此次搭建硬件系统，从PLC主控模块、报警模块等环节着手构建模块化架构，具体设计要点如下。

2.1.1 选择关键硬件型号

此次系统设计的硬件选型如表1所示。

2.1.2 硬件接线

（1）模拟量信号接线。EM AE04模拟量输入端子与输出信号线连接，并采取屏蔽双绞线的布线方法，保证单端接地，以免电磁干扰影响信号质量；（2）数字量信号接线。开关信号与PLC数字量输入端子对接，输入信号均由光电隔离模块处理，以免高压串入影响PLC主控模块的正常运行；（3）输出回路接线。PLC数字量输出端子和报警装置、闭锁开关等串联，并在输出

作者简介：程鹏飞（1974-），男，本科，高级实习指导教师，研究方向：电气自动化。

表 1 系统关键硬件选型

模块	选型	功能
主控模块	西门子 S7-200 SMART SR40 PLC	支持 24 路数字输入、16 路数字输出以及 4 路模拟量输入，满足通信供电系统采集信号、逻辑运算以及设备联动的要求。
模拟量采集模块	EM AE04	负责采集电压、电流与温度模拟信号，采集精度能达到 0.1%
数字量采集模块	采集开关量信号	响应延迟不超过 1 ms
执行器件	直流接触器、快速断路器和电磁闭锁开关	分段响应时间不超过 15 ms
检测器件	均为工业级防水防尘型号	满足户外基站与机房机柜安装要求
配套设备	24 V 直流稳压电源、声光报警器、故障指示灯和工业触摸屏	实现故障实时预警，保证系统连续供电与运行状态可视化监控

节点处增设续流二极管，以免线圈断电形成反向电动势，可以对 PLC 输出端口起到保护作用；（4）冗余回路接线。系统设计中搭建硬件硬联锁的冗余回路，采取软件 PLC 联锁和硬件继电器联锁的防护措施，增强系统保护的可靠性；（5）供电回路接线。采集、执行模块和 PLC 主控系统各自供电，并设置独立控制的空气开关，以免出现供电故障影响保护系统的正常运行[3]。

2.2 PLC 故障联锁保护程序设计

2.2.1 信号采集与防抖滤波程序

系统在运行中如果出现瞬时电压波动或受脉冲干扰，并因此造成故障误判，需要在设计阶段设置软件防抖及延时滤波程序。总结设计要点如下：（1）模拟量信号采集程序。设置连续采样时间为 10 ms，如果采样数据连续 5 次均大于阈值，即为有效故障信号，直接过滤此类单次瞬时异常情况；（2）数字量故障信号。延时 9 防抖时间设定为 0.5 s，以免开关抖动或瞬时干扰误触保护。为保证信号真实准确，还需采用数据超限滤波算法，将数据包含的极值干扰去除。

2.2.2 典型故障联锁逻辑

根据通信供电系统常见故障类型设计相应的联锁保护逻辑，增强故障判断与处理的精准性，并实现联动闭锁与分级防护。实操逻辑设计如表 2 所示。

表 2 通信供电系统常见故障联锁逻辑设计

保护逻辑	设计原理
电压异常联锁保护逻辑	预先设置系统的额定电压波动阈值是 ±5%，由 PLC 获取母线电压与支路电压的数值。若参数超出阈值，启动防抖校验判断是否存在故障，随后立即启动分级保护
电流故障联锁保护逻辑	精准区分过载、短路故障
电源模块故障联锁保护逻辑	UPS 失电与蓄电池欠压等故障设计交叉联锁逻辑
设备工况故障联锁保护逻辑	采集配电柜体与稳压模块的实时温度信号
通信链路故障联锁保护逻辑	PLC 实时检测通信握手信号
操作误动作联锁保护逻辑	设计硬软件同步操作的闭锁逻辑

2.2.3 故障分级处置与自愈复位设计

为保证系统运行安全以及连续性，此次设计选用三级故障处置及分层复位模式，将故障分为一级、二级和三级。其中一级故障包括瞬时电压异常波动、轻微过载等，只发布声光预警，并完整记录故障的代码，系统正常供电；二级故障包括不间断的电压偏差与稳定过载等，除了发布预警，还需进行负载降级与设备自愈调节处理，若自愈调解 1 min 未恢复，便要立即锁定故障状态，由技术人员进行人工故障排查；三级故障包括短路、电源失效等，在发现故障的同时联锁隔离，马上切断故障回路，启动系统的停机保护功能，待故障解决由技术人员人工复位[4]。

2.2.4 冗余容错设计

针对 PLC 可能出现的单点故障或逻辑冲突情况，此次系统设计专门增加了多重容错设计环节：（1）对于冗余指令的容错设计，重要保护指令可以输出 2 次，每次输入的间隔是 2 ms，以免指令遗失影响保护时效；（2）对逻辑互锁的容错设计，主要是以对立操作指令为对象设计互锁逻辑，其中合闸 / 分闸指令、电源投入 / 切断指令均为互相闭锁状态，有效解决逻辑冲突问题；

（3）对超时容错的设计，若设备动作之后的300 ms没有接收到反馈信号，便可确定为执行故障，系统采取强制复位、发布预警的方式进行处理[5]。

2.3 系统软硬件协同设计

以此次设计的硬件架构、程序逻辑为依托进行软硬件协同设计，能在系统运行过程中形成闭环机制，保证系统运行全过程自动化，解决了人工干预的相关问题。具体在系统软硬件协同设计中，主要有以下几点：（1）采集信号。系统正式运行之后，PLC主控模块不间断的扫描所有采集模块信号，设置采样周期为10 ms。采集信号后去除干扰信号，向联锁逻辑运算单元传输有效数据；（2）信号分析与判断。预先设置故障阈值、联锁逻辑，由运算单元对系统当下运行状态作出判断。若系统无故障，可继续监测；如果发现故障信号，便会以最快的速度确定故障等级、类型，启动相应的分级保护；（3）硬件硬联锁。日过PLC软件程序在运行过程中出现异常情况，或者通信突然中断，此时自动触发硬件继电器联锁，以强制的形式切断故障回路。如此一来，便可以在软硬件的协同运行下实时系统的双重防护。

3 系统调试与测试

3.1 分阶段调试

（1）硬件调试。按顺序检测各个设备与模块性能，包括供电情况、信号采集效率、动作性能等，完成模拟量采集精度和数字量信号通断的校验，此调试流程可以判断是否存在接线故障或元器件破损问题[6]；（2）程序调试。在线模拟不同的故障场景，对电压故障、电流故障等情况下联锁响应效果进行测试，判断系统故障判定精度、预警响应速度等；（3）联动调试。模拟多种故障同时出现、多设备协同联动的场景，测试系统的联锁性能，以免动作响应不及时，或排查逻辑存在冲突；（4）带载试运行。系统与真实负载对接，开启连续72 h的带载试运行，实时监测系统运行是否稳定。

3.2 系统应用测试效果

为验证此次设计PLC故障联锁保护系统的运行效果，观察系统测试过程，统计测试数据如表3所示。结合表3所示数据，此次设计系统满足通信供电系统持续稳定运行规范，而且与传统保护技术相比具有应用优势。

表3 PLC故障联锁保护系统优化设计前后性能对比

统计维度	设计前	设计后
故障响应时长	80 ms～120 ms	15 ms～20 ms
年均故障误动次数	12次	0次
年均故障拒动次数	3次	0次
局部故障扩散导致的供电瘫痪事故次数	4次	局部故障支持单点隔离，不会影响整个供电链路
设备故障率	65%	23%

4 结束语

PLC控制下的通信供电系统优化设计，应用故障联锁保护技术可以解决传统继电保护面临的响应不及时、保护逻辑固化等问题。此次设计采取软硬件协同、故障自愈调节等方式，切实提高了通信供电系统运行的稳定性以及故障排查与防控能力。未来，通信供电系统还需探索多元化故障识别方法，利用人工智能算法进一步提高故障识别与判定精度，在联锁保护技术的支持下增强通信网络运行的连续性和稳定性。

参考文献：

[1] 杨瑞宁.化工装置仪表联锁保护系统设计与可靠性提升措施研究[J].中国石油和化工标准与质量,2026,46(12):121-123.

[2] 霸振,王浩然,黄政华.油气田压缩机联锁保护系统优化研究[J].设备管理与维修,2026(11):34-36.

[3] 孙胜元.DCS系统在化工装置联锁保护中的应用与优化[J].中国机械,2026(10):102-105.

[4] 王国增,马运光,王安绪.蓄热式煤气热风炉自动点火及熄火联锁保护控制方法[J].冶金设备管理与维修,2024,42(04):43-44,47.

[5] 李钢,胡荣远,周劭亮,等.适用于多种供电方式的节点联锁保护方法[J].城市轨道交通研究,2023,26(11):198-202.

[6] 韦忠俊.浅淡如何降低煤气加压机PLC控制系统故障率[J].中国机械,2023(18):94-97.

基于模块化预制的火电机电安装施工技术优化研究

赵智慧

（中国能源建设集团江苏省电力建设第一工程有限公司，江苏 南京 210001）

摘 要 在火电机组容量增大与投产节点前移的双重压力下，机电安装沿用现场散件组对、高空焊接的传统方式，已难以兼顾精度要求与工期约束。模块化预制将设备、管道、支吊架、电缆桥架等分散安装对象，在具备工装与检测条件的场所组装为功能完整的整体单元，运至现场后整体吊装就位，从本质上重构了作业空间布局、工序衔接逻辑及质量安全风险的产生载体。本文从作业空间转移、工序时序重构、质量责任前移三条路径，分析模块化预制对火电机电安装施工的影响，指出该施工模式的应用效益无法自发实现，而受制于深化设计精度、模块刚度控制、运输吊装能力与界面管理水平，进而围绕模块划分与深化设计、工厂预制工艺与过程控制、大件运输与吊装就位、接口连接与安装偏差控制、资源组织与技术保障、成品保护与调试移交六个环节，提出可落地的优化做法，以期为同类火电工程机电安装的技术策划与现场实施提供参考。

关键词 模块化预制；火电机电安装；模块划分；大件运输；吊装就位

中图分类号：TM621 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.009

0 引言

火电机组正朝超超临界、二次再热方向推进，主辅系统的设备数量、管系规模与控制回路密度较早期机组明显增加，而工程建设周期受投产工期要求制约，持续收紧。机电安装处在设备到货与整套启动之间，作业面高度集中于锅炉钢架与汽机房内部，长期依赖现场散件组对与高空焊接，工序交叉重叠、机械化施工水平不足，成为限制工程总工期推进与实体施工质量提升的核心因素[1]。国家层面正持续推动建造方式转型升级，住房和城乡建设部等十三部门印发的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》（建市〔2020〕60 号）明确提出：“大力发展装配式建筑，推动建立以标准部品为基础的专业化、规模化、信息化生产体系”。其以标准化工厂生产替代现场作业的建造逻辑，同样适用于以安装工程为主体的电力工程领域。模块化预制正是这一逻辑的具体形态，它把安装对象的组装环节从施工现场剥离，转入具备工装、检测与环境条件的场所完成，现场只保留吊装、就位与接口闭合等有限工作。需要说明的是，模块化预制并非把现场工作原样搬进工厂，它对深化设计精度、模块承载与变形控制、大件运输吊装能力以及参建各方的界面管理均提出了新的要求。本文结合火电机电安装的专业特点，分析模块化预制条件下施工技术要素的变化，并就关键环节的优化提出具体做法。

1 模块化预制对火电机电安装施工的影响

模块化预制的作用不宜简单归结为工期缩短或质量提高，它是通过作业空间的转移、工序时序的重构与质量责任的前移三条路径产生影响，三大作用路径相互耦合、协同联动，共同界定了施工技术优化的核心方向。

1. 作业空间的转移最为直接。在传统安装中，锅炉受热面组合、主蒸汽与再热管系焊接、除氧器间管廊敷设等大量工作处在高空钢架内部，脚手架搭设量大、人员密度高、机械化作业空间与设备配置受限，焊接位置多为仰焊、横焊等困难位置。预制条件下，这些工作在地面胎架上以平焊位置完成，坡口加工机、自动焊机、翻转工装得以进场，机械化替代人工作业的比例明显提高[2]；现场则由“制造”退为“装配”，高空环节收缩为吊装就位与少量闭合口连接。该作业空间转移并非简单的作业位置更迭，可有效降低施工工序对现场气候条件、作业面移交进度的依附性，使原本必须等待条件的工作可以提前启动。

作者简介：赵智慧（1975-），女，本科，高级工程师，研究方向：能源项目施工。

2. 工序时序随之重构。传统组织受“土建施工—场地移交—安装插入”的线性约束，机电工作大多落在关键线路上，单一工序滞后将引发全线工期递延效应。模块化预制使预制加工与土建施工并行推进，关键线路的部分节点由串联变为并联，锅炉钢架封闭前的大件吊入窗口也得以主动利用。但并行的代价是前置要求收紧：深化设计出图、材料到货、模块制造与运输必须按吊装窗口倒排，任一前置工序延误均会导致现场吊装窗口空置，且窗口错失后需拆除已成型结构方可补施，造成的工期与经济损耗远高于常规工序延误[3]。

3. 质量责任与安全风险的位置同时发生偏移。焊接、组对等质量形成环节前移到可控环境，风速、湿度、温度等环境变量被隔离，预热与层间温度易于稳定，无损检测的实施条件也优于现场，有效提升工程实体质量的稳定性与基准水平。与此相应，质量控制的重心转向深化设计尺寸的准确性与出厂检验的严格程度：传统现场散装施工模式可实现单件尺寸偏差的实时修正，而模块化条件下一处接口坐标错误会在批量制造中被复制，返修需要拆解整个单元。安全风险的构成也发生置换，高处坠落与高空动火风险明显下降，超限运输倾覆、吊装失稳、模块运输变形等风险则上升，安全管理核心由管控分散人员作业行为，转变为管控少量高风险、大荷载的单次特种作业。

2 基于模块化预制的火电机电安装施工技术优化策略

针对上述变化，优化工作应沿模块从设计到成型、从运输到集成的完整链条展开，重点解决划分是否合理、预制是否精确、运吊是否可靠、接口是否可控、资源是否匹配、移交是否顺畅六个问题。

2.1 优化模块划分与深化设计

模块划分是全部后续工作的前提，模块划分方案不合理，将导致施工风险与技术难题后置至运输、安装阶段。划分应以系统功能边界和介质分区为主线，同一模块内尽量容纳完整的功能段落，杜绝为适配吊装重量参数，强行整合无功能关联的专业施工单元，也避免把调试界面切割在模块内部。在功能约束之外，还需以外部条件反向校核：运输通道的限宽、限高、转弯半径与桥涵承载能力决定模块的外廓尺寸与自重上限，现场吊车站位、工作幅度与起升高度决定单件的最大吊重，厂房结构的预留通道决定吊入顺序，任一约束条件不满足时，均需迭代优化模块划分方案[4]。深化设计须建立具备施工深度的三维模型，将设备本体、管道、阀门操作空间、支吊架、保温层厚度和电气敷设一并纳入，逐层开展碰撞检查并校验检修通道与人员通行条件。模型确认后统一编制模块编码，明确接口形式、坐标与预留调整量，闭合段应留有现场配制余量以吸收累积偏差，并把预制率作为衡量划分成果的量化指标，在项目策划阶段即予明确。

2.2 优化工厂预制工艺与过程控制

预制质量取决于工艺路线是否与介质参数相匹配，不宜采用单一工艺流程适配所有类型模块的预制施工。高温高压主蒸汽、再热热段等P91、P92材质管系应单独编制工艺，坡口采用机械加工成型，不允许以手工打磨替代；采用氩弧焊封底、自动焊填充盖面，预热温度按材质要求维持在200 ℃～250 ℃并控制层间温度，焊后进行760 ℃左右的高温回火处理，并做硬度与光谱复验，一经检出合金元素错配问题，对应模块整体做报废处理。中低压水系统与压缩空气管系可采用流水线组织，实行集中下料、集中焊接、集中试压。综合模块则以型钢框架为基准，先固定支吊架再敷设管线，保证框架在起吊与运输工况下具备足够刚度。所有模块均在刚性胎架上组对，胎架按设计支吊架位置模拟约束，防止脱胎后自重变形改变接口位置[5]。检测环节按介质等级分层设置，高压管道对接焊口实行全数射线检测，中低压管道按规范比例抽检并附加渗透或超声复检；水压试验、内部吹扫、酸洗钝化在出厂前完成，管口加装临时封盖并做标识。模块出厂前应复测关键接口坐标，随件移交材质证明、焊接与热处理记录、检测报告及模块合格证，形成可追溯档案。

2.3 优化大件运输与吊装就位方案

运输与吊装是模块化施工体系中风险集中度最高、施工容错率最低的核心环节，方案必须在模块开工前定型。运输前需完成全线路勘查，核算路基与桥梁承载能力，标注限高障碍并办理超限手续；装车时按模块重心设置支撑与加固点，长细比较大的管道模块应附加临时桁架抑制运输变形，行进中控制车速并对振动敏感设备加设减振垫。超大件宜采用液压平板车或自行式模块运输车，利用悬挂系统消化道路高差。吊装方案应与模块设计同步，吊耳位置经受力校核，并验算起吊工况下的局部失稳与焊缝承载。锅炉受热面等超重模块采用多点液压同步提升，控制各提升点的同步误差；双机抬吊须核算载荷分配并设置缆风绳限制回转；风力达到六级即停止起吊作业。就位阶段以全站仪配合激光跟踪进行实时监测，临时支撑在模块脱钩前形成有效约束。吊装顺序需与土建工况绑定，屋面封闭、行车梁安装前完成全部超限件吊入，避免后期开孔或二次拆装。

2.4 优化接口连接与安装偏差控制

模块化把大量质量风险集中到有限数量的接口上，接口控制水平直接决定系统能否可靠投运。接口应按连接形式分类管理：焊接接口以现场实测配制闭合段，必要时借助三维扫描对已就位模块逆向建模，避免按图下料造成强行对口；法兰接口检查密封面平行度与螺栓分级施拧顺序；母线与电缆接口核对相序、接触面处理与接触电阻；风管接口保证法兰平整与密封件连续。高温管系的接口不能只看几何贴合，应按《动力管道》（ASME B31.1）等动力管道规范复核弯矩、内压与热膨胀共同作用下的应力水平，据此确定是否采用冷紧及冷紧量，弹簧支吊架按冷态定位值锁定，热位移方向留足空间，防止模块拼装后形成额外约束造成运行期开裂。汽轮机本体与转动设备的对中不应受模块累积偏差影响，汽轮机安装过程中转子与汽缸的中心找正精度要求控制在 0.05 mm 以内，轴系对中偏差不得超过 0.03 mm，油系统冲洗后清洁度须满足设计等级。为抑制偏差累积，厂房内应建立统一的测量控制网，把预制场坐标系与现场坐标系归一，各模块以同一基准放样，杜绝逐件相对定位。接口完成后按系统划分调试界面，分系统试运前完成整体复查。

2.5 优化资源组织与技术保障

模块化预制把施工组织的重心从工序调度转向供应链协同，各类施工资源配置失衡，是导致模块化施工效益折损的核心诱因。预制场的产能应与本工程的模块峰值需求相适应，按吊装窗口倒排制造与运输计划并预留缓冲时间；模块编码与实物标识一致，采用二维码或射频标签记录制造、检验、运输与就位状态，堆场按吊装顺序分区存放并设置符合支撑要求的临时支墩，杜绝模块倾覆风险，减少二次搬运作业[6]。在人员方面，从事高压管道预制的焊工须按同等条件考试合格并保持连续作业记录，深化设计人员应具备机电与结构复合背景，吊装指挥与信号司索持证上岗。技术保障宜实行首件鉴定：同类型模块首件完成后组织建设、监理、施工与设备制造方联合验收，确认工艺参数与检验方法后再批量投产。在设备维护方面，坡口机、自动焊机、热处理设备与起重机械纳入定期点检，焊接电源与温控仪表按周期校验，履带吊在每次超重吊装前复核工况参数。此外，应搭建覆盖设计、制造、物流与安装的数据平台，使模块状态与进度偏差可视，现场发现的接口问题能反馈至深化设计并在后续模块中修正，形成闭环。

2.6 优化成品保护与调试移交

模块出厂后要经历堆存、运输、吊装和交叉施工多个阶段，成品保护不到位，会使预制阶段形成的清洁度与精度优势在现场流失。管口临时封盖应保持到闭合口施焊前方可拆除，阀门执行机构、仪表取源部件与电气盘柜加设防撞、防潮护罩，不锈钢及合金钢表面与碳钢隔离存放，防止铁离子污染；在已就位模块上方动火时铺设防火毯，禁止把模块框架用作吊点或脚手架生根点。移交环节按系统而非按模块组织，将各模块的出厂资料与现场接口记录合并为系统级档案，水压试验、吹扫与冲洗的范围应覆盖全部闭合口，验收合格后办理安装与调试的签证交接，避免因责任边界不清延误分部试运。

3 结束语

模块化预制为火电机电安装提供的不只是一种施工手段，更是一种重新分配作业空间、工序时序与质量责任的组织方式。其效益能否兑现，取决于模块划分是否兼顾功能完整与外部约束、预制工艺是否与介质参数匹配、运输吊装是否具备足够的安全裕度、接口控制是否抑制了偏差累积、资源供应是否与吊装窗口同步以及成品保护与调试移交是否衔接到位。上述六个环节相互依存，任一施工环节管控缺失，均会降低整体施工成效与工程收益。同时应看到，预制场建设、工装配置与大型起重机械投入构成相对固定的支出，工程规模、模块重复度与运输条件未达到一定水平时，宜在管廊、泵房、辅机岛等密度高、重复性强的部位实施局部模块化，无需盲目推行全范围模块化施工。随着标准化模块库、智能预制装备与数字化协同管控的逐步成熟，火电机电安装有条件从以现场为中心的建造模式转向以工厂为中心的装配模式，为工程质量、工期与安全水平的同步提升提供更可靠的技术支撑。

参考文献：

[1] 付晓华.机电安装工程质量安全及信息技术管理[J].机械与电子控制工程,2025,07(02):49-51.
[2] 王希昱.火电厂管道施工工艺中的关键节点控制与技术创新探索[J].现代工程科技,2023,02(18):30-32.
[3] 杨跃民.机电设备安装工程施工技术与质量管理探析[J].百科论坛电子杂志,2021(14):2777.
[4] 焦鑫.浅谈机电工程安装施工技术要点[J].建筑工程技术与设计,2020(14):482.
[5] 马丽娜.复杂工况下大直径供热管道施工技术应用[J].科学技术创新,2026(16):97-100.
[6] 董少岩.智能化背景下机电安装工程的工艺优化与成本控制[J].消费电子,2026(16):209-211.

基于数据驱动的多工艺协同优化及效率提升机制研究

陆建国，金俊伟，饶胜云

（浙江联宜电机有限公司，浙江 金华 322100）

摘 要 在机械制造中，焊接热输入和精密加工余量存在强因果关联，各工序参数独立设定容易导致误差沿工序链逐级放大，传统单工序优化无法解决上述问题。本文以CO_2气体保护焊、模具成型、搅拌摩擦焊等基础工艺作为研究对象，构建出跨工序参数协同调控的具体模型，通过工序间余量数字化传递与质量实时反馈机制，将焊接、成型以及精密加工纳入统一优化框架中。结果显示，搅拌头倾角优化使中厚板焊接效率提升了40%，精密磨削使硅片表面粗糙度降低到0.8 μm，多工艺集成优化使复杂零件制造周期缩短45%、生产效率提升42%，验证了协同优化方法在系统级效率提升中的有效性。

关键词 机械制造工艺；多工艺协同优化；精密加工；工艺参数；数据驱动

中图分类号：TP273 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.010

0 引言

在多工序集成的精密制造流程中，焊接热输入、成型收缩与精密加工余量三者间存在强耦合关联，若各工序的工艺参数独立设定、缺乏协同匹配，会导致加工误差沿工序链逐层累积放大。注塑阶段模温与保压压力的设定决定成型件初始精度，其残余应力还会影响后续磨削的尺寸稳定性，焊接热输入所改变的材料状态会直接传递到精密加工环节，各工序节拍差异造成的产能损失无法通过局部调整来消除。针对上述这些矛盾，本研究建立工序间余量数字化传递与质量实时反馈机制，把焊接、成型与精密加工纳入统一优化框架，从精度链与时间链两个维度实现制造效率的系统性提升。

1 面向协同优化的基础工艺参数建模

1.1 焊接工艺参数的数据驱动优化

在CO_2气体保护焊中，焊接电流、电压、送丝速度和热输入之间存在着强耦合关系，用单因素轮换法很难捕捉参数交互效应对焊缝质量的影响。本研究采用响应曲面法中的Box-Behnken设计，把熔深和焊缝宽度当作响应指标，建立焊接参数的二阶响应模型。通过方差分析识别出电流与送丝速度的交互项对熔深影响显著（$P<0.01$），根据这个确定了薄板（厚度＜12 mm）焊接的最优参数窗口。

在参数窗口内，系统依据模型输出自动匹配工形坡口双面单道焊方案。在角焊工况当中，6 mm焊脚对应着直线焊参数组，8 mm焊脚则触发横向摆动模式来保障熔深一致性。环境风速被纳入参数监控体系，当超过2 m/s时就自动预警并启动防风挡板，该措施让气孔缺陷率从改造前的3.2%降至0.5%以下[1]。

1.2 模具成型工艺的参数协同建模

在注塑成型的过程当中，模温、料温、注射压力和保压时间之间存在着显著的交互效应，只对单参数进行独立优化易导致收缩率和充填时间产生冲突。本研究依据920组ABS家电外壳的生产记录，采用响应曲面法里的Central Composite Design构建“四因素五水平”的实验矩阵，通过方差分析能够发现，料温与模温的交互项对于熔体流动前沿温度的影响显著，保压压力和保压时间的交互项主导着收缩率的变化（$P<0.01$）。经过期望函数多目标寻优之后，得到帕累托最优参数组合，即模温52 ℃、料温210 ℃、保压压力为注射压力的65%、保压时间15 s，此时收缩率稳定在0.5%～0.7%之间。

1.3 搅拌摩擦焊工艺参数优化

与模具成型的多参数协同逻辑一脉相承，搅拌摩擦焊也是围绕关键工艺参数精准调控来提升效率，该技术借助搅拌头旋转摩擦产生热量让材料塑性变形，单个搅拌头能连续焊接800 cm焊缝而无需更换，可有效降低辅助工时。参数优化按照板材厚度分级来实施：

作者简介：陆建国（1985-），男，本科，工程师，研究方向：机械设计与制造。

1 mm～6 mm 薄板采用 1°～2° 小倾角配置以避免背面压痕，6 mm 以上中厚板选用 3° 到 5° 倾角并配合焊接压力动态调节来确保材料充分塑化，插入深度是影响焊缝成形质量的关键变量，薄板控制在 0.1 mm～0.3 mm 防止焊透，中厚板设定约 0.5 mm 保证塑性材料充足流动，搅拌头转速维持在 400 r/min～600 r/min、焊接速度配合 60 mm/min～120 mm/min，通过数据监测形成最优参数组合（见表 1）[2]。中厚板焊接效率由此提升 40%。该技术已在航空航天及轨道交通铝合金结构件制造中得到广泛验证。

表 1 搅拌摩擦焊工艺参数设置规范

板材厚度 /mm	搅拌头倾角 /（°）	插入深度 /mm	旋转速度 /（r·min^{-1}）	焊接速度 /（mm·min^{-1}）
1～6（薄板）	1～2	0.1～0.3	400～600	60～120
＞6（中厚板）	3～5	0.5	400～600	60～120

2 精密加工技术的工艺优化策略

2.1 精密磨削工艺优化

精密磨削的表面质量会受到砂轮特性、加工参数和机床刚度综合影响。本研究使用平均粒径小于等于 3 μm 的金刚石磨粒砂轮，把振动幅度控制在 0.5 μm 以下，以进给速率、砂轮线速度和磨削深度作为自变量来建立表面粗糙度响应模型，结果显示磨削深度与进给速率的交互项对 Ra 贡献率最大，约为 58%，通过 280 mm硅片加工验证，参数优化后表面粗糙度从1.8 μm 降低到 0.8 μm，平面度达到 0.3 μm。液体静压导轨技术让直线度稳定在 0.4 μm 以内，微进给系统与空气静压主轴组合使用使批量加工平面度一致性保持在 0.3 μm～0.5 μm 范围内[3]。

2.2 精密拉削与研磨工艺协同优化

精密拉削和研磨抛光是连接粗加工与精加工的重要关键环节，工序间余量数据传递是达成精度匹配的核心要素。拉削工序中，专用内定位夹具把拉刀与工件内孔位置偏差控制在 0.005 mm 以内，保证内花键分度圆与内孔同轴度稳定达到 0.008 mm，检测数据会实时汇入系统数据库，抛光工序按照前序余量数据动态匹配相关参数，粗抛使用 W10 磨料、0.10 MPa～0.15 MPa 压力清除 0.02 mm～0.03 mm 余量，精抛换用 W3.5 磨料，压力降至 0.05 MPa～0.08 MPa。经在线检测反馈实现 ±0.005 mm 的余量传递精度控制，用陶瓷轴承球进行验证，两阶段抛光后圆度误差控制在 0.1 μm 内，批次合格率达到 98.2%。

2.3 超精密抛光工艺的应用与优化

在拉削与研磨工艺完成尺寸精度控制之后，超精密抛光作为精密加工的终端工序，进一步将表面质量提升到纳米级水平。超精密抛光主要包含化学抛光、电化学抛光和超声波抛光三种形式，其中超声波抛光凭借非接触加工优势得到最广泛应用。该技术利用声波对材料表面微观冲击效应实现去除加工，精度能够达到 0.02 μm，表面粗糙度偏差控制在 0.1 μm～0.2 μm，高频超声振动赋予磨料颗粒充足冲击能量，驱动表面微凸峰发生塑性变形或脆性断裂，液中研磨通过悬浮磨粒实现均匀材料去除，磨粒在液体介质中的分散状态直接影响研磨一致性[4]。机械化学研磨整合化学反应与机械作用，干式工况下，粒径为 0.01 μm～0.02 μm 的 SiO_2 磨粒化学活性比较强，能够有效提升局部区域的研磨效率，磁流体精密研磨通过磁场驱动磁性磨料在磁极间形成研磨剂层，对于模具型腔、叶片等异形曲面具备良好的自适应能力，其加工一致性与可重复性明显优于传统手工研磨（如表 2 所示）。各种抛光方式的工艺参数通过数据采集与分析来持续优化，从而形成与前序加工工艺相衔接的完整精密加工链。

3 多工艺协同集成的效率提升机制与验证

3.1 多工艺流程的数据驱动协同优化

本研究构建的协同架构有三个层次，数据层存储各类零件工艺参数，按“材料—结构—工序—参数”四元字段建档，匹配层依据新任务特征调取参考参数，用来替代经验试切的做法，控制层根据在线检测数据

表 2 精密加工技术效果对比

加工技术	加工精度 / μm	表面粗糙度 Ra/ μm	平面度 / μm	典型应用
精密磨削	0.9	0.8	0.3～4.8	硅片加工
精密研磨	0.1	0.05～0.81	0.015～0.048	激光反射镜、陶瓷轴承球
超声波抛光	0.02	0.1～0.2	—	复杂曲面
磁流体研磨	0.02	0.1～0.2	—	模具型腔、叶片

实时修正后序余量。复杂零件制造遵循三级加工逻辑，即“模具成型奠定外形→精密磨削保障尺寸→超精抛光提升表面”。以齿轮传动件为例，搅拌摩擦焊后实测变形量 δ 实时输入拉削工序，拉削余量据此调整为理论值加 δ，让最终精磨余量稳定在 0.15±0.02 mm，传统工艺里的正火热处理步骤可省略。在节拍平衡方面，依据各工序实际加工时间分布识别瓶颈工序，通过参数压缩或者并行配置消除制约因素。在本验证对象中，瓶颈工序（精密磨削）单件时间从 18 min 降到 11 min，整线节拍由 22 min 缩短至 13 min。

3.2 智能化装备在工艺协同优化中的应用

数据驱动的协同优化以智能化装备为执行载体，其作用能分为两个不同层面。执行层涵盖数控自适应系统（动态调节进给速率与冷却液流量）、刀具磨损预警系统（振动频谱分析评估剩余寿命）以及高精度位置伺服机构定位精度达 0.01 mm，轨迹偏差≤ 0.05 mm，以此保障各工序参数得以准确执行，数据层包含嵌入式机器视觉系统（在线识别尺寸偏差与表面缺陷）和工业物联网平台（统一汇聚工艺设备与质量数据），为工序间数据传递提供实时通道。两个层面协同构成“执行—采集—反馈—调整”的闭环[5]。

3.3 工艺集成优化的效率提升机制评价

在多工艺协同优化与智能化装备的共同支撑下，系统效率提升效果通过量化指标体系加以评价。生产效率提升率作为工艺优化效果的核心评价指标，其计算公式为：

$$\eta=\frac{T_0-T_1}{T_0}\times 100\% \quad (1)$$

式（1）中：η 为生产效率提升率，%；T_0 为优化前单件加工时间，min；T_1 为优化后单件加工时间，min。

多工艺协同优化带来的效率提升从精度链、时间链和能耗链三个维度进行机制解析。

1. 精度链维度——误差阻断机制。在传统的分散生产模式当中，各道工序都是独立进行加工以及独立开展检测的，尺寸偏差会沿着工序链一级一级地放大，最终就表现成精度失去控制。经过协同优化之后，各道工序之间设置了质量检测的节点，实测的偏差会实时反馈到参数数据库里，后续的工艺会依据这个动态调整加工余量。这种机制让不合格品在工序之间的流转率从改造之前的 12% 降低到了 4.8%，加工精度的稳定性（用 CPk 值来衡量）从 0.85 提升到了 1.32。

2. 时间链维度——辅助时间压缩机制。多工艺集成所带来的时间节约并非主要源于切削参数激进调整，而是来自工序间辅助时间的系统性消除。焊接完成后直接进入精密加工，避免了传统工艺里因工序衔接不畅所需的热处理等待，单件平均可节约 4.5 小时，同时也避免了重复装夹定位时间，单件平均节约 1.2 小时。两项合计让单件总制造周期从原来的 38 小时压缩至 21 小时，缩短幅度达到 44.7%。

3. 能耗链维度——材料与能源协同节约机制。通过对工序间余量进行数字化匹配，把粗加工余量从经验值 0.8 mm 压缩到 0.55 mm，使得材料去除量减少了 31%，对应的切削能耗下降约 35%。工序合并降低了中间转运与二次装夹时设备空转产生的能耗。综合这三项因素，单件产品综合能耗从改造前的 56.3 kWh 降到 36.6 kWh，降幅达到 35.0%。

上述三个维度的改进共同促成生产效率提升 42%、制造成本降低 25% 的协同优化成效，验证了本文协同优化方法的有效性。

4 结束语

本研究针对多工序集成制造中参数孤立且缺乏系统级优化方法的现状，基于响应曲面法建立了焊接与成型工艺的参数—质量映射模型，构建了工序间余量动态匹配的有效机制，从精度链、时间链和能耗链这三个维度揭示多工艺协同优化的效率提升机理，验证了制造周期缩短 45% 以及生产效率提高 42% 的实际效果。但研究仍然存在不足之处，模型主要依赖静态历史数据，对实时工况波动的响应不够充分，验证对象局限于轴类零件，其普适性还有待进一步检验。未来会融合数字孪生技术来实现动态决策，将验证拓展至薄壁件等复杂结构以检验方法适用性，引入有限元—数据驱动混合建模来量化热—力—精度多场耦合效应，推动协同优化向在线自适应方向升级。

参考文献：

[1] 祝耐成,杨德勇.镀锌板加工制造工艺优化研究[J].冶金与材料,2025,45(09):145-147.
[2] 杜启鑫,李博,靳凯峰,等.现代机械制造工艺的优化与应用研究[J].中国机械,2024(15):40-43.
[3] 张永延.智能制造模式下机械加工工艺的标准化[J].大众标准化,2025(23):26-28.
[4] 王伟.机械制造工艺及装备技术的应用分析[J].中国设备工程,2025(18):141-143.
[5] 吴少卿,李聪波,曹华军,等.高能效制造研究现状及展望[J].机械工程学报,2025,61(13):142-157.

基于 VB 语言的架空输电线路工程塔基断面图自动成图软件

宋朝峰

（安徽华电工程咨询设计有限公司，安徽 合肥 230051）

摘　要　在输电线路建设中，塔基断面图是一项十分重要的测绘成果，也是输变电线路结构专业设计不可或缺的基础依据。本文围绕采用 VB 开发的塔基断面自动成图软件，系统地探讨了其外业作业方式、测点编号规则、数据规范、测量手段以及利用 VB 完成塔基断面绘制等内容；同时，构建了输变电线路测量从野外数据采集到室内数据处理的完整技术方案，并自主完成了该软件的研制，以期为推动该软件在输变电线路工程中的广泛应用提供借鉴。

关键词　输变电线路工程；塔基断面图；VB 语言

中图分类号：TM753　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.011

0　引言

塔基断面是指以塔位中心为原点，沿指定方向（四/八/十二断面）采集的地形平距、高程及塔腿坐标数据，用于塔型选择、基础设计、土方计算和造价评估，是输电线路勘测核心基础资料。当前，塔基断面图的数据处理仍缺少通用化、标准化的软件支撑。该图件所表达的核心信息是各塔腿方位相对中心桩的距离差与高程差。由于野外采集普遍依赖 GPS，所得成果通常为坐标形式，所以内业阶段必须把每个测点逐一换算为平距、高差及方位角，再手工逐点输入并编辑成图。这种作业方式不仅进度慢、步骤杂，而且人为失误概率较高。为改变这一状况，可在外业环节引入观测要素名称编码，建立统一的编码规则，使现场采集、数据记录与草图绘制同步规范开展；内业则依据既定编码自动生成塔基断面图，从而显著提升整体作业效率。基于此，本文把 VB 程序引入架空送电线路塔基断面绘制，构建一种新型、高效的测绘流程：明确各塔腿外业采集编码标准，统一现场观测要求，并自主开发以 VB 为编程工具的塔基断面自动成图系统。该系统能够实现一键出图，避免手工录入带来的问题，旨在明显提高工作效率。

1　基于 VB 语言的架空输电线路工程塔基断面图自动成图软件编制方法及实现过程

1.1　塔基断面图简介

塔基断面图一般分直线塔和转角塔。常规塔型均为正方形塔，直线塔以塔位中心为原点，以小号侧线路为起始线，沿顺时针方向转 45 度为 A 腿方向，继续顺时针旋转以 90° 递加，分别为 B、C、D 腿；转角塔以塔位中心为原点，以小号侧线路为起始线，旋转 45° +a/2 为 A 腿（其中 a 为转角度数，左转为负，右转为正，数据计算时自动判断），继续顺时针旋转以 90 度递加，分别为 B、C、D 腿（见图 1）。

常规塔基断面测量，分别按 A、B、C、D 四个方向延伸测量约 20 m～50 m 不等，纵横比例尺均为 1:200。

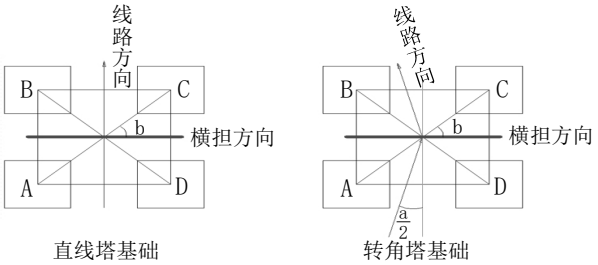


图 1　塔基断面平面示意图

1.2　塔基断面图编码

结合手持 GPS 终端录入点号的实际操作特征，并考虑外业测量的惯常做法，为本程序编制了相应的外业测量编码规则。该软件主要编码如下：

1. 转角桩。J(1～99)。

2. 直线桩。直线桩 Z(1～99)。

3. 转角桩塔基断面 A 腿，J(1～99)-100a……999a；B 腿 J(1～99)-100b……999b；C 腿 J(1～99)-100c……999c；D 腿 J(1～99)-100d……999d。

作者简介：宋朝峰（1982-），男，本科，高级工程师，研究方向：测绘工程。

4. 直线桩塔基断面A腿，Z(1～99)-100a……999a；B腿Z(1～99)-100b……999b；C腿Z(1～99)-100c……999c；D腿Z(1～99)-100d……999d。

在实际测量过程中，只要确认好各条塔腿的命名规则，内业数据处理时，对数据加以归类即可。

1.3 观测数据采集及文件格式

目前，塔基断面数据采集模式主要分全站仪采集和GPS-RTK采集。全站仪采集：通过全站仪逐点观测并记录斜距、垂直角、平距、高差等数据。GPS-RTK采集：现代常用方法，利用RTK技术直接获取测点的三维坐标（X，Y，H）。其优势是精度高、效率快，且数据可直接导入软件处理。在线路工程测量中，目前主要以GPS-RTK为主要采集手段，直线桩、转角桩等均为独立观测。

坐标数据文件可由全站仪或全球卫星定位差分流动站设备导出，其中每行记录表示一个测量数据，每行记录有四个字段，分别为测点名称、测点北坐标、测点东坐标、测点高程，中间以空格分开，测点点名采用该软件规定的格式命名，数据可现场随机采集，观测数据格式[1]示例如表1所示。

表1 塔基断面图测点编码示例

测点名称	测点北坐标	测点东坐标	测点高程
J8	3 324 909.899	598 183.54	826.275
Z17	3 324 900.12	597 494.84	725.928
J9	3 324 883.86	596 352.096	559.374
Z17-637a	3 324 897.67	597 497.134	728.046
Z17-638a	3 324 895.399	597 499.641	729.358
Z17-639a	3 324 893.199	597 501.964	730.492
Z17-640a	3 324 891.853	597 503.131	731.316
Z17-641a	3 324 889.723	597 505.588	732.018
Z17-647b	3 324 897.49	597 492.709	727.533
Z17-648b	3 324 896.469	597 490.941	727.829
Z17-649b	3 324 895.299	597 489.884	727.807
Z17-650b	3 324 892.336	597 487.468	728.127
Z17-651b	3 324 889.309	597 484.388	727.836
Z17-657c	3 324 901.967	597 492.996	724.556
Z17-658c	3 324 903.923	597 490.812	722.499
Z17-659c	3 324 904.769	597 490.098	722.06
Z17-660c	3 324 906.932	597 486.758	719.906
Z17-661c	3 324 908.485	597 485.849	719.052
Z17-662c	3 324 910.646	597 483.928	716.645
Z17-667d	3 324 902.166	597 496.846	724.862

续表1

测点名称	测点北坐标	测点东坐标	测点高程
Z17-668d	3 324 903.954	597 498.346	723.592
Z17-669d	3 324 904.897	597 499.541	722.883
Z17-670d	3 324 907.206	597 501.948	720.691
Z17-671d	3 324 908.237	597 502.931	719.639
Z17-672d	3 324 910.828	597 505.110	716.612

2 基于VB语言的架空输电线路工程塔基断面图自动成图软件编制原理

本软件采用Visual Basic实现，主要用于按编码规则驱动输电线路铁塔基础断面图的自动绘制。其核心流程如下：外业阶段先依据预设编码模板对量测对象作标记[2]，同时采集杆塔四腿断面信息，并记录塔位中心点与各腿在水平投影及剖切方向上的关联；之后把上述资料交由程序解析，生成AutoCAD可打开的DWG图。具体处理时，第一步以转角点作为参照，将空间坐标转为极坐标表达，并从中抽取出断面记录所含的编码字段与矢量联系；第二步对编码进行映射转译，使其符合DWG所需数据形式，进而完成基础断面图形的全自动绘制。整体结构包含四个单元：数据接入、坐标变换、编码解析和AUTO CAD导出，具体见图2。

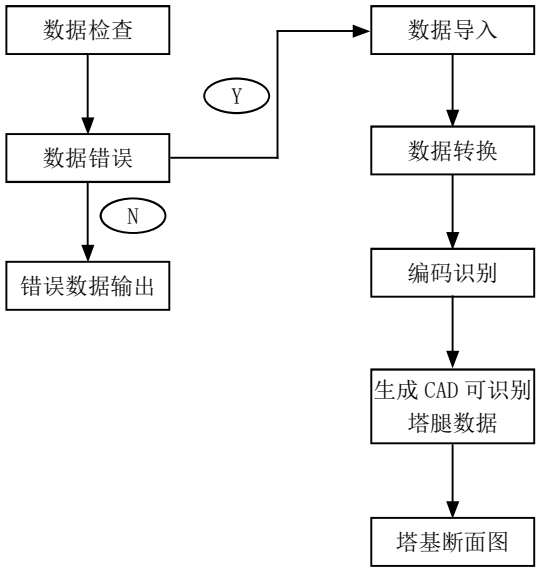


图2 软件结构图

3 基于VB语言的架空输电线路工程塔基断面图自动成图软件的实现

3.1 数据导入

在成批读入坐标点文件之后，先对其字段结构、特殊标记以及各塔腿测点是否归属于预先设定的塔腿

方位进行校验，并给出相应提示；随后依据塔腿类型建立彼此独立的数组分别保存，从而为后续数据提取和调用提供便利[3]。

数据导入后，软件将自动判断，塔腿数据是否在对应的塔腿方向线上，同时判断塔腿数据距离塔腿方向线的直线距离。

3.2 数据转换

软件首先提取塔位中心、前塔位中心、后塔位中心三个塔位坐标。

计算塔位前后方向线方位角：

$$\theta=|arc\ \tan(y2-y1)/(x2-x1)|$$[4]

x2-x1>0,y2-y1>0，则方位角 $\alpha_{12}=\theta$；x2-x1<0,y2-y1>0，则方位角 $\alpha_{12}=180°-\theta$，x2-x1<0,y2-y1<0，则方位角 $\alpha_{12}=180°+\theta$，x2-x1>0,y2-y1<0，则方位角 $\alpha_{12}=360°-\theta$，式中（x1,y1）为后塔位中心坐标；（x2,y2）为当前塔位中心坐标。

计算塔位转角度数：转角度数 $a=\alpha_2-\alpha_1$，则 A 腿方向线方位角为，$\alpha_A=\alpha_{21}+(\alpha_{23}-\alpha_{12})/2+45°$；B 腿方向线方位角为，$\alpha_B=\alpha_{21}+(\alpha_{23}-\alpha_{12})/2+135°$；C 腿方向线方位角为，$\alpha_C=\alpha_{21}+(\alpha_{23}-\alpha_{12})/2+225°$；D 腿方向线方位角为，$\alpha_D=\alpha_{21}+(\alpha_{23}-\alpha_{12})/2+315°$。

偏塔腿方向线距离计算：利用点到直线的距离判断测量塔腿方向点距离塔腿方向线的距离，距离超过 10 cm，软件自动判定点位错误，并将判定错误点位以 TXT 文本的格式导出，且提示点位错误的具体原因，例如测量点偏线距离超过 10 cm，则将测量点点名、偏线距离一一标出。

计算点到直线的距离，目前已知塔位中心坐标，塔基断面点坐标，及塔腿线方位角。

若直线经过点塔位中心 (x_1,y_1)，塔腿 A 方向方位角为 α_A（通过上式计算），待求点为塔基断面点 (x_0,y_0)，则塔基断面点到过点塔位中心 (x_1,y_1) 且方位角为 α_A 的直线的距离为 $d=|(x_0-x_1)\cos\alpha_A-(y_0-y_1)\sin\alpha_A|$。

3.3 编码识别

提取塔腿编码的点号后，按同一点号后缀名为同一塔腿的原则建立平面拓扑关系，以软件赋予的点代码建立塔腿连续关系，将同一塔腿方向线上的坐标、高程按由近及远的顺序，转换成极坐标距离、高差，再将高程、平面距离结合[5]绘制成塔基断面图。

3.4 成果输出

将塔基断面图按塔腿命名 ABCD 四条腿的顺序逐一绘制，并以塔位中心名称命名单元图幅，然后将数据保存为 AUTO CAD 可识别的 DXF 文件格式，再将文件统一导出至指定文件夹中，该文件可先使用 AUTO CAD 软件批量打开，先逐一核对，再将文件批量保存生成塔基断面图。

3.5 软件试运行

理论上采集塔腿数据点时，只能无限接近塔腿方向线的中心线，为兼顾外业测量效率和塔基断面图的精度，该软件默认塔腿方向线的偏线距离为左右 10 cm。同时，为方便设计人员识别各塔腿数据，软件自动将四条腿设置成不同的颜色，并在塔基断面线终线附近标注塔腿名称，塔腿名称颜色与塔基断面线颜色保持一致。

4 结束语

在基于 VB 语言的架空输电线路工程塔基断面图自动成图软件研发过程中，系统制定了统一的编码规则、数据格式和外业观测方法，参考了道亨 SVCAD 数据的塔基断面图[6]处理模式，明确了从外业数据采集、记录、编码到内业处理的完整技术流程；以 Visual Basic 为开发工具，构建了编码数据与 AutoCAD 图形文件间的自动化映射和转换机制，消除了野外采集与室内制图之间的数据隔阂，形成了一套面向电力杆塔基础断面绘制的高效作业方案。软件投用后，架空输电线路测量工作得以在质量、效率及内外业协同方面实现整体提升：人工二次录入和格式切换大幅减少，人为失误概率下降，成果的标准化程度与统一性明显增强。与此同时，对塔基断面各测点之间的空间逻辑进行深入解析，使断面轮廓得以高精度拟合。该成果使塔基断面外业测量效率提升 40% 以上，内业成图效率提升 95% 以上，显著压缩了测量专业工期。目前，该软件已在多家行业单位落地应用，在真实工程中展现出可靠的稳定性、良好的兼容性与较强的推广意义，可满足不同电压等级和多种地形背景下的塔基断面测量要求，未来在行业内具备较大的应用空间。

参考文献：

[1] 张吉春.VB6.0 在测绘资料整理中的应用 [J]. 工程建设与设计 ,2024(13):176-179.
[2] 张帅帅 , 王鸣翠 , 公明 , 等 . 基于 VB 的地上附着物清点测绘数据汇总程序设计 [J]. 城市勘测 ,2024(06):128-131.
[3] 梅挺 , 罗玉军 .Visual Basic 程序设计 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2018.
[4] 何荣 , 李长春 . 数字测图原理与方法 (第 2 版)[M]. 北京 : 煤炭工业出版社 ,2020.
[5] 董武钟 . 程森 .GPS 高程拟合在输电线路控制测量中的应用研究 [J]. 工程技术研究 ,2020(21):91-92.
[6] 田正杰 , 黄文华 . 基于道亨 SVCAD 数据的塔基断面图自动生成方法研究 [J]. 无线互联科技 ,2023(15):115-118.

多晶硅厂区电缆桥架巡检无人机搭载式红外检测系统研究

潘多明

（特硅基新材料有限公司，新疆 昌吉 831100）

摘 要 针对多晶硅厂区腐蚀性粉尘多、桥架分布跨度大、人工登高巡检风险高、电缆发热隐患难以早期识别的现实问题，本研究设计了一套无人机搭载式红外检测系统。结合厂区实际工况完成硬件选型、机载采集模块与地面解析平台搭建，规范红外图像采集流程，实现电缆桥架接头、线缆表层温度的数据采集、热异常标记以及缺陷初步判别。现场测试表明，该系统可完成长距离桥架非接触巡检，有效识别电缆局部过热、连接点发热隐患，降低现场作业安全风险，提升多晶硅厂区供配电运维智能化水平，在化工厂区电气运维领域具备良好的推广价值，可为同类企业电缆桥架智能巡检提供参考。

关键词 多晶硅厂区；电缆桥架；无人机巡检；红外热成像；设备运维

中图分类号：TM727；TH811 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.012

0 引言

多晶硅生产厂区设备密集、电缆桥架线路长，腐蚀性粉尘易侵蚀线缆接头与紧固件，造成接触不良发热、绝缘老化等隐患[1]。传统人工登高巡检劳动强度大、部分高风险位置难以接近，红外测温覆盖不全，隐蔽性发热缺陷难以及时发现，易引发电气火灾。无人机搭载红外热成像设备具有机动灵活、非接触检测优势，但针对多晶硅桥架的专用巡检系统研究较少，缺少适配粉尘环境的采集策略与缺陷判别流程[2]。基于此，本研究构建无人机搭载式红外检测系统，完成硬件配置与作业流程设计并开展现场试验，为多晶硅厂区电缆桥架智能化巡检提供技术方案。

1 多晶硅厂区电缆桥架巡检工况分析

多晶硅厂区属于化工生产场景，生产过程产生硅粉等腐蚀性颗粒物，长期附着在电缆桥架、电缆接头表面，会加速金属构件锈蚀，造成螺栓松动、接触电阻增大，运行时产生局部过热现象。厂区桥架分为室内工艺廊道桥架、室外长距离架空桥架，线路跨度大，部分桥架布置于设备上方，人工抵达作业点位难度高。常规人工红外巡检受观测角度、粉尘遮挡影响，测温误差偏大，漏检风险较高[3]。

厂区电缆桥架典型故障表现为电缆接头过热、线缆过载温升、桥架接地跨接件腐蚀发热、电缆绝缘老化升温。故障早期无明显外观变化，仅体现为温度异常，依靠可见光巡检无法识别，必须依托红外热成像手段捕捉温度差异。同时，厂区存在电磁干扰、局部气流、粉尘遮挡等干扰因素，无人机巡检需要规避设备构筑物，对飞行路径、红外采集参数提出约束条件。

从发热机理来看，电缆接头部位因压接工艺偏差、螺栓紧固力矩不足或腐蚀层介入，接触电阻显著高于线缆本体，在负荷电流作用下依据焦耳定律产生额外温升，长期运行加速绝缘热老化，最终可能引发绝缘击穿甚至相间短路。多晶硅厂区还原炉、氢化炉等大型用电设备启停频繁，负荷电流波动幅度大，接头部位承受周期性热应力，导致接头部位反复承受热胀冷缩应力，进一步加剧接触劣化进程。因此，建立高效、全覆盖的桥架温度巡检手段，对早期识别发热缺陷、防范电气火灾具有重要的工程意义[4]。

2 无人机搭载式红外检测系统总体方案

无人机搭载式红外检测系统分为机载采集子系统与地面解析处理子系统两大部分。机载部分由多旋翼无人机平台、红外热成像模组、可见光相机、数据存储传输模块组成；地面子系统包含地面站、图像解析软件、温度数据库，完成热图接收、温度读取、热异常点位标记、巡检台账输出[5]。

作者简介：潘多明（1988-），男，本科，高级工程师，研究方向：机械电子和光伏硅基、大化工企业设备完整性管理。

2.1 机载硬件选型

无人机选用工业级多旋翼机型，具备粉尘耐受能力、定点悬停、航线规划功能，满足厂区复杂环境下飞行作业。红外热成像模组测温范围 -20 ℃～ 150 ℃，测温精度 ±2 ℃，同步搭载可见光摄像头，实现红外—可见光图像同步采集，方便故障位置对照定位。机载模块具备防尘外壳，降低硅质粉尘对镜头的污染；机载存储单元保存原始红外图像，可实时回传关键画面至地面站。

红外热成像模块的工作原理是通过非制冷红外探测器接收被测物体表面发出的红外辐射，经光电转换和信号处理后生成温度分布伪彩图像。相较于接触式测温，红外热成像可在不停电、不接触的条件下对运行中电缆进行大面积温度扫描，尤其适合桥架密集敷设区域的快速筛查。系统配置时，发射率参数参照交联聚乙烯电缆绝缘表面设置为 0.85 ～ 0.9，环境温度参数由机载温湿度传感器实时修正，同时将机载激光测距模块测得的镜头至被测目标距离作为输入参数，纳入测温补偿计算，削弱厂区环境温度波动对测温结果的影响。

2.2 地面解析子系统

地面站实现无人机航线设置、飞行状态监控，接收机载回传图像数据。解析软件读取红外热图原始温度矩阵[6]，可框选桥架电缆接头、线缆本体区域提取最高温度及相对温差，参照《带电设备红外诊断应用规范》（DL/T 664-2025）及工业电缆运维判别标准，对温差超阈值区域自动标记疑似缺陷点位，生成巡检记录，保存点位、温度、现场图像，形成桥架巡检电子台账，便于运维人员后续复核处置。

3 无人机搭载式红外检测系统作业流程设计

3.1 巡检前期准备

开展现场踏勘，梳理厂区电缆桥架走向，标记构筑物、高大设备作为禁飞区域，规划自动巡检航线，设置悬停采样点位，重点覆盖电缆接头、三通弯头、电缆密集敷设区段。检查红外镜头洁净度，清理粉尘污渍，使用标准面源对红外模组进行现场测温校验，完成测温参数校准，避免厂区粉尘造成测温偏差[7]。

3.2 现场数据采集

无人机按照预设航线飞行，在关键点位悬停，同步采集红外热图像与可见光图像；镜头垂直或者小角度对准桥架被测部位，尽量减少粉尘、反光干扰。采集过程记录对应位置信息，每一处接头、密集线缆区域留存不少于 2 组红外样本。遇到大风、扬尘浓度过高天气停止巡检，保障成像质量。

3.3 数据解析与缺陷判别

将采集热图导入地面解析平台，提取被测区域温度，计算部件之间相对温差。依据《带电设备红外诊断应用规范》（DL/T 664-2025）中电流致热型设备的相对温差判据法，以接头与对应正常本体参照点之间的相对温差百分比 δ_t 作为核心主判据，结合设备负荷工况、环境温度完成修正后，按规范分档判定缺陷等级；同时将接头绝对温度结合设备额定载流量做差异化修正后作为早期预警辅助判据，形成多维度双重预警机制。同步匹配可见光图像确认现场位置，输出巡检报告，列明隐患位置、温度数据、风险等级，推送运维人员开展现场复核检修。对于标记为严重缺陷的点位，系统自动生成检修工单，关联历史巡检数据形成温度趋势曲线，辅助运维人员判断缺陷发展速率并制定消缺计划。

4 无人机搭载式红外检测系统现场测试与结果分析

选取某多晶硅生产厂区室外一段长 420 m 梯式电缆桥架开展系统测试，桥架敷设动力电缆，包含 22 处电缆中间接头。无人机飞行高度距桥架约 5 m ～ 8 m，镜头与被测面基本垂直，分别使用本无人机红外系统与传统人工手持红外测温同步开展对比巡检。

无人机巡检完成全部区段耗时约 42 min，识别出 3 处接头存在相对温差超标疑似发热点；后续人工登桥复核确认，3 处点位均存在紧固件锈蚀、接触电阻偏大问题，与检测结果一致。人工巡检全程需要登高作业，耗时约 135 min，受观测角度限制，1 处隐蔽接头前期未能有效识别。

测试结果表明，该无人机搭载红外检测系统巡检效率明显优于传统人工模式，能够捕捉多晶硅厂区粉尘环境下电缆桥架的早期发热隐患，规避人员登高作业风险。测试中也发现，当镜头表面附着硅粉会带来测温轻微偏移，作业中需要定时检查清理镜头；局部强日光直射场景，需要调整拍摄角度降低环境对热成像的干扰。

在测温准确性方面，对 3 处确认发热接头进行无人机红外测温与人工接触式复测对比，无人机测得接头区域最高温度分别为 68.2 ℃、71.5 ℃、65.8 ℃，人工接触式复测分别为 69.7 ℃、73.1 ℃、67.2 ℃，绝对误差均在 2 ℃以内，满足工业设备红外测温精度要求。在缺陷判别方面，3 处接头与相邻本体温差绝对值分别为 18.5 ℃、22.3 ℃、16.1 ℃，结合现场环境温度与负荷电流换算为相对温差（δ_t）后分别为 42.3%、51.6%、38.7%，对照《带电设备红外诊断应用规范》（DL/T 664-2025）中对应设备类型的电流致热

型缺陷分档阈值，均达到一般缺陷判定条件，判为一般缺陷及以上，与现场复核结论一致。

综合对比来看，无人机红外巡检在作业效率、覆盖范围、人员安全性三个维度均具有明显优势。效率方面，单架次可完成400 m以上桥架巡检，耗时仅为人工的三分之一左右；覆盖方面，无人机可从多个角度对桥架上下层、弯头、三通等人工难以接近部位进行成像，消除检测盲区；安全方面，作业人员无需登高，在地面站即可完成全部巡检操作，大幅降低高处坠落和触电风险。

5 无人机搭载式红外检测系统应用优化与改进策略

结合现场测试结果，针对多晶硅厂区高硅粉尘、强腐蚀、光照与电磁干扰复杂的现场工况，从硬件防护、图像识别算法优化、现场作业管控、数字化运维体系建设四个维度对本无人机搭载式红外检测系统开展优化改进，进一步提升系统检测精度、设备可靠性与智能化运维能力。

1. 硬件防护方面。硅质粉尘易黏附于红外镜头、机身散热缝隙，既会造成测温数据偏移，也会加速金属零部件腐蚀。可在红外热成像镜头前端增设可快速拆装的防尘抗腐蚀光学保护镜片，镜片选用抗硅粉磨损的光学材料，便于现场快速擦拭更换；对无人机机身、机载传输模块强化密封防护，提升整机防尘抗腐蚀等级，降低粉尘侵入内部电路的概率。同时，增加机载镜头自清洁辅助结构，在巡检间隙可快速清除镜头表面浮尘，减少因镜头积灰带来的测温误差，延长机载设备在化工厂区的使用寿命[8]。

2. 图像识别算法优化方面。厂区强光直射、粉尘散射会造成红外图像噪点多、局部反光伪温问题。可基于现场采集的大量桥架红外样本数据集，完善图像预处理算法，增加降噪、反光抑制、伪温剔除模块，削弱外界环境因素对热图质量的干扰。优化缺陷判别逻辑，结合厂区负荷波动特征动态修正相对温差与绝对温度双重判据，构建适配多晶硅电缆桥架工况的缺陷识别模型，区分真实发热缺陷与环境、光照带来的虚假高温，降低系统漏检与误检率，减少后期人工复核工作量。

3. 现场作业管控方面。推行分级差异化巡检策略。对于室外架空桥架、老旧线缆区段、还原炉等大功率设备供电桥架缩短巡检周期；结合厂区设备布局动态迭代巡检航线，更新禁飞区、障碍物数据库，优化悬停采样点位，保证电缆接头、三通弯头、线缆密集段全部纳入采样范围。严格执行天气准入条件，大风、高扬尘、强光暴晒时段暂停巡检，保障红外成像质量。

4. 数字化运维体系建设方面。完善地面解析平台数据库，对历次巡检温度数据进行归档，建立电缆桥架设备电子档案。对发热隐患点位持续跟踪，自动生成温度变化趋势曲线，实现缺陷风险动态评估，将传统事后故障排查转变为预测性维护，提升多晶硅化工厂区供配电运维的精细化水平。

上述四个维度的优化措施相互协同、层层递进：硬件防护从源头削弱环境干扰，算法优化提升数据质量与判读效率，作业管控保障巡检规范与覆盖度，数字化运维实现隐患全生命周期管理。四者同步推进可使系统在多晶硅复杂工况下的测温稳定性、缺陷识别准确率与运维响应速度得到整体性提升，为厂区电缆桥架安全运行提供更加可靠的技术保障。

6 结束语

多晶硅厂区特殊腐蚀粉尘环境下，电缆桥架接头发热隐患是厂区供配电安全的重要风险源，传统人工巡检效率低、作业风险高，部分点位存在检测盲区。本研究搭建无人机搭载式红外检测系统，完成机载硬件与地面解析平台配置，建立适配多晶硅厂区工况的巡检作业流程，现场测试验证系统可高效完成长距离桥架红外巡检，有效识别电缆接头、线缆局部过热缺陷，提升巡检作业安全性与检测覆盖面。未来需要进一步优化镜头防尘防护结构与图像预处理算法，削弱粉尘、强光对测温结果的干扰，完善缺陷智能识别模型，降低人工判读工作量。

参考文献：

[1] 隋宇,宁平凡,牛萍娟,等.面向架空输电线路的挂载无人机电力巡检技术研究综述[J].电网技术,2021,45(09):3636-3648.
[2] 张昊洋,刘英顺,张光远,等.无人机技术在输配电架空专业中的应用[J].农村电气化,2024(09):25-27.
[3] 沈洋.基于红外热成像技术的配电线路缺陷诊断技术研究[J].电工技术,2024(S2):657-659.
[4] 陈加文.红外热成像技术在配电线路缺陷诊断中的应用[J].农村电气化,2024(05):85-87.
[5] 邓琨,温启良,张渊渊.基于超声红外热像的电缆终端局部放电缺陷检测方法[J].红外技术,2022,44(09):972-978.
[6] 严丹昭,陈晶,兰旺耀,等.基于表层温度深度学习的电缆接头绝缘劣化非接触式诊断[J].红外技术,2024,46(06):712-721.
[7] 贾宏满,李腾,孙铁铮,等.基于红外技术的远距离电缆测温装置研制[J].东北电力技术,2023,44(10):17-20,52.
[8] 孙政樑,马立博,焦政国,等.无人机在架空输电线路智能巡检中的应用[J].农村电气化,2025(01):42-45.

多业务混流下 PVE 超融合集群网络抖动与脑裂问题治理研究

钟乐鹏

（广东南华工商职业学院，广东 广州 511510）

摘 要 开源 Proxmox VE 超融合架构低成本、自主可控，常应用于高校中小型私有云，多业务混流造成的网络抖动、丢包、脑裂制约平台稳定。本文基于七节点 PVE+Ceph 集群，针对心跳、虚拟机迁移、业务访问、存储读写场景剖析故障机理，依托 Corosync 与 Fencing 机制，定位流量抢占、优先级缺失、仲裁配置不当为主要诱因。采用物理网卡隔离结合 QoS 调控的双层方案，优化仲裁与故障隔离策略，搭建集群容错体系。实测优化后网络稳定无丢包，根除脑裂，高可用切换性能提升，满足高校教学科研虚拟化生产使用，可为同类 PVE 集群稳定性优化提供实践参考。

关键词 PVE 超融合；多业务混流；网络抖动；脑裂治理；Corosync

中图分类号：TP393 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.013

0 引言

高校数字化建设稳步推进，教学虚拟机房、科研算力集群等业务对虚拟化基础设施的稳定性、性价比要求持续提高。传统物理服务器资源利用率偏低、运维压力大，商用超融合存在厂商锁定、成本高、定制开发受限等短板，难以契合高校自主轻量化建设需求。基于 PVE+Ceph 的开源超融合可统一纳管计算、存储、网络，无商业授权，适合搭建高校私有云。但 PVE 集群默认单网承载全部业务，缺少流量隔离与优先级调度。七节点集群下，Corosync 心跳、Ceph 存储读写、虚拟机迁移、校园业务流量相互抢占，易出现时延抖动、丢包问题，轻则业务卡顿超时，重则心跳中断引发脑裂，造成业务瘫痪，阻碍该架构落地投产。因此，针对多业务混流场景治理 PVE 集群网络抖动与脑裂问题，具备较高的工程实践价值。

1 PVE+Ceph 超融合集群核心架构、流量机制与研究现状剖析

梳理知网及行业现有超融合集群相关研究可知，当前学界针对分布式集群脑裂、网络优化的研究主要集中于商用超融合平台、传统虚拟化集群及 Zookeeper、数据库等通用分布式中间件场景，形成了以“奇数节点过半仲裁、冗余心跳链路、故障节点隔离”为主的通用防脑裂体系。部分研究针对超融合网络抖动问题，提出了 VLAN 逻辑隔离、交换机参数调优、带宽限速等基础优化手段，为集群稳定性治理提供了通用思路[1]。但现有研究存在明显短板与空白：其一，针对性研究缺失，现有文献极少聚焦开源 PVE+Ceph 超融合架构，鲜有针对七节点多节点集群、四业务流量混传的专项研究，多数成果仅适用于双节点、三节点简易集群，无法适配多节点高并发场景的复杂网络冲突问题；其二，研究层次浅层化，现有工程类文献多为故障处置、单一配置优化的经验总结，仅解决表象问题，未深入剖析混流场景下“网络抖动—心跳丢包—集群分区—脑裂爆发”的链式耦合机理，缺乏系统性理论分析与闭环治理体系；其三，方案适配性不足，通用分布式集群优化方案未兼顾 Ceph 存储大流量、PVE 迁移瞬时峰值流量的专属特性，直接套用易出现存储超时、迁移中断等次生故障。当前高校开源超融合建设快速普及，但配套的稳定性优化理论与标准化方案滞后于落地实践。

本文基于生产级七节点集群实测场景，旨在弥补现有研究碎片化、通用化的短板，构建适配 PVE+Ceph 架构的精细化、分层化治理方案。基于现有研究的不足，开展递进式深化研究，核心内容与差异化创新点如下：一是机理深化创新，突破现有研究单一故障分析的局限，系统性揭示心跳、业务、存储、迁移四流混传的带宽抢占耦合机制，阐明网络抖动诱发 Corosync 集群

作者简介：钟乐鹏（1983-），男，硕士研究生，助理研究员，研究方向：大数据、云计算。

脑裂的完整链式成因，填补PVE多节点混流故障机理的研究空白；二是方案体系创新，区别于现有文献单一逻辑隔离、简单参数调优的浅层方案，构建“物理网卡硬隔离+QoS优先级软调控+仲裁参数精调+Fencing兜底隔离”的四层闭环治理体系，兼顾网络传输优化与集群分布式一致性保障；三是场景适配创新，针对高校教学、科研业务波动特性与七节点集群架构特点，优化Ceph存储超时参数与HA切换阈值，规避通用优化方案的适配漏洞；四是实证落地创新，区别于纯理论仿真研究，基于真实生产集群完成72小时高负载实测，量化验证优化效果，方案可直接复用落地。

1.1 PVE超融合集群架构

本文采用七节点PVE超融合架构，奇数节点架构可依托分布式多数派原则，从底层降低脑裂发生概率。集群以PVE为虚拟化管控核心，承载虚拟机与容器调度，整合Ceph分布式存储构建统一资源池[2]，依托Corosync组件完成节点状态监测、心跳同步与仲裁投票，配合Fencing设备实现故障节点强制隔离，保障集群高可用运行。集群运行依赖四类核心网络流量，各类流量特性差异极大，是引发网络冲突的根本原因。

1.2 核心流量特性与集群机制

Corosync心跳流量为小额高频数据包，对延迟、丢包极度敏感，是集群节点状态判定的核心依据；Ceph存储流量为大带宽、持续性读写流量，带宽占用率高，极易挤占其他流量[3]；虚拟机迁移流量为瞬时峰值流量，短时间内会消耗大量网络资源；校园业务流量波动频繁，对网络稳定性要求较高。

Corosync集群采用多数派仲裁机制，正常运行需满足法定投票节点数量。网络分区、心跳丢包会导致集群分裂为多个子集群，各子集群独立选举主节点，引发脑裂故障。Fencing隔离机制是集群防脑裂的关键兜底手段，可强制下线故障节点，避免资源冲突。

2 多业务混流故障成因分析

2.1 网络抖动与丢包成因

开源PVE默认组网无流量隔离与优先级策略，四类流量共用物理链路，形成严重的带宽抢占冲突。Ceph持续读写流量长期占用主干带宽，导致心跳数据包传输拥堵、延迟升高；虚拟机迁移瞬时大流量突发，直接挤压高频小额心跳包，造成数据包丢失；业务流量动态波动进一步加剧网络拥塞，最终形成持续性网络抖动与间歇性丢包。该问题在七节点多并发集群中尤为突出，节点数量越多，流量交互越频繁，网络冲突风险越高。

2.2 集群脑裂诱发机制

结合现有文献的通用脑裂理论与PVE集群专属特性可进一步深化分析：现有分布式集群研究证实，奇数节点可通过过半投票原则降低脑裂概率，但本文实测发现，该结论仅适用于网络链路纯净、流量单一的理想场景。在七节点PVE+Ceph混流集群中，Ceph持续大流量与虚拟机瞬时迁移流量会造成局部网络分区，使集群节点分裂为票数接近的不均衡子集群，打破奇数节点的仲裁优势。同时，现有多数运维方案仅依赖默认Fencing配置，未针对PVE集群细化隔离规则，故障节点无法快速强制下线，心跳断续恢复后易出现双主共存、资源抢占叠加问题，最终引发Ceph副本错乱、HA机制失效等严重故障，这也是现有研究未充分阐释的混流场景专属风险。

3 系统化治理优化方案

3.1 网络分层隔离优化

针对多流混传核心痛点，采用物理网卡独立组网方案，彻底隔离四类业务流量，从硬件层面杜绝流量抢占。为Corosync心跳网络配置独立高速网卡，专属承载集群控制报文，保障心跳链路纯净稳定；单独部署Ceph存储网络，隔离大容量存储读写流量，避免存储流量干扰集群控制与业务传输；拆分业务网与虚拟机迁移网，实现校园用户访问与节点迁移流量相互独立。物理隔离后各类流量互不干扰，从根源解决带宽抢占问题。网卡隔离收益受制于PCIe带宽与NUMA亲和性配置。为实现硬件层的最优隔离效果，七节点部署中为心跳网卡和存储网卡分配不同PCIe通道，中断绑定至对应NUMA核心，避免跨域内存延迟；交换机侧划分独立STP域与组播路由表，防止组播报文被IGMP查询干扰。该方案虽增加单节点两片网卡投入，但彻底消除L2/L3层流量冲突，长期稳定性收益远超成本。

3.2 QoS流量优先级调控

在物理隔离基础上，配置交换机QoS流量优先级策略，构建精细化流量管控体系。将Corosync心跳控制流量设置为最高优先级，保障极端网络负载场景下心包零丢失、低延迟；将核心教学、科研业务流量设为次级优先级，保障业务访问稳定；对Ceph存储读写流量、虚拟机迁移流量进行带宽限速，限制瞬时峰值，避免大流量报文挤占核心控制流量。通过优先级分级管控，平衡各类流量传输需求，兼顾集群稳定性与业务性能。QoS策略的实际效果依赖交换机缓存队列深度与调度周期的合理匹配。依据七节点集群并发流量峰值，将交换机出口队列缓存划分为控制队列、业务

队列、存储队列、迁移队列，并设置队列调度周期为 100 μs。针对 Ceph 存储流量中的 OSD 同步报文与业务读写报文进行二级分类标记，确保存储内部副本同步不挤占前端业务读写带宽，使 QoS 策略从粗粒度流分类升级为细粒度应用感知。

3.3 Corosync 仲裁与 Fencing 机制优化

结合七节点集群特性优化仲裁参数，精准配置集群法定投票数、心跳超时阈值与节点投票权重，适配多节点网络波动场景，降低节点离线误判概率。严格规范 Fencing 故障隔离设备配置，启用节点强制下线机制，当集群检测到节点心跳中断、状态异常时，立即触发隔离策略，强制清除故障节点集群资源，阻断异常节点参与集群投票，彻底规避网络分区后的脑裂风险，形成“网络优化 + 仲裁调控 + 故障隔离”的三重防脑裂体系。仲裁参数优化必须与集群时钟同步精度协同调优。同步部署 PTP 高精度时钟同步协议，将七节点间时钟偏差控制在 1 μs 以内，避免时钟偏移导致心跳超时计数器累积误差。此外，细化 Fencing 执行器的优先级排序，优先采用交换机端口禁用方式隔离节点，失效后降级为 IPMI 电源复位，再失效则启用备用管理网口的 ARP 阻断，形成三级执行器串联保障，确保任意单点故障不影响隔离操作最终生效。

3.4 集群辅助稳定性优化

优化 Ceph 存储网络读写超时参数，适配优化后网络链路特性，避免网络小幅波动引发存储读写超时与副本同步异常[4]；调整 PVE 集群 HA 故障切换阈值，过滤瞬时网络抖动干扰，避免虚拟机频繁误切换；关闭集群中非必要的系统日志聚合服务与未使用的存储网关服务，降低节点资源与网络开销，进一步提升集群整体稳定性。辅助优化参数基于网络实测基线迭代校准。以 72 小时监控数据标定正常波动范围，将 Ceph 的 osd_op_timeout 从 60 秒调至 45 秒，与优化后存储网络时延匹配，避免超时过长掩盖异常；PVE 的 ha_failover_timeout 设为 30 秒，滤除短于 10 秒的瞬时毛刺；启用迁移流量压缩传输，减少对控制链路的间接影响，实现各辅助参数协同收敛。

4 测试验证与结果分析

4.1 测试环境与方案

测试基于七节点 PVE 超融合生产集群，硬件配置统一，搭载 Ceph 分布式存储，模拟高校高并发业务场景。分别采集优化前后的网络延迟、丢包率、集群稳定性、HA 切换成功率四项核心指标，通过高并发业务负载、虚拟机批量迁移、网络波动模拟等场景，验证优化方案效果。

4.2 测试结果分析

网络性能方面，优化前多业务混流场景下网络延迟波动大，存在间歇性丢包问题，Ceph 读写偶发超时；优化后各类流量传输稳定，网络延迟波动极小，无随机丢包、链路拥堵现象，存储读写持续稳定[5]。集群稳定性方面，优化前高负载场景下存在心跳超时、集群分区隐患，偶发 HA 切换异常；优化后连续 72 小时高负载运行，集群节点状态同步正常，无网络分区、无脑裂故障。故障容错方面，模拟单节点离线、瞬时网络波动场景，集群可精准识别故障节点，Fencing 隔离及时有效，HA 自动切换平稳无业务中断，容错能力大幅提升。

5 结束语

本文立足于开源 PVE 超融合架构的专属特性，结合七节点多流混传复杂场景，揭示了网络抖动与脑裂的耦合发病机理，构建了多层级闭环治理体系。方案有效弥补了通用分布式集群优化方案在 PVE+Ceph 架构中适配性差、落地性弱的短板，解决了现有研究重理论、轻实测、无场景适配的问题。经生产集群实测验证，优化方案可彻底解决多业务混流引发的网络不稳定与集群脑裂问题，适配高校轻量化开源超融合平台的生产运行需求，相较于现有研究成果，具备更强的场景针对性与工程落地性，可为同类开源虚拟化集群的稳定性优化提供标准化实践参考。未来研究可结合智能流量调度技术，实现多业务流量动态自适应调控，同时完善集群网络监控告警体系，实现网络抖动、心跳异常等隐患的提前预警与智能处置，进一步提升开源超融合集群的智能化运维水平与运行稳定性。

参考文献：

[1] 张志强.基于SDN的数据中心超融合网络资源调度方法[J].电子设计工程,2025,33(19):132-136.
[2] 王光林.基于Proxmox VE+Ceph+HA的智能运维架构[J].黑龙江广播电视技术,2025(04):46-49,89.
[3] 李博,颜靖艺.全闪存Ceph的混合优化策略研究[J].计算机应用与软件,2024,41(06):128-133.
[4] 苗宇豪,范中磊,张墨翟,等.基于Ceph存储的数据均衡分布算法[J].微电子学与计算机,2024,41(03):90-97.
[5] 王磊.基于Proxmox VE超融合虚仿教学实训平台的设计与实现[J].科学技术创新,2025(10):113-116.

工业机器人视觉引导系统在精密装配线上的应用可靠性分析

吴建亭

（广东晟盈智能装备有限公司，广东 东莞 523808）

摘 要 工业机器人视觉引导系统在精密装配中的可靠性取决于标定、识别、定位与对位装配全链路的误差控制能力，单一环节的精度提升难以解决误差在传递过程中的耦合放大问题。本文从全链路误差传递机制切入，分析相机标定、工件识别、位姿解算与机器人对位装配各环节的误差源及其耦合效应，识别视觉标定漂移与定位精度衰减、光照条件波动与工件识别的一致性退化等典型扰动与失效模式，提出基于误差溯源的标定漂移补偿、光照自适应处理与特征鲁棒性增强、多源传感冗余与装配力控的协同验证的可靠性增强策略，并结合典型装配工况进行验证，以期为相关人员提供参考。

关键词 工业机器人；视觉引导；精密装配；全链路误差源；误差传递

中图分类号：TP242.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.014

0 引言

精密装配线对工业机器人视觉引导系统的定位精度要求通常在微米至亚毫米级，系统在实验室标定环境下表现出的精度指标与产线长期运行后的实际表现之间存在明显落差。视觉标定漂移、光照条件波动、工件一致性偏差等因素在单一环节评估中看似可控，但在全链路叠加后引发的末端装配偏差往往超出预期。已有研究多聚焦标定算法或识别精度的单向优化，对误差在标定、识别、定位、装配链路上的传递机制分析不足。本文从误差传递与耦合的视角切入，分析工业机器人视觉引导系统的可靠性影响因素，提出针对性的增强策略，并结合典型工况加以验证。

1 工业机器人视觉引导系统在精密装配线上的误差传递机制

1.1 全链路误差源解析

工业机器人视觉引导系统的误差并非产生于单一环节，而是沿着“相机标定→工件识别→特征匹配→位姿解算→机器人对位装配”这一链路逐级传递并累积的。

相机标定环节的内外参标定精度构成后续所有视觉测量结果的基准，标定残差会直接映射到工件位置的测量值中[1]。工件识别环节依赖于对工件边缘、角点或特定纹理特征的稳定提取，光照变化与工件表面状态差异均会影响特征提取的一致性。位姿解算环节将二维图像特征转换为三维空间坐标，解算精度取决于特征匹配的准确性与标定参数的可靠性。

1.2 误差传递的耦合放大效应

各环节误差在传递过程中并非简单叠加，而是存在耦合放大效应。

标定残差在特征匹配时产生初始偏移，该偏移经位姿解算后转化为末端装配偏差，偏差量在传递过程中被逐级放大。光照波动对标定和识别两个环节同时产生扰动，标定板在不同光照下的对比度差异影响角点提取精度，工件表面反光特性变化影响特征识别的一致性，两个环节的偏差在位姿解算阶段叠加后，末端装配偏差呈非线性增大趋势。耦合放大效应的存在意味着即使各单一环节的精度指标均在允许范围内，全链路累积后的末端偏差仍可能超出装配公差要求，这也是视觉引导系统在实验室环境下表现良好而在产线长期运行中可靠性下降的重要原因。

2 精密装配工况下工业机器人视觉引导系统的典型扰动与失效模式

2.1 视觉标定漂移与定位精度衰减

工业机器人视觉系统在连续运行中受温度变化、机械振动和安装结构微变形的影响，相机内外参数会产生缓慢漂移。这种漂移不是突然发生的，单次漂移

作者简介：吴建亭（1991-），男，本科，工程师，研究方向：智能产线与机器视觉。

量在几微米量级时系统仍能维持正常工作，定位偏差在装配公差范围内，过程监控很难发现异常。但经过数周或数月的累积后，末端定位偏差逐渐超出装配公差允许范围，产品一致性开始出现波动。标定漂移的隐蔽性在于它不是突发故障，而是渐进退化，从初始标定精度到超出公差范围的全过程可能没有任何报警信号，往往在批量性质量波动出现后才被发现。定期标定维护周期过长、对漂移累积的监测手段缺失，是这类失效在产线中反复出现的深层原因。

2.2 光照条件波动与工件识别的一致性退化

精密装配线环境中的光照条件并非稳定可控，车间照明变化、工件表面油污或氧化导致的反射特性差异、相邻工位设备遮挡产生的局部阴影，都会影响视觉系统对工件特征的稳定提取。光照波动对精密装配的影响比对一般搬运或分拣更为敏感，后者对识别精度的容忍度较高，即便特征提取出现小幅偏移，抓取成功率未必受到明显影响；前者在亚毫米级定位要求下，微小的特征偏移即可能导致装配位置偏差，造成卡件、过压或装配不到位。实际产线中完全依赖单一光源和固定阈值进行特征提取的做法，对光照变化的适应能力有限，环境光条件稍有波动，特征识别的一致性和稳定性就会受到干扰。

2.3 多批次工件一致性偏差引发的位置补偿失效

同一型号不同批次的工件在尺寸公差、边缘毛刺和表面纹理上存在差异，视觉系统在示教阶段建立的模板与实际运行中识别的工件特征之间存在偏差。当工件一致性偏差超过视觉系统预设的匹配容忍度时，位置补偿算法会出现收敛到局部最优而非全局最优的问题，补偿后的位姿与实际装配位姿之间产生残余偏差。以电子连接器插装为例，不同批次的连接器外壳注塑成型后边缘毛刺的分布位置和尺寸可能不同，视觉系统在示教时以光滑边缘建立的模板，在实际运行中遇到带有毛刺的工件时，识别出的边缘位置存在微小的系统性偏移，会误导系统做出错误的位置补偿，结果是批量装配中同类型位姿偏差反复出现，而不是随机性失误。

3 工业机器人视觉引导系统在精密装配线上的应用可靠性增强策略

3.1 基于误差溯源的标定漂移补偿

标定漂移的累积性决定了它不能仅靠出厂时的一次标定来解决，需要建立定期校准与漂移补偿的常态化机制[2]。比较实用的做法是在装配工位上设置一个固定参考基准，比如一块位置已知且精度经过验证的标定板或基准块，机器人按预设周期移动末端执行器至基准位置，视觉系统采集基准图像后与初始标定时的基准数据进行比对，计算出当前的标定漂移量并自动补偿修正值。漂移量超过预设阈值时触发重标定流程，阈值可以根据装配公差倒推确定，一般设定为装配允许误差的 1/3 到 1/2 比较合适，留出余量给后续的识别和定位误差（见表 1）。

表 1 标定漂移补偿的关键参数与设定依据

参数名称	设定依据	精密装配典型取值范围
校准触发阈值	装配允许误差的 1/3 至 1/2	5 μm～15 μm
基准件精度等级	高于装配公差一个数量级	1 μm～3 μm
初始校准间隔	投用初期漂移速率尚未稳定	1 周～2 周
稳定期校准间隔	根据累积漂移数据动态调整	1 个月～3 个月

校准周期的确定不是固定不变的，系统刚投用阶段可以适当缩短校准间隔，积累一段时间的漂移数据后，根据漂移速率的变化趋势动态调整校准频率，比固定周期校准更贴合实际运行状态。

3.2 光照自适应处理与特征鲁棒性增强

光照波动对精密装配的影响不像标定漂移那样隐蔽，但它的随机性更强，往往和车间白夜班交替、天气变化、设备维护后的环境光条件变化绑定在一起。

从硬件层面看，光源配置上采用多角度组合光源配合漫反射板，能在一定程度上抵消工件表面反光特性变化对特征提取的干扰，偏振滤光片也可以滤除一部分金属表面的镜面反射。从软件层面看，光照自适应处理的关键是让算法对不同光照条件下的图像有相对稳定的响应，直方图均衡化和自适应阈值处理能在一定范围内补偿整体亮度变化，对局部阴影的改善效果则有限。更有效的做法是在特征模板训练阶段就引入多光照条件下的工件图像样本，让算法学习不同光照条件下工件特征的表现差异，提高匹配鲁棒性。这种做法前期需要额外采集一些数据，但一旦完成训练，在后续运行中就不需要频繁调整参数。实际应用中可

以将光源硬件的优化和算法训练的优化结合起来，硬件兜底常规光照波动，算法弥补硬件的适应死角，两方面的改善叠加起来效果会比单一措施可靠得多。

3.3 多源传感冗余与装配力控的协同验证

工业机器人视觉系统在精密装配中承担的是“看”的角色，但仅靠视觉定位在某些工况下存在局限性，工件表面反光过强或过弱、特征局部被遮挡、环境光突变导致识别失败，这些问题在纯视觉方案下都会直接导致装配偏差。

引入力觉传感作为辅助手段，相当于为系统增加了一个独立的验证通道[3]。机器人在装配过程中通过末端力传感器实时监测装配力变化，正常装配时力变化曲线呈现特定的规律，即初始接触时力缓慢上升，工件进入导向槽时力趋于平稳，装配到位时力再次上升到达预设值[4]。当视觉定位出现偏差，工件与装配位置之间存在位置差时，接触力的变化曲线会偏离正常规律，表现为力上升过快或接触位置异常，系统可以据此判断视觉定位可能出现问题，触发二次定位或停机待处理。视觉与力觉的协同不是简单的并联冗余，而是分工协作，视觉负责快速定位，力觉负责精细验证和异常拦截，两者的优势互补。

4 典型装配工况下工业机器人视觉引导系统的应用可靠性验证

选取某医用缝合线热硬化装针全自动生产线上缝合线和缝合针的精密装配工序作为验证场景，该工序要求视觉引导系统精准定位缝合线线头，对齐目标工位后完成穿针装配，工序允许的最大装配位置偏差为 ±0.05 mm。产线连续运行三个月，其间经历了白夜班交替、多批次物料切换、设备维护停机及重启等全工况生产状态，本次验证未人为干预、调整原有生产节奏，完全贴合实际量产工况。

验证期间采集了三类关键数据。在标定漂移方面，在装配工位设置固定基准块，每周开展一次在线精度比对，三个月内设备最大标定漂移量控制在 4 μm 以内，未超出 8 μm 的预设校准阈值，全程未触发设备重标定流程，视觉定位基准稳定性良好。在光照波动方面，车间白班和夜班的照度差约 30%，夜班工件特征识别的一致性在启用光照自适应处理后与白班基本持平，没有出现因光照变化导致的匹配失败。在工件一致性方面，三个月量产周期内共切换四批次缝合线与缝合针医用物料，其中单批次缝合线截面轮廓与初始示教模板存在明显差异，视觉系统在初期出现了约 0.03 mm 的定位偏差，触发了力觉异常检测，后续通过优化匹配模板参数，快速恢复标准装配定位精度，保障了产线持续稳定生产。

王新等[5]搭建的工业机器人单目视觉装配系统以法兰盘为装配对象进行实验测试，采用 Eye-in-hand 式手眼系统完成相机标定与手眼标定，通过椭圆检测识别零件轮廓并结合外部标记辅助实现位姿解算。10 次装配实验结果表明，系统最大位置误差为 3.97 mm，最小位置误差为 2.07 mm，姿态角最小误差为 0.13°。该研究针对金属零件弱纹理及无角点特征的位姿估计问题提出了解决方案，但实验在实验室条件下完成，位置误差在毫米级，与精密装配要求的微米至亚毫米级定位精度存在差距，系统在长期连续运行中的可靠性数据也有待积累。

综合来看，本文验证的视觉引导系统在真实产线工况下承受住了标定漂移、光照波动和工件一致性变化这三个方面的持续扰动，基于误差溯源的漂移补偿、光照自适应处理和力觉协同验证三种策略的组合应用对提升系统长期运行可靠性具有实际效果。与实验室条件下的装配实验相比，产线连续运行验证更能反映系统在复杂工况下的真实可靠水平。

5 结束语

工业机器人视觉引导精密装配系统的运行可靠性，依托标定、目标识别、空间定位与对位装配全流程的误差管控水平。各工序误差逐级传递并相互耦合放大，是设备长期工作后装配精度逐步衰减的关键诱因。标定漂移、光照条件波动、工件制造一致性偏差是现场三类主要干扰因素，仅优化单一环节参数无法满足整体精度要求。本文采用误差溯源思路，通过标定漂移补偿、光照自适应图像处理、视觉力觉协同验证方案抑制误差累积。产线实测表明，整套方法可将末端定位偏差稳定控制在装配公差区间。未来可针对多品种混线工况开展试验，完善策略通用性，推动误差预测模型嵌入产线平台，逐步实现由周期性维护转向预测性维护。

参考文献：

[1] 许鸿萍.视觉引导工业机器人的标定与工件识别方法研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(11):210-212.
[2] 于冠军.工业机器人视觉定位系统高精度标定研究[J].机器人产业,2022(03):92-94.
[3] 崔坤坤,段晋军,姜锦程,等.基于视/力多源信息融合的机器人精密装配研究[J].机械制造与自动化,2023,52(05):6-10.
[4] 张平华.多机器人协作中提高装配精度的几种方法分析[J].机电信息,2022(10):47-51,55.
[5] 王新,郭俊.工业机器人单目视觉装配系统研究[J].机械设计与制造,2024(06):342-347.

市政给排水长距离顶管施工技术研究

朱国权

（广东华飞工程有限公司，广东 清远 511500）

摘 要 为全面提升市政给排水工程施工中的长距离管道施工质量，解决管道施工中面临的轴线偏差、顶力异常等情况，本研究结合某市政给排水工程项目实际情况展开分析，在介绍案例工程项目基本情况后，分别从设备选配、沉井构筑、分级中继顶进、同步注浆等多个环节详细说明现场施工工艺。根据工程项目施工检验，随着上述施工工艺的顺利落实，可将地表沉降量控制在 4.2 mm 以内，且轴线位置偏差≤ 7.0 mm，各项数据满足给排水管道的现场施工要求且具有推广价值。

关键词 市政给排水工程；长距离顶管；工作井施工技术；同步注浆；动态纠偏

中图分类号：TU99 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.015

0 引言

给排水管道作为市政工程项目的重要组成部分，其施工质量一直是社会关注的重点。随着国内市政管网改造工程的持续推进，管道跨越河道、主干道布设的情况越来越常见，长距离顶管非开挖工艺的应用占比逐年提升，且部分地区地质多为粉质黏土夹砂卵石复合地层，具有土层透水、稳定性差的问题，对长距离顶管工艺提出更高要求。因此，为能切实保证市政项目的现场施工质量，需要结合工程项目施工经验积极完善顶管施工工艺，这也是本文研究的主要目的。

1 案例概况

本研究以某地区城市供水应急保障工程为研究对象，作为当地区域供水主干线的关键工程，项目建成后可显著提升城市片区供水输送整体水平，具有极高的社会价值。根据项目前期规划结果，整个施工段穿越一条宽度达 500 m 的河道，导致施工难度偏高；施工现场勘察数据显示，当地土层自上而下分别为素填土、粉质黏土、粉砂、卵石层及泥岩基层，本次顶管掘进主要穿越粉砂层与卵石混合层，其孔隙比约为 0.82 ～ 0.90，含水率为 28.5% ～ 34.9%，整体稳定性较差，在施工中极易出现坍塌或流沙等不良情况。

2 施工设备选型与配套参数配置

在长距离顶管施工中，设备性能参数对最终施工效果有最直接的影响，而为保证工程项目施工质量目标实现，需结合地质条件、管径参数等关键指标匹配设备型号。案例工程中管道顶管长度长且地层多为砂卵石复合层。为满足施工要求，最终决定引入 XDN1800 泥水平衡顶管机展开作业，相关设备的参数指标如表 1 所示。设备安装结束后可做 72 h 联动调试，要求理想状态下设备故障发生率≤ 1.2%，若不满足上述要求则可及时更换。

3 工作井施工技术

作为长距离顶管施工的核心载体，工作井施工质量关系到工程施工质量，案例工程为保证施工质量达标，对工作井规格参数作出严格限制，要求始发井与接收井井壁厚度为 0.8 m，外部尺寸规格为 12.0 m×8.0 m；而工作井的深度应≥ 30 m，整个现场作业施工中的核

表 1 工程项目设备参数统计表

设备系统	设备型号	核心技术参数
主顶液压系统	ZY-400	配置 4 组液压油缸，单缸最大顶力 4 000 kN，总最大顶力 16 000 kN，油缸行程 3.5 m
泥水平衡顶管机	XDN1800	适配管径 DN1800，刀盘直径 2 160 mm，刀盘转速 0 r/min ～ 3.5 r/min，最大掘进扭矩 185 kN·m
激光导向测量系统	JZ-500	激光有效射程 1 000 m，水平测量精度 ±3 mm/100 m，高程测量精度 ±2 mm/100 m
泥浆循环系统	MX-200	进浆泵流量 200 m^3/h，出浆泵流量 220 m^3/h，泥浆池容积 80 m^3，泥浆过滤精度 0.1 mm

作者简介：朱国权（1984-），男，本科，高级工程师，研究方向：建筑工程建设。

心难点体现在深基坑止水与沉井均匀下沉等方面。

为满足上述要求，该项目规定在沉井预制作业中使用性能更强的C35抗渗混凝土，将材料分层浇筑厚度控制在500 mm以上，经分层振捣密实后连续养护14 d以上。沉井下沉中可采用排水下沉与不排水下沉相结合的施工工艺，其中针对上方15 m的土层，在现场施工中可考虑采用排水下沉工艺,将下沉速率维持在1.0 m/d～1.2 m/d之间；针对下方水下砂卵石地层则可采用“不排水下沉”的施工要求。上述施工执行过程中，应随时观察井壁垂直度与平面位移情况，要求结构的平面误差控制在0.5‰以内[1]。

工作井封底作业环节，案例项目引入水下混凝土封底工艺，将封底混凝土厚度维持在1.2 m以上，经C30水下专用混凝土浇筑，在8 m^3/h的速度下共计浇筑120 m^3，整个浇筑中做到无中断，在确认封底结束后做7 d水下养护。根据现场实测数据发现，上述施工工艺下，井底实测承载力达到250 kPa以上，满足质量标准。

4 长距离顶管设计施工技术分析

4.1 初始顶进施工

在顶管机出洞掘进作业中，本环节现场施工的重点主要包括机头姿态校准、洞门破除与顶力控制等方面。为保证质量目标实现，该项目采用分层人工破除工艺完成洞门破除，即将分层施工厚度稳定在200 mm左右，避免分层厚度过大而造成结构坍塌。在破除结束后即可启动泥浆循环系统，实现泥浆水平衡。在整个顶进作业中，设置初始泥水仓平衡压力0.18 MPa，压力波动范围严格控制在±0.02 MPa，避免压力过大导致地面隆起、压力过小导致掌子面坍塌，且为预防质量问题发生，应每隔1 m采集顶力数据与管线姿态情况，要求连续顶进50 m后机头水平偏差≤4 mm[2]。初始顶进施工参数数据如表2所示。

表2 初始顶进施工参数统计表

顶进距离区间	顶进速度（mm/min）	泥水仓压力（MPa）	平均顶力（kN）
0 m～10 m	10～15	0.17～0.18	4 200
10 m～30 m	15～18	0.18～0.19	4 800
30 m～50 m	18～20	0.19～0.20	5 500

4.2 正常长距离顶进施工技术

当初始顶进长度达到50 m后，即可进入超长距离正常顶进阶段，本环节现场施工的核心在于控制顶力增长速率并稳定顶进参数，避免不合理施工行为造成地层扰动。由于项目当地砂卵石复合地层的稳定性差，为满足稳定性要求，需将正常顶进速度稳定在40 mm/min～45 mm/min，该作业速度兼顾掘进稳定性与施工效率要求；刀盘转速为2.2 r/min，该速度下可确保掌子面土壤均匀切削，也可避免转速过快而造成土体扰动。

根据掘进深度动态调整泥水系统作业参数，其中当掘进深度处于50 m～300 m时,地层以粉质黏土为主，需将材料泥浆黏度稳定在23 s～26 s，材料比重也应达到1.08～1.12。当掘进深度达到300 m～600 m区间时，地层结构发生改变，砂卵石占比明显提升，此时土体的透水性明显增强且流失率明显增加，此时需将材料黏度提升至32 s，且泥浆比重也应达到1.20[3]。当掘进深度大于600 m时不断接近接收井，地层应力逐步释放，为适应现场情况，需将材料黏度稳定在26 s～30 s，比重稳定在1.12～1.16即可。

4.3 同步注浆与泥浆置换施工技术

根据现场施工经验发现，在长距离顶管掘进作业中，地层与管节之间形成环形间隙，此时若不能及时填充加固材料则可能造成管线晃动、地层沉降等明显质量问题。为解决上述问题，本工程将采用随顶随注同步注浆工艺，将注浆口布设在顶管机尾部，在同步进行挖掘作业时,使注浆压力高于地层土压力0.03 MPa左右。

注浆材料的选择上使用水泥—膨润土混合浆液，该材料水泥：膨润土：水的配比控制在1:0.35:0.8左右，该浆液的初凝时间为4.5 h，终凝时间稳定在12 h，浆液兼顾固结强度与流动性要求，现场测试显示，28 d后的抗压强度可达到2.8 MPa，满足质量要求。此外，在同步注浆量的设置上，该项目决定按照环形间隙体积标准的120%进行控制，即每米单关节注浆量应达到0.35 m^3左右，预计全程累积注浆量可达到298.5 m^3，并确保注浆饱满度检测合格率≥99.99%。

确认顶管全程贯通且线路姿态稳定后即可做第二次泥浆置换作业，本环节现场施工的主要目的是将残留外周的浆液置换为固化浆液，进而提升结构稳定性。本次置换浆液的水灰比为0.45，注浆压力为0.3 MPa，经分层分段注浆稳压后，每隔50 m设置一个注浆段，稳压30 min后即可封堵注浆孔。

4.4 管线姿态动态调整技术

根据现场施工经验发现，在超长距离顶管掘进作业中，现场施工中可能因为顶力偏差、地层分布不均匀等因素影响而造成管线的水平位移，若未采取针对性措施则会导致掘进长度累积明显增大，因此实现姿态调控成为现场施工的关键[4]。为确保管线纠正数据精度，可采用以激光导向为主以及微量纠偏的精细化调控技术，经现场施工后可避免地层扰动或关节破坏等问题发生。

管线姿态纠偏期间，利用监测系统采集管线姿态

数据，并通过姿态偏移曲线记录结构位移，其中当偏移量处于5 mm～10 mm预警区间时，采用微量纠偏方式，通过调整单侧油缸顶力、微调刀盘切削角度、局部调整泥水压力实现姿态修正；若发现偏移量不足 5 mm，在不影响顶管施工质量的基础上可先维持现有施工参数并自然校正其中的偏差。在上述施工工艺基础上，要求整个顶管作业中避免一次性大幅纠偏，针对偏差过大的情况，需将每次调整纠偏量维持在 3 mm 以内，并重复上述操作直至管线线形平滑且连续。

此外，案例项目施工中发现，在长距离掘进后可能出现高程下沉等质量偏差，决定可采用上扬微调与压力补偿等施工技术，将机头上方泥水压力提升 0.02 MPa 左右，刀盘上仰角度保持在 0.2° ～ 0.3° ，通过上述方法逐步修正高程偏差使其逐步恢复至正常水平即可。整个全程姿态调控无超差情况，最终管线贯通后整体线形平顺，轴线偏差合格率 100%，满足市政给排水管线输水精度及长期运行稳定性要求。

5 贯通收尾与设备拆除工艺

长距离顶管作业中，当机头掘进至距离接收井洞口约 5 m 范围时即可进入贯通收尾阶段，本环节现场施工的重点主要包括门洞破除、机头接收等方面，其中在贯通前 5 m 区间可将管道顶进速度维持在 15 mm/min，刀盘转速也应下调至 1.5 r/min 并逐步降低水仓压力，即将泥水注浆压力从 0.32 MPa 缓慢下调至 0.22 MPa，通过精准控制压力变化可预防掌子面坍塌等严重质量问题发生。在上述工艺基础上要求施工单位密切监测装置频率变化，即每隔 0.5 m 完成一次采样，使机头精准对接接收井洞门，避免出现偏差。

当机头进入接收井内后即可停止顶管作业，连续稳压 120 min 使地层压力趋于稳定，再分层拆除接收井洞门结构即可。本环节破除作业工艺与始发洞门基本相同，并在破除结束后用吊车将其缓慢牵引顶管机头出洞，本环节机头出洞速度控制在 0.2 m/min，全程保持水平平稳移动，无倾斜、晃动情况。机头完全出洞后，对洞门间隙进行快速封堵，采用速凝混凝土填充振捣密实，养护 7 d 达到设计强度。

设备拆除遵循“先附属、后主机，先管路、后设备”的有序拆除原则，首先拆除泥浆循环管路、监测线路、液压管线等附属设施，随后依次拆除中继间装置、主顶油缸、顶管机主机。拆除过程中做好已成型管线防护，严禁设备碰撞、挤压管节，避免管线破损、接口渗漏[5]。设备拆除完成后，对管节接口进行全面检测，932 m 管线共 372 个管节接口，接口密封完好率 100%，无渗漏、错位、开裂问题，管线整体施工质量达标。

6 工程项目施工成效评估

结合案例工程项目实际情况，经泥水平衡顶管、分级中继间顶进等方法，有效解决工程项目施工建设中面临的地下水埋深浅、砂卵石复合地层等施工难题，相关技术措施具有良好操作性，实现安全稳定施工并预防渗漏、坍塌等质量问题发生。施工全程累积有效顶进作业时长达到 286 h，平均每日顶进深度达到 78.5 m，其施工效率明显超过顶管工程平均水平。现场记录结果显示，整个顶管作业中管线最大顶进偏差为 7 mm，高程的施工的最大偏差为 6 mm，相关偏差数据均低于 ±15 mm 的标准值。地表沉降量统计数据显示，上述长距离顶管工艺下所产生的最大沉降量达到 4.2 mm，且表面观测中未见裂缝、隆起等明显病害；管节接口密封性评估中，管道满水试验检测中未见渗漏，其施工参数满足市政给排水管道长期输水运行要求。

7 结束语

长距离顶管施工技术在市政给排水工程中占据重要位置，本研究结合某管道工程实际情况，提出一套完整的顶管施工工艺，相关技术措施在执行过程中以设备选型、分级中继顶进、同步注浆等工艺为核心，现场施工过程依托实测数据明确各环节工艺标准，最终依托分级中继顶进、泥浆动态调节、微量纠偏等工艺，有效控制顶力增幅与管线轴线偏差，工程最终沉降、线形指标均满足给排水管道使用标准，同时现场施工工艺科学可行。未来，市政给排水管道工程将向着大口径、超长距穿越复杂地层的方向发展；同时智能化、数字化技术的迭代，也将对现场施工过程产生深刻重塑。依托数字化技术对顶管施工工艺路径开展持续优化，可有效降低长距离顶管的施工阻力，减小施工引发的地层扰动，相关研究成果与实践经验可为同类市政给排水工程提供借鉴。

参考文献：

[1] 栾梓铭，师磊．市政给排水长距离顶管施工技术研究 [J]. 现代工程科技，2024,03(23):53-56.
[2] 刘壮，兰春雨，戴志福，等．市政给排水施工中长距离顶管施工技术研究 [J]. 科学技术创新，2024(16):183-186.
[3] 陈卫星．市政给排水施工中的长距离顶管施工技术研究 [J]. 工程建设与设计，2024(10):212-214.
[4] 陈兵．长距离顶管施工技术在市政给排水管网建设中的应用 [J]. 散装水泥，2024(02):141-143.
[5] 唐恺．市政给排水工程中的长距离顶管施工技术研究 [J]. 工程技术研究，2024,09(06):51-54.

公路高填方路基不均匀沉降防控施工技术

陈荣飞

（四川港建水利水电工程有限责任公司，四川 成都 610097）

摘 要 山区公路建设中高填方路基应用广泛，不均匀沉降是其最常见的病害之一，易引发路面开裂、桥头跳车、结构错台等问题，直接影响行车安全与道路使用寿命。本文结合四川川东北地区某山区高速公路工程实践，分析高填方路基不均匀沉降的形成机理与防控难点，从基底加固、填料填筑、压实管控、防排水四个维度梳理关键施工技术，提出全过程质量控制措施，以期为同类山区高填方工程沉降防控提供施工参考，助力提升路基建设耐久性。

关键词 公路高填方；不均匀沉降；沉降防控；分层压实；沉降观测

中图分类号：U416.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.016

0 引言

山地丘陵地貌区高速公路建设过程中，高填方路基是适应地形起伏、平衡土石方的常用结构形式。高填方路基填筑高度大、自重荷载高，受地质条件不均、填料性质差异、压实质量波动、雨水入渗软化等多重因素影响，工后易出现不均匀沉降，轻则造成路面开裂变形，重则引发路基滑移失稳。当前部分项目对沉降防控重视不足，施工管控粗放，后期沉降治理往往需要投入大量资金与时间，严重影响道路运营效率。因此，系统梳理高填方路基不均匀沉降防控的关键施工技术，建立全流程质量管控体系，对保障山区公路建设质量、降低后期运维成本具有重大意义。

1 工程概况

1.1 项目背景与地质条件

本项目为四川川东北地区某新建高速公路标段，线路全长12.7 km，其中高填方路基段落总长3.2 km，最大填方高度26.8 m，平均填筑高度约18 m，属于典型山区高填方工程。项目所在区域为丘陵地貌，沿线地形起伏较大，冲沟与缓坡交替分布，路基基底条件差异明显。地质勘察结果显示，路基基底表层覆盖第四系粉质黏土与腐殖土，厚度2 m～5 m，承载力偏低且压缩性较大；下伏侏罗系泥岩夹砂岩，风化程度不均，局部段落存在软弱夹层。

区域气候属亚热带湿润季风气候，降雨集中在5月—9月，年平均降雨量约1 100 mm，雨季地下水位埋深1.5 m～3 m，地表水与地下水补给充足。雨水入渗易软化路基填料与基底土层，降低土体抗剪强度，是加剧路基沉降的重要外部因素。设计要求路基工后总沉降量不大于30 cm，不均匀沉降坡差不大于1.5%，满足沥青路面铺设的变形控制要求。

1.2 不均匀沉降防控难点

本项目高填方段沉降防控存在四方面突出难点。一是填筑高度大，土体自重固结周期长，工后沉降持续时间久，控制难度远高于普通填方路基。二是基底地质条件沿线路方向波动大，冲沟段软弱土层厚、坡地段基岩埋深浅，不同段落承载力差异明显，易产生横向与纵向差异沉降。三是沿线取土场分散，填料性质波动较大，若管控不严易出现不同压缩性填料混填的情况，引发分层沉降差。四是填挖交界、桥台衔接等过渡段较多，路基刚度差异大，是不均匀沉降的高发区域，需要专项处理。

2 公路高填方路基不均匀沉降防控关键施工技术

2.1 基底差异化加固处理技术

基底是路基沉降的起始层，基底承载力不均、软弱层处理不到位是引发不均匀沉降的重要根源。施工前根据地质勘察结果对基底进行分类，采用差异化加固方案，从源头减小基底沉降差异。普通土质基底先清除表层耕植土、腐殖土与松散土体，清表厚度0.3 m～0.5 m，整平后采用重型压路机碾压密实，确保基底承载力满足设计要求[1]。对于坡度陡于1:5的斜坡基底，开挖宽度不小于2 m的反向台阶，台阶面向内倾斜2%～4%，增强路基抗滑稳定性。

针对浅层软弱基底，采用碎石换填法处理，挖除全部软弱土层后分层回填级配碎石，每层厚度不超过30 cm，逐层压实。对于填方高度超过20 m、软弱层较厚的段落，采用强夯加固技术，夯点按正方形布

作者简介：陈荣飞（1992-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁。

置，主夯点间距 4 m，夯击能控制在 1 500 kN·m～2 500 kN·m，每点夯击 6 遍～8 遍，最后满夯整平。

如表 1 所示，不同基底条件对应不同的处理技术，兼顾防控效果与工程经济性。

表 1　不同基底条件对应的加固处理技术及适用场景

基底条件类型	主要处理技术	关键控制参数	适用填方高度	承载力提升幅度
一般土质基底	清表 + 重型碾压	清表 0.3 m～0.5 m，压实度≥ 90%	≤ 12 m	10% ～ 15%
浅层软弱基底	碎石换填 + 分层压实	换填厚度 0.8 m～1.5 m	12 m～20 m	30% ～ 50%
厚层软弱基底	强夯加固 + 碎石垫层	夯击能 1 500 kN·m～2 500 kN·m	20 m～30 m	50% ～ 80%
填挖交界段	台阶开挖 + 土工格栅加筋	台阶宽≥ 2 m，格栅 2 层～3 层	全高度适用	差异沉降减小 25% 以上

填挖交界等沉降突变部位加铺双向土工格栅，利用格栅的加筋作用扩散上部荷载，协调沉降变形。格栅沿填挖方向铺设，两端分别伸入挖方段与填方段不小于 10 m，层间距 0.8 m，根据沉降差设置 2 层～3 层，有效降低刚度突变带来的不均匀沉降。

2.2　填料优选与水平分层填筑技术

填料性质直接决定路基的压缩变形特性，是控制沉降的基础工作。本项目优先选用强度高、压缩性低的碎石土、砾石土作为填筑材料，严禁使用淤泥、腐殖土、膨胀土、过湿土等不良填料。填料进场前逐批次做土工试验，测定最大干密度、最佳含水率、CBR 值、压缩系数，不合格的填料坚决清退，不得进入施工现场 [2]。

填筑采用水平分层填筑法，路基横断面全宽分层，自下而上逐层填筑。每层摊铺厚度根据压实机械性能通过试验段确定，土质填料每层厚度不超过 30 cm，石质混合填料不超过 40 cm，严禁超厚摊铺。不同性质的填料分层填筑，同一层用同一种填料，不得混填、杂填，防止因压缩系数不同产生层间沉降差。填筑时设 2%～3% 的横向排水坡，防止表面积水浸泡填料。

填方高度大于 20 m 的高填段落，每层摊铺厚度减小到 25 cm，压实度标准提高 1%，用更密实的填筑减小后期固结沉降量。填筑至路床部位时，用性质均匀的优质填料，保证上路床强度均匀。

2.3　分层压实和指标双控技术

压实不足是造成路基沉降的主要施工因素，压实质量直接影响土体后期固结沉降的大小。本项目采用重型压实标准，根据路基部位分级控制压实度，上路床压实度不小于 96%，下路床不小于 94%，上路堤不小于 93%，下路堤不小于 90%。碾压作业遵循先轻后重、先慢后快、先边后中的原则，用 20 t 以上振动压路机作业，碾压速度控制在 2 km/h～4 km/h，碾压遍数由试验段确定，一般为 6 遍～8 遍，轮迹重叠宽度不小于 1/3 轮宽。

碾压前严格控制填料含水率，保证其在最佳含水率 ±2% 范围内。含水率偏高时翻晒，偏低时均匀洒水，保证压实效果最好。每层压实完成后同步检测压实度和弯沉两项指标，压实度采用灌砂法检测，弯沉采用贝克曼梁测定，两项指标均合格后方可进行上一层填筑。压路机碾压不到的边角、台背等处，用小型振动夯实机补夯，保证无压实盲区。

2.4　全断面防排水体系构建技术

水是加剧路基沉降的主要因素，雨水入渗会使填料软化、土体强度降低，加快固结沉降，还会冲蚀基底形成空洞，引起不均匀沉降。本项目建立地表、地下相结合的全断面防排水体系，最大限度地减少水对路基的侵蚀。地表排水方面，路基两侧设梯形边沟，填方坡顶外侧 5 m 处设截水沟，各级边坡平台设平台排水沟，形成完整的排水网络，及时将地表水引出路基范围，防止坡面积水下渗。

坡面用拱形骨架护坡和植草防护相结合，防止雨水冲刷坡面形成渗水通道。地下排水，地下水丰富的冲沟段设横向盲沟，拦截山体侧向渗水，将地下水引出路基范围 [3]。填挖交界处设渗沟，汇集挖方段地下水排出，防止积水软化结合部填料。每层填筑时预留横向排水坡，保证雨水及时排出。

3　公路高填方路基不均匀沉降防控施工全过程质量控制措施

3.1　施工准备阶段精准管控

开工前做好基础准备工作，防止因前期工作不到位埋下沉降隐患。补充开展高填方段地质详勘，加密地质钻孔间距至 30 m，软弱层分布段加密，准确掌握基底土层厚度、分布范围、地下水情况，为针对性处理提供依据。提前对选定的取土场进行全面的土工试验，了解填料性质的波动范围，制定分类使用方案。

正式大面积施工前，选取代表性段落进行试验段施工，检验填筑厚度、碾压遍数、含水率控制等工艺

参数，确定最优作业组合，形成标准化作业指导书。对所有施工班组进行全员技术交底，明确沉降防控要求、操作要点和验收标准，保证一线作业人员掌握工艺要求，防止因操作不规范造成质量问题。

3.2 填筑过程动态质量控制

施工过程执行“三线”控制标准，即摊铺厚度控制线、含水率控制线、压实质量控制线。每层摊铺前挂设标高控制线，严格控制摊铺厚度，现场安排技术员旁站巡查，发现超厚部位及时推平重铺。配备快速含水率检测设备，碾压前逐段检测填料含水率，偏离最佳范围及时采取晾晒或洒水措施，严禁含水率不合格就强行碾压[4]。

建立工序交接验收制度，上一道工序验收不合格不得进入下一道。碾压过程全程旁站监督，核对碾压遍数、碾压速度、搭接宽度，杜绝漏压、欠压、快压等违规操作。雨季施工时缩短单段填筑长度，做到当天摊铺、当天碾压、当天成型。雨后复工前对路基进行全面检查，对受雨水浸泡软化的部分彻底翻挖换填，合格后方可继续施工。

3.3 沉降观测与动态反馈机制

建立完善的沉降观测体系，用实时监测掌握沉降规律，动态调整施工节奏，防止沉降失控。沿线路方向每50 m设一个沉降观测断面，填挖交界、高度突变、桥台过渡段增设断面。每个观测断面设3个观测点，分别设在路基中心和两侧路肩处，用混凝土标石埋设牢固。如表2所示，根据施工的不同阶段设置不同的观测频率和控制标准。

观测精度为二等水准测量，基准点设在沉降影响范围外的稳定基岩上，保证观测数据的准确性。根据观测数据绘制沉降曲线，反演路基固结度，预测工后沉降量。当日沉降速率超过限值时立即停止填筑，待沉降趋于稳定后再恢复施工。预压期结束后，根据沉降数据来评价工后沉降量，满足要求后才能进入路面施工环节[5]。

表2 高填方路基沉降观测频率与控制标准

观测阶段	观测频率	沉降速率控制阈值	异常处置要求
填筑施工期	每填筑1层观测1次	日沉降量≤15 mm	超阈值立即暂停填筑，排查原因
预压期前3个月	每7天观测1次	月沉降量≤20 mm	连续两月超标则延长预压时间
预压后期	每15天观测1次	月沉降量≤10 mm	不达标不得开展路面施工
运营首年	每3个月观测1次	年沉降量≤30 mm	差异沉降超标及时处置

3.4 薄弱部位专项管控措施

重点对填挖交界、桥台过渡段、新旧路基衔接等沉降高发部位进行专项管控，消除沉降差异隐患。填挖交界段严格按台阶开挖要求进行，台阶宽度、坡度验收合格后方可填筑，填筑时从低处向高处逐层推进，格栅铺设平整、张拉到位，防止褶皱松弛。桥台台背用级配碎石填筑，填筑长度不小于桥台高度的2倍，沿线路方向形成刚度渐变的过渡段，减小桥台与路基的沉降差。台背碾压用小型压实机具配合人工夯实，保证靠近台背部位压实达标。

新旧路基衔接处对旧路基边坡进行开蹬处理，开挖反向台阶后逐层填筑新路基，加铺土工格栅增强整体性，防止出现纵向沉降裂缝。对所有薄弱部位加密沉降观测点，提高观测频率，及时发现沉降异常。施工过程中留存影像资料和检测记录，对每一个薄弱部位都有据可查，保证专项措施的落实。

4 结束语

公路高填方路基不均匀沉降防控是一项覆盖勘察、施工、监测全周期的系统性工作，单一技术措施难以实现全面管控，需要多环节协同发力。通过差异化基底加固消除初始沉降差异，通过标准化分层填筑与压实控制土体固结变形，通过完善的防排水体系减少水蚀影响，配合全过程质量管控与沉降动态观测，能够有效将工后沉降与差异沉降控制在允许范围内。未来可进一步引入智能压实监测、自动化沉降采集等技术，提升施工管控的精准度与时效性，更好地适应复杂山区公路的建设需求。

参考文献：

[1] 聂彦蓉.公路路基工程高填深挖施工技术分析[J].交通建设与管理,2026(03):168-170.
[2] 唐珊.高填方路堤分层压实工艺优化与沉降控制研究[J].交通建设与管理,2026(03):213-215.
[3] 姚成城.公路填筑路基沉降监测与施工控制技术[J].大众标准化,2026(11):48-50.
[4] 王智渊,刘倩.高速公路软基路段拼宽路基差异沉降控制技术[J].工程技术研究,2026,11(11):64-66.
[5] 杨聪.库区公路高填方路基不均匀沉降对路面结构安全性的影响及处治措施[J].交通世界,2026(16):34-36.

深基坑支护施工技术及安全风险防控研究

刘德新

（惠州市产投建筑工程有限公司，广东 惠州 516000）

摘 要 深基坑支护是地下工程施工的主要工序，施工工况复杂，风险大，直接影响到基坑安全及周边建筑物的安全。本文具体介绍了土钉墙、排桩、地下连续墙、微型钢板桩四种支护类型的操作要点，分析了从开挖到支护、排水、监测整个过程的安全风险点，并提出相应的工序控制、跟踪监控、隐患排查、应急预案等防范措施，旨在为防止坍塌、位移、渗漏水等事故的发生，指导施工现场的规范化、安全化作业提供借鉴。

关键词 深基坑支护；土钉墙支护；排桩支护；地下连续墙支护；微型钢板桩支护

中图分类号：TU473.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.017

0 引言

随着城市建筑高层化与地下空间开发的规模化推进，深基坑工程的开挖深度与跨度持续增大，作业场地受限、周边管线密集交错、地层情况复杂等问题日益凸显，对支护施工的质量管控与安全管理提出了更高要求。深基坑支护施工属于临时性高危作业环节，作业顺序紧凑、受水文地质及人为操作影响较大，是地下工程管理的重中之重和最危险的部分，目前施工现场存在施工方式不当、作业时间安排不合理、风险预测不足、预防措施落实不到位等现象，很容易造成基坑偏移、边坡坍塌、地下水渗流等问题。本文以现场实践为主线，对常用支护施工的主要技术要点进行归纳总结，对整个施工过程中的安全风险进行梳理排查，提出对应性、可操作性的预防措施，从而达到提高深基坑工程的安全管理水平的目的。

1 深基坑主流支护施工关键技术

1.1 土钉墙支护施工技术

土钉墙适用于均匀土质、地下水位较低、坑深6 m～12 m的一般土层基坑，有施工方便快捷、价格便宜、适用性强等特点，是民用建筑基坑工程中最常见的支护方式，施工的主要难点是分层分段进行，控制好钻孔、注浆、挂网喷射混凝土三个重要环节。

现场施工严格按照分层开挖的要求，每层挖深不得超过 1.5 m，严禁一次挖到底，开挖完之后立即修坡，坡面要平整、无松动石块，防止边坡暴露过久。钻孔施工使用小型钻机，根据设计间距、角度、深度准确施工，钻孔倾斜度稳定在 10°～15°，孔径、孔深偏差值不得大于 ±50 mm，钻孔后清除孔内残渣、杂物，防止注浆通道堵塞。土钉选用螺纹钢，在安装过程中保证居中放置，保证钢筋保护层厚度符合要求。注浆采取常压注浆方式，使用水泥砂浆，注浆饱满、密实，不能出现空洞、空鼓现象，注浆结束后进行养护。然后铺设钢筋网片，网片连接长度不得小于 200 mm，绑好之后就可以进行混凝土喷射，厚度控制在 80 mm～100 mm，分两次进行喷射，每层喷射厚度均匀，不能有裂缝、剥落现象，施工完毕后及时浇水养护，保证支护结构的强度足够。

1.2 排桩支护施工技术

排桩支护适合软土、杂填土等复杂地质，基坑使用深度一般在 8 m～18 m左右，刚度大、变形小、止水性能好，在靠近道路、管道、建筑物等危险地段的深基坑中应用广泛，现场施工以钻孔灌注桩为主体，重点抓好成孔、钢筋笼安装、混凝土浇筑、桩间止水四个方面的实际操作。

施工准备时准确放样定位桩位，桩位偏差在 50 mm以内，采用旋挖钻机干法施工或泥浆护壁法成孔，根据土层情况调整施工进度，软土层慢进尺、硬土层匀速推进，防止塌孔、缩径等问题出现。成孔后对孔深、孔径、垂直度等进行检测，合格后进行清孔，孔底沉渣不得超过 100 mm。钢筋笼集中预制作业，现场采用多点吊放技术顺利下放入孔，避免碰撞孔壁，保证钢筋笼处于中间位置，保护好保护层厚度，焊接点饱满，无夹渣裂缝等现象发生。水下混凝土浇筑采用高标号混凝土，坍落度控制在 200 mm～220 mm之间，采用

作者简介：刘德新（1974-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程管理。

导管式连续灌注的方式进行施工，导管埋设深度控制在2 m～6 m之间，杜绝断桩、夹渣、桩身不一致等质量问题出现[1]。桩身成型之后，迅速进行桩间的高压旋喷止水帷幕施工，封闭桩间间隙，阻挡地下水渗透，保证基坑内干燥作业环境。

1.3 地下连续墙支护施工技术

地下连续墙支护刚度最大、止水效果最佳，适用于超深基坑、富水砂层、承压水层及周边环境敏感的工程，可以做到“两墙合一”，既起到临时支撑又作为永久建筑的作用，施工精度要求高，主要控制好成槽、泥浆护壁、钢筋笼起吊、水下混凝土浇筑四个方面。

现场施工先施工导墙，确保导墙垂直、平整，作为成槽施工的参考标准。使用成槽机分段挖掘槽段，槽段长度保持在4 m～6 m，施工过程中始终采用泥浆护壁，不断地调节泥浆的比重、黏度等参数，防止槽壁的坍塌。成槽结束后对槽底进行清理，沉渣厚度不超过50 mm。钢筋笼整体成型，采用扁担梁多点吊装，垂直度偏差在1%左右，准确对准槽段的位置。水下混凝土浇筑作业持续进行，导管间距小于等于3 m，相邻槽段的混凝土面差小于等于0.5 m，新旧槽段之间通过接头箱隔开，确保接缝紧密防水[2]。在整个施工过程中严格控制槽段误差以及混凝土浇筑的密实度，防止出现渗流、墙面变形等质量问题。

1.4 微型钢板桩支护施工技术

微型钢板桩是一种常用的刚性支护方式，用于3 m～8 m的基坑，尤其适合于城市中的狭窄空间、邻近的老建筑物、临时性的抢险救灾等情况，具有施工占地面积小、形成速度快、无需等待养护期、可周转使用等特点，在城区中的小型深基坑中使用优势明显。主要实操要点包括桩位的布置、打桩过程中的控制、支撑的搭设、拔桩的过程以及桩孔的回填等内容。施工前需要对场地进行平整、对地下的管线进行核实，测量好桩位，对进场的钢板桩锁口进行检查，对于已经出现的变形部位进行修复等工作。用小型振动打桩机进行施工，做到慢沉轻振，严格控制桩身的垂直度偏差≤0.5%，保证桩体之间的锁口连接紧密，杜绝渗漏水、漏土的情况发生[3]。打桩完成后立即布置型钢支护结构，使其均匀地分担土的侧压力，防止基坑侧壁发生变形过大的现象。在基坑的施工及回填工作完成之后，用对称拔出的方法进行拔出钢板桩，一边拔一边回填土，及时将桩孔空隙夯实，避免出现后期地面沉降的情况发生，确保支护全过程的施工安全。

2 深基坑施工核心安全风险

2.1 土方开挖施工风险

土方开挖是基坑危险多发环节，在施工现场最常见的违规现象是超挖、快挖、无次序开挖，有的施工单位为了赶工期，违反了“分层分段对称均衡”的原则，一次性挖得太深，造成支护体系无法及时发挥作用，使坡面土体应力集中释放造成坡面裂缝、滑移等问题发生，开挖过程中机械使用不当碰擦、挤压已有的支护体系导致桩体变形、土钉脱落、墙面破损等情况出现，在基坑开挖之后坡体暴露的时间太长并且没有任何的保护措施，受到风吹雨淋以及外力的影响容易产生局部塌方、土体滑落等。在软土地层开挖时，由于土体固结的速度较慢而又过快地开挖导致基坑整体的下降、侧墙的大幅位移等问题发生。

2.2 支护施工工序风险

支护施工质量缺陷是后期发生安全事故的主要原因之一，主要是施工过程中忽视管理造成的。土钉墙施工过程中，钻孔深度不够、注浆不充分、混凝土养护不到位等因素，使得土钉锚固力不够、支护面层产生裂缝，不足以阻挡土体侧压力；排桩施工过程中，孔底沉渣过厚、混凝土浇筑不连续、钢筋笼偏位等原因，容易造成桩身承载力不足、断桩、桩身倾斜，导致局部支护失效；地下连续墙施工过程中，槽段接缝封闭不严、沉渣未清理干净，会造成墙体出现渗漏水、管涌等现象。同时，支护顺序落后于开挖顺序，挖后未及时支护，两工序之间的时间差太久，大大增加了基坑失稳的概率。

2.3 地下水诱发施工风险

地下水是深基坑工程建设中的主要安全隐患之一，现场降水、止水作业不当易造成重大安全事故。富水地层中进行深基坑作业时，降水井布置不当、降水过快或者过慢都会导致基坑内外水位差失稳，造成周边地表塌陷，基坑侧面渗水。止水帷幕施工存在缝隙、损坏会出现少量渗漏的现象，如果巡视不及时，渗漏处继续扩大，就会出现涌水、涌沙的现象，侵蚀掉基坑底部的土层导致基坑整体倒塌。另外，雨季施工期间没有做好基坑截排水工作，地表上的雨水灌入基坑中去，浸润了坡面的土体，降低了土体的强度，造成了坡面滑坡、支护体系失稳的现象发生。

2.4 现场作业与监测滞后风险

施工现场人员违章作业、机械管理不到位、监控不到位是主要的隐患类型。作业人员未正确佩戴防护

用品、边坡坡顶违规堆放超重物品、在危险距离内行走作业易造成坠落、土方坍塌等伤人事件；大型开挖、起重机械作业半径控制不力、违章越过基坑边缘扰动边坡土体；大部分施工现场存在监控形式化现象，不能按照时间节点及时监测支护位移、沉降、水位变化，监测数据延迟、报警信号不能及时发现，不能提前预防基坑变形隐患，小隐患演变为重大安全隐患。

3 基于现场实操的安全风险防控措施

3.1 严控土方开挖标准化施工

严格实行分层开挖、随挖随支作业方式，根据支护类型、土质条件确定每层开挖深度，一般土层每层开挖高度不超过1.5 m,软土、富水地区控制在1 m以内，严禁超挖、乱挖、快挖。开挖应采取对称、平衡作业方式，由基坑中间向两侧分层推进，防止一侧开挖产生较大侧向力集中效应。规范机械操作顺序，挖掘机、吊车等设备工作距离基坑边缘不小于 2 m，严禁机械触碰支护结构、扰动坡壁土体。减少坡壁暴露时间，开挖完毕后四个小时内必须做好相应段的支撑工作，不能及时支撑的坡面铺盖防雨布、设置临时防护栏。基坑周围不得堆载，土料、物资等距离基坑边 3 m 以上，严格控制堆载量，防止土壤侧向力过大导致滑坡现象发生[4]。

3.2 强化支护施工全过程质控

对不同支护方式落实专项质量保证措施，从根源上预防工程质量问题。土钉墙施工应控制钻孔质量，钻孔结束后应清除孔内杂物，注浆用定量灌注方式保证浆液满盈，喷射砼厚度一致，养护期不少于 7 天，养护期间禁止破坏边坡；排桩施工应全程监控成孔质量，不断优化钻进参数，严格控制沉渣厚度，混凝土灌注过程中不能有任何停顿，完成后要对桩身进行逐个检测；地下连续墙施工应加强对槽段清理、接缝密封、混凝土灌注等环节的管理，施工结束后进行渗水检查，及时堵塞细小的漏洞。配备专职质检人员全程旁站施工，对每一个步骤、每一个区域分别检验，合格后才能进行下一道工序，避免不合格的施工步骤带来隐患。

3.3 落实地下水专项防控作业

根据场地水文地质条件，提前安装降水、止水、排水设施，提前 7 天～ 10 天开始进行降水作业，缓慢降水，控制好降水速度，密切关注地下水位变化，保持水位稳定低于开挖面 1 m 以上，提高止水帷幕施工质量。完成后进行气密试验、渗漏检测，发现缺陷及时进行灌浆处理。在基坑顶部设置排水沟、挡水墙，在基坑底部设置集水井、排水管道。建立完善的排水网络，在雨季期间 24 小时不间断排水，防止坑内积水浸泡基坑。在富水砂层、承压水地层中增加临时灌浆加固层，切断地下水渗透路径，防止管涌、流沙等事故发生[5]。

3.4 完善动态监测与现场管控机制

建立施工现场全时段动态监测系统，合理布置监测点，重点监测支护结构水平位移、基坑周围土体沉降、地下水位、边坡裂缝四个方面的内容，一般情况下一天监测一次,在施工高峰期及下雨天加密至每天2次～3次。制定分级警报界限，监测数据临近报警值就必须停工检查，及时进行支撑加固、回填、注浆等加固措施。严格落实安全管理制度，工作人员必须正确佩戴好防护用具，禁止在边坡边缘违规作业、停留等。规范大型机械设备的操作规程，划出作业禁区和警戒区，设置防护栏杆、警示标志。每天都要进行班前安全技术交底、班后隐患排查，建立隐患台账，做到隐患闭环治理，防止同类事故再次发生。

4 结束语

本文聚焦深基坑支护施工现场实操，系统梳理土钉墙、排桩、地下连续墙、微型钢板桩四种常见支护形式的施工流程，详细阐明各工艺环节的关键技术要点与对应质量控制标准；同时精准覆盖土方开挖、支撑搭设、降水运维及现场作业全工序，全面识别并归纳各环节的危险点源，针对每一类风险源提出可落地的全方位防范措施。深基坑支护施工安全的核心在于对细节的严格把控，只有在每一步施工过程中做到有据可依、步步为营，真正实现防患于未然，第一时间处置现场发现的各类隐患，才能切实保障深基坑工程的整体施工质量与作业安全。

参考文献：

[1] 龙江 . 复杂城市环境下深基坑支护与施工优化技术研究 [J]. 中国建筑金属结构 ,2025,24(04):85-87.
[2] 柴锋建 . 高层建筑深基坑施工存在的问题及其解决措施研究 [J]. 中国建筑装饰装修 ,2025(06):168-170.
[3] 白树标 , 黄震 . 建筑工程中深基坑支护施工技术的优化与实践研究 [J]. 全面腐蚀控制 ,2025,39(04):112-117.
[4] 黄亮 , 侯积伟 . 深大基坑预应力装配式支护体系力学性能与施工协同优化研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术 ,2025(10):45-48.
[5] 郑晋溪 . 复合支护措施下深基坑开挖稳定性分析及支护优化研究 [J]. 福建建筑 ,2025(06):44-49.

软土地基条件下闸站深基坑支护施工技术分析

周兴俊[1]，吴文君[2]

（1. 江苏祥通建设有限公司，江苏 无锡 214142；
2. 江苏中准工程质量检测技术有限公司，江苏 无锡 214142）

摘　要　软土地基中的闸站深基坑常处于高水位、低强度和强压缩性土层中，开挖后容易出现围护位移、坑底隆起、渗流破坏及周边沉降。本文围绕闸站基坑的受力和水文特点，分析围护结构、止水帷幕、内支撑、降水开挖及坑底加固等施工技术，并提出质量检查与监测反馈方法。研究结果显示，通过控制成槽垂直度、支撑安装时机、分层开挖厚度和坑内外水位差，可减小软土卸荷造成的变形，使支护体系在施工全过程保持稳定，为同类水利工程提供参考。

关键词　软土地基；闸站工程；深基坑；支护施工；变形控制

中图分类号：TV551.4　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.018

0　引言

闸站集挡水、排涝和调度功能于一体，泵房、闸室及进出水构筑物多埋置较深，施工期间还要承受河道水位和地下水的共同影响。软土结构松散，受扰动后强度下降较快，常规放坡难以满足场地与防渗要求。因此，深基坑通常采用围护、支撑、止水和加固组合方案。施工中任何一道工序滞后，都会使土压力、水压力重新分配，进而放大围护变形。基于此，从施工难点出发，对各关键工序及控制方法进行分析至关重要。

1　软土地基条件下闸站深基坑施工难点

1.1　软土变形控制难度较大

沿海冲积平原和河网地区的淤泥质黏土天然含水率常为35%～55%，孔隙比可达1.0～1.8，压缩系数多在0.5 MPa^{-1}～1.5 MPa^{-1}之间，不排水抗剪强度通常只有10 kPa～30 kPa。闸站基坑开挖深度常达到8 m～15 m，卸荷后坑内土体会产生回弹，坑外土体则向临空面移动。若围护结构刚度不足或支撑形成较慢，墙顶位移、深层水平位移和地表沉降会同步增加[1]。软土还具有流变性，开挖完成后变形并不会立即停止，长时间暴露会使支撑轴力继续增长。施工组织需要缩短无支撑暴露时间，将大面积开挖划分为若干小区，做到开挖一层、支撑一层，使围护结构受力及时闭合。

1.2　地下水对基坑稳定影响明显

闸站多靠近河道或现状水系，地下水位往往距地表0.5 m～2.0 m，汛期外河水位变化还会造成坑外水头反复升降[2]。软黏土本身渗透系数较小，常处于10^{-7} m/s～10^{-9} m/s范围，但夹层粉砂或薄层砂土可能形成集中渗流通道。帷幕接头、围护墙槽段接缝或降水井封闭不严时，水土容易从局部缺口进入基坑，引发流砂、管涌和墙后土体损失。过度降水同样会增加有效应力，使周边道路、管线或既有建筑产生附加沉降。因此，基坑水控制不能只追求坑内无水，还要维持合理的坑内外水位差，并根据河道水位、井内水位及地表沉降及时调整抽水量。

2　软土地基条件下闸站深基坑支护施工技术

2.1　围护结构施工

围护结构承担侧向土压力和水压力，也是止水体系的重要组成部分[3]。软土闸站基坑可根据深度、周边条件和施工设备选用地下连续墙或钻孔灌注桩配合搅拌桩帷幕。地下连续墙整体刚度较大，墙厚常取600 mm～1 000 mm，适合变形控制要求较高的泵房基坑。施工前应复核导墙轴线和顶面高程，成槽过程中连续检测槽深、垂直度与泥浆性能，接头处采用刷壁器反复清理，直至刷壁器基本无泥。钢筋笼应整体吊装或分节可靠连接，水下混凝土导管埋深保持在2 m～6 m，浇筑面上升速度宜稳定，防止夹泥和断墙。围护受力可用主动土压力合力进行初步校核，公式如下：

$$P_a=\frac{1}{2}\gamma H^2K_a+qHK_a \qquad K_a=\tan^2(45°-\varphi/2) \tag{1}$$

式（1）中，P_a为单位长度围护墙上的主动土压力

作者简介：周兴俊（1991-），男，本科，工程师，研究方向：水利施工、水利工程检测。

合力，kN/m；γ 为土的重度，kN/m^3；H 为开挖深度，m；q 为坑边均布荷载，kPa；K_a 为主动土压力系数；φ 为土的有效内摩擦角。软土中 φ 值较小，水土合算时还需叠加静水压力。围护成型后应采用超声波或取芯方法检查墙体完整性，对接缝渗漏位置提前布置注浆管。对钻孔灌注桩方案，成孔时应控制泥浆液面高于地下水位 1.0 m 左右，孔底沉渣厚度按设计要求验收，桩间净距较小时还应采用隔桩跳打，防止邻桩混凝土受到扰动。冠梁施工前凿除浮浆并校直主筋，使各桩共同受力。

2.2 止水帷幕施工

止水帷幕应在围护结构形成连续封闭体后再进行开挖。采用三轴水泥土搅拌桩时，施工设备先试运转并校正桩架垂直度，浆液按试桩确定的水灰比配制，喷浆和搅拌保持连续。相邻桩套接时间过长会形成冷缝，现场宜按跳槽或连续套打顺序组织施工，并对转角、接头及设备停歇处增加复搅[4]。帷幕底端应进入相对隔水层，无法落底时需结合坑内降压井控制承压水。施工参数可结合如表 1 所示的常用范围设置，但水泥掺量、提升速度和桩间搭接仍要通过试桩调整。

成桩 7 d 后可进行轻便触探，28 d 后检查无侧限抗压强度；发现渗漏时先降低局部水头，再采用双液浆由下向上封堵，避免高压注浆把渗流通道进一步冲开。靠近河岸的转角部位可预留袖阀管，开挖后根据渗水位置进行低压补浆。帷幕顶部与冠梁或压顶板之间也要封闭，避免地表水沿施工缝绕流进入坑内。

2.3 内支撑体系施工

内支撑将围护墙的侧向荷载传至对侧，是控制软土基坑位移的主要构件。首道支撑宜尽量靠近冠梁布置，以减小墙顶悬臂长度；下部支撑随开挖深度逐层安装。混凝土支撑刚度较大，适合平面尺寸较规则的闸站主体，钢支撑安装速度快，便于局部调整。钢支撑拼装前应检查法兰、螺栓和焊缝，吊装就位后及时施加预轴力，常按设计轴力的 40% ～ 60% 分级加载，每级稳压后记录油压和支撑伸长量。支撑端头与围檩之间不得留有松动间隙，斜撑节点还要设置抗滑构造。土方机械从支撑下方通过时应控制净空，严禁碰撞立柱和支撑[5]。拆撑前先完成底板、侧墙及换撑构件，并核对混凝土强度；拆除顺序与安装顺序相反，分区对称卸载，避免围护墙突然失去约束。对平面较大的泵房基坑，可设置临时立柱桩缩短支撑计算跨度，立柱垂直度通常控制在 1/300 以内。

表 1 软土深基坑关键工序常用控制参数

控制项目	常用范围或要求	检查方式
地下连续墙厚度	600 mm ～ 1 000 mm	设计图及尺量
成槽垂直度	不大于 1/300	超声成槽检测
水下混凝土坍落度	180 mm ～ 220 mm	现场试验
搅拌桩水泥掺量	18% ～ 22%，以试桩为准	流量与总量核验
钢支撑预加轴力	设计轴力的 40% ～ 60%	油压表和轴力计
单层开挖厚度	1.0 m ～ 2.0 m	水准仪复核
坑内水位控制	低于开挖面 0.5 m ～ 1.0 m	水位孔观测
坑底加固强度	28 d 不低于 0.8 MPa ～ 1.0 MPa	钻芯或试块

2.4 基坑降水开挖施工

降水和土方开挖应作为同一工序统筹安排。坑内降水井可沿基坑周边和中部布置，滤管进入主要含水层，井口设置流量计和水位测管。正常开挖时，地下水位宜保持在当前开挖面以下 0.5 m ～ 1.0 m，承压水则根据抗突涌验算确定降压幅度。估算井群抽水量时可采用达西定律：

$$Q=kiA \tag{2}$$

式（2）中，Q 为渗流量，m^3/s；k 为土层渗透系数，m/s；i 为水力坡降；A 为过水断面面积，m^2。计算结果用于确定水泵能力和井数，实际抽水量还应由试抽水修正。开挖采用分层、分区和对称方式，每层厚度一般控制在 1.0 m ～ 2.0 m，靠近围护墙和立柱的土体由小型机械配合人工清除，避免超挖。每一开挖区长度可控制在 15 m ～ 25 m，土方完成后尽快施工垫层或安装支撑。雨季在坑顶设置截水沟，坑内设置排水沟和集水井，备用泵能力不低于最大日常抽水量的 30%。河道水位快速上涨时减少开挖面暴露，并核对帷幕外水位变化。开挖至设计标高前保留 200 mm ～ 300 mm 保护土层，由人工清底后立即浇筑垫层，减少软土受水浸泡和机械扰动。

2.5 坑底加固施工

坑底加固用于提高被动区强度，减少围护墙底部位移和基底隆起。闸站泵房底板下方可采用三轴搅拌桩、高压旋喷桩或水泥土格栅，加固范围重点覆盖围护墙内侧、支撑立柱周边及进出水流道高差位置。常见加固深度为坑底以下2 m～4 m，平面上形成连续块体或格栅体，水泥掺量可按15%～20%试配，28 d无侧限抗压强度一般不低于0.8 MPa～1.0 MPa。正式施工前应通过试桩确定喷浆压力、提升速度和复搅次数。加固完成后留足养护时间，再进行最后一层土方开挖；机械不得直接碾压未达到强度的桩头。验收可采用钻芯、静力触探和开挖检查相结合的方法，对强度偏低或桩间搭接不足的区域实施补桩，使坑底形成连续受力体。

3 闸站深基坑支护施工控制

3.1 施工质量控制

围护施工前复测控制点，导墙、桩位和支撑轴线的偏差分别建档；成槽、清孔、钢筋笼吊装及混凝土浇筑实行旁站记录。止水帷幕重点检查浆液比重、单桩水泥用量和施工电流，停浆、断浆位置必须注明。支撑安装后复核标高、轴线和预加轴力，焊接节点按比例进行无损检测。关键工序参数可集中列入检查表，形成施工、监理和检测三方签认[6]。图1所示为围护、支撑、降水和坑底加固的空间关系，现场应按该受力路径安排工序，避免先大面积开挖、后补支撑。出现墙缝渗水、支撑松动或坑底局部隆起时，应立即暂停邻近区域开挖，先卸载坑边堆土，再采取封堵、复加轴力或反压措施。材料复验也不能脱离工序要求，水泥应按批次检测强度和安定性，钢支撑进场后核查壁厚、直线度及端板尺寸，混凝土试件除标准养护外，可增加同条件试件作为拆撑判断依据。

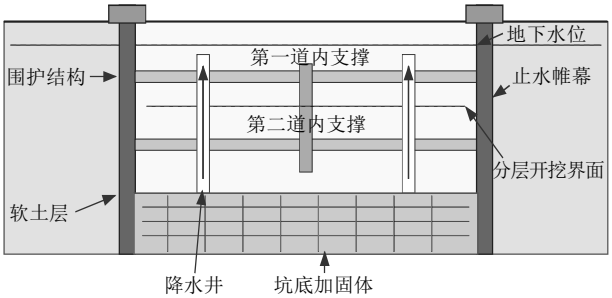


图1 闸站深基坑组合支护结构示意图

3.2 基坑监测控制

监测数据能够反映支护体系是否按设计状态工作。基坑开挖前应取得围护墙顶、周边地表、既有构筑物及地下水位的初始值，开挖期间同步监测墙体深层水平位移、支撑轴力、立柱沉降和坑底隆起。正常阶段可每日监测1次，支撑转换、暴雨或河道水位突变时提高到每日2次～4次。预警除了看累计值，还要关注变化速率和不同测项之间的对应关系，如墙体位移加快并伴随支撑轴力下降，表明节点松动；坑外水位下降同时地表沉降增大，则需减少抽水并检查帷幕。项目可将设计控制值的70%作为关注线，达到85%时启动专项复核，超过控制值立即停止相关工序。监测结论应当天反馈至施工负责人，形成“测量—分析—调整—复测”的闭环。仪器安装后应进行零点校核和保护，测斜管管口高程、轴力计编号及水位孔深度统一录入台账。数据平台可按平面分区显示变化曲线，并设置连续三次增量异常提醒，防止单点噪声造成误判。对于临河基坑，还应把外河水位纳入同一时间轴分析。闸站主体底板完成后，降水和监测仍需保持连续，待侧墙、顶板及回填形成稳定受力体系后再分级停泵。每级停泵宜观察6 h～12 h，若坑外水位回升同时出现墙体位移加快或结构渗水，应立即恢复抽水，并检查封底、施工缝及穿墙管部位，防止结构尚未闭合时产生浮托。

4 结束语

软土地基条件下的闸站深基坑施工，实质上是土体变形、水压力变化与支护结构受力不断调整的过程。围护墙、止水帷幕、内支撑、降水系统和坑底加固需要同步发挥作用，任何局部缺陷都会通过软土和地下水传递并放大。施工中应以勘察和设计为基础，用试桩、试抽水确定关键参数，以分层开挖缩短暴露时间，再通过质量检查与动态监测修正施工节奏，从而在控制基坑变形的同时，减少对闸站周边水系和既有设施的影响。

参考文献：

[1] 李玉强，夏扬，赵宇. 高水位软土深基坑支护关键技术与变形控制研究[J]. 红水河，2025(04):134-138,146.
[2] 王桢. 软土地区深基坑支护结构施工技术研究及质量分析[J]. 建筑科技，2024,08(05):164-167,172.
[3] 廖炫杰，孙小强. 周边环境复杂的深基坑支护施工技术[J]. 云南水力发电，2024,40(01):76-80.
[4] 曹星，曹冰心. 软土地区深基坑施工对周边环境的影响[J]. 电力勘测设计，2025(10):87-90,96.
[5] 李煜峰. 软土地区紧邻地铁车站深基坑支护设计实践[J]. 建筑施工，2024,46(07):1093-1097.
[6] 谭代强，黄斯导. 临江半悬臂式深基坑支护与内支撑拆除施工关键技术[J]. 广东土木与建筑，2026,33(02):90-93.

山区高速隧道软弱围岩段开挖支护施工技术应用

李 超

（四川西香高速建设开发有限公司，四川 西昌 615000）

摘 要 针对山区高速隧道软弱围岩自稳差、变形快、易坍塌的特点，本文坚持“管超前、严注浆、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”原则，阐述超前地质预报、管棚与小导管注浆预支护、三台阶七步及中隔壁法分步开挖、湿喷钢拱架初支、径向注浆堵水、仰拱二衬适时封闭等技术，建立预报与量测联动、按变形反馈动态调整工法参数的信息化机制。结果表明，该技术可控制围岩变形、加快支护成环、稳定掌子面，为同类工程提供借鉴。

关键词 山区高速隧道；软弱围岩；分步开挖；超前支护；初期支护

中图分类号：U455.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.019

0 引言

山区高速隧道常穿越断层破碎带、强风化层和松散堆积体，洞口多浅埋偏压，围岩自稳时间短、变形快，工法不当或封闭不及时易发生掌子面失稳、拱顶坍塌和侵限。施工中需以超前预支护改善围岩、分步开挖控制临空面、强初支早封闭约束变形，依靠量测动态调整。随着机械化、信息化应用，开挖支护逐渐由经验组织向预报、开挖、支护、量测闭环转变。因此，研究山区高速隧道软弱围岩段开挖支护施工技术，对保障施工安全、控制质量、提升隧道建造水平具有现实意义。

1 山区高速隧道软弱围岩段工程特点与施工原则

1.1 软弱围岩工程特性与变形特征

山区高速隧道软弱围岩多为Ⅴ级、Ⅳ级围岩，岩性以泥岩、页岩、千枚岩、断层角砾和松散坡积土为主，具有强度低、完整性差、遇水软化、流变明显等特征。受构造挤压和风化作用影响，节理裂隙发育、岩体破碎，部分段落富含地下水，开挖后地下水沿裂隙渗出甚至涌水，进一步降低结构面抗剪强度，使围岩自承能力显著下降。洞口浅埋、偏压段覆盖层薄，地表沉降易向洞内传导，施工扰动后更易发生开裂和滑塌[1]。

从变形特征看，软弱围岩开挖后应力释放快，表现为拱顶下沉量大、周边收敛持续时间长、掌子面挤出和底鼓明显，变形具有明显的时间效应和空间效应：开挖通过初期变形速率高，若初期支护不能及时封闭成环，变形会持续累积并可能出现钢拱架扭曲、喷层开裂乃至坍塌。围岩变形同时受开挖步序、循环进尺、支护时机和地下水影响，参数之间相互耦合。这就要求施工不能沿用硬岩隧道“大进尺、强爆破、后支护”的做法，而应把围岩作为支护体系的一部分，及时约束、主动加固，充分发挥其自承能力[2]。

1.2 开挖支护总体原则

软弱围岩段施工遵循“管超前、严注浆、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”的原则。管超前，是在开挖前以管棚、超前小导管等对掌子面前方围岩预支护，形成承载拱；严注浆，是通过超前和径向注浆充填裂隙、固结松散体并堵截地下水；短进尺，是缩小开挖循环进尺、减少单次临空面暴露时间；强支护，是采用喷射混凝土、钢拱架、锚杆（管）和钢筋网组成刚度足够的初期支护；早封闭，是使初支尽快仰拱落底、封闭成环；勤量测，是通过连续监测掌握变形、指导施工。

2 山区高速隧道软弱围岩段开挖支护施工技术

2.1 超前地质预报与围岩级别动态确认

超前地质预报是软弱围岩动态施工的前提，采用长中短距离相结合、物探与钻探相结合的方式。长距离以弹性波反射法（TSP）探测前方断层、破碎带和岩性界面的位置与规模，中短距离以地质雷达识别掌子面前方松散体、空洞和富水区，对异常部位辅以超前水平钻探取芯和孔内出水观测，直观确认岩体状况；每班由技术人员开展掌子面地质素描，记录岩性、产状、出水和掉块情况[3]。

作者简介：李超（1990-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁（隧道工程）。

各类预报成果相互印证、综合判释，形成前方地质条带图和风险提示，用于动态确认围岩级别并预先调整开挖工法、循环进尺和支护参数。当预报揭示断层破碎带、涌水或围岩级别降低时，提前加密超前支护、缩短进尺、增设临时支护并备好排水和注浆设备；围岩条件好于预期时，按程序优化支护参数。通过把地质预报纳入工序管理，做到“先探后掘、不探不掘”，避免盲目开挖诱发掌子面失稳，为开挖支护方案的动态调整提供可靠依据。

2.2 超前预支护与注浆加固

超前管棚适用于洞口浅埋、偏压和断层破碎带等自稳能力极差的段落。管棚沿开挖轮廓线外缘按设计外插角打设，钢管分段连接、棚护范围跨过不稳定段，钢管内注浆并与洞口套拱及钢拱架连成整体，形成沿纵向承载的“伞状”防护，承担上部松散荷载、限制坍塌发展。管棚施工控制钻孔角度和搭接长度，防止侵限和棚护空档，注浆采用水泥浆或水泥水玻璃双液浆，按先无水后有水、由下而上的顺序施注并检查固结效果。

洞内一般软弱围岩段采用超前小导管注浆，小导管沿拱部周边按设计环向间距和外插角打设，前端加工成锥形并钻设溢浆孔，尾部与钢拱架焊接，注浆压力和注浆量双控，使浆液在围岩中扩散胶结，形成具有一定厚度的加固圈。对裂隙水发育、掌子面不稳的部位，配合掌子面喷射混凝土封闭、局部超前玻璃纤维锚杆和洞内周边帷幕注浆，先堵水加固后开挖。注浆结束后按设计检查注浆量、压力、涌水量和加固体强度，必要时补注浆，确保前方围岩在开挖时具备短期自稳能力。

2.3 分步开挖工法与循环控制

软弱围岩段以分部开挖、快速支护为基本要求，根据断面跨度和围岩稳定性选择工法。围岩稍好的Ⅳ级段采用台阶法，上、中、下台阶错开推进，台阶长度满足机械作业又不过长；Ⅴ级及破碎富水段采用三台阶七步开挖法，将断面分为环形拱部、中部和下部多个开挖面，弧形导坑先护拱、两侧交错落中槽、及时接长钢拱架并施作仰拱，使支护尽早成环；对大跨、浅埋和变形难以控制的地段，采用中隔壁法或交叉中隔壁法，以临时中隔墙和仰拱分割断面、控制沉降[4]。

开挖坚持短进尺、弱扰动，循环进尺与一榀或两榀钢拱架间距相匹配，一般控制在0.5 m～1.0 m，开挖后立即初喷封闭、架立钢拱架、施作锁脚锚管（杆）并复喷至设计厚度。机械开挖为主，采用挖掘机配合破碎锤修边，尽量减少爆破；确需爆破时采用光面爆破、小药量、短进尺，降低对围岩和已作支护的振动。开挖轮廓预留足够的变形量和支护沉降量，避免变形侵限；上台阶中部保留适量土体支挡掌子面，随开挖随清除。各开挖面保持合理步距、平行流水，仰拱紧跟下台阶及早封闭成环，缩短围岩暴露和支护未闭合的时间。

2.4 出渣、防排水与作业组织

软弱围岩段出渣与开挖支护紧密衔接，上台阶采用挖掘机扒渣、装载机配合自卸车运输，减少掌子面存渣和机械对初支的碰撞；仰拱施工采用自行式移动栈桥，保证出渣车辆通行的同时在栈桥下方连续施作仰拱和填充，解决仰拱施工与运输干扰，加快封闭成环速度。洞内道路保持平整、排水通畅，富水段设置集水井和水泵分级抽排，防止积水浸泡拱脚和基底引起软化、沉降。

作业组织推行机械化配套和标准化循环，将超前支护、开挖、出渣、初支、量测纳入循环作业图表，明确各工序用时和衔接条件，做到支护不到位不进入下一循环、量测数据异常不盲目掘进。加强通风、照明和用电管理，对涌水、掉块和变形地段设置专人巡查。通过紧凑有序的组织，把每循环围岩暴露时间压缩到较短范围，使超前支护、开挖和初期支护形成连续、稳定的作业节拍，为控制软弱围岩变形创造条件。

3 支护施工与变形控制技术

3.1 初期支护快速施作与封闭成环

初期支护是约束软弱围岩变形的主要承载结构，由喷射混凝土、钢拱架、系统锚杆（锁脚锚管）和钢筋网组成，开挖后及时施作、快速闭合。喷射混凝土采用湿喷工艺和湿喷机械手，先对岩面初喷一层封闭，再在出渣、架立钢拱架后复喷至设计厚度；湿喷混凝土回弹少、匀质性好、早期强度高，掺加速凝剂后迅速与围岩密贴，及时提供支护抗力。钢拱架按设计间距架立，连接板螺栓连接、纵向钢筋拉结，拱脚置于稳固基础上并设置垫板，防止下沉[5]。

锁脚锚管（杆）是控制拱架下沉和收敛的重要环节，在各台阶拱脚处按设计角度打设并与钢拱架可靠焊接、注浆固结，把拱架荷载传入深部稳定岩体；系统锚杆按梅花形布置，破碎段以中空注浆锚杆替代，注浆后兼具加固和锚固作用。钢筋网随岩面起伏铺设、搭接牢固，与钢拱架和喷层形成整体。施工中重点控制初喷及时性、钢拱架垂直度和连接质量、锁脚锚管角度

以及喷层厚度，仰拱初期支护紧跟开挖落底，使整个初期支护尽早封闭成环，发挥封闭结构的承载能力。

3.2 径向注浆加固与地下水处治

对初期支护完成后仍存在渗漏水、围岩松弛或变形偏大的地段，实施径向注浆加固。径向注浆管（锚杆）通过初支或在开挖轮廓外按设计孔位、深度和间距打设，浆液充填围岩裂隙、固结松弛圈，并在初支背后形成止水固结层，减小地下水对围岩的软化和对支护的压力。注浆根据水量选择水泥浆或双液浆，分段分级控制压力，防止压力过高击穿掌子面或造成初支变形，注浆过程中观察支护和出水变化，做好记录。

地下水处治坚持“防、排、堵、截相结合，因地制宜、综合治理”。掌子面涌水采用超前帷幕或局部注浆封堵，集中出水点设置引流管将水导入洞内排水系统，避免直接冲刷喷层和作业面；初支与二衬之间铺设防水板和无纺布、按设计布设环纵向盲管与排水边沟，形成可靠的防排水体系。注浆效果通过检查孔涌水量、取芯固结情况和压水试验评定，未达要求补注浆。通过加固与堵水并举，改善围岩力学条件，降低富水软弱围岩段的变形和渗漏风险。

3.3 仰拱与二次衬砌适时施作

仰拱是支护结构封闭成环、控制底鼓和整体沉降的关键，应紧跟下台阶施作，做到“仰拱先行、尽早闭合”。仰拱开挖控制超挖和对拱脚的扰动，虚渣、积水清除干净后浇筑混凝土，仰拱与填充分层施作并按设计设置钢筋，仰拱接头与边墙初期支护顺接。利用移动栈桥实现仰拱连续施工和车辆正常通行，保证仰拱与掌子面、二次衬砌之间的安全步距，避免步距过大导致初支长期开口、变形累积。

二次衬砌是安全储备和防水承载结构，其施作时机由监控量测确定：当拱顶下沉、周边收敛速率明显减小并趋于稳定、位移达到预计总量的规定比例，且初期支护表面裂缝不再发展时施作二衬。衬砌采用全断面液压台车整体浇筑，混凝土对称、分层、连续入模，加强振捣和拱顶带模注浆，保证背后密实、无空洞；二衬钢筋、防排水板和施工缝、变形缝止水带按规范安装。软弱围岩段二衬适度紧跟，与仰拱、初支共同形成长期稳定的支护体系，既不盲目抢工造成开裂，也不过度滞后削弱安全储备。

3.4 监控量测与信息化动态施工

监控量测贯穿软弱围岩段施工全过程，分为必测项目和选测项目。必测项目包括洞内观察、拱顶下沉、周边收敛和洞口浅埋段地表沉降，按规定断面和频次观测，开挖后及时读取初始值；选测项目包括围岩内部位移、围岩与初支接触压力、钢拱架应力、锚杆轴力和二衬接触压力等，用于判断支护受力状态。测点埋设牢固、标识清晰，爆破和出渣后加强保护，保证数据连续。

量测数据及时整理，绘制位移时态曲线和速率曲线，采用回归分析预测最终位移，对照变形管理等级和预警值实施动态控制：变形速率正常时按既定参数施工；接近预警值时加密观测、减缓进尺、补强支护；超过控制值或出现异常加速时，立即停工撤人，采取增设临时仰拱或横撑、补打锚杆注浆、提前封闭仰拱等措施，待变形回稳后复工。在此基础上推行自动化、无线传输监测，在典型断面安装固定式测斜、收敛和应力传感器，数据实时上传信息化平台并与超前地质预报、开挖进度和支护参数关联，结合三维模型展示变形分布和发展趋势，实现“预报—开挖—支护—量测—反馈”的闭环管理，使软弱围岩施工由经验判断转向数据驱动、动态决策。对长大软弱围岩段，可将监测数据接入数字孪生平台，与三维地质模型和开挖进度关联，以云图展示变形与受力分布，辅助工法切换和资源调度，推动施工由被动处置向主动预判转变。

4 结束语

本文阐明软弱围岩低强、破碎、变形快、自稳差特征，确立“管超前、严注浆、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”原则，总结预报定级、管棚小导管预支护、三台阶七步、中隔壁开挖、湿喷钢拱架、锁脚锚管强初支、注浆堵水、仰拱先行、二衬封闭、量测预警技术，提出以预报探明条件、分部开挖控扰动、封闭约束变形、量测指导调整，保持掌子面、围岩稳定，抑制坍塌。未来需深化自动监测与工况关联，发展变形预测与机械化软岩工法，提升数字化水平。

参考文献：

[1] 覃群 . 软弱围岩条件下桥隧过渡段支护结构施工技术 [J]. 西部交通科技 ,2026(06):133-135.
[2] 朱泽豪 . 高速公路特长隧道初期支护施工技术与质量控制 [J]. 工程技术研究 ,2026,11(12):147-149.
[3] 郝江 . 软弱围岩公路隧道施工变形与控制技术 [J]. 交通世界 ,2026(18):145-147,151.
[4] 李港回 . 基于大跨度软弱围岩的高速公路隧道施工技术 [J]. 工程技术研究 ,2026,11(11):76-78.
[5] 覃钊泽 . 山区公路隧道施工安全风险识别与动态控制技术研究 [J]. 运输经理世界 ,2026(16):89-91.

水利工程超深竖井地表帷幕灌浆防渗优化设计与应用

阮 超

（中国水利水电第六工程局有限公司，辽宁 沈阳 110169）

摘 要 案例工程6-1#竖井深度616.5 m，属超深竖井，原设计采用井内防渗固结灌浆方案，但施工揭示无地面预注浆井段渗水显著，降雨后最大出水量达22 m^3/h，且存在井内交叉作业安全风险高、占用直线工期、灌浆压力受限导致防渗效果不佳等问题。本文提出将井内防渗固结灌浆优化为地表帷幕灌浆方案，通过井口平台环形布孔（布孔圈半径6.8 m，30个灌浆孔，孔深55.5 m），与地面预注浆段搭接5 m，构建垂向连续防渗体系。从灌浆机制、参数设计、施工工艺及质量控制等方面开展研究，以期为超深竖井防渗设计提供技术参考。结果表明：优化方案采用分级压力控制（最大2.0 MPa）、水泥—水玻璃双液浆及分序加密工艺，灌浆后目标透水率 $q \leqslant 3$ Lu；虽然直接费用增加约23.70万元，但消除了井内交叉作业安全隐患，缩短总工期约6个月，防渗可靠性显著提升，综合效益远高于成本增量。

关键词 超深竖井；帷幕灌浆；浆液变换；帷幕搭接

中图分类号：TV543 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.020

0 引言

竖井作为水利、交通及矿山工程中的关键地下结构，其防渗性能直接决定围岩稳定性和长期运行安全[1]。随着工程建设向深部发展，竖井深度已普遍超过300 m，部分工程甚至达到1 000 m以上，高地应力、高裂隙水压及复杂水文地质条件对竖井的防渗加固技术提出了严峻挑战[2]。在富水地层中，地下水渗流不仅降低围岩自稳能力，还可能引发涌水、塌方等灾害，合理选择防渗加固方案是竖井建设的核心问题之一。

案例工程6-1#竖井采用井内灌浆与竖井掘进、衬砌同步进行的作业模式。施工过程中灌浆工序占用竖井掘进直线工期，按原设计排距3.0 m、每段灌浆及候凝时间约24 h～36 h计算，仅防渗固结灌浆一项将延长总工期约15 d～20 d，严重影响工程整体进度。此外，井内空间受限，灌浆压力及扩散范围难以保证，易形成不连续防渗体[3-4]。为规避安全风险、保障工期并提升防渗效果，需优化施工方案。帷幕灌浆作为成熟的防渗技术，在水电大坝及地下工程中已得到广泛应用，其地表施工可避免井内交叉作业，形成连续、可控的防渗帷幕[5]。基于此，本文提出将原井内防渗固结灌浆优化为地表帷幕灌浆，通过环形布孔与地面预注浆段搭接，构建完整的垂向防渗体系。从灌浆机制、参数设计、施工工艺及质量控制等方面开展理论研究，验证优化方案的可行性、安全性与经济性，以期为超深竖井防渗设计提供理论依据。

1 案例工程概况

案例工程6-1#竖井井深616.5 m，属超深竖井，其防渗设计采用井内防渗固结灌浆方案，即在掘进与衬砌过程中同步实施孔深5.0 m的固结灌浆，但施工揭示无地面预注浆井段渗水显著，降雨后最大出水量达22 m^3/h，表明原方案难以有效控制地下水。已有研究表明，井内灌浆与开挖衬砌交叉作业存在高空坠物风险，且灌浆工序占用直线工期，严重影响施工效率[6]。

该工程竖井穿越地层自上而下依次为质岩类、碎块石土、砂卵砾石夹漂石及白云岩夹页岩、炭质页岩等复杂地质。地下水类型主要为基岩裂隙水，总体属中等至强富水地层。竖井采用复合式衬砌结构，衬砌混凝土厚度50 cm～60 cm。地面预注浆共设置8个注浆孔，布孔圈半径6.2 m，注浆段长度608 m，起止高程675 m～67 m。防渗固结灌浆原设计布置于JS0+11.6～JS0+50.5无地面预注浆井段，对应高程713.9 m～675 m，段长38.9 m。固结灌浆孔深度5.0 m，每排15个灌浆孔，排距3.0 m，呈梅花形布置，如图1所示。

作者简介：阮超（1981-），男，本科，高级工程师，研究方向：水利水电工程施工管理。

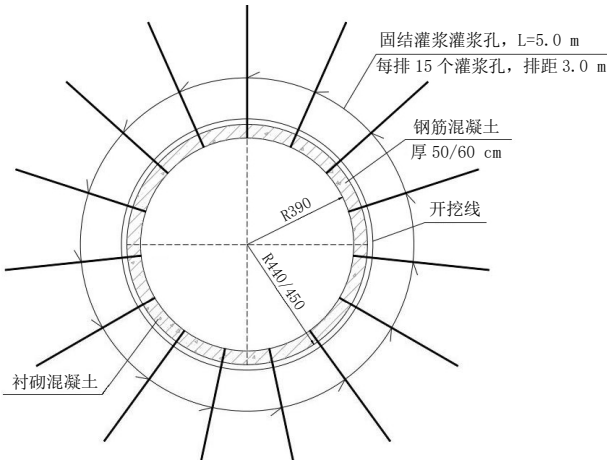


图 1　竖井防渗固结灌浆布置图

2　方案设计及优化

2.1　帷幕灌浆优化思路与参数设计

基于上述问题，在确保工程安全与质量的前提下，将原井内防渗固结灌浆变更为地表帷幕灌浆，通过调整灌浆工艺，确保达到更优的防渗效果，同时兼顾施工效率与经济性。

具体优化思路如下：利用井口平台开阔场地，从地表向下钻孔，形成环形帷幕，与已完成的地面预注浆段搭接，构建垂向连续防渗体系。该方案可避免井内交叉作业，同时实现更大深度、更大范围的防渗加固，确保防渗体系在垂向上无空白段，增强整体防渗可靠性。

在井口平台布置1环帷幕注浆孔，布孔圈半径6.8 m，共 30 个灌浆孔，孔间距 1.42 m，孔深 55.5 m，注浆段长度 43.5 m（起止高程为 713.5 m～670 m），与地面预注浆顶部高程 675 m 搭接 5 m。

2.2　灌浆材料、压力及孔段划分

帷幕灌浆的浆材由主材和辅材共同构成。主材为 P.O 42.5级普通硅酸盐水泥，辅材为水玻璃（模数3.0～3.5，波美度 45°），用于配制水泥—水玻璃双液浆，以提高速凝效果，适用于裂隙发育、吃浆量大的地层。浆液比级采用 2:1、1:1、0.7:1、0.5:1 四个水灰比级，由稀至浓逐级变换。

帷幕灌浆施工过程中所需要的浆液由制浆站提供，制浆站布置在井口平台处，配备 ZJ-600L 高速制浆机、两个 JP400L 双层搅拌桶，通过 Φ25 mm 管路输送至井口作业面。

根据孔序及孔深，实行分级压力控制，将全孔55.5 m划分为 8 个灌浆段。为逐步加密、提高帷幕均匀性，30 个帷幕孔分为三个次序施工——Ⅰ序孔 8 个、Ⅱ序孔 7 个、Ⅲ序孔 15 个。Ⅰ、Ⅱ序孔采用自上而下分段钻孔、分段灌浆，Ⅲ序孔作为加密孔，根据地层情况采用自上而下或自下而上分段灌浆。从渗水量相对较大的方向开灌，灌浆压力视注入率动态调整，确保浆液有效扩散与裂隙充填。帷幕灌浆设计参数如表 1，各段长度及设计灌浆压力如表 2 所示。

表 1　帷幕灌浆设计参数

施工项目	孔序	设计工程量			设计孔深 /m
		孔数 / 个	覆盖层 /m	基岩 /m	
帷幕灌浆 1 环	Ⅰ序孔	8	96	348	55.5
	Ⅱ序孔	7	84	304.5	55.5
	Ⅲ序孔	15	180	652.5	55.5
合计		30	360	1 305	166.5

表 2　不同灌浆段设计灌浆压力统计表

段次	孔深 /m	段长 /m	Ⅰ序孔压力 /MPa	Ⅱ序孔压力 /MPa	Ⅲ序孔压力 /MPa
1	14	2	0.5	0.7	1.0
2	20	6	0.7	1.0	1.5
3	26	6	1.0	1.0	1.5
4	32	6	1.0	1.0	1.5
5	38	6	1.0	1.0	1.5
6	44	6	1.0	1.0	1.5
7	50	6	1.0	1.0	1.5
8	55.5	5.5	1.0	2.0	2.0

3　施工工艺与关键技术

3.1　施工流程与钻孔技术

单孔施工流程：根据孔序不同，单孔施工分为自上而下分段灌浆法和自下而上分段灌浆法两种流程。

1. 自上而下分段灌浆流程（适用于Ⅰ、Ⅱ序孔及部分Ⅲ序孔）：钻入第一段（2 m～6 m）→洗孔、压水→灌浆→待凝→扫孔→钻入下一段→重复上述步骤直至终孔→全孔封孔。

2. 自下而上分段灌浆流程（适用于部分Ⅲ序孔）：全孔一次钻至设计深度→自孔底向上分段→每段下设灌浆塞→洗孔、压水→灌浆→提升灌浆塞至上一段→重复直至孔口→封孔。

竖井地表覆盖层厚度约13.5 m，主要由碎块石土、砂卵砾石组成，结构松散，易塌孔。因此，在钻孔过程中，覆盖层采用跟管钻进形式，采用HM-90SC全液压履带式锚固钻车，配备Φ130 mm钻头，采用跟管钻进工艺，边钻进边下入Φ108 mm套管，直至穿过覆盖层进入基岩2 m，钻进完成后，在套管内注入水泥浆固结，形成稳固的孔口管，待凝48 h后方可进行后续基岩钻进；基岩采用回转钻进形式，该段采用XY-2型地质回转钻机，钻孔孔径Φ76 mm，钻头选用硬质合金或金刚石钻头，根据地层情况调整钻压与转速。钻进过程中采用清水循环，及时排除岩粉，保持孔内清洁。

同时，为保证帷幕搭接效果，须严格控制钻孔偏斜。在开孔前使用罗盘、水平仪校准钻机立轴，确保其倾角与方位角符合设计要求。在钻进过程中，每10 m进行一次孔斜测量，采用陀螺测斜仪或精度不低于±0.5°的电子测斜仪。终孔孔底允许偏差按孔深控制：孔深55.5 m时，最大允许偏差不大于1.2 m。

3.2 灌浆方法与控制技术

采用孔口封闭、孔内循环灌浆法。灌浆塞置于孔口或孔内预定位置，浆液通过钻杆注入孔底，经孔壁裂隙进入地层，多余浆液经回浆管返回搅拌桶形成循环。对于Ⅰ、Ⅱ序孔，采用自上而下分段灌浆，每段灌浆结束后待凝8 h～12 h再钻下一段；对于Ⅲ序加密孔，可采用自下而上分段灌浆，以提高施工效率。

在灌浆过程中，采用抬动监测与压力分级控制技术。起始阶段采用较低压力（设计值的20%～40%），根据注入率变化逐步升压。注入率与压力关系如下：当吸浆率＞30 L/min时，使用0.2P；15 L/min～30 L/min时，使用0.4P；＜15 L/min时，使用0.8P；终灌阶段达到设计压力。

3.3 浆液比级与变换标准

开灌水灰比根据压水试验透水率确定。透水率≤10 Lu时，采用2:1浆液开灌；10 Lu～30 Lu时，采用1:1开灌；＞30 Lu时，可直接采用0.5:1浓浆开灌。

浆液采用由稀至浓的逐级变换变标准：当灌浆压力保持不变而注入率持续减少，或注入率不变而压力持续升高时，不得改变水灰比；当某级浆液注入量达到300 L以上，或灌注时间已达30 min，而灌浆压力和注入率均无明显改变时，改浓一级水灰比；当注入率大于30 L/min时，可视情况越级变浓（直接从2:1跳至0.7:1）。此外，在灌浆过程中若出现漏浆、冒浆、串浆等异常情况，可越级变浓或改用水泥—水玻璃双液浆。灌浆段在设计压力下，注入率不大于1 L/min后，屏浆30 min，屏浆期间平均注入率不超过1 L/min，即可结束该段灌浆。

4 技术经济分析

为客观评估优化方案的工程经济性，依据《水利工程设计概（估）算编制规定》（水总〔2024〕323号）及本工程实际施工条件，分别对原井内防渗固结灌浆方案与地表帷幕灌浆方案进行费用估算约98.29万元，帷幕灌浆费用约121.99万元，优化后增加费用约23.70万元。虽然直接工程成本有所上升，但其在防渗效果、施工安全、工期保障三方面的综合效益远高于成本增量，是一项技术上先进、经济上合理、安全上可靠的优化举措。

5 结论

针对案例工程6-1#竖井原井内防渗固结灌浆方案存在的安全风险高、占用直线工期、防渗效果差等突出问题，将其优化为地表帷幕灌浆方案是必要且可行的。优化的帷幕灌浆方案采用孔口封闭、孔内循环灌浆法，通过分序加密（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ序孔）、分级压力控制（0.5 MPa～2.0 MPa）、浆液比级变换（2:1→0.5:1）及水泥—水玻璃双液浆等关键技术，可确保浆液有效扩散与深部裂隙充填，灌后透水率目标值q≤3 Lu。通过地表环形布孔、垂向帷幕搭接，构建了完整的垂向防渗体系，有效解决了原方案的技术局限，且防渗可靠性大幅提升。

参考文献：

[1] 王耀毅,尚书毫,曾庆好,等.库尾复杂地质段超深竖井咬合桩的施工技术研究[J].云南水力发电,2023,39(10):98-101.

[2] 刘力源,纪洪广,王涛,等.高渗透压和不对称围压作用下深竖井围岩损伤破裂机理[J].工程科学学报,2020,42(06):715-722.

[3] 温东北.富水厚覆土层地区竖井施工技术[J].工程建设与设计,2020(20):132-133.

[4] 薛惠江,周王鹏,蒲仕洋,等.高水头条件下超深竖井渗透特性及防渗技术研究[J].安徽建筑,2024,31(04):127-129.

[5] 王天培.水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用研究[J].科技与创新,2026(08):155-158.

[6] 程玉泉.破碎围岩小断面渐变调压井施工关键技术[J].水利技术监督,2026(08):277-280,330.

建筑工程混凝土框架结构关键节点的施工质量控制措施

徐雪峰

（中机建工有限公司，北京 100083）

摘 要 本文结合混凝土框架结构施工特点，分析关键节点施工质量控制的重要性及常见问题，从钢筋工程、模板工程、混凝土施工工艺及养护检测等方面提出针对性技术措施，并从全过程质量管理、人员培训、信息化监管及验收改进等角度构建质量保障体系，以期为提高关键节点施工质量水平提供参考，进而保障建筑工程结构安全与使用寿命。

关键词 建筑工程；混凝土框架结构；梁柱节点；节点养护管理；节点模板安装

中图分类号：TU755 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.021

0 引言

随着我国建筑行业的高速发展，高层与大中型建筑对结构承载力、抗震性能提出了更高要求，混凝土框架结构因受力清晰、空间布置灵活的优势，成为各类建筑的主流选型。混凝土框架结构的关键节点承担着连接构件、传递内力的核心作用，其施工质量缺陷会引发应力集中，大幅降低建筑结构整体安全性。结合多年工程实践来看，节点部位的施工质量问题多源于工艺管控不到位，因此梳理关键节点常见问题，明确针对性质量控制路径，对保障建筑工程结构安全有着重要现实意义。

1 混凝土框架结构关键节点施工质量控制的重要性分析

1.1 保障框架结构整体承载力与稳定性

混凝土框架结构是以梁、柱、节点共同来承担竖向荷载和水平荷载的结构形式，梁柱节点是力传递的枢纽。节点施工质量对结构受力性能和整体稳定性都有一定的影响。节点区钢筋锚固长度不够、钢筋间距大、混凝土强度低等都会使节点核心区抗剪能力及承载力降低，进而对整个结构的受力状况造成影响。节点质量差，地震、风荷载等复杂作用下会使结构变形增大或者破坏。所以加强关键节点施工质量控制，就是保证框架结构安全稳定的先决条件[1]。

1.2 提高建筑工程安全性与耐久性

关键节点就是混凝土框架结构应力集中最严重、裂缝、钢筋锈蚀、混凝土劣化最容易发生的部位。严格控制钢筋安装、模板支设、混凝土浇筑质量，可使节点密实度提高、整体性强、结构抗渗、抗冻、抗腐蚀好，使建筑物使用寿命变长。黑龙江齐齐哈尔市第三十四中学体育馆坍塌事故调查结果表明，由于长时间超载、荷载控制失效造成的承载力不足，从而引起重大安全事故的问题十分明显。

1.3 减少结构质量缺陷与安全隐患

建筑工程施工过程中节点处的钢筋较为密集，在施工过程中所占的空间较小，并且混凝土难以进行浇筑。管理不善造成蜂窝麻面、孔洞、露筋、裂缝等质量通病，不但会影响结构的外观质量，而且会降低结构的耐久性、安全储备。需重视施工重点部位的质量控制工作，及时解决施工过程中出现的各种质量问题，防止因施工过程疏忽而造成的大面积维修、加固等现象的发生，从而提高工程质量。

1.4 促进工程建设质量目标实现

关键节点质量控制包括施工前准备阶段、施工过程实施阶段、质量验收等各个方面，是保证工程质量创优的关键。经过施工流程标准化、全过程质量管理体系创建之后，可以提高施工组织的效率、工程管理的水平，使工程质量达到设计规范、验收标准的要求，为建筑工程顺利交付和长期安全使用奠定良好的基础[2]。

2 混凝土框架结构关键节点施工中存在的主要质量问题

2.1 梁柱节点钢筋安装质量不达标

梁柱节点处钢筋多、分布杂乱，施工时容易造成钢筋规格不符、锚固长度不够、箍筋加密区不设或者

作者简介：徐雪峰（1975-），男，本科，高级工程师，研究方向：民用建筑、高标准农田施工。

设而不规范、保护层厚度过大等质量问题。施工人员为了方便安装而私自变更钢筋的位置或数量，使得节点核心区的受力性能变差。近年来的建筑质量调查发现，钢筋施工不合格也是造成结构安全问题的一个方面。例如：根据浙江省余姚市新建房顶坍塌事件分析可知，该事件主要因为施工期间存在施工工艺控制疏漏而引发，属于典型的由于设计技术方案和结构布置安排不当所造成的质量隐患。

2.2 节点区域模板支设与加固不到位

节点处的模板构造比较复杂，模板间如果存在缝隙，支撑系统容易失稳，加固措施不足的话，就会出现混凝土浇筑时产生跑模、胀模、变形等问题，从而造成构件截面尺寸出现偏差，严重时还会造成节点位置漂移。高层建筑施工的节点模板受力大，没有按照专项施工方案施工会造成结构尺寸精度、混凝土成型质量等各方面的误差。例如：根据深圳市地铁13号线白芒站工程坍塌事故调查结果可知，在施工过程中没有按照方案要求、安全技术措施进行施工，致使结构稳定性受到影响。

2.3 混凝土浇筑振捣质量控制不足

由于梁柱节点处钢筋密集、混凝土流动性不好，施工过程中会产生下料不均、振捣不到位、漏振等现象而产生蜂窝、孔洞、夹渣等问题。为了赶工期而缩短了浇筑时间，没有按照分层浇筑、连续振捣的要求进行施工，在节点核心区密实度不够，影响结构的整体性能。大体积或者高强度混凝土施工中，坍落度、浇筑工艺不合理也是施工质量隐患。

2.4 节点养护管理及成品保护不到位

混凝土浇筑完毕后养护时间不够、保湿措施不力、温度控制不准等均会造成节点处产生初期收缩裂缝，发展较慢。节点部位很容易受到碰撞、钻孔、荷载堆积造成的局部损伤。例如：通过对广东江门潭江特大桥项目坍塌事故的调查可以得出，施工中施工设备、质量管理工作存在的问题很多，施工全过程的质量控制和后期管理对工程质量起着重要的作用。所以只有加强养护管理、成品保护，才能保证节点质量达到设计要求，保证建筑工程长期安全稳定运行[3]。

3 混凝土框架结构关键节点施工质量控制的关键技术措施

3.1 加强梁柱节点钢筋工程质量控制

施工时按照设计图纸和规范要求对钢筋下料、绑扎、安装进行施工，控制钢筋的型号、数量、间距、锚固长度、箍筋的加密范围。节点核心区钢筋交叉部位使用BIM技术提前对钢筋布置进行优化，避免施工现场钢筋随意移动的情况。要建立钢筋工程全过程验收制度，对隐蔽工程进行专项检查，保证每一道工序都达到质量标准。工程建设过程中，因工程违反规范、质量管控不力等原因，引起结构的承重能力不够，从而造成失稳的情况。该案例表明，结构重要受力部位要落实质量控制的要求，保证结构的受力体系完整可靠。

3.2 严格实施节点模板安装与验收管理

模板工程是为了保证节点尺寸精度、混凝土成型质量而进行的一项工程。按照工程实际情况来制定专项施工方案，确定模板形式、支撑体系的设置、加固措施。施工前应对模板材料质量进行检查，保证模板刚度、强度、稳定性满足要求；施工过程中严格控制轴线位置、标高偏差、节点截面尺寸，防止出现跑模、涨模、漏浆现象。高层建筑、大跨度框架结构的模板支撑系统必须做严格的计算和监测来防止变形问题的发生。模板安装完毕之后，应由施工人员、监理工程师和技术管理人员对模板安装质量进行验收，合格后才能进行下一道工序。近些年来的部分工程事故调查发现，模板支撑系统失稳、施工组织不到位是引起结构质量事故的主要原因，所以必须把模板工程当作重点控制对象，实行事前防范和过程监管并重的方式。

3.3 优化节点混凝土浇筑及振捣工艺

由于梁柱节点处钢筋多、混凝土流动性差，应根据节点构造特点合理选用混凝土配合比，适当提高和易性、流动性。浇筑前要做好技术交底，确定浇筑顺序和分层厚度，采用分层浇筑、分层振捣、连续作业的方式进行，使混凝土均匀密实。振捣过程中要合理选择振捣设备和振捣时间，防止漏振和过振。对超高层建筑、大跨度结构等复杂工程来说，用自密实混凝土或者高性能混凝土来改善节点核心区的填充情况是可行的。例如：在以北京城市副中心行政办公区建设为主体的诸多工程当中，其核心部分均为高性能混凝土、细致化浇筑手段所承载，此过程中对节点部分展开全部范畴内的质量控制活动，以此来达成对结构实体品质及耐久性方面的保证作用效果。通过实践可知，改善浇筑振捣工艺是提高节点质量、减少质量通病的一种行之有效的方法[4]。

3.4 强化节点混凝土养护与质量检测

节点处温度变化、收缩应力对强度及耐久性有较大影响，养护不好易引起早期裂缝和结构破坏。施工单位要按照季节特点制订相应的养护方案，混凝土终凝后立即开展保湿养护，夏季加强降温保湿措施，冬

季做好保温防冻工作，保证混凝土处在适宜的养护环境之中。要建立起质量检测体系，使用回弹法、超声波法、钻芯取样法对节点混凝土的强度和密实度做检测。例如：通过本次对广东江门潭江特大桥施工事故的调查可以得出，施工全过程的质量监督十分重要，并且在工程施工中还存在着一些管理方面的不足之处。虽然该工程类型和房屋建筑不一样，但是它所体现出的质量管理缺失问题有很强的警示作用。所以，加强养护管理、质量检测是保证混凝土框架结构长期安全运行的有效措施。

4 混凝土框架结构关键节点施工质量控制保障体系构建

4.1 完善施工全过程质量管理机制

混凝土框架结构关键节点质量控制不能只是靠某一个施工环节实现，而应是设计、施工、监理、验收等各方面的共同参与的质量体系。施工单位应按照国家现行规范和工程实际状况，编制详细的工程质量控制计划，把重要的节点当作主要控制目标，并且实行事前筹划、事中把控、事后评判的闭环治理。施工前做好图纸会审及技术交底工作，施工期间执行样板引路、工序交接，竣工后进行实体质量检测及资料复核。全过程管理机制的形成可以提前避免质量问题的发生、及时发现和处理存在的质量问题，并使工程质量得以提高。

4.2 强化施工人员技术培训与责任落实

钢筋工、模板工、混凝土工、现场管理人员等都要通过常规的培训来提升自己对施工规范、质量标准、典型案例的掌握度。施工复杂的节点时通过现场演示、专项培训、技术交底等方式使施工人员对于施工要点、质量控制的要求有充分的认识。创建质量责任追究制度，把质量责任落实到班组、岗位、个人，建立逐层负责、逐级落实的管理体系。例如：根据齐齐哈尔第三十四中学体育馆事故调查结果可以得知，一些责任主体的质量意识薄弱、管理不到位也是造成事故的原因之一。加强责任体系建设，可以从根本上减少人为因素造成的质量问题。

4.3 推进信息化与智能化质量监管应用

随着建筑业的数字化转型，信息化、智能化技术也成为提高施工质量管理水平的一种方式。施工企业可以利用 BIM 技术建立三维可视化的模型，对梁柱节点钢筋布置、模板安装、施工过程等进行模拟分析，在施工前就可以发现设计上出现的矛盾和施工中遇到的风险。采用物联网技术布设传感器，对混凝土温度、湿度、强度发展过程进行实时监测；利用移动终端和智慧工地平台对质量问题进行在线记录、整改跟踪、数据共享，提高管理效率。以雄安新区启动区重点建设项目为例，在工程建设过程中大量使用 BIM、数字孪生、智慧工地等技术来对重要结构节点施工全过程进行数字化管理，从而提高工程的工程质量。经由实践检验可知，智能化监管能使得质量把控越发精确且迅速，给关键节点的质量掌控提供有力的技术支持 [5]。

4.4 健全质量验收与持续改进制度体系

质量验收就是对施工结果进行检验的过程，也是不断改进的基础。建立材料验收、工序验收、隐蔽工程验收、实体质量验收等各种各样的质量检查体系来对重要的部分进行重点检查，专门验收。对出现的一切质量问题及时组织开展原因分析，制定整改措施并及时反馈。建立工程质量数据库，对以往的工程质量问题加以归纳总结并形成经验反馈机制，给以后的工程提供借鉴。把质量评价结果同绩效考核、信用评价、奖惩制度挂钩，调动各参建主体质量管理水平的积极性。创建持续改进体系，持续改善施工工艺、管理流程，把混凝土框架结构关键节点施工品质提高到标准、精细、高品质的方向来发展，全方位提高建筑工程的安全性、耐久性、使用价值。

5 结束语

混凝土框架结构节点是建筑结构受力传力、抗震作用发挥的重要部分，施工质量的好坏影响整个工程安全和耐久性，需全面、全过程、细致化地做好钢筋安装、模板支架搭设、混凝土浇筑、养护等各项工作，加强施工技术及现场的监督管理工作，保证各项施工技术符合规范要求。未来需大力推进 BIM、智慧工地等信息化技术的使用，并且形成质量责任体系和验收制度，实行全过程闭环管理，为建筑工程高质量创建、安全稳定运行提供保障。

参考文献：

[1] 陈勇，杨志兵．房屋建筑工程的混凝土施工质量控制分析 [J]. 低碳世界，2024,14(03):97-99.
[2] 张金志．建筑工程大体积混凝土施工质量控制 [J]. 工程质量，2024,42(09):34-38.
[3] 江波，郑俊．工程建筑中混凝土结构施工技术及质量控制 [J]. 科技创新与应用，2023,13(20):163-166.
[4] 杨伟．建筑工程中框架剪力墙结构工程施工技术分析 [J]. 居业，2024(11):22-24.
[5] 赵宇．建筑工程中剪力墙结构设计策略解析 [J]. 中国建筑金属结构，2025,24(12):100-102.

建设项目前期报建阶段风险识别与防控

李园园

（徐州淮海国际陆港控股投资发展集团有限公司，江苏 徐州 221000）

摘 要 为提升建设项目前期报建风险管控效能，本文立足于项目报建全流程实务，识别政策法规变动、立项审批合规、投资合作主体、招标采购程序、跨部门协调衔接五大类典型风险；从制度环境、组织结构、管理能力三个维度剖析风险频发的内在成因。研究认为，报建阶段风险的本质是审批制度持续改革迭代与多层嵌套式项目组织体系之间形成的结构性矛盾。风险防控应当转变思路，由被动补救转向主动预判，构建覆盖报建全流程的风险管控体系。研究成果旨在为同类片区综合开发项目的报建管理工作提供实践参考。

关键词 建设项目；前期报建；风险识别；风险防控

中图分类号：TU721 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.022

0 引言

随着城市化发展进程的加快，城市建设不断提档升级，新型工程建设管理模式得到广泛应用。当前受宏观政策调控、市场环境变化影响，建设项目普遍面临融资落地难、市场去化压力大等问题，对项目计划管控、成本管控、质量管控提出了更高要求。前期报建是项目由决策阶段转入实施阶段的关键枢纽，需要在较短周期内并行完成立项审批、社会投资人引进、项目公司设立、招标采购等多项工作。报建任意环节出现疏漏，都将传导至后续工程建设，对项目建设进度、投资效益乃至整体合法合规性造成重大影响。因此，系统识别报建环节风险、建立完善防控机制，对保障项目平稳落地具有现实意义。

1 建设项目前期报建阶段常见的风险类型与识别

1.1 政策法规变动风险

项目前期报建工作高度依托现行法律法规与行业政策体系，国家、地方层面政策标准处于动态调整过程中。以九里湖商务中心片区项目为例，项目2021年2月正式启动，历经立项批复、投资人招标、合作协议签署等一系列环节，周期跨度较长。若推进过程中土地管理、环评、投融资监管等领域政策发生调整，已完成的前期工作成果可能需要重新论证修改。

片区开发项目涉及发改、自然资源、住建、生态环境等多个主管部门，各部门政策更新节奏不完全同步，容易出现“前序环节执行旧规、后续环节适用新规”的政策衔接冲突，进而引发系统性合规风险[1]。

1.2 立项审批合规风险

立项是报建工作的核心节点，立项批复的合规性直接决定后续各项审批手续的法律效力。九里湖商务中心片区项目立项批复包含安置房、市政道路、生态整治、科创中心四大建设板块，总投资约125.9亿元。批复文件中建设内容、建设规模、投资额度等关键要素一旦出现表述偏差，会造成后续行政许可与立项批复内容不一致。

实务中主要风险点集中在建设规模论证深度不足、投资估算计价口径不统一。片区开发多采用打捆立项模式，将属性差异较大的多个子项目合并审批，虽提升审批效率，但单个子项发生变更时，极易触发整体立项批复调整，产生连锁变动风险。

1.3 投资合作主体风险

片区开发项目投资规模大、投资回收期长，普遍采用引进社会投资人组建项目公司的开发模式。多主体共同参与虽能够分散投资压力，但也带来报建实施主体身份认定难题。项目公司从合作协议签订到完成工商注册往往需要数周乃至数月，报建手续不能长时间等待。若以母公司名义申报，申报主体会与后续实际实施主体不一致；若以尚未完成注册的项目公司申报，则会因为不具备法人主体资格被审批部门驳回，形成报建申报主体的“空档期”。除此之外，项目公司各股东话语权的分配，会直接影响报建事项决策效率。遇到方案调整、规划指标变更等事项，股东各方意见分歧，会拉长内部决策周期，挤压外部行政审批可操作时间。

作者简介：李园园（1992-），女，硕士研究生，一级建造师，研究方向：城市片区开发管理。

1.4 招标采购程序风险

报建阶段招标采购既是工程实施前置条件，也是合规审计重点管控领域。片区开发项目常采用 EPC 总承包模式，勘察、监理、设计—施工总承包等多标段并行采购，采购包数量多、投资金额高、各事项时序交叉重叠，程序上的微小瑕疵，都可能在审计巡察中被认定为违规问题。

风险主要体现在两方面：一是招标方案与立项批复匹配度不足，EPC 承包范围是否完整覆盖立项批复建设内容、标段界面划分是否契合投资合作协议，一旦出现偏差就形成合规漏洞；二是社会投资人招标与工程 EPC 招标分属两级采购行为，前者由政府主管部门审批，后者由项目公司组织实施，两类采购在审批权限、评审标准、异议处置等方面缺少统一衔接规则，容易出现权责交叉或者监管盲区 [2]。全部招标档案若归档不全，也会留下审计隐患。

1.5 部门协调衔接风险

片区开发报建既要对接管委会、发改、自然资源、住建等多个外部行政主管部门，企业内部还要完成合同会签、法务审核、财务审核等多层级流程。九里湖项目采用“管委会交办—国企统筹—项目公司落地”三级组织架构，信息在多层级传递过程中容易出现信息衰减、理解偏差。

一份投资合作协议需要经过八个内部签批环节，任意节点意见不统一或者审批滞后，都会拖慢整体进度。当外部审批存在明确受理窗口期，而内部决策链条冗长，内外节奏错配，就会造成申报材料过期、批文失效等实质性损失。

2 建设项目前期报建阶段风险的成因分析

报建阶段各类风险并非偶然发生，根源集中在制度环境、组织结构、管理能力三个层面。从制度环境来看，我国工程建设审批制度持续改革，各级政府不断调整审批事项权限、申报条件与技术标准，不同职能部门改革进度缺少统一协同，报建工作始终面临规则适用的不确定性。从组织结构来看，片区开发普遍实行“政府授权—国企统筹—项目公司实施”三级运行架构。管理层级每增加一级，就叠加一轮信息过滤与多方决策博弈。不同层级主体目标导向、利益诉求存在差异，审批衔接障碍本质是层级目标冲突，不只是简单沟通协调问题。从管理能力来看，传统项目管理中报建往往被视作事务性报送工作，企业报建专业力量配置薄弱。从业人员大多习惯于被动响应审批部门要求，缺少政策研判、风险前置预判能力，风险识别滞后于风险发生。制度、组织、能力三方面矛盾相互叠加，构成报建风险反复出现的结构性诱因 [3]。

3 建设项目前期报建阶段风险的防控

3.1 建立政策动态跟踪研判机制

应对政策变动风险，核心是变被动应对为主动预判。企业应当建立常态化政策收集、分析、预警工作机制。第一，设置专职岗位对接发改、自然资源、住建、生态环境等主管部门，收集正式文件、征求意见稿以及行业工作动态；按照审批事项分类建立政策台账，标注政策生效时间、过渡期安排，梳理对在办项目的影响。第二，在月度报建例会增加政策研判专题，对照新发布政策评估对当前审批节点的影响，提前准备材料修改方案或者备选审批路径。对于公开征求意见的重大政策，通过行业座谈、意见反馈等渠道把握政策走向，在正式文件落地前完成内部预案。第三，联动外部法律顾问、专业咨询机构，遇到政策适用争议及时获取专业解读，规避理解偏差带来的申报失误。

3.2 做细立项审批前置校核工作

立项合规风险的防控重心应前移至申报材料编制阶段，在正式递交审批部门之前完成充分的内部校核。立项申报启动前，组织设计、造价、法务专业人员开展立项方案专题论证会，确保建设内容表述口径与规划条件、可行性研究报告保持统一；统一投资估算计价基准、定额与价格依据。针对片区项目打捆立项模式，同步编制各子项独立说明文件，清晰划分安置房、市政道路、生态整治、科创中心等板块建设规模、投资额与实施边界，为后续单项调整预留空间。立项初稿完成后，主动与审批部门开展预沟通，重点确认建设内容的分类归属、审批权限的对应关系以及批复文本中关键条款的表述要求，将审批部门的反馈意见纳入材料修改后再正式递交，从源头降低批复与实际建设需求错位的风险 [4]。

3.3 健全投资合作全流程风控体系

多方投资主体参与片区开发的模式下，报建团队应在投资合作协议签署前提前介入合同条款的审核，从报建实操角度提出约束性条件。一是协议中应明确约定项目公司工商注册的最晚完成时限，并将注册完成作为启动后续规划许可、施工许可等审批手续的前置条件，避免因申报主体身份不确定而造成审批程序反复。二是协议应就项目公司层面涉及报建事项的决策权限作出专项安排，将设计方案调整、规划指标变

更、审批材料签章等高频事项纳入管控清单，明确股东议事规则，防范社会投资人单方决策偏离管控目标。三是完善项目公司章程，设立报建工作联席会议制度，协调股东之间意见分歧。同时，在协议中明确投资人在报建过程中的配合义务，限定资料提交、盖章流转时限，把合作风险转化为可落地的契约约束。

3.4 强化招标采购全链条合规管控

理顺社会投资人招标与工程招标两级采购关系，出台统一管理办法，厘清审批权限、评审衔接、异议处理归口。招标采购程序风险的防控核心在于确保招标方案与立项批复、投资合作协议之间形成严密的逻辑闭环。编制招标方案时，应将立项批复中确定的建设内容逐项分解为招标采购清单，对照合作协议标段边界交叉校验，实现建设内容全覆盖、标段划分无重叠无遗漏。对于EPC模式下设计、施工、采购合并招标的情形，招标文件中应专设条款明确EPC合同范围与立项批复内容的对应关系，要求投标文件逐项响应批复确定的建设要求。在社会投资人招标与工程EPC招标两级采购体系中，报建团队应协助制定统一的招标程序管理办法，明确两级招标各自的审批权限、评审标准的衔接规则以及异议处理的归口部门，避免因权责界面模糊引发合规争议。招标过程中产生的全部文件应完整归集，与立项、合作协议配套归档，形成完整证据链，便于后续接受审计、巡察等专项检查时快速调取[5]。

3.5 构建制度化多主体协同联动机制

针对需要管委会、集团、项目公司多方出具文件的事项，编制三级联动工作方案，推动多主体同步筹备材料，改变逐级流转模式。部门衔接风险的防控不能停留在加强沟通的层面，而应从组织架构层面建立制度化的协调运行机制。企业应推动成立报建专项领导小组，分管领导牵头，法务、财务、合约、技术等部门负责人参与，重大报建事项实行集体决策，替代现行逐级会签中“串联式”的审批模式。在具体操作中，报建团队应编制详细的审批事项清单与时间节点图，将每一项外部审批手续的受理窗口期、有效期限标注在时间轴上，据此倒排内部决策的截止日期，确保内部签批流程在外部窗口期关闭前留出足够余量。对于需要管委会、集团、项目公司三级主体分别出具文件的审批事项，应提前编制三级联动工作方案，明确各方责任人、交付标准与完成时限，在材料编制阶段即实现同步推进而非逐级流转。同时，建立报建进度周报制度，定期向领导小组同步办理状态、卡点问题与下一步计划，实现风险早暴露、早处置。

4 九里湖商务中心片区项目报建实践案例

徐州淮海国际港务区九里湖商务中心片区开发项目（一期）的报建历程较为典型地呈现了前文所述的多重风险交织特征。2021年2月管委会向陆港集团发出交办单，移交片区咨询、项目建议书编制、法务等前期工作，当月24日出具立项批复，批复涵盖安置房65.5万平方米、市政道路30.67公里、生态整治5.11平方公里、科创中心14.49万平方米四大板块，总投资约125.9亿元，建设期36个月。立项完成后，项目随即进入社会投资人招标阶段，两个标段分别由中建三局联合体、中交三航局联合体中标，双方于2021年6月启动投资合作协议谈判，拟按标段各组建注册资本1亿元的项目公司。至2021年7月初合同会签审批表签批完毕，一份协议经历了从经办人到董事长共八个层级的内部审核。项目从交办到合作协议签署仅五个月，立项审批、投资人招标、项目公司组建、合同会签多项工作高度并行，既体现了报建团队的高效统筹能力，也暴露出各环节留给风险研判的时间窗口极为有限的现实压力。

5 结束语

建设项目前期报建风险具备来源多元、动态演变的特点，单一管控手段难以根除隐患，必须围绕政策跟踪、立项审核、投资合作、招标管理、跨部门协同打造系统化防控体系。随着工程建设审批制度改革持续深化，审批事项整合、数字化报建平台普及成为新趋势，报建岗位逐渐从传统材料报送型事务岗位向风险研判型专业岗位转型。在此背景下，企业应当重视报建专业人才队伍建设，把风险管控理念嵌入报建全业务链条，推动报建管理由经验驱动转向制度驱动，为项目前期科学决策筑牢保障。

参考文献：

[1] 李志艳.房地产项目报建流程对开发环节的影响研究[J].房地产世界,2022(02):9-11.
[2] 马继锋,李滨.全过程工程咨询模式下建设项目报批报建实践与思考[J].建设监理,2025(09):35-38.
[3] 马全明.超高层建筑工程前期报建管理措施研究[J].住宅与房地产,2024(17):107-110.
[4] 宋晓旻,袁从强.大型市政工程报建风险分析及控制[J].项目管理技术,2024,22(01):137-140.
[5] 俞鹏飞,熊代燃.报批报建管理中的问题及风险控制[J].建设监理,2022(10):70-71,103.

同步磁阻电机节能改造技术及工业应用实践

王 伟

（江苏上上电缆集团有限公司，江苏 常州 213300）

摘 要 永磁辅助式同步磁阻电机以磁阻转矩为主、永磁转矩为辅，转子无鼠笼、无稀土磁体，整体损耗较异步电机降低 20% ~ 30%，达 IE5 能效等级。通过能效、温升及全生命周期成本的多维度对比可见，该类电机宽负载区间效率表现更优，转子运行温升显著降低，可有效延长轴承理论服役寿命。目前已有离心风机、水泵机组的实际改造案例，分别验证了其稳定的节电效果与良好的经济效益，旨在为工业电机存量改造提供可复制的技术路径。

关键词 同步磁阻电机；磁阻转矩；节能改造；节电率

中图分类号：TM352 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.023

0 引言

工业电机能耗在全国用电总量中占比颇高，提升存量电机能效是推进工业领域节能降碳的核心关键。永磁辅助式同步磁阻电机采用磁阻转矩主导、铁氧体永磁辅助的驱动结构，既摆脱了对稀土资源的依赖，又省去了异步电机必备的鼠笼转子结构，在能效等级、运行稳定性与维护成本上形成了区别于传统电机的独特技术优势[1]。因此，梳理同步磁阻电机节能改造效果与规模化工业应用路径，具备重要的行业参考价值。

1 同步磁阻电机节能改造技术特征

1.1 磁阻转矩与永磁转矩协同驱动结构

永磁辅助式同步磁阻电机依据磁阻最小路径闭合原理来运行，其转子铁芯按照不同角度设置多层非对称磁障通道，形成各向异性磁路结构。转子磁障结构是决定电机转矩性能的主要因素[2]，气隙磁阻随着转子位置周期性变化从而产生磁阻转矩，以此驱动转子沿着磁阻最小路径方向进行旋转。磁障通道内嵌入铁氧体永磁体，提供辅助永磁转矩，与磁阻转矩叠加形成合成电磁转矩：

$$T_{em}=\frac{3p}{4}\left[\left(L_d-L_q\right)i_d i_q+\psi_f i_q\right] \quad (1)$$

式（1）中，T_{em} 为合成电磁转矩；p 为极对数；L_d、L_q 分别为直轴、交轴电感；i_d、i_q 分别为直轴、交轴电流分量；ψ_f 为永磁体直轴磁链。第一项对应磁阻转矩，取决于直轴与交轴电感差；第二项对应永磁转矩，由铁氧体永磁体提供，且该类铁氧体辅助同步磁阻电机中磁阻转矩占比通常在三分之二以上，永磁转矩仅承担辅助部分[3]。转矩密度较纯磁阻结构电机提升，配合专用驱动器实现同步运行，不存在异步电机转差损耗。驱动器采用计及铁心损耗的最小损耗控制策略，通过合理分配定子电流使运行损耗保持在较低水平，相较传统最大转矩电流比控制，实验验证可节约约 9.79% 的运行损耗[4]，进一步提升驱动系统整体效率。

转子不设置鼠笼绕组，和三相异步电机依靠转子导条感应电流产生转矩的方式有着本质不同——转子没有电流通过，这样就消除了铜耗与涡流损耗，电机整体损耗降低了20%～30%，为能效等级提高提供了结构基础。

1.2 免稀土转子设计与宽负载高效区间

转子磁障通道采用多层非对称结构的设计方式，通过增大直轴磁路与交轴磁路的磁阻差值，让磁阻转矩贡献占比超过总输出转矩的 80%，永磁体仅负责承担辅助转矩部分，这样转矩产生机制对于磁体剩磁性能的依赖程度就降低了，为转子选用低剩磁密度的铁氧体材料替代高剩磁密度的稀土材料在设计方面提供了可行性。铁氧体耐温强度能够达到 350 ℃，矫顽力受温度的影响比较小，可以避免稀土永磁体在高温、振动、过载或者强电流冲击的情况下出现退磁现象。磁阻转矩主导的转矩合成方式让电机在 20% ～ 120% 负载区间内都保持着较高的效率，三相异步电机仅仅在 80% ～ 100% 额定负载区间内接近高效区，在轻载工况下效率衰减比较明显。

2 同步磁阻电机节能改造效果对比分析

2.1 与 YE3 系列异步电机能效对比

同步磁阻电机高效区间覆盖 20% ～ 120% 负载，宽于三相异步电机 80% ～ 100% 的高效区；7.5 kW 效率对比曲线显示，25% ～ 100% 负载区间内效率均高于 YE3 系列异

作者简介：王伟（1984-），男，本科，工程师，研究方向：电缆厂压缩空气系统。

步电机，且随负载率降低差值扩大。电机在《电动机能效限定值及能效等级》（GB 18613-2020）及IEC60034-30-2:2016标准体系下达到国家一级能效及IE5能效等级，较YE3所处的三级能效（IE3）跨越两个等级。效率提升的实质在于转子损耗结构的改变：

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_{in}} \tag{2}$$

式（2）中，η为电机效率；P_{in}为电机输入电功率；ΔP为电机总损耗，由定子铜耗、转子损耗、铁耗及机械损耗构成。YE3系列转子导条中的感应电流产生持续转子铜耗，构成ΔP的组成部分；磁阻转矩驱动结构转子无电流通过，该损耗项被消除，η相应提升，直接体现为效率曲线整体上移。

2.2 运行温升变化及轴承寿命影响

运行时的温度和温升分布对电机性能有显著影响，因此，发热和冷却一直是电机的重点研究领域[5]。转子无感应电流通过，运行过程中不产生转子铜耗与涡流发热，电机整体温升低于同容量三相异步电机。例如：某水泵现场轴承端盖温度对比可知，异步电机运行时的温度是81.7 ℃，同型号的同步磁阻电机运行温度为56.1 ℃，两者之间的温差达到了25.6 ℃，如表1所示。轴承润滑脂性能与绕组绝缘材料老化速率均随运行温度升高而加速衰减，遵循如下经验规律：

$$L = L_0 \cdot 2^{\frac{T - T_0}{10}} \tag{3}$$

式（3）中，L为运行温度T下轴承润滑脂或绝缘材料的理论寿命；L_0为基准温度T_0下的对应寿命；T-T_0为实际运行温度与基准温度的差值，以摄氏度计。把25.6 ℃温差代入指数项之后，理论寿命能够延长大约5.9倍。

表1 异步电机与同步磁阻电机轴承端盖温度及理论寿命对比

电机类型	轴承端盖温度（℃）	温差（℃）	理论寿命倍数
三相异步电机	81.7	0（基准）	1（基准）
同步磁阻电机	56.1	25.6	约5.9

2.3 变负载工况下节电率变化规律

节电率并非固定数值，随负载率变化呈现规律性波动。7.5 kW效率对比曲线表明，负载率处于25%～50%区间时，同步磁阻电机相对YE3系列异步电机的节电率达到约10%的峰值区间；负载率升至80%～100%额定区间时，两者效率差值收窄，节电率相应降低。这是由于异步电机轻载时转差、励磁损耗占比上升导致效率下降明显，磁阻转矩驱动结构无转差损耗，效率曲线相对平坦。工业现场电机选型通常留有容量裕量，实际负载率长期低于额定值，轻载区间的节电优势因此更具现实适配价值。

2.4 全生命周期成本构成占比

电机全生命周期成本包括购置成本、维护成本、能源消耗成本，这三者所占比例大致为3%、1%、96%，其中能源消耗成本占据主体地位。在购置阶段，同步磁阻电机由于需要配套专用驱动器，其初始投入成本高于同容量的三相异步电机。然而，在能源成本占绝对主导的成本结构中，效率提高所带来的电费节省幅度超过购置差价，使得投资回收周期相应缩短。在维护环节，定子线圈结构和异步电机相同，维修方式、难度及成本也一致，无需返厂维修，轴承因温升降低、故障率下降，所以维护频次和费用同步减少。

3 同步磁阻电机工业应用实践

3.1 离心风机改造应用及节电成效

某废气处理系统的离心风机改造中，原先配置的是YE3-225M-4型号的三相异步电机，其额定功率是45 kW，能效等级为IE3，运行时采用变频驱动方式，改用与原容量相同的同步磁阻电机系统，能效等级提高到IE5，同样配合变频驱动来运行。改造前后运行参数、节电效果如表2所示。在相同的运行转速1 120 r/min工况下，异步电机每小时用电量为25.62 kW·h，同步磁阻电机系统降至21.4 kW·h，节电率达到16.4%。这个数值高于常规负载工况下的通常节电水平，原因是风机类负载运行转速相对固定、负载波动较小，磁阻转矩驱动结构在稳定工况下的损耗优势得以充分展现，没有受到轻载、重载交替运行造成的效率波动影响。

表2 离心风机改造前后运行参数及节电效果对比

项目	三相异步电机（YE3-225M-4）	同步磁阻电机系统
额定功率（kW）	45	45
能效等级	IE3	IE5
运行转速（r/min）	1120	1120
每小时用电量（kW·h）	25.62	21.4
每小时节电量（kW·h）	—	4.22
节电率	—	16.4%

3.2 水泵机组改造应用及经济效益

某132 kW水泵机组改造案例中，阀门保持全开、出水压力表读数维持0.45 MPa工况不变条件下，改造前后运行参数及效益核算如表3所示：异步电机运行时电流为186.8 A，表面温度是64.2 ℃，单位小时耗电量是112.7 kW·h。而改造之后同步磁阻电机运行电流降低至143.4 A，表面温度下降到55.3 ℃，单位小时耗电

表 3 水泵机组改造前后运行参数及效益对比

项目	三相异步电机	同步磁阻电机
额定功率（kW）	132	132
出水压力（MPa）	0.45（阀门全开）	0.45（阀门全开）
运行电流（A）	186.8	143.4
表面温度（℃）	64.2	55.3
单位小时耗电量（kW·h）	112.7	87.9
单位小时节电量（kW·h）	0（基准）	24.8
年节电量（万 kW·h）	—	19.6
年节能效益（万元）	—	15.3
年节约标准煤（吨）	—	58
年减排 CO_2（吨）	—	156.6

（注：年运行时长按 330 天 ×24h/ 天计算，共 7 920 小时；电价按 0.784 元 /kW · h 计算。）

电量变为 87.9 kW·h，单位小时节电达到 24.8 kW·h。按照每年运行 7 920 小时来计算，年节电量为 19.6 万 kW·h，年节能经济效益大约是 15.3 万元。在环境效益方面，每年节约标准煤 58 吨，每年减排二氧化碳 156.6 吨。电流与温升的同步下降，体现了转子损耗降低对电机运行状态的改善，兼具经济与环境效益。

3.3 规模化改造实施流程与推广路径

规模化改造实施遵循节能诊断、试机验证、批量改造三阶段推进路径，如图 1 所示。在节能诊断阶段，完成现场用电设备的排查工作，编制初步节能方案并进行收益测算，以此明确改造对象与预期效果。在试机验证阶段，选取具有代表性的设备签订试机合同，实施小规模改造并且进行节能验收，进而形成全厂适用的改造方案。在批量改造阶段，依据验证结果签订商务合同，分批完成设备更换并且组织节能验收。按照节电率 10% ～ 30% 这个区间进行测算，规模化改造年节电量能够达到 100.8 万 kW·h ～ 302.4 万 kW·h，当节

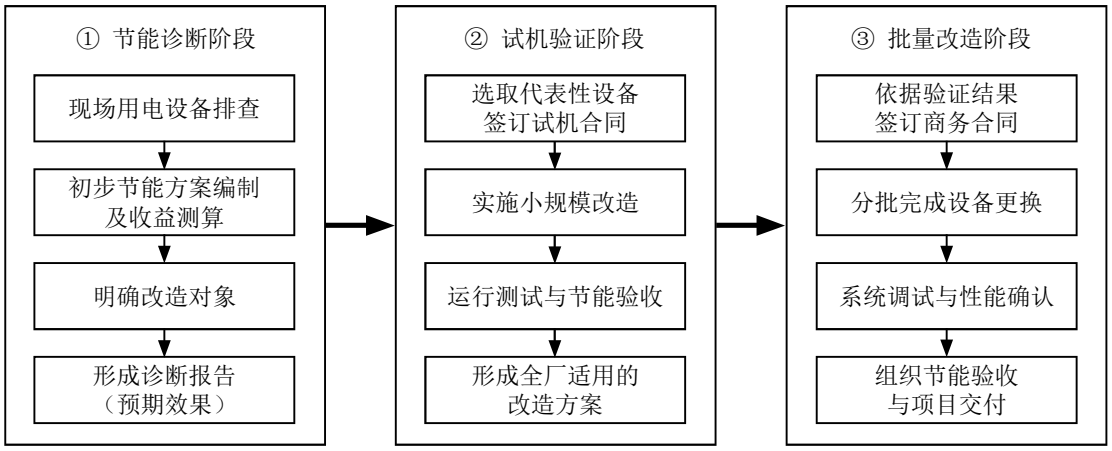


图 1 同步磁阻电机规模化改造三阶段实施流程

电率达到 10% 以上时，年节约标准煤大约为 298 吨，形成了涵盖方案设计、工程实施与运维服务的完整实施闭环，为不同行业电机存量改造提供了可复制的路径。

4 结束语

电机采用磁阻转矩与永磁转矩协同驱动结构，在完全不依赖稀土材料、转子无附加损耗的前提下实现了能效等级的显著跃升，实测温升、全生命周期成本数据，充分验证了其在运行可靠性与投入经济性上的双重优势。离心风机、水泵机组的多场景改造实践表明，同步磁阻电机节能改造技术在宽幅负载波动工况下均能输出稳定的节电效果，整套改造工艺流程成熟、落地风险可控。而通过“前期节能诊断、单机试机验证、分批次批量改造”的三阶段推进模式，更为国内同类工业电机存量能效升级的规模化推广提供了可直接复用的标准化参考路径。

参考文献：

[1] 陈彬,杨向宇,史进飞,等.永磁辅助同步磁阻电机转矩脉动抑制研究 [J]. 微特电机 ,2024,52(02):26-31.
[2] 王子贺,李存贺,焦提操,等.基于机器学习的同步磁阻电机转子结构优化研究 [J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(09):116-126.
[3] 徐潇钦,胡岩,刘泽宇,等.基于参数灵敏度的永磁辅助同步磁阻电机优化设计 [J]. 微特电机,2022,50(03):16-20.
[4] 赵子安,王一帆,李凤姣,等.考虑铁损的同步磁阻电机最小损耗控制策略 [J]. 电机与控制学报 ,2023,27(11):1-9.
[5] 曹恒佩,艾萌萌,王延波.永磁辅助同步磁阻电机研究现状及发展趋势 [J]. 电工技术学报,2022,37(18):4575-4592.

能源行业电气自动化设备故障监测与管理研究

王 毅，赵佳丽，刘晟钰

（中国能源建设集团东北电力第二工程有限公司，辽宁 大连 116023）

摘 要 能源行业电气自动化设备担负着生产控制、安全防护、智能运维的重要工作，其运行可靠性关系到能源供应的连续性和安全性。本文就电气回路、机械设备、自动化系统和通信网络等常见故障提出融合在线监测、预测性维护、冗余容错和全生命周期管理的综合策略。创建多参数状态感知体系、故障树诊断模型以及冗余备份机制，实现由被动抢修向主动预防的运维模式转变。结果表明，该体系可以明显地减少非计划停机的风险，延长设备的使用寿命，提高能源生产系统整体的可靠性以及运维效率。

关键词 能源行业；电气自动化设备；故障监测；设备管理

中图分类号：TM76 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.024

0 引言

随着新型电力系统建设持续推进、能源结构转型步伐不断加快，电气自动化设备在火电、风电、光伏、煤矿等能源核心场景的应用覆盖度持续提升，设备保有量与系统集成复杂度也同步显著增长。传统定期计划检修模式难以精准识别早期隐性故障与突发失效风险，由此引发的非计划停机，带来的经济损失与安全运行隐患正持续扩大。当前，多源传感融合、数据驱动故障诊断、全链路智能运维等技术已逐步成熟落地，为能源领域设备全生命周期状态管控提供了全新的技术实现路径。在此行业背景下，系统开展能源行业典型自动化设备的故障特征规律研究，探索构建全维度状态监测体系、迭代优化运维管理机制，对保障能源基础设施长期安全、稳定运行，具备极高的工程落地应用价值。

1 能源行业电气自动化设备的关键作用

1.1 保障能源生产精准运转

电气自动化设备是能源生产流程的精准控制中枢，在火电、水电、风电、光伏等各种能源场景里，从燃料输送、锅炉燃烧、汽轮机运转到发电机并网发电，整个生产过程环环相扣，对时序和精度要求很高。电气自动化设备利用PLC控制器、DCS分布式控制系统以及各种智能执行机构，接收传感器传来的温度、压力、流量、转速等参数，经由逻辑运算之后驱动阀门、变频器、断路器等终端设备做出毫秒级的反应。闭环控制能力保证能源转换过程一直处在设计工况之内，防止人工操作迟缓造成的参数波动。所以，电气自动化设备担负着把物理能源变成稳定电能的主要调度任务，是能源生产系统正常运转的“指挥大脑”。

1.2 构筑能源系统主动防护

电气自动化设备是能源系统安全运行的主动防护屏障，能源行业高压开关柜、变压器、发电机组等关键设备长期处于高温、高湿、强电磁干扰的恶劣环境中，电气绝缘老化、接触不良、过载发热等隐患随时都有可能引起重大事故。自动化监测设备可以实时采集电流、电压、局部放电、温度、振动等各方面的状态量，在故障萌芽期就能发现异常趋势并发出预警，联动继电保护装置在毫秒级内完成故障隔离。与传统的手工巡检只能发现明显的缺陷不同，自动化设备可以对隐性的劣化过程进行持续的感知，从而把事后抢修变成事前预防。尤其在煤矿、海上风电等高危或者偏远的场所，自动化保护系统可以在人员不能及时到达的时候自行执行安全措施，避免事故扩大[1]。

1.3 驱动能源企业降本增效

电气自动化设备是能源企业降本增效、智能运维的重要抓手，能源行业设备资产数量多、种类繁杂，传统的定期检修方式存在着过度维修、漏检并存的问题，既造成人力物力的浪费，又不能避免非计划停机造成的巨大损失。自动化设备依靠自身的自诊断系统以及对外的数据接口，把自身的健康状况及时地传送到运维管理平台当中，促使检修工作由定期的维修转变为状态检修以及预测性维护。运维人员可以根据设备实际劣化趋势而不是固定的周期来安排检修，准确地匹配出所需的备件库存和人力资源，从而延长设备

作者简介：王毅（1986-），男，本科，高级工程师，研究方向：电力工程技术。

的使用寿命并且降低运维成本。自动化设备所产生出来的大量运行数据，给能源企业的能效分析、故障溯源、寿命预测等提供基础支撑，促使能源企业由经验管理转向数据管理。新型电力系统背景之下，由于风光等新能源出力具有随机、波动的特性，因此对电气自动化设备快速调节能力的要求也越来越高，成为保证电网频率稳定、电能质量的技术手段。

2 能源行业电气自动化设备常见故障

2.1 电气回路故障

电气回路故障是能源行业自动化设备最基础也最高频的故障类型，主要是短路、接地、过流、绝缘劣化、接触不良等。高压开关柜、变压器、变频器、电缆网络等长期受到大电流冲击和电压应力的双重影响，由于导体连接处存在热胀冷缩反复的作用，使得螺栓松动、接触电阻增大，从而引起局部过热，形成恶性循环，最终导致熔焊或者起火。绝缘介质老化的因素有温度、湿度、粉尘、腐蚀性气体等，在沿海风电场、井下煤矿环境里，盐雾、瓦斯加快了绝缘的劣化速度，容易造成相间短路或者对地放电。浪涌电压、电磁干扰都会造成电子元器件绝缘层被击穿，造成控制板卡永久损坏。这类故障隐蔽性大，初期只有微弱的泄漏电流或者绝缘电阻下降，常规巡检不能发现，必须依靠在线局放监测、红外热成像等手段才能早期发现。一旦故障发展成显性短路，就会引起电弧闪爆，对人员和设备安全造成直接威胁，所以电气回路定期绝缘测试、连接点温度监测属于预防性维护的第一步。

2.2 系统工作故障

自动化系统的故障通常划分为硬件故障与软件故障两大类。其中硬件故障指电子自动化设备内部各类装置、元器件或功能组件发生物理失效，直接导致设备整体或局部功能丧失、无法正常运行。而软件故障并非仅由代码本身缺陷引发，现场运维人员若对系统权限边界、操作流程不熟悉，越权操作、误触参数等不规范作业行为，同样会触发软件层面的运行异常，进而引发系统停机等问题。因此，运维人员需系统提升专业技能，熟练掌握系统各模块的功能逻辑与操作规范，从人为操作源头上规避此类故障风险。硬件故障多为控制器死机、通信断开、传感器漂移、执行机构卡顿等，其根本原因在于元器件老化的缘故、接插件松动的情况、电源出现波动的现象或者环境受到腐蚀的影响等[2]。软件故障包含程序逻辑漏洞、参数配置失误、通信协议不符、上位机数据库异常等，一般会在系统更新或者参数变动之后突然出现。两类故障互相交织的时候，排查的难度就会增大，比如传感器数据异常是由硬件漂移造成的，也可能是由于软件滤波算法失效引起的。因此，建立故障树分析模型并采用冗余备份的方式，是提高自动化系统可靠性的主要手段。

2.3 机械设备故障

机械设备故障在能源行业电气自动化系统中主要集中在电机、泵组、风机、齿轮箱、传动机构等旋转设备上，故障的主要表现是振动异常、轴承磨损、轴系不对中、机械松动、润滑失效。电机长期运转之后，轴承滚道及滚动体由于疲劳而产生点蚀或者剥落，从而引起高频振动，并且通过壳体传递到传感器上，如果不加以处理的话，就会发展成抱轴或者扫膛事故。风机、泵组的叶轮在含尘气流或者浆液中不断受到磨损，造成动平衡被破坏，振动幅值随着转速的增大而呈指数级增长，从而拉断基础地脚螺栓。机械故障的发展过程比较缓慢，由最初的微小摩擦发展到最后的功能丧失一般要经过几个月或者更长时间，给预测性维护留出一定的时窗。利用振动频谱分析、油液磨粒检测、声发射监测等手段可以准确找到故障部位及劣化阶段，在设备完全失效之前就进行计划性检修，防止非计划停机带来的连锁生产损失。

2.4 网络通信故障

网络通信故障是造成能源自动化系统不能协同工作的主要因素，涉及现场总线、工业以太网、无线通信以及各种协议转换等各个部分。在大型火电厂或者新能源集控中心中，数以万计的 I/O 测点依靠 Profibus、Modbus、IEC61850 等协议来完成数据交互，通信电缆被强电磁场感应造成共模干扰，导致报文校验失败或者帧丢失。光纤链路因为弯曲过大、接头被污染或者受到雷击而产生光衰增大，造成通信出现间歇性的中断。交换机和路由器端口老化、地址冲突或者出现广播风暴都会造成整个子网瘫痪。软件层协议栈异常、IP 地址冲突、防火墙拦截、主站轮询超时等也会造成通信中断，但是很难找到原因。网络故障具有很强的级联放大效应，一个节点掉线就会导致上位机画面数据被冻结，控制指令不能下发，严重时还会造成全站联锁停机。因此建立冗余环网结构、设置网络状态监视探针、开展通信质量趋势分析，都是保证自动化系统信息通道高可用性所必需的[3]。

3 能源行业电气自动化设备故障监测与管理

3.1 在线监测体系建设

电气回路绝缘老化、接触不良等隐蔽性较强，需要建立电气量、温度量、绝缘状态的多参数在线监测系统。在高压开关柜、变压器等重要节点处安装无线测温传感器，对连接点由于螺栓松动引起温升的变化

进行实时监测，把事后抢修转变为事前预警。对电缆网络、变频器回路等设置局部放电在线监测装置，利用特高频、超声波传感器捕捉绝缘介质内部微弱放电信号，用相位分辨图谱分析技术识别放电类型及发展阶段。在配电回路中安装智能电动机保护器和电能质量分析仪，对电流谐波、电压波动、泄漏电流等进行连续监测，得到设备健康基线模型。

3.2 预测性维护与故障诊断

对机械设备振动异常、轴承磨损等存在较长发展周期的故障来说，需要创建以多源信息融合为基础的预测性维护体系。在电机、风机、泵组、齿轮箱等旋转设备上装设振动传感器和油液磨粒监测单元，获取振动频谱、包络解调信号以及润滑油中金属颗粒的浓度和形貌特征。通过比较正常状态下基准指纹库，用趋势外推法来估计剩余使用寿命，在设备完全失效之前发出检修工单。用网络状态监视探针、协议分析工具对网络通信故障实施即时观测，查看报文丢失率、通信延迟、光链路衰减等状况，并且借助冗余环网自愈切换记录找出间歇性中断的缘由。在诊断环节使用故障树分析模型，将电气回路异常、控制逻辑错误、通信中断等现象同底层硬件故障、软件漏洞、参数配置失当等根因进行因果映射，使运维人员很快找到问题的层次。由被动应对转为主动预判的运维模式，大大缩短了故障排查的时间，消除了由于过度检修和漏检而造成的矛盾[4]。

3.3 冗余容错与应急联动

为保证自动化系统控制器不会出现死机、通信中断、传感器漂移等故障，需从架构上设计出冗余容错和应急联动的机制。控制层采用双机热备或者控制器冗余配置，当主CPU检测到自身出现异常或者通信心跳丢失的时候，备用单元会在毫秒级之内完成无扰切换，保证控制逻辑不会被中断。关键执行回路设置硬接线后备操作通道，在网络控制失效时，运行人员可以就地手动操作来保证设备的基本安全状态。通信网络层面创建环网拓扑，并开启快速生成树协议，单点光纤断裂的时候链路可以在几十毫秒之内重组起来，防止整个子网瘫痪。软件系统实行版本管理与配置备份，程序修改之前会自动生成快照，出现异常情况时可以一键回滚到稳定的版本[5]。同时，将自动化系统的故障告警信号同视频监控系统、门禁系统以及消防系统联动起来，当发生保护动作或者设备跳闸的时候，会自动弹出对应的摄像头画面，解锁逃生通道，并且启动灭火装置。多层次容错和联动的设计把单点故障的影响范围缩到最小，给能源生产的连续性、安全性提供结构上的保证。

3.4 全生命周期运维管理

对设备从投入运行到报废各个阶段的故障风险发展变化规律进行研究，创建覆盖设备规划、采购、安装、运行、维护、检修直到报废全过程的全面运维管理体系。根据FMEA分析结果来确定设备的可靠性指标以及监测接口的要求，选择具有自诊断功能、标准通信协议的产品。安装调试阶段创建完备的电子台账，记载设备型号、出厂参数、安装方位及最初试验数据，给之后的状态评定提供参照标准。运行过程中采取分级巡检方式，即“在线监测告警+定期预防性试验+专项技术监督”，并且按照设备的重要性及风险程度来改变巡检频次和内容。检修管理实行工单闭环制度，每次发生故障或者计划检修之后，对设备的健康状况进行更新，并且记录下故障样本以及维修成果。备件管理根据故障统计、寿命预测的结果来改善库存结构，保证关键元器件可以被替换。最终依靠EAM系统同监测平台的深度融合，实现设备资产价值、可靠性以及运维成本的全面最佳，促使能源企业由依靠经验开展管理转变为依靠数据进行精细化管理[6]。

4 结束语

能源行业电气自动化设备故障监测和管理属于一项包含感知、诊断、决策以及执行等环节的综合性工程，依靠在线监测捕捉到早期异常，预测性维护改进检修时机，冗余容错缩减故障影响，全生命周期管理累积资产知识，这四个部分互相联系，形成闭环管控链条。未来，需融合数字孪生、边缘智能、大模型等先进技术，使设备运维朝着更高层次的自主认知、协同决策发展。持续改进监测精度并推行管理流程标准化，是保证能源生产安全、降低消耗的有效手段，需要产、学、研、用各方面共同努力。

参考文献：

[1] 周毅忠.电气自动化设备安全监测与故障诊断技术分析[J].电力设备管理,2025(22):26-28.
[2] 虞自强.智能电气自动化技术的创新发展与融合应用探索[J].中国战略新兴产业,2025(17):136-139.
[3] 刘钊,陈彬琦,张杰.浅谈电气自动化现状及其与人工智能融合的展望[J].工程建设与设计,2025(11):147-149.
[4] 周吉林.电气自动化设备安全监测与故障诊断技术研究[J].中国新技术新产品,2025(11):137-139.
[5] 凌瑜.基于物联网技术的电气自动化设备监测与故障诊断[J].电气技术与经济,2024(06):150-152.
[6] 李威.电气系统及其自动化在工业生产中的应用研究[C]//中国智慧工程研究会.2024智慧施工与规划设计学术交流会论文集,2024.

AI 赋能下建筑企业全链条安全精细化管控体系构建研究

翁绍铭，唐燕斌，陈育萌，余红乐，俞善文*

（浙江高信技术股份有限公司，浙江 杭州 310016）

摘 要 为解决建筑安全管理中效率低、响应慢等问题，明确 AI 赋能实现风险管控的价值。方法上，采用“架构设计 + 技术赋能 + 机制保障”框架，构建包含风险识别、评估、处置的闭环体系，融合物联网感知、智能算法、数据安全等技术。建筑企业应分阶段实施，搭建 AI 驱动的风险管控架构，制定分级管控方案；采用无人机、机器人等设备多模态数据采集，结合概率评估模型量化风险等级；部署数据安全体系，保证全流程加密、管控权限。结果表明，该模式能提高实现风险识别效率、缩短隐患处置时间，为建筑行业安全管理智能化转型提供了实施参考。

关键词 AI 赋能；建筑企业全链条；安全精细化管控体系

中图分类号：TU714；TP18 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.025

0 引言

建筑企业安全管理是保障工程质量、人员安全的关键。AI 技术的融合应用，为优化安全管控体系提供了新路径。AI 具有实时感知、智能分析、自动决策功能，可提升风险预判效率。立足建筑企业全链条安全管理需求，构建 AI 赋能的精细化管控体系，在核心架构、数据安全、实践路径、保障措施、基础设施、应用场景等方面系统规划，形成全周期的智能化解决方案，助力行业安全管理数字化转型。

1 建筑企业安全管理的重要性及价值

建筑企业安全管理直接关系施工作业人员的生命安全，住建部明确要求超过 10 万 m^2 项目必须配备安全总监，3.5 万 m^2 以上项目专职安全员不少于 3 人，每增加 5 万 m^2 至少增配 1 人。因此，安全管理是建筑企业生存发展的底线工程，须开展主动预防，降低事故发生风险[1]。AI 将安全管理模式升级为“问题找人”，AI 能够全天候不间断实时分析，识别未佩戴安全帽、违规进入危险区域、设备不当操作等不安全行为。例如：浙江省“智安工兵”系统已在 2 390 个工地连通测试，隐患识别准确率达 91%。系统投用后平均项目隐患日均发现数从 35 个降至 3 个，人员的不安全行为从 20 起降至 2 起。计算机视觉技术采用卷积神经网络，智能识别分析现场图片，快速准确检测安全问题，能够大幅提升排查效率。无人机搭载 AI 大模型自动识别临边区域等隐患，能够扩大巡查范围、缩短隐患处置时间，实现智能监测。

2 AI 赋能下建筑企业全链条安全精细化管控体系构建策略

2.1 明确 AI 赋能建筑企业全链条安全精细化管控体系的核心架构

建筑企业应构建 AI 驱动风险管控架构，第一阶段成立 AI 风险管控虚拟小组，小组由项目经理担任组长，组员包括 AI 系统管理员、安全工程师、数据标注员各 1 名。系统分配风险管控职责，每项职责绑定智能合约，触发条件后自动推送任务指令。第二阶段制定风险管控方案，AI 方案生成引擎读取项目 BIM 模型、施工组织设计文本，自动提取管控目标，输出风险管控准则清单。第三阶段风险识别执行 AI 工序，现场勘查环节部署无人机、地面机器人自动采集场地影像，采集频率 2 次 / 日；资料整理环节调用 OC、与 NLP 模型解析施工图纸、专项方案等文档，提取风险特征词；施工作业分解环节运行图神经网络，自动划分作业活动至细分工序，标记重点工序；调查研讨、专家咨询环节，由知识图谱自动检索历史项目事故库，匹配相似案例，生成初始风险因素列表，识别出全部风险因素。第四阶段风险评估部署概率评估模型，蒙特卡洛模拟 10 万

作者简介：翁绍铭（1999-），男，本科，高级工程师，研究方向：安全应急领域信息化建设。

*** 通信作者**：俞善文（1988-），男，硕士研究生，高级工程师，研究方向：系统集成、安全管理。E-mail：272902011@qq.com

次迭代计算每类风险发生概率，按照风险接受准则确定风险等级（Ⅰ级重大、Ⅱ级较大、Ⅲ级一般、Ⅳ级低）。第五阶段风险评价输出风险管控清单，清单包含风险ID、风险等级、触发条件、监测指标数据。管控措施分解模块采用强化学习算法，将风险逐条拆解。所有措施自动推送至对应责任人移动端，系统记录接收时间、确认状态[2]。

2.2 保证AI赋能建筑企业全链条安全精细化管控体系的数据安全

采集阶段，建筑企业在所有感知层设备内置硬件安全芯片，采集数据加密后经SM4对称加密算法存储在设备本地缓存。传输阶段，建立多层加密传输通道，端到边采用DTLS协议加密，使用预共享密钥认证机制。存储阶段，根据数据分级标准划分安全等级。交换阶段，实施数据脱敏处理，涉密信息启用k-匿名模型屏蔽具体数值，脱敏后字段保留80%统计特征。销毁阶段，存储介质执行三次随机数据覆写，数据销毁后产生可审计的操作记录。建立数据安全态势感知平台，7×24小时监控数据集约节点安全状态，检测到异常访问流量阈值超过50 Mbps自动触发告警阻断，覆盖物理环境、通信网络、区域边界、计算环境安全领域。

2.3 规范AI赋能建筑企业全链条安全精细化管控体系的实践路径

建筑企业应构建“采集、识别、预警、处置、复核”五步标准化实践路径，每步配置量化执行指标。建筑企业采集部署AI智能感知设备，运行YOLOv8与真知大模型双引擎识别算法，识别物未戴安全帽、未系挂安全带、临边防护缺失、电焊作业不规范、挖掘机吊物、电线电缆拖地、动火作业不规范、堆载超限、消防设施缺失等安全隐患。建筑企业预警采用多级分发机制，智能分析系统检测到隐患后，15秒内生成预警信息，自动匹配推送对象，优先级排序依次为现场安全员、项目经理、项目总监、监督部门。建筑企业处置建立分级处置标准，一般隐患2小时内完成现场处置，重大隐患30分钟内启动应急处置。移动端处置APP推送责任人，责任人接收后60秒内确认、反馈处置方案，处置完成后上传复核图像。

2.4 完善AI赋能建筑企业全链条安全精细化管控体系的保障措施

建筑企业应建立应急保障体系，组织保障设置三级安全管理组织架构。企业级设立AI安全管理委员会，由公司分管安全的副总经理任主任，含信息化、安全、工程、技术等部门负责人，每季度召开一次专题会议；项目级在每个施工标段设立安全管理小组，配备专职安全总监1名，每标段安全员不少于3名，均需通过AI安全管理专项考试；班组级在每施工班组设置安全联络员1名，每日班前会通报AI识别隐患。资源保障建立专项资金预算体系，按项目总投资额的0.8%计提AI安全建设专项经费，经费覆盖AI设备采购、系统运维、算法训练、应急物资储备。建筑企业单个10万m^2建筑项目，其AI安全管控软件使用费、服务费不超过3 000元/年。建筑企业应建立两级技术支持体系，企业总部设立AI安全技术支持中心，配备算法工程师、系统架构师，负责训练算法、优化模型、升级系统、处置故障[3]。建筑企业还应在每个片区项目部配置1名现场技术运维人员，每日巡检边缘节点。建筑企业人力保障实施三级培训制度，管理层培训每半年组织一次48学时封闭培训；安全员培训每季度组织40学时实操培训；作业人员培训由班组安全联络员在班前会开展10分钟安全教育，每月组织一次AI安全知识考核。

此外，为保证在一线工程项目中AI安全管理系统能够保持稳定高效地运行，建筑企业还应配套设立相应的人员机制。除在每个项目部安排1位现场技术保障员外，明确其边缘节点巡视检查、设备故障排除、数据传输检测和系统维护等职责，确保“设备有人管、问题有人查、异常有报告”。通过分层分类的三级培训机制来提高不同岗位上人员对于AI安全工具使用水平，在管理层面注重对数字化安全管理理念及决策方面的训练；而在安全员方面，则更加强调智能设备操作和预警信息研判能力及现场处理；作业层结合班前会及每月一测，来加强对智能监测和违章识别以及防范的了解。

2.5 优化AI赋能建筑企业全链条安全精细化管控体系的基础设施

建筑企业应部署含交互层、计算层、存储层、传输层、感知层的基础设施架构。感知层分四类部署终端设备，视频感知类部署400万像素星光级球机，在重点风险区域每1 000 m^2部署4台；人员感知类部署UWB定位基站，覆盖半径80 m，支持同时定位标签数量200个；设备感知类部署工业级振动、温度传感器，振动频率测量范围10 Hz～1 000 Hz，温度测量范围-40 ℃～+125 ℃；环境感知类部署PM2.5/PM10/噪声三合一监测终端，PM2.5测量精度 ±10%；传输层采用有线、无线混合组网，主干网络采用光纤布线方案，传输距离覆盖工地全域；无线网络部署企业级接入点，每接入

点覆盖半径 100 m，支持连接设备数量 128 台，系统网络架构如图 1 所示 [4]。

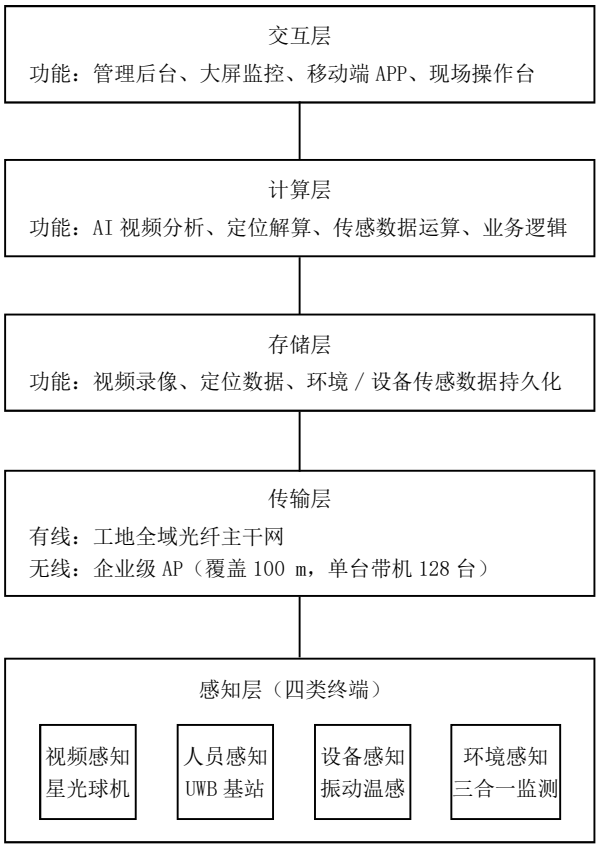


图 1 系统网络架构图

为满足中大型建筑企业集团级别的智慧工地监控、管理需求，支持范围内多片区、数千路摄像头的并发接入分析 [5]。建筑企业应每片区部署 1 台 AI 边缘计算服务器，配置 8 核 ARM CPU+NPU，支持 -30 ℃～ 70 ℃宽温工作。边缘节点接入摄像头路数不少于 32 路，部署目标检测、行为识别等本地算法模型，边侧处理后数据量降低 85% 后再上传云端。云端计算集群部署 32 节点 GPU 服务器，集群总算力达 1280 TFLOPS。

2.6 AI 赋能建筑企业全链条安全精细化管控体系的应用场景

建筑企业应部署 AI 安全应用场景，设计阶段部署 AI 智能审图场景、BIM 安全预演场景。AI 审图场景中，审查建筑图纸中疏散通道宽度、防火分区面积等安全合规指标，单个图纸文件平均处理时间 120 秒，自动标注不符合项，生成整改意见表。BIM 安全预演场景将 BIM 模型导入安全仿真引擎，模拟施工过程，预测识别设计阶段可预见的作业风险点。施工阶段，人员行为管控场景部署 AI 摄像头、UWB 定位融合识别，自动抓拍未戴安全帽、违规跨越围挡、吊臂下站人、临边作业未挂安全带等违规行为。设备运行监控场景，在塔吊、升降机、高支模等大型设备部署传感器实时监测运行参数，塔吊监控载重、风速、倾斜角、回转角度等参数，升降机监控载重、运行速度、门锁状态、垂直度等参数，高支模监控位移、沉降、倾斜、轴力等参数。环境安全监测场景，实时采集工地扬尘、噪声、风速、温湿度、有害气体浓度环境数据，PM2.5 浓度超过 75 μg/m^3 时，自动联动雾炮机喷雾降尘，风速超过 6 级自动停止塔吊作业 [6]。无人机高空巡检场景搭载光学变焦摄像头、红外热成像仪，每日自动巡航 2 次，单次覆盖面积 5 万 m^2，飞行高度 80 m，能够识别高处临边防护缺失、脚手架违规搭设、材料堆载超限等隐患。高风险作业智能防护场景在深基坑、爆破区等高危区域部署红外电子围栏、雷达检测，人员违规闯入时，现场触发语音驱离。运维阶段，建筑企业部署 AI 安全巡检机器狗场景，机器人搭载激光雷达、深度相机、AI 识别模块，执行全地形自主巡检任务。

3 结束语

本研究构建的 AI 赋能建筑企业全链条安全精细化管控体系，提升了风险管控的精准性，验证了 AI 在建筑安全管理中的价值，为建筑行业的安全生产与高质量发展提供了技术参考。未来的研究中，应进一步深化算法智能化水平，推动多源数据跨企业共享，完善行业安全标准体系；进一步挖掘 AI 在安全管理中的应用潜力，探索 AI 与区块链等技术融合应用，拓展全链条管控的覆盖范围，推动建筑企业安全管理向更智能、更高效的方向发展，构建更协同的建筑行业生态。

参考文献：

[1] 申雅琦 . 建筑施工企业安全风险分级动态管控探究 [J]. 科技与创新 ,2024(11):144-146,150.
[2] 仇模伟 , 刘洋 , 张戚乐 . 浅谈中小建筑公司安全管理问题及对策 [J]. 商业文化 ,2021(36):98-99.
[3] 周东平 . 成本视角下建筑企业安全管理研究 [J]. 安徽建筑 ,2021,28(11):188-189.
[4] 李停军 , 黄欣 , 王皎 . 建筑企业班组安全文化测评指标体系研究 [J]. 建筑安全 ,2021,36(02):60-62.
[5] 曹家勇 . 建筑施工企业安全风险分级管控探究 [J]. 四川建筑 ,2020,40(06):266-267.
[6] 屈建军 . 浅议建筑施工企业安全管理的创新思路 [J]. 中华建设 ,2024(07):29-31.

光伏电站施工现场全过程统筹管控技术与成本优化策略研究

岑立奇

（肇庆市新奥能源发展有限公司，广东 肇庆 526000）

摘 要 在“双碳”目标驱动下，我国光伏电站建设规模持续扩大，施工现场的统筹管控水平直接决定工程质量、建设周期与综合效益。本文侧重技术维度，系统梳理光伏电站施工现场全过程统筹管控的技术基础与阶段要点，深入分析数字化管控、工艺优化、质安协同等核心技术的应用路径，提出基于技术优化的成本管控策略与协同保障机制，构建技术引领、成本协同的全过程管控体系，以期为光伏电站施工的精细化、高效化管控提供理论参考与实践思路。

关键词 光伏电站；施工现场；全过程管控；数字化现场管控技术；成本控制

中图分类号：TM615 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.026

0 引言

当前部分光伏项目仍沿用粗放式管控模式，技术管控节点不明确、工艺标准不一致、技术与成本协同性差等缺陷较明显，容易造成施工质量波动、工期延误、成本超支等风险，全过程统筹管控以系统化思维统筹施工全过程技术要素、成本要素，是光伏工程建设提质增效的重要途径。从技术角度分解施工现场各阶段技术管控逻辑，寻找技术应用与成本优化的结合点，是光伏电站施工管控提质增效的重要支撑。

1 光伏电站施工现场全过程统筹管控的技术基础

1.1 全过程管控的技术范畴与边界

光伏电站施工现场全过程管控技术包含施工前期准备至工程竣工验收全过程的技术管控，涵盖土建基础、支架安装、组件铺设、电气布线、系统调试等各专业技术的相互交叉融合，以现场施工作业为依托，向前延伸到施工方案的技术论证、物资进场的技术核验，向后延伸到并网调试、竣工移交的技术闭环，首尾相接的技术管控链条[1]。全过程技术管控不是各工序单独的技术管理，而是以系统化思维统筹各专业、各阶段技术要素，统一技术标准，衔接工序接口，有序开展施工，全面实现技术要求，是保证工程整体技术性能的重要手段。

1.2 现场施工技术管控的核心原则

光伏电站现场施工技术管控应坚持系统性、适配性、前瞻性三个原则。

1. 系统性原则，即把各施工工序看作有机整体，对各专业、各作业面施工技术衔接进行统筹考虑，防止局部技术优化而造成整体施工流程不平衡，确保施工流程各环节协同运转。

2. 适配性原则，即技术方案要与项目场址条件、设备技术参数、施工环境相匹配，根据地形地貌、地质条件、气候特征、电网接入要求等调整技术方案，防止标准化技术方案的生搬硬套，增强技术方案的现场适用性。

3. 前瞻性原则，即在施工技术管控过程中，对施工中可能遇到的技术风险进行预判，提前制定技术预案及替代方案，从源头上减少施工中的技术变更、返工损耗。

1.3 统筹管控技术的整体架构

光伏电站施工现场统筹管控技术架构可分为层级化的三个层面，各层面之间层层依托，形成光伏发电施工现场技术管控整体体系。基本技术层包括施工工艺标准、施工设备技术参数、光伏电站场址技术条件等底层技术内容，是技术管控工作的技术支撑和实施依据；过程管控层以施工全过程为依托，设置分级技术管控节点，对各工序技术实施情况实时检验、纠偏、记录，保证施工过程技术标准的贯彻执行；协同优化层通过跨专业、跨阶段的技术协同，打通工序间的技术壁垒，实现施工效率提升与成本优化的双重目标（如表1所示）。

作者简介：岑立奇（1992-），男，本科，工程师，研究方向：电力与新能源。

表 1 光伏电站施工现场全过程技术管控体系架构

管控层级	对应阶段	核心技术节点	管控侧重点
基础技术层	全阶段	工艺标准、设备参数、场址条件	技术依据的统一性与准确性
过程管控层	主体施工阶段	基础精度、结构质量、电气合规性	工序技术标准落地与作业稳定性
协同优化层	全流程	工序衔接、资源配置、风险预判	整体效能提升与成本协同管控

2 光伏电站施工各阶段的技术管控要点

2.1 前期准备阶段的技术统筹

施工前期准备阶段技术统筹是全过程技术管控的基础，也是后续施工技术顺畅、施工进度高效的前提，施工前期准备阶段应做好场址勘测数据技术复核，对地形、地质、光照、水文条件进行二次复核，调整初步设计中与现场实际不相符的技术参数，使设计方案在施工现场更具适应性[2]。

2.2 主体施工阶段的技术管控

主体施工阶段是技术管控的重中之重，包括桩基施工、支架安装、组件铺设、电气布线等工序，管控的精度高低对电站整体性能有着直接的影响。桩基施工阶段，要重点管控桩位偏差、桩体垂直度、成桩质量等技术参数，保证基础结构满足设计荷载要求及抗震要求；支架安装阶段，要重点管控支架平整度、倾角、连接紧固等技术要求，保证支架系统结构稳定、角度精准，为组件高效发电提供结构支撑；组件铺设阶段，要严格执行组件搬运、固定、接线等技术要求，控制施工过程中外力的影响，防止出现隐裂、破损等质量问题。

2.3 收尾调试阶段的技术核验

收尾调试阶段的技术核验是检验整个工程技术性能的重要环节，包括分项调试和系统联调两个层次，构成技术核验的完整闭环。在分项调试中，依次对光伏组串、汇流箱、逆变器、升压站等各部分进行技术参数测试，检验各设备的运行状况、电气性能、保护功能是否达到设计要求，检验单个设备技术隐患；系统联调中，模拟真实发电工况，检验整个发电系统运行的协同性、故障处理能力及与调度的适应性，检验系统衔接中的技术缺陷[3]。

3 施工现场统筹管控的核心技术应用

3.1 数字化现场管控技术

数字化管控技术是增强施工现场统筹管控能力的重要技术支撑，以信息化技术破除信息孤岛，对施工全过程进行可视化、可追溯化管控。在施工现场可建立一体化数字管控平台，集成施工进度、质量、安全、物资等技术信息，各工序技术状态实时更新，各岗位共享，提高技术决策响应速度；运用三维建模技术，对施工方案进行预演推演，对复杂作业面的施工顺序、设备站位、管线走向进行模拟，提前发现技术矛盾和空间矛盾，优化施工方案的合理性；运用物联网感知技术，对施工关键参数进行实时监测，对桩基施工、设备吊装、电气测试等技术参数进行动态采集，及时发现技术偏差并发出预警，提高管控的准确性和时效性。

3.2 施工工艺优化技术

施工工艺优化是技术管控的重要组成部分，以工艺优化提高施工效率，保证施工质量稳定性是技术降本的重要途径。在桩基施工中，依据场址地质条件优化成桩工艺，选用与地质条件相匹配的施工设备及施工参数，优化施工工序组合，降低成桩过程中的质量波动，避免无效作业；在支架安装中，采用模块化安装工艺，在预制环节完成支架部件的预组装，进行精度调校，提高现场安装效率，安装一致性；在组件铺设中，优化铺设顺序及固定工艺，采用标准化作业流程，降低组件破损率，提高施工效率，保证施工质量稳定性；在电气施工中，采用预制线缆工艺，提前裁剪线缆，进行标识，压接端子，减少现场接线工作量，降低接线错误率。工艺优化结合现场实际情况进行技术论证，在保证质量的前提下，提高施工效率[4]。

3.3 质量与安全协同管控技术

质量与安全的共同管控是施工现场技术管控工作的重要内容，要将技术标准运用到质量管控、安全管控的全过程，使质量与安全技术实现共同管控。质量管控方面，要建立质量技术分级核验制度，对重要工序实行技术停检点制度，严格进行技术标准的逐项核验，形成班组自检、项目部复检、监理终检三级质量管控体系。安全管控方面，要根据施工工序技术特点制定安全技术措施，对高空作业、带电作业、吊装作业等高风险作业，制定安全技术操作规程及安全防护标准，把安全要求纳入施工工艺设计中。

4 基于技术优化的施工成本管控策略

4.1 技术选型与成本适配机制

技术选型是成本控制的源头，要形成技术性能与施工成本的匹配机制，从源头上防止因技术投入过多

或技术标准过低造成成本浪费，在施工方案设计时，要进行多方案技术经济比选，从技术可行性、施工难度、成本投入、工期影响等方面进行比选，选择技术匹配性最好、全周期成本最优的施工方案，不以技术先进或成本低为唯一追求目标；设备、材料选型要结合施工技术要求进行匹配，即在满足技术性能指标的前提下，尽量选择便于现场施工、安装损耗低、通用性强的设备、材料，减少施工过程中的材料损耗及人工投入；技术选型要兼顾施工期间成本与项目运行期间成本，平衡建设成本与运维成本，实现项目全生命周期成本最优[5]。

4.2 施工流程优化的成本压降路径

利用技术性施工流程优化，降低无效及重复作业发生率，达到施工成本系统性降低的目的；利用工序技术逻辑优化施工流水作业，合理设置施工段、作业面，匹配各工序作业节奏，各工序无缝衔接，缩短施工工期，降低工期相关的设备租赁、人工、管理成本费用；利用施工工艺标准化、模块化，增加单位时间作业量，降低单位工程量人工、设备台班消耗，摊薄固定成本。

4.3 资源统筹的成本协同管控

施工现场资源技术化统筹是成本优化的有力途径，借助技术实现人力、设备、物资的精准统筹，提高资源使用效率，如以施工进度技术节点为依托，精准计算各施工阶段资源需求量及进场时间，制定资源动态统筹计划，与施工节奏相匹配，防止资源闲置或资源不足造成成本损失。施工设备选型结合施工技术要求进行匹配，选择性能适配、效率适配的施工设备，优化设备作业路线及排班，提高设备利用率，降低设备租赁及能耗成本。物资管理方面，运用技术优化物资进场顺序及堆放布局，降低二次搬运损耗[6]。

5 全过程技术管控与成本优化的协同保障

5.1 技术标准体系的建立与落地

完备的技术标准体系是全过程管控及成本控制相互配合的制度保障，是开展各项管控工作共同的依据，依据项目特点制定统一的施工技术标准、质量核验标准、成本管控标准，对各工序技术要求、验收程序、成本核算口径进行规定，使技术管控与成本管控标准统一、口径一致。技术标准体系要涵盖各专业、各工序，形成层次分明、衔接有序的标准体系，明确各岗位的管控职责及工作流程，防止各环节标准相互矛盾或管控盲区的出现。

5.2 现场管控团队的技术能力建设

现场管控人员技术水平是管控措施实施的关键，是全过程管控效果的保证，项目管理团队应具有各专业技术综合协调能力，可协调各专业技术接口，兼顾各专业成本平衡，从整体项目角度制定管控方案；现场技术人员应熟知对应专业施工工艺及技术标准，能及时处理施工技术问题，把握工序质量、成本节点，做好现场技术指导及核验；施工班组应具有标准化作业能力，按技术规范作业，降低操作失误造成质量问题及成本浪费。

5.3 动态调整与持续优化机制

光伏电站施工过程受现场条件、环境变化、设备供应等多种因素影响，管控方案难以一成不变，需建立动态调整与持续优化机制，保障技术管控与成本优化的适应性。需建立常态化的技术复盘机制，定期对施工中的技术执行情况与成本数据进行联动分析，识别管控中的薄弱环节与优化空间，及时调整技术方案与管控策略，适配现场变化[7]。

6 结束语

在光伏电站施工中，通过构建施工现场全过程的技术管控体系，明确各阶段技术管控要点，应用数字化管控、工艺优化等核心技术，结合技术导向的成本优化策略，可实现施工质量、建设效率与成本效益的协同提升。技术管控与成本优化并非对立关系，而是相互支撑、协同推进的有机整体，技术优化为成本管控提供可行路径，成本管控为技术升级提供正向反馈。随着光伏产业的持续发展与技术的不断迭代，施工现场管控将向智能化、精细化方向不断改进，进一步推动光伏工程建设的高质量发展。

参考文献：

[1] 陈志坤. 山地农光互补光伏电站选址研究及应用 [J]. 中国资源综合利用 ,2026,44(05):243-245.
[2] 王景航 , 李蕾 . 复杂地质条件下的光伏微型桩基施工研究 [J]. 工程技术研究 ,2026,11(09):223-225.
[3] 鲍悦. 地面光伏电站土建工程施工技术要点分析 [J]. 工程建设与设计 ,2026(09):153-155.
[4] 贺文山 , 马铂浩 , 黄炜 , 等 . 不同限电率下采用不同类型光伏支架的光伏电站投资收益率分析 [J]. 太阳能 ,2026(04):76-86.
[5] 杨占坡 . 光伏电站工程中水上光伏冬季施工关键技术研究 [J]. 电力设备管理 ,2026(08):243-245.
[6] 李星志 .H 电力工程公司海外光伏电站项目团队管理改进方案研究 [D]. 哈尔滨 : 哈尔滨工程大学 ,2023.
[7] 荣家栋 .EPC 总承包模式下 A 光伏电站项目进度管理研究 [D]. 贵州 : 贵州大学 ,2022.

新质生产力背景下阳江绿色能源企业数字化转型的实践路径研究

王亚娟，谭永奖

（阳江职业技术学院，广东 阳江 529500）

摘 要 本文立足于阳江海上风电、光伏、核电等绿色能源产业基础，聚焦企业数字化转型中面临的技术适配性不足、产业链协同机制缺失、专业人才供给短缺三大核心痛点，从技术、产业、人才支撑维度系统研究转型实践对策，构建“技术攻关—产才融合—生态培育”的数字化转型实践路径体系，旨在为阳江绿色能源企业数字化转型提供可落地的实践指引，也为国内同类城市绿色能源产业数字化升级提供参考。

关键词 新质生产力；绿色能源企业；数字化转型；产业链协同

基金项目：阳江市哲学社会科学规划 2025 年度立项课题（课题编号：YJ2025B11）。

中图分类号：F426.61 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.027

0 引言

在“双碳”目标引领和能源转型战略支撑下，新质生产力正以绿色能源产业为典型载体、以数字化转型为重要抓手，释放其低碳潜力、提升其发展效率。阳江作为粤港澳大湾区向西延伸第一城与重要节点城市，正立足自身优势聚力打造具有本土特色的“4+4+X”现代化产业体系，系统推进“融湾入圈”工作。目前，阳江主导产业集群已形成规模：先进材料产业产值突破 1 400 亿元，海上风电建成装机容量已突破 801.66 万千瓦，潜在光伏接入需求不断增加，绿色能源产业正成为推动阳江经济高质量发展的主要引擎与支撑性主导产业[1]。

1 绿色能源企业数字化转型的基础与条件

1.1 独特的区位与多层次政策支撑

阳江地处粤港澳大湾区、海南自由贸易港与北部湾城市群的交汇节点，在承接产业转移、衔接西部能源资源过程中扮演着重要的角色。《广东省海上风电发展规划（2017-2030 年）》将阳江列为全省海上风电产业发展核心区，规划建设海上风电装备制造千亿产业基地[2]；同时，阳江发布的《阳江市制造业数字化转型实施方案》中明确提出推动海上风电装备、合金材料、绿色能源等产业集群数字化升级转型，建立推动数字化转型的常态化工作机制，为企业数字化转型提供了有力保障[3]。

1.2 绿色能源产业基础

目前，阳江以海上风电为引擎，已形成“风、光、水、火、气、核、储”多能齐发的格局，并汇聚了明阳智能、金风科技、东方海缆等龙头企业，构建了集风电整机制造、叶片、塔筒、海缆、运维服务于一体的完整产业链。2025 年阳江核电基地 6 台核电机组全年上网电量约为 498.76 亿千瓦时，略低于 2023 年的 500.32 亿千瓦时峰值，但仍保持国内核电基地第一梯队的运行水平。2025 年全国核电全年总发电量达 4 852 亿千瓦时，同比增长 7.6%，全国核电装机规模和总发电量持续提升[4]。同时，因地制宜开发建设集中式与分布式开发光伏发电，积极推进农光互补、渔光互补、光伏观光旅游等项目建设，近年来装机规模持续扩张，与海上风电、核电形成互补发展的良好态势。

1.3 产学研协同与技术创新平台双轮驱动

1.3.1 校企协同育人机制实现双向赋能

2019 年 1 月阳江职业技术学院与明阳智慧能源集团股份公司合作共建新能源产业的学院——阳江海上风电产业发展明阳学院。校企双方共同确定专业定位，优化人才培养方案，师资互聘互认机制。同时，通过现代学徒制、订单班等培养模式，为海上风电全产业链输送高素质复合型技术技能人才，为产业数字化转型提供人才储备[5]。

1.3.2 为省级技术创新平台提供核心支撑

2019 年 8 月，先进能源科学与技术广东省实验室

作者简介：王亚娟（1989-），女，硕士研究生，讲师，研究方向：新能源汽车与绿色能源融合。

阳江分中心获省政府授牌阳江风电实验室，聚焦海上风电支撑结构、新材料、核心施工装备、施工工艺标准化等核心研究领域。针对海上风电高端装备制造、海上风电开发等领域的“卡脖子”技术难题开展联合攻关，为阳江绿色能源产业数字化转型与可持续发展提供关键技术支撑。

2 绿色能源企业数字化转型面临的挑战

2.1 技术层面：本土化适配不足与中小企业应用壁垒突出

2.1.1 通用技术难以适配复杂的南海环境特征

现有的海上风电运维技术大多数是参照内陆风场或欧洲北海场景研发，未充分考虑南海海域环境特征对设备运行的影响。南海海上风电设备长期在高盐雾、强台风的海域高强度工作，易造成传感器和通信模块腐蚀失效等问题，传统的数字孪生技术、预测性维护技术无法满足数字化技术要求的精度和稳定性。

2.1.2 中小企业数字化技术的应用面临困境

阳江绿能产业链中以中小企业为主，但受限于资金、技术和转型意识，其数字化转型多处于观望阶段，数字化技术应用的内外部障碍明显。

2.2 产业层面：产业链数字化协同性弱与数据孤岛

2.2.1 产业链数字化协同性弱

阳江绿色能源产业链虽然已形成完整布局，但产业链上中下游企业间未建立成熟数字化协同机制。例如：上游装备制造与下游开发运营企业间，生产、运行、运维数据未高效衔接，未能精准合理安排建设和运维规划，制约了项目的推进。此外，风电、光伏、核电等绿色能源企业缺乏数字化协同、调度数据未共享对接，不利于区域电网统一智能化调度，限制了多能互补绿色能源体系效能释放。

2.2.2 数据孤岛制约协同效率

阳江绿色能源领域企业间数据标准未统一，中小配套企业数字化程度低、数据采集整理能力不足，难输出标准化数据接入协同平台。产业链无法通过数据整合挖掘协同价值，增加企业沟通对接成本，限制智能化决策，拖慢产业数字化协同转型节奏。

2.3 人才层面：专业人才供给失衡与培养机制滞后

2.3.1 复合型技术人才短缺

阳江风电、光伏、核电等绿色能源产业对能解决生产运维、数据治理和智能调度等问题的复合型技术人才需求巨大，但现有人才多局限于传统领域。同时，受区位、配套、政策等因素影响，多数企业“找不到、留不住”人才，导致供给严重不足，直接制约了企业数字化升级。

2.3.2 人才培养与产业需求错配

本地院校尚未针对性地开设海上风电、光伏等新能源相关专业，现有机电、电气等相近专业的人才培养方案与本地新能源产业数字化人才需求存在差异。课程体系多侧重于传统制造技能，缺乏对数字化技能的训练，导致毕业生的综合能力难以胜任企业数字化技术岗位的实际需求。

3 绿色能源企业数字化转型的对策分析

3.1 技术对策：强化本土化创新与平台搭建

3.1.1 推进核心技术本土化适配研发

依托阳江海上风电实验室等省级创新平台，高校、企业、科研机构开展产学研联合攻关，破解通用技术与本地场景脱节问题。同时，引导本土绿色能源企业结合自身生产运营与区域产业特征，推动通用型数字化技术升级为适配本土产业需求的专用技术，降低绿色能源产业对外技术依存度，为本土企业数字化转型夯实技术基础。

3.1.2 搭建普惠性数字化技术服务平台

立足于阳江绿色能源产业链系统需求，由政府主导，整合高校、科研院所、龙头企业的产学研资源，搭建市级绿色能源数字化转型服务平台，打通上下游数据接口，降低中小企业数字化技术应用门槛，助力企业优化生产布局，实现政校企协同赋能。

3.2 产业对策：构建数据共享机制与创新生态

3.2.1 构建跨产业数据共享机制

以产业链数据共享与协同机制建设为核心，产业链上下游企业接入统一的工业互联网平台，实现大中小企业各环节数字化深度互联。制定统一的数据采集范围、接口标准和共享规范，实现数据一方采用多方复用，重点支持基于大数据的产品优化设计、供应链协同和预测性维护，打破海上风电装备制造、光伏电站运营、储能系统调度等环节的数据壁垒。

3.2.2 打造产业链协同创新生态

以绿色能源龙头企业为引领，联合产业链中小企业、科研机构和高校，共同打造数字化产业链协同创新生态平台，促进产业链各主体间的信息畅通、资源共享和业务协同。通过开展技术联合攻关，研发成果资源共享，加快数字化解决方案模块化，助力产业数字化转型走深走实。

3.3 人才对策：完善引育机制与优化发展环境

3.3.1 完善人才引育机制，破解人才供给与适配问题

针对绿色能源数字化领域紧缺的复合型人才，政

府在落户补贴、住房保障、子女教育、科研启动经费等方面出台专项支持政策，降低人才流入的门槛与成本，留住高端核心人才。同时，推动本地高校开设绿色能源与数字技术交叉融合的特色专业，开展学徒制、订单班等人才培养模式，培养一批适配产业发展的应用型本土人才。

3.3.2 优化人才发展环境，健全数字化技能培训体系

政、校、行、企四方联合搭建“培训—认证—激励”联动机制，定期举办绿色能源数字化人才的培训与认证等活动，强化数字化转型意识与战略统筹能力，提升数字化能力的内生动力，带动产业链企业数字化转型升级。

4 构建“三阶递进式”数字化转型实践路径

4.1 技术攻关路径：从“引进吸收”到“自主创新”的闭环机制

立足于海上风电、光伏等绿色能源企业的数字化需求，针对企业核心技术依赖外部、本地化适配不足、自主研发能力薄弱的问题，坚持精准引进适配技术，实现数字化技术与本地产业场景的深度融合，实现技术差异化、高端化升级，逐步培育自主技术优势，构建“引进—吸收—消化—创新”的全链条封闭路径，摆脱对外部技术的依赖，提升技术创新的成果转化与推广应用，为企业数字化转型提供核心技术支撑。

4.2 产才融合路径：从“单向供给”到“双向互促”的闭环构建

推动高校、行业、企业三方协同育人，围绕产业人才需求建立绿色能源产业数字化人才需求清单，明确人才缺口与岗位类型、薪酬标准、技能要求，为人才培养、引进工作提供精准导向。本地院校贴合产业需求动态调整专业设置，实现人才培养与产业需求的同频共振。构建“人才培养精准对接—校企协同创新—人才价值实现”的闭环机制，着力破解高端人才引不进、技能型人才留不住、人才与产业需求脱节的突出难题，支撑新质生产力对高素质、专业化人才队伍的要求。

4.3 生态培育路径：从“政策驱动”到“生态自洽”的梯度演进

围绕产业链协同、要素市场化配置、可持续自我演化核心目标，构建“政策筑基—市场激活—生态自洽”三阶递进机制，契合新质生产力“协同化、生态化、可持续”的发展要求，打造适配新质生产力发展的绿色能源数字化产业生态，为产业数字化转型提供稳定、可持续的环境保障。

5 绿色能源企业数字化转型路径的适用性与推广价值

坚持本土化技术创新的核心地位，聚焦产业实际问题开展产学研联合攻关，构建“三阶递进式”数字化转型的实践路径，从实际问题出发，针对不同规模、不同领域企业匹配差异化解决方案，既破解了核心技术瓶颈，又兼顾了中小企业的转型实际需求，完全适配本地化绿色能源产业的发展现状与转型要求，为新质生产力发展提供复合型高素质人才。坚持自我迭代和产业协同创新，遵循从政策引导到市场机制激活再到生态自洽的演进路径，顺应了新质生产力依托完善产业生态持续演化发展的内在规律，为区域绿色能源领域新质生产力的培育发展提供系统性支撑[6]。

6 结束语

在全球处于新一轮科技革命与能源变革深度交织的关键阶段，培育发展新质生产力已成为推动产业高质量发展的核心命题。绿色能源作为我国能源转型与双碳战略实施的核心支撑，其数字化升级既是新质生产力培育的重要方向，也是实现能源安全、绿色发展的必然要求。本文以阳江绿色能源产业为研究对象，梳理了其转型发展面临的核心痛点，构建了“技术突破—产才融合—生态培育”三阶递进式数字化转型路径，验证了该路径对本土产业特征和新质生产力发展要求的适用性，为同类区域数字化转型升级提供参考。

参考文献：

[1] 阳江市人民政府办公室网站 . 阳江市人民政府 2026 年政府工作报告 [EB/OL].(2026-02-11).http://www.yangjiang.gov.cn/gkmlpt/content/0/923/post_923046.html#7.

[2] 黄礼万 , 伍玩秋 , 周岩丽 . 阳江风电装备制造产业发展面临的人才困局与对策研究 [J]. 中国科技产业 ,2022(10):66-69.

[3] 阳江市人民政府办公室网站 . 阳江市人民政府关于印发阳江市制造业数字化转型实施方案（2021—2025 年）的通知 [EB/OL].(2022-01-07).http://www.yangjiang.gov.cn/gkmlpt/content/0/587/post_587840.html#4.

[4] 国务院国有资产监督管理委员会网站 . 中广核阳江核电 2023 年上网电量首破 500 亿千瓦时 [EB/OL].(2024-03-26) http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c30380028/content.html.

[5] 伍玩秋 , 黄礼万 , 刘文彬 . 阳江建设世界级海上风电产业基地的探索与实践 [J]. 中小企业管理与科技（上旬刊）,2020(04):133-137.

[6] 杨宏伟 . 新质生产力驱动经济高质量发展研究 : 基于创新生态系统视角 [J]. 特区实践与理论 ,2025(05):30-39.

适配源网荷储协同体系的电力负荷精细管理与虚拟电厂高效运营研究

杨彩虹

（国网滨州供电公司，山东 滨州 256600）

摘 要 随着高比例新能源规模化接入，源网荷储协同已成为统筹电力安全保供与能源低碳转型的核心载体。本文面向源网荷储一体化运行场景，提出适配该体系的电力负荷精细管理与虚拟电厂高效运营框架。构建“容量—能量—灵活性”三维协同优化模型，设计数字孪生驱动的分钟级负荷画像与云边端协同柔性调控架构，并给出基于改进Shapley值的分布式资源可信聚合与利益分配方法，以期为提升新型电力系统灵活性与运营经济性提供实践参考。

关键词 源网荷储；负荷精细化管理；虚拟电厂；协同运营

中图分类号：TM73 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.028

0 引言

新型电力系统建设逐渐从“源随荷动”向“源网荷储协同互动”范式转变。但是，现有的负荷管理大多停留在总量削峰上，未对异质柔性资源进行细致的刻画，虚拟电厂陷入“聚合容易、优化困难、结算混乱”的困境，难以支撑协同体系的运营。已有研究对于源网荷储以及虚拟电厂的耦合机理、跨时间尺度协同以及分布式信任机制的考虑较少。因此，本文主要研究适应协同体系的负荷精细管理和虚拟电厂运营优化，从三维协同框架、数字孪生画像、可信聚合和分配四个方面提出创新点，旨在解决新型电力系统落地的关键问题。

1 源网荷储协同体系的内涵与运行机理

1.1 源网荷储一体化的系统边界重构

传统的电力系统是以“源、网、荷”单向潮流为边界，储能作为一个独立的环节，处于调度闭环之外。源网荷储一体化冲破了这个刚性界限，储能成了“调节枢纽”，负荷成了“主动资源”，源侧的波动经由荷储双向缓冲被系统内部吸收。本文将协同体系的新型边界定义为“可调度资源池”，即任何具有可控性、可测性和可响应性的设备都属于同一个优化域，虚拟电厂是这个资源池的市场化聚合者。根据调节特性将资源池划分为调节型（储能、电动汽车）、缓冲型（热泵、储热）和替代型（互联微网互济）三类，设置可调带宽不小于额定功率5%的准入条件。该重构把系统调节裕度由单一的电源侧拓展到源、网、荷、储四个维度，实证显示四维协同比单维电源调节可以提高等效可用容量30%。测算结果表明，资源池准入门槛每降低1%，可以挖掘出的柔性潜力就增加2.5%，但是边际调控成本也会随之上升，所以阈值的确定要兼顾潜力规模和经济性，为负荷精细管理打下物理基础。该边界重构产生出了“荷储一体”的新型市场主体，使需求侧具有和供给侧相当的市场议价能力。

1.2 多能流耦合下的协同优化机理

源网荷储协同不是四类资源的简单叠加，在电、热、气多能流耦合约束下进行联合寻优。核心机理是时空置换，即在时间维度上把富余新能源从谷时段转移到峰时段，平滑净负荷曲线，在空间维度上用广域负荷聚合来抵消局部波动，减小对输配网络的影响。协同优化的本质就是“灵活性稀缺资源的最优再分配”，可以表述为目标最小化系统灵活性成本、约束为功率平衡和可靠性裕度，边际灵活性成本 λ_f 随着调用深度的增加而递增。以电－热耦合为例，热泵在电价低谷时储热、高峰时释热，等效把电负荷从峰转谷而不需要改变终端热需求，就是多能流协同的典型体现。该本质把容量市场和辅助服务市场统一到同一个目标函数上，为后续负荷精细管理和虚拟电厂调度提供锚

作者简介：杨彩虹（1989-），女，本科，高级工程师，研究方向：电力营销、负荷管理、虚拟电厂。

点。机理也表现出协同收益存在“层级递减”的现象，即基础能量平衡收益最先被获得，而容量和灵活性溢价要达到更高的渗透率才会有所体现，这也是低渗透率时协同价值较小的原因[1]。

2 电力负荷精细管理的技术体系

2.1 数字孪生驱动的精细化负荷画像

负荷精细管理的首要前提是“看得清”。本文提出数字孪生驱动的负荷画像方法，在云端创建区域级负荷数字孪生体，把智能电表、气象、设备台账、用电行为等多源数据融合起来，用分钟级的分辨率来刻画工业、商业、居民等不同类型的异质负荷的功率特性、温度敏感性以及可调潜力。该孪生体是由物理机理层、数据驱动层和不确定性层三部分组成，物理层描述设备额定约束，数据层用时序模型拟合行为，不确定层用概率密度来表示响应偏差。方法中用可调带宽来度量每类负荷在不造成舒适和生产影响的前提下，上、下调的范围（商业空调 ±15%、工业可中断负荷单次 30 分钟），根据实时工况进行分钟级在线更新、日级重训。画像把模糊的“负荷总量”拆解成可以调度、可以预测、可以定价的细颗粒度资源图谱，让管理者找到“哪些负荷可以调、调多少、代价几何”。为了防止画像漂移，设置了漂移检测阈值，当实测和预测的偏差连续越限时就触发重训，用联邦学习聚合画像，在数据共享和隐私保护之间找到平衡。

2.2 “云－边－端”协同的可控负荷柔性调节

画像的价值在于调动起来。本文提出“云－边－端”三级柔性调控架构，云端做全局优化和指令分解，边缘侧做毫秒级闭环校正，终端执行可中断负荷、空调集群、储能和电动汽车的有序响应。该架构的主要创新就是把“硬切负荷”升级为“柔性让渡”，根据负荷价格弹性来设计分时激励价格，用舒适度补偿来引导用户自愿参与，在保证体验的前提下实现负荷曲线的平滑塑形。与集中式控制相比，云边端协同的通信时延从秒级降到毫秒级，在隐私保护上把敏感数据限制在本地，故障隔离时具备单点失效不会导致整个系统失灵的特点，可以支撑起大量的异质资源的可靠调控，防止出现“一刀切”式的限电造成的社会成本。边缘侧使用模型预测控制滚动优化来发出指令，只把聚合状态反馈给云端，从而减少通信带宽的占用。实证表明，柔性让渡模式下用户的参与率比强制中断的提升了 40% 左右，单位调节成本也比强制中断的低了 20% 左右，说明以价换调比以令限电更好[2]。

3 虚拟电厂高效运营的优化模型

3.1 多时间尺度联合调度优化

虚拟电厂要“高效运营”，就要跨越从秒级调频到日前出清的各个时间尺度。本文建立了三层嵌套调度模型，日前层用收益最大化来完成容量和能量的分配，并且参加市场出清；日内层依靠超短期预测滚动修正，吸收光伏出力的波动；实时层依靠边缘控制器执行秒级频率响应来平抑弃光和频偏。三层用影子价格来传递协同信号，使得长周期的决策可以自动吸收短周期的不确定性[3]。目标函数是由能量收益、灵活性机会成本和偏差惩罚这三项组成，机会成本项用来度量调用一次可调资源的“未来折价”，约束包含爬坡率、电量平衡和网络安全，用随机—鲁棒双层算法求解，对非凸环节进行刻画不确定性，日前—日内—实时三层迭代收敛，计算耗时满足在线调度时限的要求，实现运营经济性和资源可持续性的动态平衡，解决“今朝有酒今朝醉”式的浪费资源。

3.2 基于区块链的资源可信聚合与结算

分布式资源主体多、信任成本高，是虚拟电厂规模化的主要障碍。本文提出区块链赋能的可信聚合和结算机制，用联盟链架构，各资源方把可调容量申报、实际响应、计量数据上链存证，智能合约根据事先设定的偏差阈值自动核验响应偏差并执行奖惩，结算全过程不可篡改；聚合过程用零知识证明保护商业隐私，主体在不暴露自身策略的情况下完成可信互验。该机制把传统的“中心化平台背书”变为“算法化的可信协作”，把多边的信任成本由人工的对账转变为代码的自动执行，结算的时间从 T+1 缩短到准实时，使得大量的碎片化资源可以低成本地接入虚拟电厂，从根本上解决了聚合容易而结算难的问题。联盟链只对监管节点、结算节点开放只读权限，既保证透明度，又保证合规，链上存证可以作为争议仲裁的司法级证据，降低履约风险。链上信用和线下监管罚则联动起来，形成“代码加制度”的双重约束，保证多边协作的信任[4]。

4 协同体系下的创新运营机制

4.1 “容量—能量—灵活性”三维协同框架

本文的核心创新是提出“容量—能量—灵活性”三者协同的框架。传统的优化只考虑能量维度（电量平衡），忽略了容量（峰值支撑能力，单位兆瓦）和灵活性（爬坡、调节速率，单位兆瓦每分）的协同作用。本框架把三类资源映射到一个三维空间里，容量维度保证系统有足够大的余量，以峰值负荷下最小的保供缺口为约束；能量维度实现经济调度，以综合成

本最低为目标；灵活性维度平抑波动，以净负荷变化率不越限为准绳。三维联合寻优使得源网荷储和虚拟电厂在规划、运行的整个过程中互相补充、互相促进。储能发挥灵活性和容量的作用，负荷承担低成本的灵活性，新能源专注于能量的输出。用资源映射矩阵实现异构资源可比定价，整体配置效率大大提高。框架内置容量充裕度约束，在规划阶段就可预测运行期灵活性缺口，形成规划引领运行、运行反哺规划的闭环，破解长久以来的割裂难题。三维框架给辅助服务市场赋予了可以结算的产品维度，从而使得灵活性得以明码标价、独立交易[5]。

4.2 动态博弈的分布式利益分配

协同收益要靠多元主体之间公平分配才能可持续。本文设计出一种基于改进Shapley值的动态博弈分配机制，用各个主体在三维协同中边际贡献来决定分配权重，也就是根据加入前后联盟总收益增量来加权，同时引入响应信用系数，对虚报容量和响应违约行为进行权重折减，反之则会给予信用溢价。机制随着市场出清的结果不断调整权重，符合激励相容的原则，即贡献大的人能得到更多的利益，信用好的人能得到更多的激励。不同于静态按比例分成，它既考虑了效率也考虑了公平，抑制了机会主义和搭便车的行为，给多主体长效合作赋予了可以执行的制度保证，保证协同体系在利益方面自我维持。通过算例可以发现，加入信用系数之后主体虚报行为减少超过60%，联盟稳定度大幅提高，说明机制对于机会主义行为有很好的抑制作用[6]。

5 案例验证与效益分析

5.1 典型区域场景的仿真设置

为了检验框架的有效性，本文创建了包含光伏、储能、工业可中断负荷和商业空调集群的典型园区仿真场景，用传统的总量削峰加独立虚拟电厂的基准方案与本文提出的三维协同加精细管理的方案进行对比。园区光伏装机30兆瓦、储能10兆瓦时、可中断负荷5兆瓦、空调集群可调3兆瓦，分时电价峰谷比为3:1。仿真周期选取夏冬两季典型日，考虑到新能源出力的不确定性，用多层随机优化求解，以蒙特卡洛抽样得到100组场景取期望，求解器采用商业优化内核和遗传算法处理非凸环节，关键绩效指标包括消纳率、峰谷差率、收益和保供缺口概率，保证评估全面。为了提高可比性，两个方案都使用相同的资源和边界，只改变协同的逻辑，使得效益的差异是由框架造成的而不是资源禀赋造成的，提高结论的可信度。所有的算例都在相同的硬件环境里重复运行十次取平均值，消除随机求解的偶然性。场景设置接近真实的负荷结构和价格信号，保证结论具有工程上的可推广性。

5.2 协同运营的综合效益评估

仿真结果表明，本文方案比基准方案的新能源本地消纳率提高了大约12%，峰谷差率降低了大约19%，虚拟电厂综合运营收益提高了大约23%，单位灵活性调用成本明显降低，年均减排二氧化碳约2 000吨。就可靠性来说，保供缺口概率由基准的4%下降到个位数以下。敏感性分析结果表明，当新能源渗透率大于40%的时候，三维协同框架的优势更加明显，灵活性收益占比随着渗透率的提高呈线性增长；在预测误差±20%的鲁棒性测试中，方案收益只变化约3%，具有较强的抗扰性。从进一步的投资回收计算可以看出，在三维协同的框架下虚拟电厂增量投资回收期比传统投资回收期少了一年左右，经济性较好。协同框架减小了弃光限电次数，提升了用户侧用电满意度，综合社会净收益明显为正。负荷精细管理与虚拟电厂高效运转，在源网荷储协同系统中取得明显效益。

6 结束语

本文以源网荷储协同体系为研究对象，从系统角度出发，提出适应于该体系的电力负荷精细化管理及虚拟电厂高效运行的方法。提出“容量、能量、灵活性”三者协同的模型，用数字孪生画像和云边端柔性控制来实现负荷精细化管理，用多时间尺度调度和区块链可信聚合来支撑虚拟电厂高效运行，用改进的Shapley值动态分配来保证多主体协作。研究从机理、方法、机制三个方面形成了一个闭环的创新体系，用仿真验证其对提高新能源消纳、削峰填谷和运营经济性有着明显的成效，给新型电力系统高质量的实施提供了实际可行的途径和依据。

参考文献：

[1] 李泽宇,张士杰.电力负荷管理的形势及其发展分析[J].内江科技,2025,46(08):2-3.
[2] 王铁权.电力保供中电力负荷精益管理系统及其关键技术应用[J].电力设备管理,2025(08):50-52.
[3] 马阿威.基于短期负荷预测的虚拟电厂优化调度研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2025.
[4] 王芳.基于物联网的配电网电力负荷管理系统设计与实现[J].电气技术与经济,2024(08):304-306.
[5] 顾丽玲.基于大数据技术的电力负荷预测与优化控制分析[J].电子技术,2024,53(08):172-173.
[6] 王昊.基于电力负荷特性分析的地区短期负荷预测方法研究[D].沈阳:东北大学,2022.

高速公路工程水土保持监理要点分析

成举荣[1]，常　猛[1]，葛　波[2]，郑　康[1]

（1. 华设设计集团股份有限公司，江苏 南京 210000；
2. 江苏仁禾中衡工程咨询房地产估价有限公司，江苏 盐城 224000）

摘　要　高速公路线路绵长、土石方作业量大、扰动点位分散，施工建设极易诱发坡面冲刷、渣土乱堆等水土流失问题，水土保持监理作为现场生态管控核心主体，需精准厘清自身履职范畴，严格区分于水土保持监测工作。本文立足于近两年高速公路现场实操创新思路，明确水土保持监理三大核心职责定位，围绕土石方周转、分段临时防护、取弃土场管控、敏感区段治理梳理一线管控实操要点，从问题分级处置、工序捆绑报验、定点常态化巡检、班组前置交底四个维度提出提质增效落地对策，以期为充分发挥水土保持监理过程纠偏与源头防控作用提供借鉴，进而推动水土保持措施与主体工程同步落地，有效遏制人为水土流失，实现公路工程建设与沿线生态保护协调推进。

关键词　高速公路；水土保持监理；施工管控；水土流失；现场履约

中图分类号：U415.1　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.029

0　引言

高速公路项目建设实施水土保持监理，可以通过总监理工程师全面负责、驻地监理工程师具体负责的方式，全面加强水土保持工作过程监控，将标段高速公路建设环境保护、水土保持工作控制在标准限度内。水土保持监理扎根施工一线，是落实经批复的水土保持方案及其后续设计体系、约束不合理地表扰动行为的现场执行载体，依托线性工程独有施工特征明晰监理履职路径、细化现场管控举措，是工程建设期落实生态水土保护法定要求的必然实践路径。

1　高速公路工程水土保持监理的职责定位

1.1　对标方案核查现场，严控施工履约标准

水土保持监理首要履职内容就是以行政审批批复的水土保持方案、施工图纸中水保专项设计内容为刚性依据，常态化深入施工现场开展符合性核验工作。在路基分段开挖填筑、隧道弃渣转运堆存、临时施工用地布设恢复、各级边坡开挖及配套防护施工等关键作业环节，逐项核对现场施工做法、设施规格、布设位置是否完全匹配设计要求。遇到部分水保构造受地形、地质、施工工艺制约无法按原图实施，或是原有设计防护强度不足以适配现场实际工况的情形，监理主动牵头建设、设计、施工、勘察四方开展现场踏勘会商，形成合理可行的优化变更意见并履行相应流程，从根源解决方案文本与现场施工相互脱节的现象。该项工作和水土保持监测存在清晰边界，监测侧重水土流失指标观测汇总，监理专注于措施落地履约核查，以此守住项目水土保持依法实施的基本底线。

1.2　前置隐患排查治理，动态纠偏施工扰动

高速公路典型线性工程具备线路跨度大、施工点位零散分布、弃渣场布局分散、跨河跨沟施工频次较高的特征，水土保持监理的核心职责之一便是建立主动式风险管控模式，从事前预判、过程干预层面管控地表扰动行为。监理日常巡查重点针对集中堆土区域失稳滑坡隐患、沿线截排水沟破损堵塞、表层种植土随意混堆乱弃等典型风险点位开展常态化排查，一旦发现粗放式施工造成不合理地表扰动，第一时间通过工作联系单、整改指令等正式文书约束施工行为，督促立即纠偏整改[1]。该职责区别于监测单位被动采集水土流失相关实测数据的工作模式，不侧重后期流失量统计分析，而是立足于水土流失发生之前识别风险、处置隐患，贯穿工程全周期约束各类违规扰动作业，最大限度降低人为活动诱发土壤侵蚀的可能性。

1.3　把控分项工程质量，筑牢竣工验收基础

水土保持监理承担水保专项工程全过程质量验收管控职责，覆盖取土场、弃渣场土地复垦整治、路堑边坡生态植被防护、各类临时占地生态恢复、全线截排水构筑物系统等所有水土保持专项构造物。在施工推进过程中严格落实工序报验制度，对隐蔽部位、关

作者简介：成举荣（1990-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：水土保持。

键工序实行逐道验收，上一道水保工序质量核验不合格，不得进入下一道施工作业，同步完成分项、分部完工质量认定工作。在验收管控全过程同步系统收集现场施工照片、工序报验单、隐蔽工程记录、整改闭环资料等全套佐证材料，系统性梳理水保工程现存质量缺陷与实施短板，动态补齐资料缺项。通过全过程质量管控与资料归集整理，系统性完善水土保持设施验收前置必备档案资料，为后续整体水保专项竣工验收提供完整、真实、有效的施工全过程依据，切实履行水土保持工程质量总把关的岗位职能。

2 高速公路水土保持监理的工作要点

2.1 紧盯土方周转流程，全程旁站施工管控

依据国家有关环境法律规范，可知高速公路工程水土保持监理主要指针对高速公路工程建设有关活动，以严密的制度构成为主体特征的综合管理手段，具有行为明确、目的性强特点。作业期间逐一核对表土堆放区域围挡设置、防尘密目网覆盖完整性，实测堆土自然休止角，检查坡脚临时拦挡砌筑施工及时性，一旦发现施工人员私自跨标段随意倾倒弃土、混堆表土与渣土的行为当场叫停纠正。每逢汛期来临前，现场督促施工单位在所有集中堆土外围开挖环形排水沟、布设截水埂，理顺地表汇水路径[2]。全程落实开挖与回填调配同步推进、土体堆放与防护布设同步实施的管控要求，针对土方调配每一个流转节点实时核验防护落实情况，从土体扰动源头控制降雨冲刷引发的土方流失问题。监理还会在土方转运车辆出场前进行检查，督促车辆设置密闭挡板、冲洗轮胎，避免沿途撒落渣土形成沿路线状水土流失，同步做好每一处堆土点位动态台账记录，跟进堆土增减变化对应的防护调整工作，不因土方量动态变动出现防护缺位。

2.2 依托线路分段施策，动态完善临时防护

高速公路工程水土保持监理可以通过控制、检查、视察、评价等一系列从旁纠偏手段，保证水土保持合同目标任务的顺利实现。路基段落完成单次开挖成型后，立刻核查同步施工的路基边沟、坡面急流槽、路口沉沙池施工进度与成型质量，不得滞后主体开挖工序。全线新建施工便道成型阶段，督促施工单位沿便道内侧或外侧修筑连续挡土埂与纵向排水沟，及时疏导路面汇水；路基、堑坡形成裸露创面后，当场督促完成无纺布或防尘网全覆盖，不得长时间裸露搁置。对于互通立交、服务区、收费站等零散不规则扰动地块，监理按地块边界划分专属防护责任区块，逐一明确防护完成时限与施工标准，逐个点位核对覆盖、拦挡、排水设施落实情况，消除零散点位管控盲区，避免局部防护缺失带来反复整改作业。针对分段移交、分期完工的施工段落，监理同步做好防护交接核验，前段完工移交时必须完成临时防护验收，防止交接空档期出现裸露土体无人管护、雨水冲刷流失的问题，保障全线临时防护衔接不间断。

2.3 聚焦场坪施工工序，闭环管控水土隐患

监理将取土场、弃渣场定为全线水土保持管控核心点位，落实全工序报验管理模式，严格遵循堆渣填筑、分层碾压压实、坡脚挡墙砌筑、坡面修整防护、场内排水系统铺设、后期土地复垦的施工顺序逐道核验。每完成一层渣土填筑摊铺碾压，现场实测堆填边坡坡度、堆体总存量，核对是否符合设计限定堆高与坡率参数，确认满足要求后方可审批下一层填筑作业，从严制止超坡度堆填、超出设计库容倾倒废渣等违规行为。在渣场整体堆填接近尾声阶段，提前对接施工单位排定边坡绿化、土地平整、复耕覆土具体施工节点，同步跟进工序报验验收，不允许场坪堆渣完工后长期搁置不开展生态修复，持续盯控全周期施工动作，彻底消除取弃土场长期遗留水土流失风险[3]。日常巡检中同步检查场内排水涵洞、盲沟等隐蔽排水结构埋设质量，避免内部积水浸泡堆体引发滑移塌陷，对进场出入口设置临时沉沙设施，拦截出场裹挟泥沙，杜绝场外沟道淤积问题。

2.4 紧盯敏感施工区域，同步落实防护约束

针对跨河桥梁桩基、临河路基、深挖高陡边坡等生态敏感区段，监理单独匹配同步管控节奏，逐项落实硬性防护要求。开展河道范围内桩基施工时，要求围堰围护结构、泥浆沉淀处理池与桩基开孔作业同步搭设启用，全程管控施工泥浆、基坑废水处置路径，严禁含泥污水未经沉淀直接排入自然河道。高陡路堑开挖作业严格执行分层开挖模式，每开挖成型一级坡面，随即核验锚杆、框架梁、植草等防护工序跟进情况，禁止一次性大面积开挖多个坡面后集中补做防护工程。每年汛期到来之前，逐段排查疏通全线截水沟、排水沟、急流槽等排水构筑物，清理沟槽内部淤积渣土、杂草杂物，修整破损开裂渠段，保证排水通道通畅，避免强降雨形成集中径流冲刷坡面及各类防护结构，防止防护体系损毁诱发大面积水土流失。

3 高速公路工程水土保持监理工作效率提升建议

3.1 分级分类处置问题，提速现场整改闭环

监理在日常巡查过程中，对现场发现的水土保持问题提前划定轻重等级，对应匹配不同处置流程，简化多层级书面报批流程。针对裸土局部未覆盖、临时围挡局部破损、零星排水沟杂物堵塞这类轻微问题，

现场直接向现场带班人员下达口头整改指令，要求作业人员当场完成修补、覆盖、疏通作业，整改完成随即现场复核销号。针对土方随意堆放、截排水体系失效、堆土坡率超标等一般性违规问题，现场填制正式书面整改通知单，写明问题位置、整改标准、完成时限，全程跟踪整改进度，到期逐项核验闭环。针对擅自设置弃渣点位、大面积铲除原生植被、向沟谷河道乱倒废渣等严重违规情形，直接签发工序暂停指令，禁止该区域后续施工作业，待全部整改到位并经监理复核验收合格后，方可批复恢复施工，精简流转环节，加快各类问题处置节奏。

3.2 捆绑主体工序报验，压实同步防护要求

调整原有水土保持单独报验、滞后于土建主体施工的报验流程，制定统一的工序联合报验要求，路基分层填筑、路堑分级开挖、弃渣分层堆填等关键主体工序申请验收时，施工单位提交的报验资料内必须附带该施工区域配套水土保持设施施工完成佐证材料。监理在开展主体工程质量核查的同时，同步核查对应区域裸土覆盖、临时拦挡、截排水布设、堆土规整等水保落实情况，只要对应水土保持措施未按标准施工、存在缺项漏项，直接不予签署该道主体工序验收资料，不允许进入下一道主体施工工序[4]。通过报验环节硬性约束，倒逼施工班组在编制施工计划时同步安排水土保持施工内容，杜绝项目后期集中突击补做水土保持工程，避免大面积返工整改作业。该联动报验机制将水保管控融入主体施工全流程，打破了土建施工与水土保持防护脱节的行业通病，从制度层面压实施工单位主体责任，有效规避后期水土保持工程补做造成的工序冲突、成本增加及防护效果不达标的各类问题。

3.3 锁定重点管控点位，固化常态巡检机制

开工前期梳理全线水土保持高风险点位台账，逐一登记所有取土场、弃渣场、跨河施工断面、深挖路堑与高陡边坡具体位置，编制固定点位巡检清单，明确每一处点位常态化巡查频次与检查内容，严格按照既定路线与频次开展定点踏勘，摒弃随性巡查、走马观花式检查模式，规避隐蔽部位隐患遗漏。针对往年汛期曾发生坡面冲刷、排水溃口、土体滑塌的薄弱路段，单独提高巡查频次，增加雨季专项踏勘频次，逐段检查排水通畅性、堆体稳定性、坡面防护完整性。每次巡查完整留存现场检查记录，对发现问题即时登记处置，持续跟踪整改落实情况，减少同类问题反复出现、多次整改的情况，精简重复巡查与整改投入。同时结合季节施工特点动态调整巡检重点，旱季重点核查裸土覆盖、防尘管控落实情况，雨季重点排查排水系统通畅性与堆体稳定性，通过差异化巡检模式精准把控不同时段水保风险，全面提升隐患排查的精准度与实效性。

3.4 下沉一线作业交底，前置规避施工违规

改变以往仅面向项目部管理人员开展水土保持技术交底的单一模式，监理主动深入土方开挖、桥梁桩基、边坡修整等一线作业班组，在每一新工作面动工前开展现场实地交底。交底过程中结合作业地块地形条件，明确表土存放位置、堆土控制坡度、临时拦挡搭设位置、裸土覆盖时机、临时排水沟布设具体尺寸等实操细则，逐条明确现场作业禁止行为[5]。同步向一线作业人员讲明违规堆土、泥浆乱排、裸土长期裸露等行为对应的整改要求与管控约束措施，让一线作业人员清晰掌握作业红线。从作业起步阶段规范施工操作习惯，遏制日常施工中习惯性违规扰动地表的现象，减少后续巡查发现问题后的沟通劝导、反复督促整改工作，从源头减少水土保持违规问题产生。每次交底后同步组织简单考核与签字确认，留存交底影像、签到表、考核记录等完整档案，确保一线作业人员吃透管控标准、牢记施工红线，彻底解决传统交底流于形式、落地不到位的问题，筑牢源头水保管控防线。

4 结束语

水土保持监理是高速公路建设期管控人为水土流失的关键执行环节，明晰监理专属职责边界、区分监测工作定位，是规范化开展现场管控的基础。围绕土石方周转、分段临时防护、取弃土场治理、敏感区段防护落实针对性管控要点，搭配问题分级处置、工序联合报验、定点常态化巡检、班组前置交底等实操举措，可切实打通水土保持措施落地堵点。未来高速公路工程建设中，水土保持监理应持续立足于施工现场全过程主动管控，紧盯各类扰动作业动态纠偏，推动水土保持措施与主体工程同步推进，在保障项目建设有序开展的同时，降低沿线地表生态扰动，实现工程建设与水土保持统筹协调推进。

参考文献：

[1] 武文. 水利工程水土保持监理的理论与实践研究 [J]. 建设监理 ,2026(05):94-96.
[2] 高硕. 水土保持工程安全监理与隐患排查治理方法 [J]. 水上安全 ,2026(05):155-157.
[3] 黄旭文. 福建省高速公路工程水土保持监理工作的实践与思考 [J]. 亚热带水土保持 ,2024,36(02):46-48,54.
[4] 梁亚丹, 吴碧波. 广东省高速公路水土保持示范工程创建实践与经验 [J]. 中国水土保持 ,2023(06):21-24.
[5] 姜桐伽. 高速公路施工期取土场、弃土场水土保持监理研究 [J]. 运输经理世界 ,2021(33):25-27.

配电变压器运行隐患排查及维护管理策略

黄永权

（中山市长江电气安装工程有限公司，广东 中山 528400）

摘 要 配电变压器作为配电网的核心设备，承担电压变换、电能分配的关键职能，其运行状态直接决定城乡配电网供电可靠性。受负荷波动、环境侵蚀、设备老化、运维不到位等多重因素影响，配电变压器运行过程中易出现过热、渗漏油、绝缘劣化、接地异常等各类隐患，严重时引发设备烧毁、停电事故，威胁电网安全与用户用电安全。本文结合配网现场运维实际，归纳配电变压器常见运行隐患类型，分析隐患形成诱因，阐述隐患排查的重点内容与技术方法，从日常巡检、状态检测、故障处置、运维制度、人员能力等维度提出针对性维护管理策略，以期为配电变压器安全稳定运行提供技术参考。

关键词 配电变压器；隐患排查；设备维护；配电网；运行管理

中图分类号：TM421 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.030

0 引言

当前，城乡用电负荷持续增长，配电变压器数量规模不断扩大，设备长期处于高负荷、多工况运行环境。配电变压器分布范围广，大量设备安装于户外，常年经受高温、雷雨、潮湿、沙尘等外界环境影响，设备部件会逐步发生老化损耗。部分基层运维存在重故障抢修、轻日常维护的现象，隐患排查流于形式，早期缺陷无法及时识别，小隐患逐步演变为重大设备故障，造成区域停电，给居民生活、工商业生产带来损失。做好配电变压器隐患排查，构建科学完善的维护管理体系，能够降低设备故障概率，延长设备服役寿命，提升配网供电可靠性，对保障配电网安全运行具有现实意义。

1 配电变压器主要运行隐患及成因分析

1.1 渗漏油隐患

渗漏油是配电变压器最为普遍的故障隐患。变压器密封胶垫长期受温度冷热交替、紫外线照射出现老化开裂；法兰连接螺栓松动、箱体焊缝锈蚀开裂；套管密封部位破损，均会造成变压器油渗漏。变压器油承担绝缘、散热作用，漏油会造成油位下降，内部散热能力降低，绝缘性能下降，极易引发绕组过热击穿。部分渗漏位置隐蔽，轻微渗油不易被巡检人员发现，长期发展将加剧设备损坏。

1.2 过热发热隐患

变压器过热分为本体过热与接线部位过热。一方面用电负荷持续攀升，变压器长期过载运行，绕组损耗增大，本体温度异常升高；另一方面接线端子、引线接头安装工艺不到位，接触电阻偏大，运行中发热氧化，形成恶性循环。夏季用电高峰时段，过载发热问题尤为突出，高温会加速绝缘材料老化，缩短变压器使用寿命，严重时造成绕组烧毁。

1.3 绝缘性能劣化隐患

户外环境下，潮气、雨水、粉尘容易侵入变压器内部，造成绝缘油受潮、绝缘套管积污闪络。绝缘油经过长时间运行会发生氧化变质，产生杂质，降低绝缘强度。套管表面污秽严重，遇到阴雨大雾天气，容易发生套管闪络放电，诱发短路故障。绝缘属于隐性缺陷，设备外观无明显异常，依靠肉眼巡检很难发现，属于高风险隐患。

1.4 接地与防雷隐患

配电变压器接地装置锈蚀、接地极腐蚀流失，会造成接地电阻超标；防雷避雷器老化失效、避雷器引线连接松动。雷雨天气遭受雷击时，过电压无法有效泄放，过电压侵入变压器内部，击穿绕组绝缘，造成变压器损毁。很多老旧台区接地装置埋设于地下，腐蚀情况无法直观观察，接地隐患具有较强隐蔽性。

1.5 附属部件异常隐患

分接开关接触不良，会造成接触点发热，输出电压偏移；油位计、温度计损坏，无法真实反馈设备运行参数；呼吸器硅胶失效未及时更换，空气中水汽持续进入油箱内部；变压器外壳锈蚀，防护能力下降。

作者简介：黄永权（1991-），男，本科，工程师，研究方向：电气工程及其自动化。

附属小部件故障，往往容易被运维人员忽视，逐步诱发主设备故障。

1.6 人为及外部环境带来隐患

动物闯入造成相间短路；树木树枝距离变压器、引线过近引发放电；外力碰撞损坏箱体；运维操作不规范，检修遗留缺陷。同时，部分老旧设备运行年限超期，部件老化严重，设备本体先天缺陷，进一步放大运行风险。

2 配电变压器隐患排查主要内容与技术手段

隐患排查主要划分为人工现场巡检、仪器设备检测两大类别，实际工作当中需要将日常巡视、专项隐患排查、停电试验检测等工作方式有机结合，统筹兼顾设备表面可见缺陷与内部不易察觉的隐蔽缺陷，真正实现显性、隐性隐患的全方位覆盖，避免出现漏查、错查问题。

2.1 外观现场人工排查

运维人员现场开展人工外观巡检，重点检查变压器箱体外壳有无变形锈蚀，各法兰、密封垫等密封位置有无渗油漏油现象，观察油枕油位是否保持在设备铭牌标注的标准区间；仔细查看套管有无破损、裂纹、积污放电痕迹；观察接线端子有无氧化变色、发热烧蚀痕迹；检查呼吸器硅胶是否变色失效；核查接地引线有无断裂锈蚀；同时排查设备周边环境是否存在树木、杂物、动物巢穴等外部风险，仔细记录设备运行噪声、有无异常震动异响等直观运行状态信息。

2.2 带电检测技术排查

充分运用各类带电检测技术开展排查工作，采用红外测温技术，对接线端子、套管、箱体、各连接接头开展多点温度检测，有效识别接头过热、本体局部发热缺陷；利用油色谱检测，提取变压器本体油样开展专业化验分析，判断变压器内部有无局部放电、过热故障；通过接地电阻测试仪，定期测量接地电阻数值，校验接地系统是否满足规程达标要求；对避雷器开展带电测试，判断避雷器性能是否出现劣化。带电检测无需设备停电，可在设备正常运行状态捕捉早期隐性隐患。

2.3 停电试验排查

在设备停电检修阶段，开展绕组直流电阻、绝缘电阻测试，细致检查分接开关接触状态是否良好；现场校验油位、温度指示装置，确认仪表显示数据真实可靠；对老化严重、指标超标的绝缘油进行过滤或者直接更换，从设备内部层面全面排查潜在缺陷。

2.4 数据台账比对分析

完整收集变压器历史运行负荷、运行温度、历年检修记录等档案资料，横向、纵向对比设备运行参数变化趋势。当出现设备负荷正常但温度异常升高，油位不明原因下降等异常数据，不能简单忽略，需要开展深度排查，挖掘设备内部存在的隐蔽隐患。

3 配电变压器维护管理优化策略

3.1 落实分级常态化巡检机制

建立日常巡视、季度专项排查、雷雨季节重点巡检相结合的巡检制度。日常巡视重点关注油位、渗漏油、外部接线、周边环境；高温负荷高峰时期，增加夜间特巡，重点排查接头发热；雷雨季节重点核查接地、避雷器运行状态。对老旧台区、高负荷台区提高巡检频次，杜绝巡检走过场。同时，做好巡检台账记录，发现隐患分类登记，明确隐患等级，区分一般隐患、重大隐患。

3.2 强化隐患闭环处置管理

建立“隐患发现—登记—派工—整改—复核销号”闭环管理流程。轻微渗漏油、硅胶变色等一般隐患限期整改；绕组过热、接地失效、油位严重偏低等重大隐患，及时安排停电处置，禁止设备带重大隐患长期运行。杜绝只排查不整改的现象，整改完成后复核验收，确认隐患彻底消除才可销号。同步更新设备档案，记录隐患原因、处置措施，为后续运维提供参考[1]。

3.3 做好设备负荷管控，规避过载运行

结合台区用电数据，动态监测配电变压器负载率。用电高峰来临前提前开展负荷预测，负载长期超标的变压器，及时采取负荷分流、增容改造措施，避免设备长期过载。合理调节分接开关，保障输出电压质量，分接开关操作完成后测试直流电阻，确认接触良好，防止调整不到位带来新故障。

3.4 规范检修与材料质量管理

检修作业严格执行工艺标准，密封垫、螺栓、呼吸器、避雷器等配件选用合格产品。变压器渗漏油处理，更换老化密封件，控制螺栓紧固力矩，避免过紧造成密封垫挤压破损。检修作业完毕，核对油位，检查密封效果。绝缘油定期取样化验，指标不合格及时滤油或者换油。设备存放、检修过程做好防护，防止潮气杂质进入油箱[2]。

3.5 提升智能化运维应用水平

积极运用红外测温、油色谱在线监测、台区智能终端等数字化手段，实时采集变压器负荷、温度、电

压等运行数据。依靠后台系统实现异常告警，改变完全依靠人工巡检的模式，及时捕捉早期缺陷。利用大数据分析，对设备健康状态进行评估，由故障抢修模式向状态检修模式转变，根据设备实际健康情况安排检修，减少不必要停电[3]。

3.6 完善管理制度，提升运维人员专业能力

完善配电变压器运维检修规程，明确巡检项目、检修标准、隐患判定标准。定期组织运维人员开展技术培训，熟悉变压器各类隐患特征，掌握红外测温、油样采集、接地电阻测试等实操技能，提高隐患识别能力。落实岗位责任，将设备运维责任落实到人，强化作业过程监督，减少人为检修缺陷。同时加强设备全生命周期管理，对于老化严重、缺陷频发，无维修价值的老旧变压器，及时申报更新改造，从源头降低运行风险[4]。

3.7 做好外部环境风险防控

运维过程及时清理变压器周边过高树木，清除设备周边杂物，封堵箱体孔洞防范小动物侵入；做好防撞防护，避免外力破坏。开展台区安全宣传，提醒用户不要私拉乱接，减少异常负荷冲击，降低外部因素带来的设备故障[5]。

4 工程案例实践

4.1 项目概况

某城区老旧供电片区共计12台10 kV油浸式配电变压器，投运年限8年～14年，台区覆盖居民与小型商业用户。改造前设备存在渗漏油、接头发热、接地电阻超标、呼吸器失效等多项典型缺陷，故障报修频次较高，夏季高峰时段供电可靠性不足。项目将上文提出的隐患排查与全过程维护管控策略落地实施，开展集中隐患治理，建立闭环运维管理机制。治理前后关键指标对比见表1。

表1 配电变压器隐患治理前后指标对比

指标	治理前	治理后
设备隐患总数量	36项	3项
年度故障报修次数	17次	2次
接头最高红外测温温度	132 ℃	64 ℃
接地电阻不合格台数	5台	0台
台区供电可靠率	98.72%	99.86%

4.2 项目实施过程

项目首先开展全覆盖隐患排查，综合人工巡检、红外测温、接地电阻测试、油质化验手段，全面统计渗漏油、接头发热、接地失效、附属部件损坏等缺陷，划分一般、重大隐患等级，建立隐患台账。其次落实分级巡检，老旧变压器提高巡检频次，高温、雷雨季节增加特巡；对渗漏油设备更换密封胶垫，对接头过热部位重新处理接触面，更换老化避雷器与接地极；严格执行材料进场检验，对呼吸器、密封件、避雷器等配件抽样检测。最后开展运维人员专项实操培训，落实隐患“发现—登记—整改—复核销号”闭环管理，引入红外测温、台区终端开展常态化在线监测，清理设备周边树障，封堵箱体孔洞防范小动物短路。

4.3 实施效果

经过为期4个月集中治理，大部分设备隐患得到消除，仅剩余3项不影响运行的一般外观缺陷。项目投运一年，变压器本体、接头发热、接地等问题得到有效遏制，故障报修大幅下降，台区供电可靠性显著提升，验证了本文隐患排查与维护管理策略具备良好的工程实用性，可为同类型老旧台区运维工作提供实践参考。

5 结束语

配电变压器作为配网末端关键设备，运行隐患种类多，部分隐患隐蔽性强，如果排查维护不到位，极易引发停电事故。运维工作不能只聚焦故障之后抢修，应当把工作重心前置，做好常态化隐患排查，综合人工巡检、带电检测、停电试验多种手段，精准识别渗漏油、过热、绝缘劣化、接地失效等各类缺陷。通过健全巡检体系、落实闭环隐患治理、管控设备负荷、推广状态检修、强化人员管理等多项举措，持续提升配电变压器维护管理水平，及时消除各类安全隐患，保障配电变压器安全可靠运行，切实提升城乡配电网供电质量。

参考文献：

[1] 许华荣.配电变压器故障分析及排除实例[J].农村电气化,2025(02):42-44.
[2] 夏旺.10kV配电变压器故障分析与诊断技术研究[J].现代工业经济和信息化,2021,11(10):133-134,139.
[3] 宋嘉琚,胡月龙,张楠,等.10kV配电网配变故障分析及处治措施研究[J].电力设备管理,2025(19):15-17.
[4] 刘西沉.配电变压器日常运行维护问题研究[J].电子世界,2020(06):167-168.
[5] 邵芳.基于监督机器学习的配电网电力智能运维检修研究[J].自动化技术与应用,2024,43(11):169-173.

高墩连续梁挂篮悬臂浇筑工序质量控制要点

杨海波

（四川省铁路建设有限公司，四川 成都 610071）

摘 要 高墩连续梁挂篮悬臂浇筑施工是大跨度桥梁建设中广泛应用的施工方法，具有墩高较大、高空作业多、线形控制难度大等工程特点，工序复杂、技术要求高、安全风险大，施工质量直接关系到桥梁结构安全和使用寿命。本文从高墩连续梁工程特点与挂篮悬臂浇筑质量控制要求出发，概述了挂篮构造选型、悬臂浇筑流程、0号块施工、挂篮拼装预压等施工工艺，从钢筋与预应力管道安装、混凝土浇筑养护、预应力张拉压浆、挂篮走行与线形控制等关键工序提出系统质量控制要点，以期为高墩连续梁悬臂浇筑施工质量控制提供参考。

关键词 桥梁施工；高墩连续梁；挂篮；悬臂浇筑；混凝土浇筑

中图分类号：U445 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.031

0 引言

随着我国铁路和公路建设向山区延伸，高墩大跨度连续梁桥梁数量不断增加。挂篮悬臂浇筑法因其无需搭设满堂支架、不受地形和水深限制、施工适应性强等优势，成为高墩连续梁施工的主要方法。然而，悬臂浇筑施工工序多、技术复杂，涉及挂篮设计安装、钢筋绑扎、混凝土浇筑、预应力张拉、挂篮走行等多个环节，任何一道工序质量控制不到位都可能影响梁体结构安全和线形精度，甚至引发安全事故。因此，系统研究高墩连续梁挂篮悬臂浇筑工序质量控制要点，对保障桥梁施工质量和结构安全具有重要的工程意义。

1 高墩连续梁挂篮悬臂浇筑质量控制难点

挂篮悬臂浇筑法的基本原理是利用已浇筑完成的梁段作为承重基础，通过挂篮逐段向跨中方向悬臂浇筑混凝土，每浇筑一个梁段并完成预应力张拉后，挂篮向前移动一个节段，循环往复直至合龙。这种施工方法不需要搭设满堂支架，不受桥下地形和水深限制，特别适合高墩大跨连续梁施工，但也带来了一系列质量控制难点。

梁段线形控制是首要难点。悬臂浇筑过程中，梁体标高受挂篮弹性变形和非弹性变形、混凝土自重、预应力张拉伸长量、温度变化、混凝土收缩徐变等多种因素耦合影响，任何一个因素考虑不周都会导致立模标高偏差，最终影响合龙精度和成桥线形。高墩条件下，墩身的水平位移和压缩变形也会叠加到梁体标高变化中，进一步增加了线形预测的难度。

混凝土浇筑质量控制是另一难点。变截面箱梁钢筋密集、预应力管道纵横交错，腹板与底板交接处、齿板附近等部位混凝土下料和振捣困难，易出现蜂窝、麻面、孔洞等缺陷。

预应力施工质量控制同样不容忽视。悬臂浇筑梁段预应力束数量多、空间曲线复杂，管道定位偏差会导致预应力损失增大，张拉力和伸长量双控不严格则可能出现预应力不足或超张拉，直接影响梁体结构安全。挂篮行走安全管控也是质量控制的重要环节，行走过程中挂篮倾覆、锚固失效、不同步偏载等风险均可能引发安全事故和质量缺陷。这些质量控制难点相互交织，要求施工单位建立覆盖各工序的全过程质量管控体系，确保每个环节都处于受控状态。

2 高墩连续梁挂篮悬臂浇筑施工工艺

2.1 挂篮构造与选型

挂篮是悬臂浇筑施工的关键设备，其性能直接关系到施工安全和质量。菱形桁架式挂篮是目前应用较为广泛的挂篮形式，主要由主桁架、锚固系统、行走系统、底模平台、侧模、内模、工作平台等部分组成。菱形桁架式挂篮具有结构受力明确、自重较轻、刚度较大、行走方便等优点，适用于大跨度连续梁悬臂浇筑施工。挂篮设计承载力按最大梁段重量的1.2倍考虑，主桁架采用型钢焊接组合截面，前后锚固点利用箱梁竖向预应力筋或精轧螺纹钢筋锚固，确保挂篮施工安全。

挂篮选型应综合考虑梁段重量、梁体截面尺寸、施工工期、现场条件等因素，优先选用自重轻、刚度大、

作者简介：杨海波（1986-），男，本科，工程师，研究方向：铁路工程与公路工程。

操作方便、安全可靠的挂篮形式。挂篮加工完成后应进行试拼和荷载试验，确保挂篮性能满足设计要求。

2.2 悬臂浇筑施工流程

挂篮悬臂浇筑施工遵循固定的工艺流程，每个梁段的施工流程为：挂篮就位调整→底模、侧模安装→底板及腹板钢筋绑扎→预应力管道安装→内模安装→顶板钢筋绑扎→混凝土浇筑→养护→拆模→预应力张拉→孔道压浆→挂篮走行→进入下一节段施工。各工序之间衔接紧密，前道工序质量不合格不得进入下道工序，形成闭环质量管理。

2.3 0号块施工

0号块作为连续梁悬臂浇筑施工的关键初始节点，位于桥墩顶部区域，既是后续节段施工的前提基础，又是确保工程质量的核心控制要素。该构件因结构高度较大、截面形式多样以及内部钢筋和预应力管道密集分布等特点，在混凝土浇筑过程中面临诸多技术难题，包括体积庞大且工艺复杂等问题。通常采用托架法进行0号块的施工，首先在墩身部位预埋牛腿并搭建型钢托架形成作业平台；随后实施静载预压试验，以此消除非线性效应的影响，并精确获取结构弹性沉降参数[1]。

0号块钢筋绑扎应严格按设计图纸施工，注意钢筋间距、保护层厚度、接头位置等质量要求，预应力管道定位要准确，采用定位钢筋固定管道位置，避免管道移位或变形。0号块混凝土方量大，宜采用分层浇筑、分层振捣的方法，每层厚度不超过30 cm，注意腹板与底板交接处、预应力管道密集处等部位的振捣密实，避免出现蜂窝麻面。同时混凝土浇筑完成后及时养护。

2.4 挂篮拼装与预压

挂篮拼装在0号块顶板上进行，拼装前应对0号块混凝土强度、预埋件位置、锚固系统进行检查，确认满足挂篮拼装条件。拼装过程中应严格按照挂篮设计图纸和操作规程施工，各连接螺栓、销轴安装到位，锚固系统牢固可靠，安全防护设施同步安装。

挂篮拼装完成后必须进行预压试验，预压荷载按最大梁段重量的1.1倍考虑，采用沙袋或水箱分级加载，预压加载分级及观测要求如表1所示。

表1 挂篮预压加载分级及观测要求表

加载级别	加载比例	持荷时间	观测内容	合格标准
第一级	50%	30 min	主桁架变形、底模挠度	变形均匀、无异常
第二级	80%	30 min	锚固系统、节点连接	锚固可靠、节点无松动
第三级	100%	60 min	整体变形、焊缝检查	总变形在设计允许范围
第四级	110%	120 min	最大变形、结构安全	无塑性变形、结构安全
卸载	0%	30 min	残余变形测量	残余变形为非弹性变形

3 高墩连续梁挂蓝悬臂浇筑工序质量控制要点

3.1 钢筋与预应力管道安装质量控制

原材料进场时要认真核对质量认证文件，按照现行国家标准或者行业标准进行力学性能检验，检验合格后方可使用。钢筋加工宜在专业化的预制场统一进行。绑扎作业应按照自下而上的顺序依次进行，即先底板、再腹板、后顶板，综合使用间距控制、排列规范、保护层厚度等关键指标，使用标准化混凝土垫块实现精准定位；分布形式建议采用均匀的“梅花型”网格布局。

在钢筋工程中，为了提高接头质量以及分布均匀性，建议优先采用机械连接或者焊接工艺，并且按照错位布置原则。预应力管道安装作业必须按照设计规范准确确定位置参数，用定位钢筋准确固定；接头处易产生渗漏风险，推荐使用专用配件并采用胶带密封技术防护。正式浇筑前要对管道体系进行全方位检测，可以利用临时支撑来提高整体稳定性，在混凝土施工过程中还要指派专人对管道进行监测，及时处理出现的位移问题[2]。

3.2 混凝土浇筑与养护质量控制

悬臂浇筑法的关键工序之一就是混凝土浇筑，混凝土浇筑工艺水平的好坏直接影响结构件的整体性能。为了保证工程品质达到预期目标，选用高性能混凝土材料，通过试验确定最佳配合比参数，满足力学性能、弹性模量、耐久性等各方面技术要求。实际施工时应采用专业化拌和站集中制备，用罐车运输，采用泵送技术精确注入模板内；同时加强现场对骨料比例控制和搅拌时间的管理，保证浇筑成果具有良好的一致性、可靠性，具体见表2。

从表2的数据分析可知，混凝土浇筑作业应按从挂篮前端到后端分层施工。实际操作时，优先使用插入式振捣器，使振捣棒深入底层5 cm～10 cm，保证

表 2 悬臂浇筑梁段混凝土浇筑及养护控制要点表

控制环节	控制要点	技术要求	检验方法
混凝土拌和	原材料计量、拌和时间	计量偏差≤ ±2%，拌和时间≥ 90 s	拌和站记录、抽查
混凝土运输	运输时间、和易性	运输时间≤ 60 min，无离析泌水	现场目测、坍落度测试
混凝土浇筑	分层厚度、浇筑顺序	分层厚≤ 30 cm，从前端向后端浇筑	现场旁站、尺量检查
混凝土振捣	振捣方式、振捣时间	插入式振捣，每点 20 s ～ 30 s，无漏振	现场旁站检查
混凝土养护	养护方式、养护时间	土工布覆盖洒水，养护≥ 14 天	现场检查、养护记录
温度控制	入模温度、内外温差	入模温度 5 ℃～ 30 ℃，内外温差≤ 25 ℃	温度计测量、温度记录

混凝土内部密实。为了降低早期收缩裂缝的风险，在浇筑完成后应及时进行表面处理，在初步固化期间完成两次抹平工序。养护环节需要依靠土工膜覆盖加周期性洒水保湿等手段来提高防护效果，保证材料性能稳定[3]。

3.3 预应力张拉与压浆质量控制

预应力张拉工序对桥梁结构受力特性、稳定性影响较大。施工前应对千斤顶、油压表进行校准，制定合理的施工技术保障措施，校准周期为一个月或者累计张拉次数达到 200 次时重新校准一次。本工序采用双控方式，主要依靠张拉力参数进行精确控制，同时将伸长量作为辅助监测指标。

预应力张拉施工要严格按照设计规范执行，遵循对称性、分级制、交替式操作原则。首先进行纵向预应力筋张拉，然后依次进行横向和竖向预应力束张拉，从而降低梁体承受集中荷载的风险。整个张拉过程要采用匀速渐进的方式逐步加载，在达到目标控制应力值后保持5 min的恒载状态，保证预应力传递的有效性、可靠性，完工后应及时检测断丝、滑移情况[4]。

3.4 挂篮走行与线形控制

挂篮走行是悬臂浇筑施工中安全风险较大的工序，必须严格控制走行安全。挂篮走行应在本梁段预应力张拉和压浆完成、压浆强度达到设计要求后进行，走行前检查轨道铺设、锚固系统、走行装置、后锚点等，确认安全可靠后方可走行。走行过程中 T 构两侧挂篮同步对称走行，走行速度缓慢均匀，设专人指挥和观察，发现异常立即停止。挂篮走行到位后及时安装后锚固，检查挂篮位置和标高，调整至设计位置后固定牢靠[5]。

线形控制是悬臂浇筑施工质量控制的重要内容，直接关系到合龙精度和桥梁外观线形。应建立专业线形监控体系，每个梁段施工前根据挂篮变形、混凝土自重、预应力张拉、温度变化、收缩徐变等因素计算立模标高，施工过程中实测各阶段梁段标高，与理论值对比分析，及时调整后续梁段立模标高。温度对线形测量影响较大，应在每天清晨温度稳定时进行标高测量，避免温度变化导致测量误差。合龙前应对 T 构两侧标高和轴线进行精确测量，根据实际偏差调整合龙段施工方案，确保合龙精度满足设计和规范要求。

4 结束语

高墩连续梁挂篮悬臂浇筑施工质量控制是一项系统性工作，需要从挂篮设备、钢筋工程、混凝土工程、预应力工程、线形监控等多环节协同发力，严格执行各工序质量标准和操作规程，才能确保梁体结构安全和线形精度。本文从高墩连续梁工程特点与质量控制要求出发，系统梳理了挂篮构造选型、悬臂浇筑流程、0 号块施工、挂篮拼装预压等施工工艺，提出了钢筋与预应力管道安装、混凝土浇筑养护、预应力张拉压浆、挂篮走行与线形控制等关键工序的质量控制要点。未来可进一步探索基于 BIM 技术的悬臂浇筑施工全过程信息化管理，推动桥梁工程高质量发展。

参考文献：

[1] 赵威 . 桥梁连续梁挂篮浇筑施工线形控制技术应用研究 [J]. 现代工程科技 ,2026,05(14):105-108.
[2] 王培剑 . 大跨径连续刚构桥悬浇施工工艺及质控措施 [J]. 交通世界 ,2026(21):87-89.
[3] 张学峰 . 大跨径连续箱梁挂篮拼装—预压—前移施工关键技术探讨 [J]. 工程技术研究 ,2026,11(14):88-90.
[4] 张涛 . 连续梁桥挂篮悬臂施工线形控制与施工精度研究 [J]. 交通科技与管理 ,2026,07(14):140-142.
[5] 齐杰 . 悬臂浇筑施工技术在大跨径连续梁桥中的应用分析 [J]. 工程建设与设计 ,2026(13):190-192.

港口与航道工程监理的安全风险管理机制研究

董振华[1]，王 贇[2]

（1. 江苏科兴项目管理有限公司，江苏 南京 210003；
2. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210003）

摘 要 随着我国水运基础设施建设规模持续扩大，港口与航道工程项目数量和体量不断增长，由此带来的施工安全风险问题日益突出，传统安全管理模式已难以满足复杂作业环境下的管控需求，如何提升监理机构的安全风险管理能力成为行业关注的重要课题。本文以监理机构职责为切入点，系统分析港口航道工程安全风险特征、识别方法，阐述监理职责定位，构建事前预防、事中控制、事后处置的全过程风险管理机制，提出组织制度、技术信息、考核追责三方面保障措施，以期为监理单位完善安全管理体系提供理论参考。

关键词 港口与航道工程；监理安全管理；风险识别；全过程控制机制

中图分类号：U615 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.032

0 引言

港口与航道工程是水运交通基础设施的重要组成部分，其建设涉及疏浚、爆破、吊装、潜水等多专业交叉作业，施工环境复杂多变。传统安全管理模式主要依赖人工巡检，存在效率低、覆盖范围有限、实时性差等缺点。监理机构作为工程建设的第三方管理力量，承担着安全监督的法定职责。构建科学完善的安全风险管理机制，对于提升监理工作效能、保障工程施工安全具有重要的现实意义。

1 港口与航道工程监理安全风险的特征与识别

1.1 安全风险的主要特征

港口与航道工程施工场景将露天水上作业环境与多工种交织施工模式相结合，风险源头呈现出复杂的叠加态势[1]。疏浚作业需要大型挖泥船在航道内持续开挖，爆破工序涉及炸药运输存储及水下定向爆破操作，吊装环节要求重型起重船精准配合，潜水施工则要求作业人员在水下高压环境中完成构件安装或检测任务，各专业在狭窄水域或码头前沿同时展开，相互干扰频繁发生。风险因子随着潮汐涨落、船舶调度、天气突变而不断变化，动态性极为显著。人员操作失误往往直接触发坍塌、触电、溺水等伤亡事件，施工人员安全意识薄弱或违章指挥更会放大既有隐患，造成群死群伤的严重后果。

1.2 风险分类与识别方法

港口与航道工程安全风险可归入人员、设备、环境、管理四个类别，各类别相互渗透又各有侧重。人员类风险集中在无证上岗、疲劳作业、违规操作等行为层面，设备类风险源于机械老化、维保缺失或超负荷使用，环境类风险突出表现为台风骤至引发的风浪冲击、潮汐涨落带来的水位剧变，管理类风险则涉及安全制度缺失、应急预案流于形式等深层缺陷。针对深基坑支护、疏浚船舶水上联合作业、大型构件起吊等关键工序，采用作业条件危险性评价法能够系统量化事故发生可能性、暴露频率、后果严重程度三项参数，计算风险等级数值后筛选出高危作业节点，形成涵盖各施工阶段的风险事件清单，为后续管控措施制定提供依据。

2 监理机构在港口与航道工程监理安全风险管理中的职责定位

监理机构在工程开工前需对承包单位提交的安全管理体系文件进行全面审查，重点核实专项施工方案是否针对深基坑开挖、大型设备吊装等高危作业制定了详细技术措施，是否配备了满足资质要求的安全管理人员。施工过程中采用定期巡视与专项检查相结合的方式实施现场监督，记录违规行为并督促整改[2]。当发现重大安全隐患且拒不整改或发生较大事故时，监理机构有权向业主提交书面报告要求暂停施工，情节严重时可建议依据合同条款更换承包单位。否决权体现在物资进场与工程验收两个环节，不合格材料或老化设备须当场拒绝入场，未经旁站验收的隐蔽工程不得进入计量程序。重大隐患暴露时监理工程师有权要求限期整改，隐患未消除前不得恢复作业，同时须将隐患详情与处理意见以书面形式上报业主，确保管理层及时掌握现场动态，防止小隐患演变为大事故。

作者简介：董振华（1976-），男，本科，高级工程师，研究方向：水利、交通工程建设管理监理。

3 港口与航道工程监理全过程安全风险管理机制构建

3.1 事前预防机制

施工组织设计与专项方案的审查构成预防机制的首要环节，监理机构需要逐项核对承包单位提交的方案文本是否针对深基坑开挖深度、支护结构选型、降水措施配置等关键参数进行了详细计算，疏浚作业方案中挖泥船定位锚泊系统、溢流管道布设路径、泥浆输送能力是否满足设计要求都要逐一核实。安全生产许可证及特种作业人员资质的核查需要建立台账式管理模式，电焊工、起重机械操作员、潜水员、爆破员的证书编号、有效期限、技能等级要登记在册，发现证件过期或岗位不符要立即要求更换持证人员。

图纸会审环节需要总监理工程师组织设计单位、施工单位、业主共同参与，重点识别码头结构设计是否存在施工难度过大导致的安全隐患，航道疏浚断面设计是否考虑了边坡稳定性，发现问题要形成书面纪要要求设计单位修改。安全责任书的签订要将岗位安全目标细化到每个监理工程师，明确专业监理工程师对分管区域的巡查频次要求、隐患上报时限、旁站记录完整性等具体指标。通过事前审查与责任落实，将潜在风险拦截在施工启动之前，为后续全过程管控奠定基础[3]。

3.2 事中控制机制

重大危险源的全过程旁站监理要求监理人员在深基坑开挖时必须现场见证每层土方开挖深度是否符合方案要求，支护结构是否按设计间距布设，锚杆注浆是否饱满，任何偏差都要当场记录并要求整改。水下爆破作业旁站需要监理工程师核查警戒船是否到位，爆破半径内是否已清空无关船只，起爆信号是否清晰，装药量是否与审批方案一致。起重吊装环节的旁站要盯紧吊车支腿是否全部伸出并垫实，钢丝绳规格是否满足载荷要求，吊点位置是否准确，指挥人员是否持证上岗。如图 1 所示，事中控制机制形成旁站监理、定期巡查、隐患排查三个层次的闭环管理体系。定期

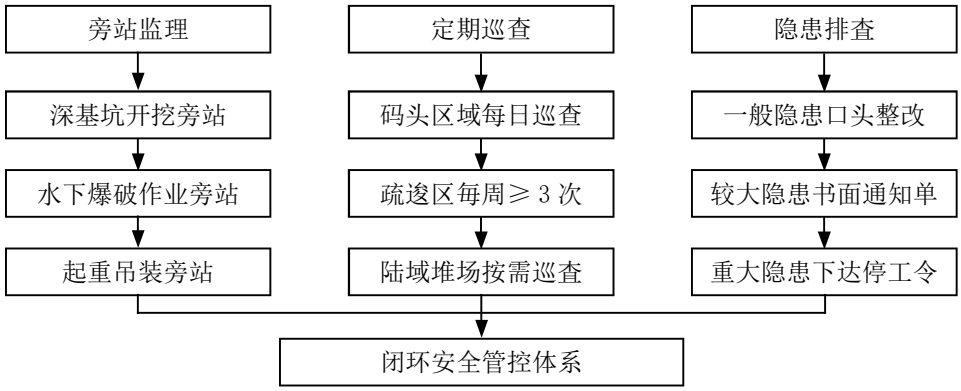


图 1 港口与航道工程监理事中控制机制框架

安全巡查采用分区分段模式展开，码头前沿区域每日至少巡查一次，航道疏浚作业区巡查频次不低于每周三次，陆域堆场及加工区根据作业强度确定巡查间隔。

隐患排查发现的问题要按照等级分类处理，一般隐患下发口头整改指令并在巡查记录中注明，较大隐患发出书面整改通知单要求限期完成并报监理部备案，重大隐患要立即下达停工指令同时报告业主及安全监管部门[4]。当基坑监测数据显示应力或位移出现异常时，监理人员须立即采取应急措施。台风、暴雨等恶劣天气预警发布后，监理机构要督促承包单位立即加固临时设施，疏浚船舶撤离作业区驶入避风锚地，码头面堆放的材料设备要捆扎固定或转移至安全区域，所有水上作业人员必须在预警生效前全部撤离返回陆地。上述管控措施的综合实施，有助于及时消除安全隐患，保障施工人员生命安全，降低事故风险。

3.3 事后处置机制

安全事故发生后，监理机构须迅速介入，第一时间设置警戒隔离，防止次生灾害扩大。监理人员配合业主、施工单位、安全监管部门组成联合调查组，调取监控录像、施工日志、设备检测报告等原始资料，走访目击者还原事故全过程。调查报告需明确事故性质与直接、间接原因，区分设备缺陷、人员失误、管理漏洞各自的责任比重。承包单位提交的事故处理方案须包含伤员救治、遇难者善后、停工整改、隐患消除验证等内容，监理机构重点审查补救措施是否针对事故根源制定，如吊装事故暴露出索具检查不到位，整改方案就须增设索具每日检查制度，明确检查项目、记录格式与不合格品处置流程[5]。

整改完成后监理人员组织现场验收，确认隐患彻底消除方可批准复工。工程竣工后监理机构编制安全

专项总结报告，梳理遇到的新问题、采取的新措施、取得的新成效，形成案例库供后续项目借鉴，特别是针对本地区特有的海况条件、地质特征总结出的经验教训，对同类工程具有直接参考价值。

4 港口与航道工程监理安全风险管理机制的关键支撑保障

4.1 组织与制度保障

安全管理委员会由总监理工程师担任主任，各专业监理工程师担任委员，形成覆盖土建、机电、水工、航道各专业领域的组织架构，定期召开安全专题会议，分析安全形势、通报隐患整改情况并部署下阶段重点工作。专职安全监理工程师不承担进度、质量等其他监理任务，全天候专注于现场巡查、方案审核与应急响应。安全监理实施细则须将巡视频次落实到具体工序，基坑开挖期间每日不少于两次，疏浚作业期间每周水上巡查不少于三次；旁站范围涵盖深基坑支护结构安装、大型构件吊装就位、水下混凝土浇筑及爆破作业全过程；各项安全设施验收指标须量化，临边防护栏杆高度不低于1.2 m，脚手架搭设间距与扣件紧固力矩等参数须符合规范要求。

4.2 技术与信息保障

建筑信息模型技术的引入能够在施工前对深基坑开挖、大型设备吊装等高风险工序进行三维仿真模拟，提前发现作业空间冲突等潜在隐患。无人机巡查系统配备高清摄像设备后能够快速覆盖大面积施工区域，监理人员在办公室内即可观察码头面施工进展、堆场材料摆放及疏浚船舶作业状态，发现异常立即研判处置。船舶自动识别系统与监理指挥中心联网后，各类作业船舶的实时位置、航速、航向数据在电子海图上同步显示，便于及时发现违规行为。智能监测设备可实现对基坑位移、应力等关键参数的全天候自动采集，数据超出预警阈值即向监理人员推送告警。如表1所示，各类技术手段在风险预警、现场监控、应急响应等环节发挥着不同作用。信息共享平台须打通监理、施工、业主、海事等多方系统接口，安全指令发出后同步推送至各责任人移动终端，确保传达不存在盲区。

表1 信息化技术手段在安全风险管理中的应用功能

技术手段	应用场景	功能作用	监控范围
建筑信息模型	施工前方案模拟	三维仿真发现作业冲突	深基坑、吊装工序
无人机巡查	大面积区域监控	快速获取现场实时画面	码头面、堆场、航道
船舶识别系统	水上作业监管	实时追踪船舶位置航向	疏浚船、交通船、起重船
视频监控	关键部位实时监控	记录作业过程违规行为	基坑边坡、吊装区域

4.3 考核与追责保障

绩效考核机制将安全监理工作成效量化为可评价指标，业主按月对监理机构考核打分，内容涵盖安全巡查到位率、隐患整改闭合及时率、旁站记录完整性等项目，得分低于阈值时扣减当期监理服务费，考核结果与监理工程师个人收入直接挂钩。责任追究制度明确事故发生后各级人员的责任界定规则，因未按规定频次巡查、发现隐患未及时下发通知单、整改验收流于形式等失职行为导致事故的，总监理工程师、专业监理工程师、监理员按各自职责范围承担相应责任，情节严重构成犯罪的移交司法机关处理。业主定期组织第三方机构开展专项检查，核查监理台账并赴现场抽验记录真实性，发现弄虚作假问题立即通报整改，以制度刚性倒逼监理人员切实履行安全监管职责。

5 结束语

港口与航道工程监理的安全风险管理是一项系统工程，需要监理机构充分发挥职责定位优势，建立覆盖施工全过程的风险管控体系。事前预防机制确保风险源头管控到位，事中控制机制实现关键环节动态监管，事后处置机制促进经验教训总结提炼。组织制度、技术信息、考核追责三方面保障措施的协同发力，能够为监理机构有效履行安全监管职责提供坚实支撑，推动港口航道工程安全管理水平持续提升。

参考文献：

[1] 徐明智.基于PDCA循环的港口航道工程质量缺陷闭环管理监理流程优化研究[J].珠江水运,2025(22):62-64.
[2] 徐玲.智能监测技术在港口航道工程监理安全管理中的应用[J].珠江水运,2025(10):118-120.
[3] 徐玲.港口航道工程施工监理难点与对策分析[J].珠江水运,2025(05):105-107.
[4] 戴璇.港口航道工程施工监理要点相关研究[J].汽车周刊,2025(03):258-260.
[5] 王全全.提升港口与航道工程质量监督工作成效探究[J].珠江水运,2024(20):98-100.

抽水蓄能电站输水隧洞施工质量控制技术研究

赵江涛，赵　能

（中国水利水电建设工程咨询西北有限公司，陕西 西安 710100）

摘　要　抽水蓄能电站输水隧洞具有埋深大、洞线长、地质条件复杂等特点，施工质量直接关系到电站长期运行安全。本文结合工程实践，系统分析输水隧洞开挖、初期支护、衬砌混凝土及灌浆等关键工序的质量控制要点，提出光面爆破参数优化、支护及时性管控、衬砌混凝土温控防裂及分时段固结灌浆等技术措施，并构建以“三检制”为核心的全过程质量管控体系，以期为类似抽水蓄能电站输水隧洞施工质量控制提供有益参考。

关键词　抽水蓄能电站；输水隧洞；施工质量控制；衬砌混凝土；固结灌浆

中图分类号：TV543+.3　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.033

0　引言

随着新型电力系统建设加速推进，风电、光伏等间歇性新能源大规模并网，抽水蓄能作为技术最成熟、经济性最优的大规模储能方式，近年来迎来快速发展期。输水隧洞是抽水蓄能电站的关键构筑物，承担上、下水库间双向水流输送功能，其施工质量直接影响电站安全稳定运行。由于输水隧洞通常具有埋深大、洞线长、穿越地层复杂等特点，施工过程中易出现围岩失稳、衬砌开裂、渗漏等质量问题[1]。因此，系统研究输水隧洞施工质量控制技术，对保障工程质量和电站长期安全运行具有重要的现实意义。

1　抽水蓄能电站输水隧洞施工特点与质量控制难点

1.1　工程特点

抽水蓄能电站输水隧洞一般由进/出水口、上平段、斜井或竖井、中平段、下平段等部分组成，洞线总长可达数千米。隧洞通常穿越多种岩性地层，围岩级别以Ⅲ、Ⅳ级为主，局部存在断层破碎带、岩溶发育区及地下水富集带[2]。与常规引水隧洞不同，抽水蓄能电站输水隧洞承受双向水流作用，发电工况和抽水工况下水流方向相反，高水头条件下衬砌需承受较大内水压力，对结构整体性、抗渗性和抗冲磨性能要求更为严格[3]。

1.2　质量控制难点

一是开挖轮廓控制难度大，钻爆法施工中超欠挖直接影响衬砌厚度均匀性和结构受力状态；二是初期支护时效性要求高，围岩变形若不能及时约束，可能引发塌方或大变形；三是衬砌混凝土裂缝控制困难，水化热温升与洞内温湿度变化共同作用易产生温度裂缝和干缩裂缝；四是高压灌浆参数控制复杂，灌浆压力、浆液配比与注入率需根据围岩条件动态调整；五是长距离隧洞施工通风、出渣和材料运输组织复杂，多工序交叉作业对质量管控协调性提出较高要求；六是输水隧洞通常布置有调压井、岔管等特殊结构段，断面变化频繁，模板适配和混凝土浇筑质量控制难度大。施工支洞的合理布置与结构设计直接影响主洞施工效率和作业安全[4]。

2　抽水蓄能电站输水隧洞开挖施工质量控制技术

2.1　光面爆破参数优化

输水隧洞开挖宜采用光面爆破技术，以减少对围岩的扰动并获得平整的开挖轮廓。周边眼间距宜控制在 40 cm～50 cm，抵抗线取 50 cm～60 cm，装药不耦合系数不小于 2.0。通过现场爆破试验优化炮眼布置、装药量和起爆顺序，确保开挖轮廓线超挖量不大于 10 cm、欠挖量不大于 5 cm。对于断层破碎带等不良地质段，应适当缩小周边眼间距、减少单孔装药量，必要时采用预裂爆破先行减震。同时应严格控制爆破振动速度，在邻近已衬砌段或建筑物部位爆破时，质点振动速度不得超过设计允许值，一般不大于 10 cm/s。

2.2　开挖断面检测与修整

每循环开挖完成后，采用全站仪或三维激光扫描仪对开挖断面进行检测，对比设计断面计算超欠挖值。欠挖部位必须在支护前处理完毕，超挖部位采用与衬砌同强度等级的混凝土回填，严禁用石渣或低强度材料填充。断面检测结果应及时反馈至爆破参数调整环

作者简介：赵江涛（1989-），男，本科，工程师，研究方向：抽水蓄能电站隧道施工。

节，形成“检测—分析—优化”的闭环控制。对于关键断面（渐变段、岔管段），应适当提高检测频率，确保开挖线形准确过渡。

2.3 不良地质段开挖控制

穿越断层破碎带时，遵循“短进尺、弱爆破、强支护、勤量测”原则。循环进尺控制在 0.5 m～1.0 m，必要时采用超前小导管或管棚预支护。超前小导管采用 Φ42 mm 热轧无缝钢管，长度 3.5 m～5.0 m，外插角 10°～15°，注浆材料采用水泥水玻璃双液浆。TBM 施工适用于地质条件相对均一的小断面长距离隧洞，需配合超前地质预报及时调整掘进参数[5]。施工中应坚持“先探后挖、不探不挖”，通过地质雷达、超前钻孔等手段查明前方围岩情况。

3 抽水蓄能电站输水隧洞初期支护施工质量控制技术

3.1 喷射混凝土质量控制

初期支护喷射混凝土应优先采用湿喷工艺，以降低回弹率和粉尘浓度。混凝土配合比通过试验确定，水泥用量不小于 400 kg/m^3，砂率控制在 45%～55%，速凝剂掺量根据现场试验确定，初凝时间不大于 5 min。喷射作业分段、分片、分层进行，一次喷射厚度边墙不超过 10 cm、拱部不超过 6 cm，后层喷射应在前层混凝土终凝后进行。喷射混凝土表面应平整，无空鼓、裂缝和脱落，平整度用 2 m 靠尺检查，允许偏差不大于 50 mm。喷射混凝土厚度采用钻孔法或地质雷达检测，每 10 延米至少检查一个断面，每个断面从拱顶中线起每间隔 2 m 布设一个检测点。

3.2 锚杆与钢拱架施工质量控制

系统锚杆采用全长黏结型砂浆锚杆或中空注浆锚杆，锚杆间距、排距及插入角度严格按设计执行。锚杆钻孔深度偏差不大于 ±50 mm，孔位偏差不大于 ±100 mm。注浆应饱满，注浆压力控制在 0.3 MPa～0.5 MPa，锚杆抗拔力检测抽样率不低于 5% 且每 300 根不少于一组。长斜井段锚杆施工需特别关注角度控制，确保锚固段进入稳定围岩。Ⅳ、Ⅴ级围岩段应设置钢拱架或格栅钢架，拱架间距按设计执行，一般为 0.6 m～1.2 m，拱架间用纵向钢筋连接，拱脚必须落在坚实基岩上，必要时设置钢垫板扩大受力面积。

3.3 支护及时性与变形监测

开挖后应尽快施作初期支护，围岩自稳时间短的地段要求在开挖后 2 h 内完成初喷。建立洞周收敛和拱顶下沉监测体系，监测频率在开挖后 1 天～15 天为 1 次 / 天，16 天～30 天为 1 次 /2 天，变形稳定后调整为 1 次 /3 天。当监测数据显示变形速率持续增大或累计变形接近允许值时，立即启动应急支护措施，如增设钢拱架、加密锚杆、补喷混凝土等。监测数据应及时整理分析，反馈指导支护参数调整和施工工序安排。

4 抽水蓄能电站输水隧洞衬砌混凝土施工质量控制技术

4.1 配合比优化与原材料控制

衬砌混凝土配合比设计应兼顾强度、抗渗性、抗裂性和施工和易性。水胶比宜控制在 0.42～0.50，砂率取 38%～44%，掺入粉煤灰或矿粉降低水化热，粉煤灰掺量可提高至 30% 以降低温度应力。抗渗要求较高的区段可掺入膨胀组分或聚丙烯纤维，纤维掺量约 0.9 kg/m^3 可显著减少早期塑性收缩裂缝。原材料进场严格执行检验制度，水泥、钢材、砂石骨料和外加剂均须抽样检测合格后方可使用，建立原材料质量追溯体系。骨料含泥量控制在 1% 以内，细度模数控制在 2.4～2.8 范围内。衬砌混凝土强度等级一般不低于 C25，抗渗等级不低于 W6，高水头段抗渗等级可提高至 W8 或 W10。

4.2 浇筑工艺控制

衬砌混凝土采用钢模台车浇筑，台车就位后校核中心线、高程和断面尺寸，模板表面清理干净并涂刷脱模剂。混凝土采用溜管或泵送入仓，分层厚度控制在 30 cm～50 cm，振捣棒插入下层混凝土 5 cm～10 cm，振捣时间 20 s/ 点～30 s/ 点，以混凝土表面不再显著下沉、不出现气泡、开始泛浆为准，避免漏振和过振。浇筑过程中设专人看护模板，发现变形或漏浆及时处理。施工缝设置应避开结构受力最大部位，缝面按规范进行凿毛处理，设置止水铜片或橡胶止水带，止水带安装应居中、固定牢固，浇筑时注意保护止水带不被移位或损坏。

4.3 温控防裂措施

衬砌混凝土裂缝是输水隧洞最常见的质量缺陷之一。温控措施包括：一是降低入仓温度，夏季施工采用冷水拌合、骨料喷淋降温，入仓温度控制在 28 ℃以下；二是埋设冷却水管，通水流量 15 L/min～20 L/min，控制混凝土内外温差不大于 20 ℃；三是加强养护，拆模后立即洒水或喷涂养护剂，养护时间不少于 14 天。通过埋设温度传感器实时监测混凝土内部温度，动态调整冷却水流速和通水时长。对于已出现的表面裂缝，应根据裂缝宽度采取表面封闭或注浆处理；贯穿性裂缝须经设计单位确认后制定专项处理方案。

5 抽水蓄能电站输水隧洞灌浆施工质量控制技术

5.1 固结灌浆质量控制

固结灌浆用于提高围岩整体性和防渗能力，灌浆孔按梅花形布置，孔排距根据围岩级别确定，Ⅲ类围岩宜采用 2 m 排距。灌浆压力按设计要求分级升压，浆液浓度由稀到浓逐级变换。长距离有压引水隧洞可采用分时段固结灌浆工艺，根据围岩透水率和注入率动态调整灌浆参数，避免串浆和冒浆[6]。灌浆结束标准为在设计压力下注入率不大于 1 L/min，延续灌注 30 min。固结灌浆质量检查以压水试验为主，检查孔数量不少于灌浆孔总数的 5%，透水率应满足设计要求。

5.2 高压固结灌浆参数优化

对于高水头抽水蓄能电站输水隧洞，高压固结灌浆是关键工序。通过现场灌浆试验验证 10 MPa 级超高压灌浆的可行性，优化灌浆压力、浆液配比和段长参数。试验表明，Ⅲ类围岩采用 2 m 排距水泥灌浆后原孔扫孔化学灌浆的复合工艺，平均单位注灰量高于 3 m 排距方案，且不增加串漏风险。灌浆施工中严格控制孔斜，孔底偏差不大于孔深的 1%。高压灌浆前应对衬砌混凝土强度和厚度进行检查确认，防止灌浆压力导致衬砌抬动或开裂。

5.3 回填灌浆与接缝灌浆

衬砌混凝土达到设计强度 70% 后进行回填灌浆，灌浆采用水泥浆，水灰比 0.8:1 ～ 1:1，分序施工（先周边后中间），灌浆压力 0.5 MPa ～ 1.0 MPa，确保回填密实度不低于 95%。回填灌浆质量检查采用钻孔注浆法或声波检测法，检查孔数量为灌浆孔总数的 3% ～ 5%。伸缩缝和施工缝的接缝灌浆在两侧混凝土温度稳定后进行，灌浆压力以不抬动衬砌为原则。灌浆完成后及时封孔，封孔采用水泥砂浆填塞密实，孔口抹平。

6 抽水蓄能电站输水隧洞施工质量控制体系与管理措施

6.1 全过程质量管控体系

建立以“三检制”（自检、互检、专检）为核心的施工质量管控体系，每道工序经班组自检、工序间互检、专职质检员专检合格后方可进入下道工序。关键工序和隐蔽工程实行监理旁站制度，未经监理签认不得覆盖或进行后续施工。制定质量奖罚细则，将质量指标与作业班组绩效挂钩。单元工程质量评定按《水利水电工程施工质量检验与评定规程》执行，优良率作为项目质量管理的重要考核指标。定期开展质量大检查和专项检查，对发现的质量问题建立台账，明确整改责任人、整改措施和整改期限，实行闭环管理。

6.2 信息化质量管理

引入施工质量管理信息系统，对原材料检测、工序验收、监测数据等进行数字化采集和实时上传，实现质量数据可追溯。利用 BIM 技术进行隧洞三维建模和施工模拟，提前预判施工难点和质量风险点。灌浆施工采用智能灌浆记录仪，自动记录灌浆压力、注入率和浆液量，杜绝人为篡改数据。监测数据接入预警平台，当变形或应力指标超过阈值时自动发出预警信息。

6.3 人员培训与技术交底

施工前对作业人员进行“理论 + 实操”双轨培训，重点强化光面爆破、喷射混凝土、衬砌浇筑和灌浆等关键工序的标准化操作。每项工序开工前进行书面技术交底，明确质量标准、控制要点和验收程序，确保施工人员准确掌握技术要求。特种作业人员必须持证上岗，爆破工、焊工、电工等关键岗位人员须经考核合格后方可作业。

7 结束语

本文针对抽水蓄能电站输水隧洞施工质量控制问题，从开挖、初期支护、衬砌混凝土和灌浆四个关键工序入手，系统提出了光面爆破参数优化、支护及时性管控、衬砌温控防裂及高压固结灌浆参数优化等技术措施，并构建了以“三检制”为核心、信息化管理为支撑的全过程质量管控体系。工程实践表明，上述技术措施可有效控制超欠挖、衬砌裂缝和渗漏等常见质量缺陷，保障输水隧洞结构安全和防渗性能。未来可进一步研究智能化施工技术在输水隧洞质量控制中的应用，提升质量管控的精细化和自动化水平。

参考文献：

[1] 黄勇,宋春华,路威,等.阳江抽水蓄能电站高压固结灌浆现场试验设计及参数优化 [J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(02):8-12,50.
[2] 侯炼.抽水蓄能电站引水长斜井扩挖及支护施工技术[J]. 水利水电科技进展,2024,44(z1):159-163.
[3] 陈捷平,张彪,林紫婕,等.钟祥抽水蓄能电站输水系统设计 [J]. 水利水电快报,2025,46(03):65-70.
[4] 刘畅,臧玉燚.垣曲抽水蓄能电站输水上平段施工支洞结构设计 [J]. 水电与抽水蓄能,2025,11(04):116-120.
[5] 胥杰,施椿燕,杜文杰,等.抽水蓄能电站小断面隧洞 TBM 施工技术 [J]. 甘肃水利水电技术,2024,60(03):60-64.
[6] 陈海.长距离有压引水隧洞分时段固结灌浆施工技术探讨 [J]. 水利技术监督,2026(02):268-270.

AI视频监控技术在智慧工地安全管控中的应用

王占泰，王晓兴

（中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710106）

摘 要 随着建设工程规模持续扩大与施工环境日趋复杂，传统以人工巡查为主的安全管理模式已难以满足实时性与精准化的管控要求。AI视频监控技术通过融合深度学习视觉算法、边缘计算与云边协同架构，为智慧工地安全管控提供了全新的自动化解决路径。本文分析了传统安全管理模式的深层局限与变革需求，指出了前端智能感知、目标检测与行为识别、多源数据融合等关键技术在小样本识别、复杂光照适应性等方面的局限，并深入探讨AI视频监控在典型场景中的应用实践。结果表明，AI视频监控技术能够变被动追溯为主动预防，显著降低事故发生率，提升管理效率。

关键词 AI视频监控；智慧工地；安全管控；深度学习；行为识别

中图分类号：TU714；TP18 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.034

0 引言

随着信息化与智慧城市建设的不断推进，智慧工地在城市基础设施体系中扮演着越来越重要的角色[1]。传统安全管理依赖安全员现场巡查和事后视频回放，不仅人力成本高昂，更存在监控盲区大、响应滞后等问题，难以从源头上阻断违规行为。近年来，人工智能与物联网技术迅猛发展，AI视频监控技术开始深入工地现场，通过对视频流的实时智能分析，能够自动识别未戴安全帽、危险区域闯入、烟雾火焰等风险事件并秒级报警，将安全关口大幅前移。这一转变正在重塑工地安全管控范式，使“智慧工地”从概念走向实用。本文围绕AI视频监控技术在施工安全管控中的核心架构、典型应用及效能优化展开论述，以期为行业智能化升级提供系统参考。

1 智慧工地安全管控的内在需求与技术驱动

1.1 传统安全管理模式的深层局限

长期以来，施工现场安全监督主要依靠人力巡检和固定摄像头录像回放。安全员需要在多个作业面间往返，依靠肉眼判断工人是否合规穿戴防护用品、是否误入危险区以及机械设备是否存在异常。这种模式受制于人的精力与注意力阈值，难以实现全天候、全覆盖的连续监控，监督难度大[2]。更关键的是，传统视频监控系统虽能实现影像记录功能，但事后追溯录像的方式只能在伤害发生后寻找原因，无法实时干预[3]，阻止事故的瞬间发生。许多违章行为持续时间仅数秒，视频虽记录了过程，却未能及时阻断。同时，存储的海量录像数据长期没有被盘活，极少得到挖掘利用，安全管理仍以经验判断、事后惩戒为主，不具备依托实时数据开展预测、主动干预的能力，再加上建筑工地扬尘、振动、光照变化剧烈等恶劣条件的影响，人工监控和常规视频分析的可靠性会进一步降低，隐蔽风险也在不断累积。

1.2 AI视频监控技术带来的主动防控变革

AI视频监控技术作为智慧工地的核心安防子系统，由传统的“事后取证”逐渐向“实时预警—智能分析—主动防控”的方向发展，对提升建筑运行管理效率、保障人员与财产安全具有不可替代的作用。通过在工地关键点位部署智能摄像机，并嵌入边缘算力，系统能够对视频画面进行逐帧实时分析，不再依赖人眼盯屏。当检测到人员未佩戴安全帽、未穿反光背心、擅自进入吊臂回转范围或出现明火浓烟时，可在毫秒级时间内触发联动报警，驱动现场声光警示、自动抓拍留存证据并同步推送至管理平台。这种从被动回溯到主动预警的跃迁，让安全管理具备了实时阻断风险的能力。同时，全时段不间断运行特性弥补了人力监管的时间盲区，使得夜间施工、节假日等薄弱时段同样获得严密守护。

2 支撑工地智能视频分析的核心技术架构

2.1 前端感知与边缘实时计算

工地环境网络条件波动大、粉尘干扰重，若将全部视频流回传至云端处理，极易出现延时、卡顿甚至

作者简介：王占泰（1985-），男，本科，工程师，研究方向：智慧工地建设、数据安全。

断连，难以满足安全报警对实时性的严格要求。为此，当前主流方案采用“前端感知 + 边缘计算”架构。智能摄像机内置高性能 AI 芯片，在视频采集的同时即完成目标检测、特征提取和初步逻辑判定，仅将结构化报警信息、抓拍截图和关键片段上传后台。这种方式极大地降低了传输带宽压力，保证在 4G/5G 信号较弱时依然能够本地独立执行识别任务[4]。边缘端算法针对工地场景进行了量化压缩与算子优化，使得一帧高清图像的处理时间可控制在数十毫秒以内，真正实现“看到即分析，分析即报警”。此外，前端设备支持强光抑制、宽动态和透雾功能，在逆光、夜间和扬尘条件下仍能提供清晰的图像基础，为后续深度模型提供高质量输入。

2.2 深度学习驱动的目标检测与行为分析

深度卷积神经网络是智慧工地视频分析各项核心功能的实现基础，在目标检测方向内，YOLO 系列这类单阶段检测算法，可实现检测速度和精度的合理平衡，应用场景广泛。YOLO 把目标分类、位置回归两个模块整合到同一网络结构内，单次推理就能输出安全帽、反光衣、施工机械、人员等多类目标的检测结果，还能同步给出对应目标的精准边界框。搭配特征金字塔结构与多尺度训练方法开展训练后，模型检测远距离小目标、密集人群中的单独个体时，依然能保持比较高的检出率。一般采用三维卷积网络，或是融合光流信息的双流网络，提取连续帧之间的运动规律与人体骨架的变化特征。例如：识别出手部到嘴部的重复运动轨迹，再匹配香烟这类小目标的尺度特征，就能准确判定现场存在吸烟行为；捕捉到人体关键点位移加速度、体态倾角的突变数据，就能实时识别人员跌倒情况，同步启动应急救援流程。这类算法用工地海量真实场景的数据集完成迭代训练，逐步减少误报、漏报情况，优化复杂光照、存在遮挡场景下的精准性。

2.3 云边协同与多源数据融合平台

单点智能需要汇聚成系统智能才能发挥最大价值。采用云边协同架构时，边缘端负责输出毫秒级报警信号，同时完成本地数据缓存，云端会收拢多路视频的结构化处理结果，开展跨点位关联分析与深度挖掘。云端平台可对接人员实名制信息、塔吊监测传感器、环境监测仪等多维数据源，能够完成视频事件和业务数据的融合校验。在实际应用场景中，AI 视频识别到工人未佩戴安全帽后，平台可联动门禁系统调取该工人的身份信息，自动记录违章次数并纳入班组安全考评。整合塔吊回转角度、吊钩高度的实时监测数据，平台可在对应监控视频画面内，动态生成三维危险作业区域，预警精准度会有比较大的提升。多源数据融合还支撑了轨迹追踪、热力图分析两类功能的落地，统计人员、车辆频繁出现违规的区域和时间段，可辅助优化施工部署，调整安全交底的重点内容。这套端边云一体化的架构设计，既能保障前端的响应速度，又能充分释放云端数据聚合与智能决策的潜力，最终构建起立体化、可进化的工地安全大脑。

3 AI 视频监控技术在典型安全场景中的应用实践

3.1 人员防护装备与违规行为智能监测

正确佩戴安全帽和穿着反光背心是预防施工现场头部伤害和提升夜间可视性的基础措施。AI 视频监控技术通过在工地主入口、作业层和通道等位置设立虚拟电子岗哨，对进入画面的每一名人员进行实时扫描。一旦发现未佩戴安全帽或未穿反光衣的个体，系统立即在本地完成告警语音喊话，如“请戴好安全帽”，并将抓拍图像和违规时间标注后上传平台，形成不可篡改的电子证据。系统支持对多种安全帽颜色同时识别，可区分管理人员、不同工种和访客，并进一步监测是否规范佩戴下颌带。除防护装备外，作业人员抽烟、接打手机等分散注意力行为同样是重点监控对象。火焰未起的烟头与微小手机在视频中像素占比极低，通过针对性的小目标增强模块和多尺度特征融合，算法能够在几十米外的塔吊视角下依然保持较高辨识度，及时提醒制止，有效消除火灾和操作失误隐患[5]。

3.2 危险区域入侵与电子围栏预警

工地临边洞口、塔吊回转半径、高压线附近以及基坑支护区域是高处坠落、机械碰撞和触电事故的高发地带。传统物理围栏与警示标牌常因被忽略或人为挪动而形同虚设，AI 视频电子围栏则以无形之界，实现了难以跨越的精准防护。在摄像机监控画面内，管理人员可灵活绘制任意形状的虚拟警戒区域，并设定不同时段、不同对象的访问规则。当有人闯入塔吊吊臂下方禁止进入区域时，系统不仅触发报警，还能联动塔吊操作室内的显示屏和蜂鸣器，提醒司机减速或停止回转，同时引导闯入者迅速离开。对于深基坑边缘，系统结合人体越线检测和徘徊判别算法，对靠近边缘超时停留行为提前预警，避免因观察不慎导致的坠落。车辆进出基坑、材料堆场等关键区域同样适用，算法可区分人、车辆和工程机械，避免动物或无关物体触发误报，显著提升预警可信度。

3.3 施工机械与车辆运行安全监管

塔吊、施工电梯、挖掘机和渣土车等重型机械是工地安全管控的重中之重。AI 视频监控技术通过高空

球机和固定枪机组合，实现了对塔吊吊钩的可视化追踪和吊物下方人员检测。利用变焦镜头自动跟随吊钩移动，系统可清晰查看吊物捆绑状态，并结合下方区域人员存在检测，一旦发现吊物下方有人，便立即向塔吊司机发出紧急停止指令，防止物体打击。针对工程车辆，视频分析可识别盲区内的施工人员，在车身侧方和后部部署智能摄像机，当工人或骑行人进入危险盲区时，车载声光报警器随即启动，同时限制车辆起步或急转。此外，系统对场内车辆超速、违规载人、不按规定路线行驶等行为进行自动车牌识别和轨迹跟踪，生成驾驶安全评分，促使车队管理从粗放式向精细化转变，有效压降车辆伤害事故[6]。

3.4 烟火及环境异常状态智能识别

工地易燃材料堆积，动火作业频繁，火灾风险始终存在。AI视频监控技术的烟火检测算法可识别火苗、浓烟以及异常高温引发的烟雾形态，与传统烟温感探测器形成互补。视觉算法通过分析烟雾纹理的扩散特征和火焰颜色闪烁频率，能够在大空间室外场景下实现早期发现，甚至在烟感尚未触发前就发出预警，争取黄金处置时间。除火灾外，施工现场的扬尘、裸土未覆盖和夜间违规施工等问题同样是监管难点。利用视频分析可自动判别裸露土表区域是否使用防尘网严密覆盖，并实时估算扬尘可见度，当扬尘超出阈值时联动喷淋系统降尘。夜间，算法识别出灯火通明且存在人员、机械活动的情况，即可判定为非许可时段施工，随即记录上报，为绿色施工和文明管理提供客观依据。

4 应用成效评估与技术演进方向

4.1 安全管理效能与事故预防成果

AI视频监控系统在实际智慧工地项目中展现出显著的安全管理效益。首先，违章行为发现模式由抽查式转变为全量式，监控覆盖面扩充至全天候、全区域，安全帽佩戴率等关键指标由人工检查时的不足85%快速提升至95%以上，反光衣穿着率和临边防护遵守情况也同步大幅改善。其次，报警响应时间压缩至秒级，现场安全员可在第一时间通过手持终端接收信息并介入干预，使许多险情消灭在萌芽阶段，可记录事故率和伤害严重程度均呈现明显下降趋势。管理层面，长期积累的违章数据结构化为安全决策提供了支撑，管理层可依据区域违章热力图优化安全交底和人力配置，安全培训也从说教式转变为基于本工地真实案例的情景化教育。此外，工程保险和业主考察中对智慧工地安全系统的认可度越来越高，良好的安全记录间接降低了投保成本和经营风险。

4.2 现阶段技术局限与未来发展趋势

AI视频监控技术虽然应用效果显著，但在实际应用场景中仍面临一些局限。复杂光照和恶劣天气条件下，雨水、尘土在镜头附着以及逆光、夜间红外成像导致图像质量劣化，目标检测准确率会有所下降。施工场景变化极快，模板脚手架搭拆、材料堆放位移频繁，使固定背景模型和行为规则库需要频繁更新，自适应性有待增强。小样本异常行为，如工人突发痉挛、打架斗殴等，由于数据稀缺，难以训练出高可靠模型。此外，多摄像头下的行人重识别与跨镜轨迹连续追踪在服装高度相似的工人群体中仍具有挑战。随着技术的不断发展，通过多模态融合、自监督学习与数字孪生的深度协同，AI视频监控技术将完善为自感知、自决策、自优化的全息智慧安全体系，彻底实现从被动报警到主动预防的跨越。

5 结束语

AI视频监控技术逐渐深刻改变智慧工地的安全管控方式。通过深度学习视觉分析、边缘智能感知与云边协同平台，传统依赖人力的被动安防被彻底升级为实时、主动、全覆盖的智能防御。在人员护具检测、危险区域预警、机械盲区监控和烟火识别等场景中，该技术显著提升了违章查纠效率，缩短了应急响应时间，有效遏制了事故苗头。当前，系统对复杂环境和稀有行为的辨识能力仍需进一步打磨，但随着多模态感知融合与自进化算法的成熟，AI视频监控技术将具备更强的环境适应性和风险预测力。未来，深度融合数字孪生与机器人巡检的智慧安全生态，必将使工地管理更加透明、精准与人性化，推动建筑业安全生产迈入事前预控的新阶段。

参考文献：

[1] 范宏凯.智慧工地视频监控系统的设置与质量控制[J].建筑机械化,2026,47(05):48-52.
[2] 朱亭瑞.建筑施工现场安全管理中智慧工地的应用[J].世界家苑,2026(11):46-48.
[3] 王瑾.智慧工地系统在建筑工程施工安全管理中的应用[J].城市建设,2026(08):79-81.
[4] 宋星晨,孙禹.5G技术驱动下智慧工地应用模式研究[J].电信快报,2026(02):26-29.
[5] 李晶.5G+AI赋能智慧工地项目管理[J].中国建设信息化,2025(21):70-73.
[6] 徐凡莉.智慧工地数智化安全建设与应用探究[J].中国安防,2025(06):75-78.

高速公路桥梁工程桩基施工技术及质量控制研究

邱龙波

（四川蜀通港口航道工程建设有限公司，四川 南充 637000）

摘 要 高速公路桥梁建设具备跨度偏大、承载要求高的特点，施工现场的地质环境存在明显差异，持续影响桥梁基础结构。系统化桩基施工工艺适配各类地层固有理化属性，规避地基沉降失衡、结构受力异常等常见工程问题，稳固全桥受力体系，为高速公路常态化安全运行提供基础保证。基于此，本文分析了高速公路桥梁工程桩基施工技术，覆盖施工各环节，并提出质量控制策略，旨在为促进桥梁基础施工实现标准化发展提供参考。

关键词 高速公路桥梁工程；桩基；护筒埋设；成孔施工；钢筋笼安装

中图分类号：U445.551 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.035

0 引言

《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）明确要求，桥梁基础施工应满足安全可靠、长期耐久的技术标准为桩基项目划定精细化技术管控门槛。在我国高速公路建设不断发展的背景下，地质条件复杂多样，软土、淤泥及高地下水位区域广泛分布，现场施工环境潜藏多项可变干扰因素，需要精确控制成孔质量，实时反馈施工监测数据。因此，施工单位要严格按照施工规范，科学组织桩基施工工序，落实全过程质量监控管理，保证桩基施工安全。

1 高速公路桥梁工程桩基施工技术

1.1 施工准备

进入施工阶段前，施工单位应结合设计文件，做好系统性技术准备，让施工组织与现场条件形成有效衔接，为桩基施工创造稳定环境。其中，技术管理人员需全面核对桩位布置、桩径参数等关键数据，重点分析桥位区地层结构，结合勘察报告确定存在粉质黏土层区域的成孔工艺，避免施工过程出现设备选型不合理或施工参数不匹配等问题。而且，施工现场还要利用导线控制网建立测量基准点，采用全站仪复核桥梁中心线，待桩位坐标确定后，应设置明显标识并采取保护措施，防止施工车辆运行或场地整平过程出现控制点偏移现象[1]。与此同时，施工单位要完成施工区域的清表作业，清除杂草、杂物以及松散土层，保证机械设备具备稳定作业条件，并采用换填压实或铺设钢板等方式，提高软弱地基区域的地面承载能力，避免旋挖钻机、履带吊等大型设备产生倾斜。设备进场前，施工单位要检测旋挖钻机、冲击钻机的性能，重点检查动力系统，并核验导管连接部位的密封性，保持各类机械设备处于良好工作状态。钢筋原材进场后，施工单位要查明质量证明文件，按照规定开展力学性能检测，依据配合比要求分类储存水泥、粉煤灰等原材料，防止受潮变质，并提前储备泥浆制备材料，保证护壁泥浆具备稳定的比重。

1.2 护筒埋设

护筒埋设是高速公路桥梁桩基施工的重要工序，能够固定桩位、隔离地表水，防止孔口坍塌，施工单位需要结合工程地质条件确定护筒规格，保证桩基施工处于稳定状态。施工单位应该采用钢护筒形式制作护筒，保持护筒内径大于设计桩径，控制差值在 200 mm～400 mm 范围内，以满足钻头运行需求，其中控制护筒钢板厚度在 8 mm～20 mm 范围内，以保证其具有足够刚度[2]。护筒进场后，施工单位需检查外观质量以及焊缝质量，避免因局部变形影响定位精度，并加强跨河桥梁或地下水丰富区域护筒防渗性能检查，以稳定施工期间孔内水位。护筒定位阶段，施工单位需要依据测量控制网复测桩位，利用全站仪精确放样，让护筒中心重合设计桩位中心，同时监测垂直度，维持垂直偏差在 1% 以内，待埋设完成后，宜控制护筒中心偏差在 50 mm 以内，以满足《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020）相关要求。同时，施工单位要按照土层

作者简介：邱龙波（1987-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁工程。

性质确定埋设深度，让普通土层区域护筒埋深在2 m～4 m范围内，若施工区域存在流砂层或地下水位较高情况，应适当增加埋设深度。

1.3 成孔施工

成孔过程中，施工单位要按地层条件合理选择施工工艺，保证孔壁稳定，为后续安装钢筋笼及灌注混凝土创造良好条件。施工开始前，施工单位应调试设备，稳固钻机底座，控制水平偏差在允许范围内，防止钻进过程出现孔位偏移。高速公路桥梁工程常见的钻孔灌注桩施工中，旋挖钻机与冲击钻机应用较为广泛，其中旋挖钻机适合黏土层、粉质黏土层以及部分砂层施工，冲击钻机用于卵石层、漂石层以及强风化岩层施工，因此施工单位应该结合地层变化及时调整钻进参数，不断提高成孔效率[3]。钻头进入表层土体时，施工单位需要保持低速钻进状态，减少孔口扰动，进入稳定地层后，可适当提高钻进效率，同时监测钻杆垂直度，保持桩孔倾斜率在1%以内，若遇桩长超过30 m的大直径桩基，应增加检测频率，及时修正钻进方向，避免孔斜影响桩基受力性能。与此同时，施工期间要采用膨润土泥浆或优质泥浆材料进行循环护壁，控制泥浆相对密度在1.05～1.20之间，保持黏度在17 s～22 s，维持含砂率在4%以内，并实时检测泥浆指标，如果泥浆性能下降，及时调整配比参数，以防发生塌孔现象。

1.4 清孔与验孔

由于钻孔达到设计深度后，孔内往往存在钻渣沉积，如果未能及时清除，将影响桩端与持力层之间的有效接触，降低桩基承载能力，同时增加桩身夹泥风险，施工单位必须完成高质量清孔作业，并采用规范验孔保证孔内各项指标满足施工要求[4]。钻孔结束后，施工单位应持续置换泥浆，逐步排出孔内含有大量钻渣的泥浆，用新鲜泥浆维持孔壁稳定状态，并重点控制泥浆性能参数，保持泥浆相对密度在1.03～1.10之间，维持黏度在17 s～20 s，把含砂率宜控制在2%以下。若参数过高容易影响混凝土与孔壁之间的结合效果，参数过低可能削弱护壁能力，进而增加孔壁失稳风险，因此现场技术人员需基于泥浆检测结果，及时调整膨润土掺量，保持泥浆良好的工作性能。鉴于钻孔过程产生的岩屑、砂粒以及土体颗粒容易沉积于孔底，形成松散沉渣层，需利用循环冲洗作用持续带走孔底杂质，提高孔底洁净程度。同时，施工单位要采用测绳配合测锤检测孔深，保证实际孔深达到设计要求，采用检孔器复核，其中检孔器外径宜接近设计桩径，如此能顺利下放至孔底，不存在明显缩径现象。而且，施工单位可借助测斜仪检测垂直度，控制高速公路桥梁工程桩基施工的孔斜率在1%以内，以保证桥梁基础受力均匀。

1.5 钢筋笼安装

作为桩基内部主要受力构件，钢筋笼需要与混凝土共同形成稳定的承载体系，因此施工单位必须严格控制制作精度，保证钢筋笼在桩孔内保持设计位置，为后续混凝土灌注创造良好条件[5]。钢筋笼制作完成后，施工单位应全面检查其外观尺寸、主筋间距等，让钢筋笼直径较设计桩径小100 mm～200 mm，如此下放过程可具有足够操作空间，若安装长度较大的桥梁桩基钢筋笼，应采用分节制作方式完成加工，并在现场连接，保证接头强度满足设计要求，防止下放过程出现变形或局部失稳现象。钢筋笼吊装前，施工单位应该再次复核孔深、孔径以及垂直度等指标，要求成孔质量满足安装条件，采用履带起重机或汽车起重机配合专用吊具实施吊装作业，保持钢筋笼整体受力均匀，以免局部受力过大造成钢筋变形。安装长度超过20 m的大型钢筋笼时，可采用两点起吊或多点起吊方式，以此提高吊装稳定性，待钢筋笼进入孔口后缓慢下放，以防与孔壁发生碰撞，导致孔壁坍塌或损害钢筋笼保护层。下放过程中，施工单位要持续监测钢筋笼中心位置与桩孔中心位置的对应关系，让钢筋笼处于设计轴线范围内，待安装完钢筋笼后，控制中心偏差在10 mm以内。定位钢筋笼后，施工单位需要采用定位筋或吊筋系统来稳固处理，防止混凝土灌注过程出现上浮或偏移现象，并严格按照设计要求控制钢筋笼顶面标高，保持高程偏差在±50 mm范围内。

1.6 混凝土灌注

灌注施工开始前，施工单位要最终检查孔内情况，确定沉渣厚度、泥浆指标以及钢筋笼位置符合施工标准，保持导管连接严密，控制导管内径在250 mm～350 mm范围内，保持导管下口距离孔底300 mm～500 mm，以保证首批混凝土顺利排出孔底泥浆并形成稳定封底层。而且，混凝土配合比设计应兼顾流动性能及抗离析性能，把坍落度控制在180 mm～220 mm范围内，保证混凝土能依靠自重在导管内顺利流动并均匀扩散，并可合理掺加粉煤灰，保持混凝土良好工作状态。灌注过程中，施工单位需维持导管埋深在2.0 m～6.0 m范围内，保证混凝土连续上升，同时避免埋置过深增加提升阻力，伴随孔内混凝土液面不断升高，应及时测量混凝土面标高，并按照实际情况调整导管位置。通常情况下，灌注不可中途停工，否则会影响品质。混凝土灌注阶段为强化效果，要注意孔内水位升降，并在实践中测量孔内混凝土高度。需注意的是：导管

提升时保持垂直，且导管始终居中，在灌注时缓慢将导管提升。现实中，如果导管内混凝土缺失，中间掺杂空气时，混凝土需缓慢灌入，同时严防导管漏水，进而保障混凝土成型质量。混凝土面接近设计桩顶标高时，施工单位应适当增加超灌高度，控制超灌高度在 0.5 m～1.0 m 范围内，以清除顶部浮浆层，让桩顶混凝土强度满足设计要求。

2 高速公路桥梁工程桩基施工质量控制策略

2.1 施工前准备阶段

施工单位应从设计文件审查、施工组织策划等方面系统实施质量控制，要求每项施工条件达到规范要求，其中设计文件审查是控制质量的第一步，需要技术管理人员详细核对桩位布置、桩径桩长等，结合现场地质勘察资料分析土层分布，继而优化施工方案。布设控制点过程，施工单位应采取保护措施，防止施工车辆或土方作业致使基准点移动，保证放样数据长期稳定可靠，为成孔提供精确依据。与此同时，施工单位要检测旋挖钻机、冲击钻机及钢筋加工设备的性能，检查液压系统的运行状态，核查起重设备的额定载荷，以保证设备能承受钢筋笼吊装及导管灌注等作业负荷，减少因设备故障造成的施工偏差。另外，施工单位要检测钢筋、混凝土原材料的力学性能，分析其成分，以适应现场施工。

2.2 施工过程控制阶段

桩基施工涉及测量定位、护筒埋设等多个工序，各环节相互关联，任何一道工序出现偏差都有可能影响成桩质量，因此施工单位需建立全过程质量控制体系，加强关键工序监测，让施工参数始终处于受控状态。钻机就位阶段，施工单位应重点检查设备水平状态，防止因设备倾斜造成孔位偏移，定时利用全站仪检测，控制孔斜率在规范允许范围以内（见表 1）。钻进过程中，施工单位需要结合土层变化情况合理调整钻压、转速以及进尺速度，避免因参数不合理导致塌孔或扩孔现象。而且，施工单位要保持泥浆护壁系统连续运行状态，并定时检测泥浆性能，按照检测结果及时调整泥浆配比，以此提高孔壁保护效果。清孔结束后，施工单位需要检测孔深、孔径以及沉渣厚度，待验孔合格后应立即组织后续施工，防止孔内长时间静置再次沉积沉渣。钢筋笼安装阶段，施工单位需重点控制结构尺寸，提前检查焊接质量，吊装期间保持受力均衡，下放后复核中心位置。灌注混凝土前，施工单位应该再次确认导管密封性能，维持灌注过程连续供料状态，并实时记录混凝土方量，以免出现断桩、夹泥以及离析等质量问题。

表 1 成孔质量标准

检测项目	允许偏差	检测方法
孔位中心	≤ 50 mm	测量检查
孔径	不小于设计桩径	检孔器（孔规）检测
倾斜度	≤ 1%	测斜仪或检孔器检测
孔深	不小于设计孔深	测绳量测
沉渣厚度	摩擦桩≤ 300 mm，嵌岩桩≤ 50 mm	测锤量测

2.3 施工后检测阶段

混凝土达到规定龄期后，施工单位应利用低应变反射波检测技术检查桩体，分析应力波传播规律，判断桩身内部是否存在缩颈、夹泥等缺陷，并采取声波透射法专项检测桥梁重要部位的大直径桩基，明晰波形变化情况，评估桩身混凝土均匀性，提高内部缺陷识别精度。检测阶段，施工单位需结合工程等级选择适宜检测方法，其中静载试验能反映桩基竖向承载能力，其检测荷载达到设计承载力的 1.5 倍至 2.0 倍，并配合高应变动力检测技术验证规模较大区域承载力。除此之外，检测人员应使用全站仪复测桩位坐标，核查实际位置与设计位置之间的偏差情况，待桩顶凿除完成后，检查混凝土表面密实程度，防止存在松散层或劣质混凝土区域。

3 结束语

复杂地质条件下，高速公路桥梁工程桩基施工科学合理，严格控制全过程质量管理，可以有效控制桩身完整性，为桥梁上部结构提供坚实支撑。高速公路桥梁桩基作为工程核心隐蔽工程，其施工质量直接决定桥梁整体稳定性，极易受地质、水文等多重因素干扰。因此，精细化的施工与管控模式是规避桩基病害、减少工程隐患的关键。未来，施工单位需要应用实时监测系统，推动桩基施工精细化，同时强化施工标准执行力度，提高现场技术管理水平，为高速公路桥梁长期安全运营提供坚实保障。

参考文献：

[1] 陈亮.基于高速公路桥梁工程的桩基施工技术研究[J].运输经理世界,2025(19):77-79.
[2] 唐万里.试析高速公路桥梁工程的桩基施工技术[J].低碳世界,2025,15(04):151-153.
[3] 农定稳,沈杰.公路桥梁工程的钻孔灌注桩高质量施工技术研究[J].企业科技与发展,2024(10):69-72,90.
[4] 李清平.高速公路桥梁工程桩基施工技术及质量控制研究[J].工程建设与设计,2023(09):202-204.
[5] 孙延青,凡长亮.公路桥梁桩基施工质量问题与控制分析[J].工程技术研究,2022,07(11):166-168.

新能源场站电气事故预防机制优化研究

田 涛

（国能内蒙古电力蒙西新能源有限公司，内蒙古 呼和浩特 010050）

摘 要 在全球能源转型进程中，新能源场站在电力系统中的重要性日益凸显，保障新能源场站稳定运行，是提升电力供应可靠性的关键支撑。当前新能源场站运行中频繁出现电气事故，降低了整体运行效率，同时不利于保障电力系统稳定运行。本文结合新能源场站特点，分析了新能源场站电气事故预防机制，提出针对性的优化建议，通过利用先进的监测技术、完善故障诊断系统以及安全管理制度，对降低电气事故发生率有所裨益，进而保障新能源场站运行的稳定性，避免出现安全事故。

关键词 电力系统；新能源场站；电气事故；预防机制

中图分类号：TM615 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.036

0 引言

现阶段的电力系统中，新能源场站的支撑作用日益凸显。对风能、太阳能等可再生能源的规模化开发利用，一方面能够减轻传统能源的供应与消耗压力，另一方面可显著降低温室气体排放，推动经济社会向可持续发展方向迈进。近年来，我国依托技术创新，新能源发电规模实现跨越式增长，这也对场站的运行稳定性与安全性提出了更高要求。然而，新能源发电受资源禀赋影响，存在间歇性、波动性等固有特性，实际运维中仍存在诸多不确定性挑战，给电力系统稳定运行带来潜在风险。因此，针对新能源场站电气事故预防机制开展优化研究，具有重要的现实意义。

1 新能源场站电气事故特点和影响

1.1 新能源场站电气事故类型

1. 短路与接地故障：新能源场站电气系统涉及设备多、链路长，事故类型多样且成因复杂。短路是新能源场站最常见的电气事故之一，诱发这类事故的原因涵盖多个方面，既有绝缘老化、设备制造质量不达标等内部问题，也有外部环境干扰等外部因素影响。出现短路事故之后，将会快速提高电流，损坏电气设备，甚至会引发火灾[1]。另一种典型事故为接地故障，这一故障会导致电缆的绝缘层破损，并显著提高电阻值，不利于正常供应电力资源。

2. 绝缘击穿与闪络事故：这类故障的核心诱发机制，是设备长期处于高电压载荷作用下，叠加绝缘材料自身老化变质，再辅以表面积污、环境受潮等多重外部因素共同作用，最终引发绝缘性能骤降导致事故发生。出现这类问题之后，如果没有及时处理，将会引发线路跳闸和设备停运，诱发短路事故，扩大事故的负面影响。

3. 过电压事故：这类事故通常由电网运行波动或现场操作不规范引发，异常抬升的电压一旦超过设备的设计耐受阈值，就会损伤内部绝缘层，严重时还会直接造成设备本体损坏。

1.2 新能源站场电气事故原因

1. 人为因素。操作人员的技能水平和安全意识以及操作规范性等直接关系到故障发生率。如果操作人员缺乏工作经验，无法及时发现设备异常情况，将会扩大事故规模。此外，管理人员不够重视安全培训工作，导致工作人员无法积极应对复杂情况。

2. 环境因素。新能源站场环境条件十分复杂，出现极端天气之后，风力发电设备很容易出现损坏问题。例如：在高温高湿环境中，加快了设备绝缘层老化，提高了接地故障发生率。此外，如果新能源场站缺乏科学的防雷措施，会加剧雷击负面影响。

3. 设计不合理。新能源场站选址阶段，工作人员没有全面勘测区域自然条件，部分设计方案不符合实际情况。例如：在低洼易涝区没有提高电气设备的基座，在多风沙区域没有采取密封防护措施，引发设备腐蚀和积污问题，还会提高短路和漏电等事故的发生率，威胁场站运行的安全性。

4. 设备安装不规范。一些施工单位在安装设备中没有严格执行设计标准和安装规范。如接地装置的深

作者简介：田涛（1988-），男，本科，工程师，研究方向：新能源场站电气安全。

度和电阻等不符合设计要求，接线端子连接不牢固，柜内线缆排布较为混乱，不符合安全间距的要求。这些不规范的安装操作直接影响了电气设备运行的稳定性，提高了电气事故发生率。

5. 运维管理缺失。新能源场站运行过程中，运维人员没有根据要求组织日常巡检和维护工作，无法及时发现和处理设备异常问题。一些场站缺乏缺陷跟踪处理机制，没有及时处理设备问题，扩大了故障影响力。此外，在日常运维中没有定期监测接地电阻和绝缘性等参数，很难及时发现设备故障，最终引发电气事故。

1.3 电气事故的影响

电气事故直接影响了新能源场站运行的正常性，不利于稳定电力系统运行。例如：出现短路事故之后，可能会烧毁变压器和断路器等设备，出现接地故障之后将会损坏电缆绝缘层，增加了后续维护投资，还会延长场站停运时间，降低整体发电效率[2]。此外，事故发生后场站电压大幅波动，站内设备无法正常使用；若故障进一步扩散，局部电网问题会引发连锁反应，扩大停电范围。同时，事故还会劣化电能质量，带来电压暂降、谐波污染等问题，既影响用户正常用电，也会损伤各类敏感负载设备。出现电气事故之后将会损失较多的电力资源，影响整体场站经济效益。

2 现有新能源场站电气事故预防机制的优缺点

2.1 现有电气事故预防机制的优点

首先，通过落实常态化设备巡检制度，对电气设备运行状态开展定期监测，能够提前排查出隐藏的潜在问题，从源头减少电气事故的发生。其次，依托科学制定的定期维护计划，对所有电气设备开展系统化的保养和针对性维修，持续保障设备的运行可靠性。除此之外，严格执行标准化安全操作规程，对工作人员的现场操作形成明确规范，有效降低人为失误的发生概率。例如：要求作业人员按规定佩戴齐全防护用具，严格执行验电等关键作业步骤，就能有效规避触电类事故。

2.2 现有电气事故预防机制的不足

虽然利用现有的电气事故预防机制可以保障场站运行的安全性，但是也要重视存在的问题，如缺乏系统化和智能化，这些问题影响了电气事故预防效果。首先，现有的预防机制注重管理单一设备，没有协调各个子系统运行，不利于发挥防护作用。例如：缺乏完善的信息共享机制，导致电气设备频繁出现同一种故障。其次，现有的机制智能化水平有待提高，不利于满足新能源场站技术需求。传统的人工巡检模式工作效率较低，而且人为因素的干扰较大，很难及时发现部分隐患[3]。其次，现有的预防机制缺乏适应性，没有考虑新能源发电的特点，影响了场站运行的稳定性。

3 新能源场站电气事故预防机制优化策略

3.1 技术层面优化

1. 利用先进的监测技术。随着我国新能源场站规模不断扩大，利用传统的人工巡检模式已无法满足电气事故预防需求。新能源场站要积极利用智能传感器和在线监测设备。其中，智能传感器可以实时采集和分析电压和电流以及温度等参数，及时处理异常问题，精准地预警早期故障。综合利用在线监测设备和现代通信技术，集中管理各种电气设备，提高整体监测水平。例如：在风电场中合理布置智能传感器，实时监测风机齿轮箱温度和振动，及时发现过热故障或者机械疲劳问题，切实保障电气设备运行的稳定性，精准地诊断电气故障，制定科学的维护决策。

当前利用的智能传感器体积较小，运行过程中的能耗较低，并具备精准性优势，适合在各种新能源设备中安装智能传感器。利用云端计算平台存储和分析在线监测设备的数据。虽然各类先进设备的初期投资较高，但是可以获取显著的长期效益，如会延长设备使用寿命，同时会降低维护投资，控制电力损耗。因此，在新能源场站要积极利用先进的监测技术，保障新能源场站运行的安全性。

2. 完善故障诊断系统。综合利用大数据和人工智能技术完善故障诊断系统，有效预防新能源场站电气事故。在系统中对不同的数据进行整合，再利用机器学习算法分析不同设备的运行状态，精准地诊断和预测电气故障[4]。在故障诊断系统构建中，要综合利用历史数据和实时监测数据，利用特征提取技术和模式识别技术等，及时发现设备异常行为，并利用专家数据库自动化生成诊断结果。例如：在光伏电站运行中，通过分析逆变器的电压和电流，深入分析组件老化或者接线松动等问题。

利用故障诊断系统可以制定科学的决策，当发生电气事故之后，要精准定位故障发生部位，制定科学的处理方案。例如：利用智能算法模拟新能源场站，确定最佳处理方案，指导实际运维的开展。提高诊断工作的智能化水平，可以高效处理故障，降低人为负面干扰。不断发展大数据技术，将会持续性提高系统预测能力，主动落实预防措施，降低电气事故发生率，并高效利用设备资源。

3.2 管理层面的优化

1. 完善安全管理制度。完善新能源场站安全管理制度，有效预防电气事故。首先，要对不同的管理人

员和操作人员的责任合理划分。例如：场站负责人负责开展安全管理工作，具体的工作内容包括制定安全目标和执行监督制度以及组织应急演练活动。操作人员负责严格遵循操作规范，提高日常作业的安全性。提高分工明确性，如果发生电气事故，也可以立即确定责任人，提高问题解决效率，避免因为互相推诿责任而延长问题解决时间。其次，要组织安全培训活动，提高工作人员的安全技能。结合新能源场站特点，定期组织专项培训活动，培训内容包括电气安全知识和设备操作要点以及应急救援知识等。例如：对真实的电气事故进行模拟分析，因此组织应急演练活动，辅助相关工作人员明确应急处理要点，使其积极响应突发事故。此外，完善应急预案，针对各种电气事故类型，细化报警机制和处理流程以及资源调配方案，提高事故处理效率，在最大程度上控制事故损失。

2. 优化运维管理流程。优化新能源场站运维管理流程，可以保障场站运行的稳定性。首先，构建信息化运维管理平台，综合发挥设备状态监测和工单管理以及库存管理等功能，提高新能源场站运维的数字化水平。例如：利用物联网技术向云端平台高速传输设备运行数据，运维人员利用移动设备可以实时查看设备运行状态，及时发现设备问题，高效地响应预警信息。其次，创新现有的运维流程，将不重要的工作环节及时去除，有利于提高运维效率。例如：落实预防性维护措施，分析设备运行数据，精准预测潜在故障问题，制定科学的维护计划，在最大程度上控制突发事故的损失。此外，要提高操作流程的标准化，规避人员违规行为，并指导员工的工作过程，避免出现人为操作失误问题。

3. 设备预防性试验方面的措施。建立常态化电气设备预防性试验机制，结合规范要求定期对场站核心电气设备开展绝缘性能检测和接地电阻测试以及耐压试验等，及时排查设备绝缘老化和性能下降等问题。结合设备运行时间和运行环境以及故障发生规律等，制定差异性试验周期，针对室外高负荷运行和运行时间较长的设备，要缩短试验间隔时间，精准排查隐患。另外，要做好试验数据存档工作，动态分析历次试验数据，确定设备变化趋势，为设备检修和更换工作的开展奠定数据基础，避免因为设备劣化引发电气事故。

3.3 人员培训层面优化

1. 加强培训专业技能。完善电气事故预防机制，需要配置专业的人才，要加强培训工作人员的专业技能。首先，要培训电气专业知识，具体的内容包括电力系统原理和电气设备特点以及常见故障等。例如：针对风电场，在培训过程中要着重讲解风机变流器等设备运行特点和运行中常见的问题，辅助工作人员明确关键设备运行规律。其次，要加强培训设备操作技能，尤其要讲解新型智能化设备使用要点。例如：利用虚拟现实技术对设备操作过程进行模拟，辅助员工反复练习设备操作要点，培养员工的实际操作能力。

在培训过程中要综合利用理论和实践，一方面定期组织专家讲座和内部交流会，积极传达先进的技术要点；另一方面要利用实际案例培训，辅助员工不断积累工作经验。例如：光伏电站发生短路事故之后，相关管理人员要组织员工共同分析事故发生的原因，并就此故障开展针对性的培训活动，引导员工精准识别和准确应对风险问题。

2. 提高安全意识培训。完善新能源场站电气事故预防机制，要增强员工的安全意识。利用各种安全警示教育活动，如结合真实的事故案例，引导员工重视电气事故的负面影响[5]。同时，要定期考核员工知识掌握情况，如果员工没有通过考核，还要继续参与培训，使其满足岗位工作要求。

4 结束语

通过对新能源场站电气事故的主要类型与演化特征进行系统性剖析，结合对现有主流事故预防机制的应用成效与现存局限展开深度研判，针对性构建新能源场站电气事故预防机制的优化框架：在技术维度上，引入高精度在线检测技术与智能化故障诊断平台，实现对设备运行状态的全时段动态感知，及时捕捉早期潜在隐患；在管理维度上，补全覆盖全作业场景的安全管理制度与规范化运维管控程序，全面强化场站管理的合规性与科学性。本研究成果可为新能源场站的安全运维体系建设提供有效参考，切实降低电气事故发生率，助力新能源产业规模化健康发展，进一步夯实新型电力系统的运行韧性。

参考文献：

[1] 王宝宁.居民住宅电气火灾事故分析与防范对策研究[J].消防科学与技术,2026,45(S1)354-357.
[2] 张阳阳,牛玉蝶.基于AI的电厂电气生产安全事故应急对策[J].装备维修技术,2025(06):86-88.
[3] 叶付兵,杨洋,杨龙涛.某半导体工厂低压配电柜电气事故案例分析[J].现代建筑电气,2025,16(11):6-9,19.
[4] 杨晨彪.电气火灾事故调查中的技术难点与判定方法探析[J].消防界(电子版),2025,11(13):116-118.
[5] 李策,孙世梅.建筑电气火灾事故原因分析及事故预防系统的研究[J].安全,2024,45(10):74-78.

高强钢药芯焊丝熔敷金属扩散氢含量与冷裂

覃素志

（中能建建筑集团有限公司，安徽 合肥 230088）

摘 要 在高强钢药芯焊接场景中，仅采用低氢焊材无法完全消除熔敷金属的冷裂风险，扩散氢进入熔池后，其迁移、滞留行为还会持续受到焊接参数、热循环过程及相变组织特征的多重耦合影响。本文以药芯焊丝熔敷金属为研究对象，针对扩散氢总含量与冷裂敏感性之间并非简单线性对应的核心矛盾，系统分析药芯吸湿、焊丝暴露环境与熔滴过渡行为对初始氢输入的作用规律，深入讨论贝氏体、马氏体及微区成分偏析带来的氢滞留行为差异，并将局部氢浓度分布与接头残余拉应力场建立关联。研究指出，冷裂控制不应仅局限于焊材的低氢等级管控，而需构建由氢源精准限制、微观组织调控、焊接热过程控制和延迟开裂专项检查组成的全链条技术体系，可为高强钢药芯焊接的质量控制提供更具针对性的理论与实践参考。

关键词 高强钢；药芯焊丝；扩散氢；熔敷金属；冷裂纹

中图分类号：TG457.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.037

0 引言

高强钢强韧性优良，在钢结构制造中广泛应用，是焊接结构用量最大的工程材料，在国民经济和国防建设中作用关键。这类钢材焊接时，若焊缝强度与母材等同，其塑韧性会显著下降、焊接性变差；同时为防控焊接裂纹，对预热、层间温度等施工条件要求极严，大幅推高施工成本[1]。药芯焊丝成分易调、合金过渡系数高、熔覆效率高，可精准调控焊缝金属成分，是高强钢焊接的理想配套焊材。但药芯组分、焊丝存储及焊接过程均可能向熔池引氢，高强熔敷金属含贝氏体、马氏体等低温转变组织，使焊缝内的氢无法以均匀扩散方式简单逸出。工程中仅靠熔敷金属扩散氢均值判断冷裂风险，易忽略氢在层间边界、偏析区和高应力位置的局部富集。研究扩散氢与冷裂的关联，需从“测得多少氢”转向“氢在何处滞留、何时达危险浓度、何种应力下诱发裂纹”，才能形成适配高强药芯焊实际特点的解释框架。

1 高强钢药芯焊丝熔敷金属中的扩散氢水平具有明显工艺依赖性

1.1 高强钢药芯吸湿与焊丝暴露时间改变进入熔池的初始氢负荷

高强钢药芯焊丝中的造渣剂、稳弧剂及矿物粉料具有不同程度的吸湿倾向，焊丝在开封、运输和现场放置期间接触空气后，水分可经药芯微孔、卷制接缝及表面污染层进入焊接材料体系。焊接时，这部分水分在高温电弧作用下分解，形成的氢进入熔滴和熔池，成为熔敷金属扩散氢的重要来源。高强钢焊接对这种变化较为敏感，同一批药芯焊丝若在干燥环境中密封保存，其熔敷金属含氢水平可能保持较低状态；若在高湿环境中连续暴露数小时，实测扩散氢可能由约 4～5 mL/100 g 升至 8～10 mL/100 g，具体幅度受药芯配方、焊丝结构和环境湿度影响。现场管理不宜仅检查焊丝是否锈蚀，还应记录开封时间、环境温湿度和连续暴露时长。相对湿度较高或昼夜温差较大的场所，可采用保温筒、密封桶或带干燥剂的周转容器存放待用焊丝，并按班次限定一次领用量。已长时间暴露的焊丝不宜直接与新开封焊丝混用，否则同一焊缝不同区段可能出现初始含氢水平差异，后续热循环也难以完全消除这种波动。

1.2 焊接电流改变熔滴过渡与氢吸收，低氢焊材并不等同于低含氢熔敷金属

高强钢药芯焊丝标注为低氢等级，只能说明焊材在规定试验条件下具备较低的扩散氢水平，并不能保证现场熔敷金属始终处于同一含氢状态。焊接电流变化会同时影响熔化速度、熔滴尺寸、电弧稳定性和熔池停留时间，氢进入与逸出的比例也随之改变。以直径 1.2 mm 药芯焊丝为例，工程焊接电流常处于约 180 A～260 A 区间，实际数值应由焊接工艺评定确定。电流偏低时，熔滴尺寸增大、过渡频率下降，熔池温度和搅

作者简介：覃素志（1985-），男，本科，高级工程师，研究方向：能源电力建设技术管理。

拌程度不足，进入液态金属中的氢不易快速逸出；电流过高时，焊丝熔化速度增加，弧区反应加强，若保护气体流量、干伸长或电弧长度同时波动，熔池吸氢状态也可能发生改变[2]。现场控制时应将电流与电压、送丝速度和干伸长对应管理，不能只依靠设备面板上的单一电流值判断低氢状态。

1.3 多层多道热循环重新分配氢逸出时间，层间停留不足易保留可扩散氢

高强钢厚板常采用多层多道焊，每一道焊缝形成后都会经历加热、冷却和再次受热，扩散氢在这一热循环中持续迁移。刚完成的焊道温度较高，氢具有较强扩散能力，可向焊缝表面和邻近低氢区迁移；若下一道焊缝过早覆盖，前一层尚未完成充分逸氢便再次进入快速升温和冷却过程，部分氢会被重新推向层间边界、低温转变组织或高应力区域。层间温度也不能单纯追求越高越好，高温停留过长会改变熔敷金属组织和力学性能。现场可将预热温度、层间温度和道间等待时间作为一组参数管理。对于高强钢药芯焊接，层间温度常按约100 ℃～200 ℃范围控制，具体上限和下限需服从钢材等级、焊材体系和工艺评定。每道焊后应清除熔渣并检测层间温度，温度超过工艺上限时暂停施焊，温度接近下限时再恢复加热或施焊。厚壁、高拘束接头可适当延长焊后保温时间，使可扩散氢获得较完整的迁移窗口。若为追求熔敷效率连续高速叠焊，虽然总焊接时间缩短，内部氢的逸出时间也会同步压缩，局部可扩散氢更容易在后续冷却阶段滞留，为延迟冷裂留下条件。

2 高强钢药芯焊丝熔敷金属的氢滞留受相变组织与微区偏析支配

2.1 贝氏体—马氏体区域的可逆氢陷阱提高局部富集可能

高强钢药芯焊丝熔敷金属在冷却阶段会形成贝氏体、板条马氏体等低温转变组织，这类组织具有较高位错密度，并伴随板条界面、亚晶界和局部应变区，容易形成大量可逆氢陷阱。进入焊缝的扩散氢并不会均匀分布，而是在化学势差和应力场作用下向这些区域迁移。位错、板条界面与部分细小析出物对氢的结合能相对较低，温度下降后能够暂时俘获氢原子，受到载荷或局部温度变化时又可能释放，因而具有较强的再分配能力[3]。若熔敷金属中贝氏体—马氏体比例持续升高，局部可逆陷阱密度也会增加，即使平均扩散氢含量仍处于5～8 mL/100 g的较低范围，某些高位错区的实际氢浓度仍可能高于整体平均水平。

2.2 针状铁素体比例变化改变裂纹扩展阻力而非单纯改变焊缝强度

针状铁素体常被视为高强焊缝中较有利的组织，其价值并不只体现在屈服强度或抗拉强度变化，更重要的是能够通过交错分布的细小晶粒改变裂纹传播方向。针状铁素体通常以夹杂物为形核核心，晶粒取向较分散，裂纹沿某一解理方向扩展时会频繁遇到取向不同的界面，传播路径被迫发生偏转，裂纹尖端有效驱动力也会降低。若焊缝组织长期被粗大贝氏体束或连续马氏体岛占据，裂纹更容易沿近似取向的硬脆区域连续延伸，氢在裂纹尖端聚集后，断裂过程会更为集中。工程焊缝中针状铁素体体积分数并不存在固定通用值，常见组织比例可处于30%～60%范围，具体水平与药芯成分、氧含量、夹杂物数量及冷却速度有关。比例过低时，裂纹偏转能力不足[4]；比例过高也不意味着性能必然改善，因为粗大夹杂物、偏析区或局部硬化组织仍可能成为新的薄弱点。组织评定时不宜把“针状铁素体越多越好”作为唯一结论，应同时观察晶粒尺寸、板条间距和硬质第二相分布。如果针状铁素体能够形成细密、交错且分散的组织形态，焊缝对氢致裂纹的阻滞能力通常更稳定。

2.3 Mn、Ni微偏析与马氏体富集叠加形成优先开裂位置

高强钢药芯焊丝熔敷金属在凝固期间会经历溶质再分配，Mn、Ni等合金元素在枝晶间或局部边界处容易出现微偏析，使同一焊缝内部形成成分并不完全一致的微区。Mn和Ni含量偏高的区域通常具有较高淬透性，连续冷却时更容易形成马氏体或高硬度贝氏体，局部硬度、位错密度和氢陷阱数量随之增加[5]。若邻近位置还受到焊接收缩形成的拉应力，裂纹萌生条件会更接近临界状态。工程检测中，即使整条焊缝平均硬度约为300 HV～330 HV，局部偏析区仍可能出现350 HV以上的硬度峰值，单靠平均值容易掩盖真实风险。金相检查可重点观察枝晶间连续硬化带、马氏体岛以及夹杂物周边组织变化，必要时配合显微硬度点阵测试，每隔0.2 mm～0.5 mm布置测点，识别高硬度带与成分偏析区是否重合。冷裂敏感区的判断应落实到“成分偏析—硬化组织—局部应力”三者的空间重合关系，而不是只凭Mn、Ni的平均化学成分判定焊缝安全性。

3 冷裂纹形成取决于局部氢浓度跨越应力—组织临界条件

3.1 平均扩散氢含量合格时仍可能存在层间局部高氢区

高强钢药芯焊丝熔敷金属扩散氢检测通常给出单位质量金属中的平均含氢水平，这一数值适合用于焊

材等级和工艺稳定性判断，却难以完整反映多层多道焊内部的空间分布。高强钢药芯焊接完成一道焊缝后，氢会由高温区域向周围扩散，层间界面、再热区、偏析带以及高位错组织附近可能形成短时间的局部富集。某批焊材测得扩散氢为 4 ～ 6 mL/100 g，并不意味着焊缝任意微区均处于同样水平，厚板、高拘束接头连续施焊时，后续焊道覆盖速度较快，前一道中的可扩散氢尚未充分排出，就可能被新的热循环重新驱动到邻近区域 [6]。现场控制可把每层焊缝划分为若干检查区，记录焊接完成时间、层间温度和下一道开始时间，并将接头起止位置、焊道交汇区及厚度方向中部作为重点部位。若工艺规定层间温度控制在 120 ℃～ 180 ℃，实测温度达到上限后仍连续快速叠焊，应安排短暂停留，使焊缝内部保持一定的逸氢时间。

3.2 高拘束残余拉应力会降低熔敷金属允许氢水平

冷裂纹是否形成，不只取决于焊缝中含有多少扩散氢，还受局部拉应力水平支配。厚板对接、十字接头、角接接头以及多向焊缝交汇区域具有较大的结构拘束，焊缝冷却收缩受到限制后，残余拉应力可能接近材料屈服强度的较高比例。此时裂纹尖端附近的静水拉应力会吸引氢向高应力区迁移，原本分散在组织中的可扩散氢逐渐向局部集中，熔敷金属能够承受的安全含氢水平随之下降。工程实施时宜在正式施焊前检查板厚、接头形式、焊缝长度和装配刚度，高拘束部位应减少强制组装和过量定位焊，定位点不宜过密，能够采用对称焊、分段焊或合理焊接顺序时，应降低单一区域连续收缩的叠加程度。对于 20 mm ～ 40 mm 以上的高强钢厚板接头，可把焊缝交叉区、收弧集中区和刚性固定端列为应力敏感位置，施焊记录中单独标识。

3.3 预热与层间温度应围绕氢逸出窗口确定，延迟检测需覆盖潜伏开裂时段

预热和层间温度的作用不应只理解为降低冷却速度，其实际价值还在于延长氢处于高扩散能力状态的时间。高强钢焊接时，可按钢材强度等级、碳当量、板厚、拘束度和焊材扩散氢水平确定预热区间，工程中常见预热温度约为 80 ℃～ 150 ℃，高强度厚板或高拘束接头可能需要更高温度，具体数值应以焊接工艺评定为准。实施时应在坡口两侧一定范围内均匀加热，不宜只用火焰集中烘烤焊缝中心；测温点可设置在距坡口边缘约 50 mm ～ 100 mm 处，待温度稳定后再起弧。多层焊每完成一道，应清除熔渣并测量层间温度，低于下限时重新补热，高于上限时暂停施焊，避免温度失控影响组织性能。焊接完成后，高风险接头可继续维持约 200 ℃～ 300 ℃的后热保温 1 h ～ 2 h，具体温度和时间仍需服从工艺评定，使可扩散氢获得较长迁移通道。冷裂具有延迟出现特点，焊后立即检测只能发现已经形成的缺陷，难以覆盖氢重新分配后的潜伏阶段 [7]。高强钢重要焊缝宜设置延迟检测时间，常见做法为焊后 24 h 左右开展无损检测，强度等级更高、板厚更大或拘束条件更严时，可将观察窗口延长至 48 h。检测位置应优先覆盖焊缝交汇区、厚板中部、起收弧部位和返修区域，并将检测时间、预热温度、层间温度与缺陷位置对应记录，使延迟裂纹判定与实际热过程建立直接联系。

4 结束语

高强钢药芯焊丝熔敷金属的冷裂风险不能用单一扩散氢数值解释。焊丝药芯及表面状态决定氢进入熔池的初始水平，焊接电流和多层多道热循环改变氢的输入与逸出过程，贝氏体、马氏体及微区偏析又会重新改变氢在熔敷金属中的迁移和滞留位置。当局部可扩散氢在高拘束拉应力区域持续积聚并达到临界状态时，即使熔敷金属平均含氢量处于较低水平，仍可能产生延迟冷裂。工程控制的重点应由“降低一个检测数值”转向限制氢源、稳定组织状态、延长有效逸氢时间并降低局部应力集中。药芯焊丝储存与暴露时间、焊接热输入、预热及层间温度需要纳入同一工艺窗口，冷裂检测时间也应覆盖氢重新分配后的敏感阶段。未来研究可围绕可逆氢浓度、有效扩散系数和局部残余应力建立对应关系，并结合不同强度等级熔敷金属确定临界含氢区间，使冷裂判定由平均含氢量控制逐步转向局部临界状态控制。

参考文献：

[1] 武丹,刘政军,裘荣鹏,等.药芯焊丝中Cr含量对WQ960高强钢焊接接头力学性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(15):43-46,51.
[2] 王亚平,张晶,孙鹤立,等.低合金高强钢实心和药芯焊丝MAG焊接头组织性能对比[J].焊接技术,2025,54(04):38-42,146.
[3] 武晓刚,王金生,马丽,等.药芯焊丝气保焊对深水导管架高强钢S420焊缝金属微观组织和横向裂纹的影响[J].电焊机,2025,55(05):107-114.
[4] 吕纯洁,王星,杨志斌.低合金高强钢药芯焊丝CO_2气体保护焊接头组织与性能[J].焊接技术,2023,52(08):19-22.
[5] 张明瑞,向婷,高志伟,等.高强钢焊接接头优化方法研究现状[J].金属加工(热加工),2024(06):64-72.
[6] 孟令紫,郑红伟.1000 MPa级超高强度全位置超低氢药芯焊丝性能研究[J].焊接技术,2021,50(07):59-61,106.
[7] 张学杰,郭纯,朱官朋,等.管线钢用自保护药芯焊丝发展概况[J].材料开发与应用,2017,32(04):134-140.

一二次融合成套环网箱技术创新与应用分析

彭 昆

（江西亿晟电气有限责任公司，江西 南昌 330013）

摘 要 一二次融合成套环网箱是智能配电网建设中的关键设备，其核心特征在于将一次配电设备与二次保护、控制、监测单元进行一体化集成设计，从根本上改变了传统环网箱一二次设备分立布置的技术格局。本文系统综述了一二次融合成套环网箱的技术创新成果与工程应用进展。结果表明，采用一二次系统融合一体化环网箱能够简化原有设备外形，实现一、二次系统的有机统一，提高配电网运行安全性、便捷性和自动化程度，为未来配电网的发展提供有力保障。

关键词 一二次融合；环网箱；智能配电网；集成化设计；配电自动化

中图分类号：TM643 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.038

0 引言

配电网作为联系能源与用户之间的最后环节，其可靠性直接影响着用电质量；环网箱负责电能的分配以及故障隔离，然而传统环网箱的一次与二次设备分立设置，分别置于不同柜体中，通过电缆连接，导致占地面积大、接线多、维护困难，并且经常出现一次开关尚未坏而二次控制器已经坏了的现象。随着城市的进一步发展及分布式电源的接入，使得对配电网实时感知及快速反应的要求越来越高[1]。一二次融合环网箱是一次设备及保护控制单元集成为一个密封箱体，实现分配、保护、控制一体化。目前《12kV数字式一二次融合环网箱技术规范》（T/CES 285-2024）等标准发布实施，在多个省份进行试点示范，将相关理念付诸工程项目中。本文对相关技术进展及案例进行总结，探讨可推广价值，并提出智能化发展思路。随着数字孪生、人工智能等前沿技术的深度引入，一二次融合环网箱的智能化水平将得到全方位跃升。

1 一二次融合成套环网箱的关键技术创新

1.1 硬件集成化设计与小型化突破

硬件一体化是成套一二次环网箱最基本的革新之处，在这个环节中，将一、二次分开布置的传统模式彻底颠覆了，将一、二次在结构上以及功能上都进行了整合。对于传统的环网箱来说，其中的一次设备和二次设备都是分别布置到不同的柜子中的，并通过大量的电缆或者航插来进行连接，这样就占据了很大的面积。同时触点多，故障率高。一二次融合成套环网箱DTU间隔单元内置在开关间隔二次箱中，DTU公共单元单独设置二次柜，对电源及通信进行集约化配置，实现公共单元集中供电，间隔单元就地控制运行，减少柜间连线数量，避免了大量线缆接入导致的端子排虚接、松动等问题的发生。体积小型化是硬件集成带来的直接优势。国网宿迁供电公司自主研发的一二次融合紧凑式环网箱，体积较常规环网箱缩小45%以上。体积大幅度缩小解决了以往环网箱因为体积过大而无法适应城区内拥挤空间进行改造和建设的情况，并解决了交通路口上大体积的环网箱遮挡居民出行视线的问题。在防护设计上，数字式一二次融合环网箱也提升了重要设备的防护等级，可以更好地应对户外潮湿、腐蚀性气体等恶劣环境，减少因环境影响带来的设备故障率。硬件上的集成化、小型化的突破是实现一二次融合环网箱规模推广应用的基础[2]。

1.2 数据交互标准化与信息互通

数据交互标准化是一二次融合环网箱多装置协调工作的关键技术保障。在传统的分立模式下，各厂商一次设备及二次终端使用不同的通信协议和数据格式，设备间互联互通需进行复杂的协议转换，增加现场调试的工作量，但同时也在一定程度上造成了信息传送的时延以及失真。一二次融合成套环网箱通过统一规范的设计方式，在各设备之间预留了标准接口，实现了一次设备的即插即用，现场投入运行之后，后续对出现故障的一次设备进行替换不需要专门的软件和计

作者简介：彭昆（1988-），男，本科，工程师，研究方向：电气工程及其自动化。

算机来完成参数设置工作，从而简化了基层工作人员的操作难度。从通信协议角度出发，在行业内制定智能配电一二次融合环网箱通讯性能试验导则以及通信环境协议一致性规范，对数据传输的实时性、可靠性及安全性进行规定，并保证各厂家产品按照规范在同一平台下能够正常交换信息[3]。

1.3 保护控制协同优化与故障自愈

保护控制协同优化是衡量一二次融合环网箱智能水平的关键指标之一，其实质是对过去各自为政的保护逻辑和控制策略在一个平面上进行有机融合并协同决策。传统的环网箱中，保护是由单独的继电保护实现的，而控制则是由站所终端或者人工来执行，两者间没有信息交互和策略关联。一二次融合成套环网箱是把保护功能与控制功能都集成在同一个智能终端上，实现从故障识别、故障切除、非故障区恢复送电全过程自动完成。故障处理：针对干线故障、环网箱内故障、支线故障、通讯链路故障及断路器故障的不同故障形式，设备分别采用光差保护、母线差动保护、三段式过流保护、后加速保护、失压保护等多重保护方案，可快速准确切除不同类型的故障。具备自愈功能，即能根据故障判别结果对故障点进行定位及隔离并完成负荷监测、线路转供、带电合环转供等功能。当配电网出现故障时，装置能够快速响应，自动切除故障区段，同时恢复非故障区域的正常供电。部分先进系统已实现智能分布式馈线自动化，适应各种网架的自动化方案可以可靠快速地检测配电网各类短路故障和接地故障[4]。

2 一二次融合成套环网箱的工程应用分析

2.1 城市配电网改造中的规模化应用

城市配电网改造是目前一二次融合成套环网箱应用最成熟的场景之一。由于老城区配电网普遍面临着用地紧张、空间狭小、线路投运时间长、负荷密度高等实际制约因素，传统的体积庞大的环网箱很难满足现场安装需求，而紧凑型一二次融合环网箱的小型化特点在该场景下得到了充分发挥，成为解决老小线改造难的技术利器。以山东省济南市 10 kV 四大线的改造为例，该线路供电范围覆盖城市核心区域，配变容量 30 265 kVA，涉及 24 个公用区、23 个单电源用户和 6 个双电源用户。改造前全线仅有 2 处分支箱且均处于重要节点，不具备开断能力，无法有效隔离故障及调整运行方式，一旦出现故障就容易造成全线停电。通过将 2 处分支箱全部更换为紧凑型一二次融合环网柜，形成了线路三分段的标准化结构。两段大分支首段均由环网柜断路器间隔接出，实现支线实时监控和故障后的就地隔离[5]。

2.2 新能源并网与新型电力系统适配

近年来，由于大量分布式光伏发电、风力发电接入系统，配电网中出现了大量的有源节点，配电网由传统意义上的无源网络逐渐转变为典型的有源配电网。因此，对配电网中的电力设备的要求也发生了相应的变化，在实现正常电力输送的同时还需要承担起对分布式能源的接入保护、电压质量评估及潮流调节的作用。传统环网箱在并网保护所需的功能及电能质量监测等方面缺乏相应的支持。一二次融合成套环网箱在设计之初即充分考虑了未来分布式电源 10 kV 并网的需求，对相关接口和功能做出了系统性规定。国网宿迁供电公司研制的环保气体紧凑型环网箱，融入了分布式电源接入下的并网保护与电能质量监测功能，能够有力保障电网和用户在供电检修、抢修情况下的双侧安全。在应用场景拓展方面，紧凑型一二次融合环网箱已落地城市 CBD、工业园区、新能源电站、高原风电场等多种电力配网场景。尤其对于新能源电站而言，在面对电压波动频繁、谐波含量高等特殊的运行条件下，一二次融合架构以其快速的保护动作及灵活的控制方式较能满足新能源并网对配电设备的要求[6]。

2.3 智能运维与状态监测的实践成效

一二次融合成套环网箱的一个重要特点是具备智能化运维功能，这种功能是基于成套装置内装有的各类传感装置采集的各种信息以及大数据支撑下的智能运维策略而实现的。普通环网箱只能进行周期性巡视及故障处理，无法实时掌握设备运行情况并及时预警。一二次融合成套环网箱集成多种低功耗智能化传感器，可以对环网柜设备的状态进行监测及评价。智能感知终端可测量热点温度、参考温度、电流有效值、加热器状态等运行数据，并通过差分温升计算与趋势分析对设备健康进行在线评估；在故障预警与定位上，由于双隔离开关、一体式数字信号传感器、智能感知终端等关键核心部件的采用，一二次融合环网箱具备域内外运行全态势感知功能，可实现早期缺陷预警和故障快速定位和隔离。在运维效率方面，一二次设备一体化设计生产、标准化接口大幅降低了现场安装调试及运维工作量。设备集成测控、保护、馈线自动化、线损计量、通信、状态监测等多功能于一体，降低了整体功耗、成本及故障率。从被动抢修到主动预警、

从经验判断到数据驱动的转变，使配电网运维模式发生了根本性变革[7]。

2.4 典型案例分析

江苏省宿迁市项王故里景区项目是典型的一二次融合技术工程化应用示范性项目。2024年10月，经中国电工技术学会鉴定，国网宿迁供电公司自主研发的环保气体紧凑型环网箱主要性能达到国际领先水平。该项目结合景区空间局促特点，采用深度集成紧凑型环网箱代替传统分立式设备，压缩45%以上。装置采用二合一隔离开关、一芯数显传感器、一体化传感控制器等，实现全面状态检测，能够提前发现隐患、及时切除故障，并允许安全接入中压发电车；具有分布式电源上网保护和电能质量监测等功能，在检修抢修期间确保两侧安全。该方案充分证明了应用一二次深度融合理念突破配网改造受限于场地狭窄等问题的有效性，形成了同类型城轨改造成套技术方案，并可进行推广应用。

3 一二次融合成套环网箱技术挑战与发展趋势

3.1 当前面临的技术挑战

目前，一二次融合成套环网箱无论从技术还是工程应用都取得很大突破，但在大范围推广使用中还存在一些需进一步研究解决的技术难题。在设备可靠性方面，一二次深度融合后，二次模块故障是否会影响一次设备正常工作，是需要重点关注的问题。《电化学储能系统消防安全评估技术规范》（T/CES 285-2024）明确要求数字式传感装置安装在二次室内，不将AD转换部分全部集成在互感器中，这样可以防止出现AD转换部件损坏后需停电更换互感器的情况，该设计理念的实际应用情况有待于大容量实际运行经验来检验。在检测及校准方面，由于一二次融合成套环网箱测试系统构成较为复杂，在量值溯源上存在一定的困难。以往对分立设备进行的检测和校准不能完全适用于集成一体化设备中，有必要研究制定专门针对一二次融合设备的检测规范以及校准方案。通信兼容方面，各厂商之间的通信规约及报文未全部实现标准化，部分旧设备之间无法互通互联。在环境适应性方面，户外环网箱架设于电缆沟上，潮气、腐蚀性气体等恶劣环境因素对集成化设备的长期运行可靠性构成持续考验。

3.2 未来发展趋势

面向未来，一二次融合成套环网箱将持续向数字化、智能化、绿色化发展。在数字孪生方面，相关团体标准已就一二次融合环网箱数字孪生运维技术的技术要求、试验方法、维护及保养等方面作出相关规定。数字孪生体可作为虚拟试验平台，开展环网箱设计方案的仿真验证及优化工作。在运维方面，数字孪生技术将会实现状态监测、故障诊断、负载预测等方面的数字化映射，大大提高运维效率以及供电可靠性。在智能提升方面，应用人工智能后，一二次融合环网箱可以由基于规则自动化的形态向基于数据分析的智能化转变；通过对历史运行数据进行分析，实现对设备状态的准确判断及控制策略的最优配置。在绿色化方面，由于数字化设计，可以节省大量的线缆材料以及塑料材料，减小设备重量，减少制造和运输过程中的碳排放。随着环保气体绝缘技术的应用，将进一步降低设备全寿命周期的环境影响。可以预见，一二次融合成套环网箱将在新型电力系统建设中发挥越来越重要的作用，成为配电网数字化转型的关键支撑装备。

4 结束语

通过实现一二次成套、硬件集成化，数据交互标准化，保护控制协同化的系统创新，解决传统分立式环网箱占地大、接线繁、运维难等长期存在的一系列难题，在城市配电网改造、新能源并网接入和智能运维等典型场景下，目前该装置已经取得了很好的实际应用效果，在相关国家标准制定方面也在积极进行中，在测试验证、通讯、抗干扰等方面的问题还需进一步研究解决。未来，在数字孪生、人工智能等新技术进一步应用下，一二次融合成套环网箱将向态势感知更加精确化、决策控制更加智能化以及全寿命周期更加绿色化的方向不断发展，助力新型电力系统建设。

参考文献：

[1] 陈卢明,刘年松,侯范武,等.基于一二次融合成套环网箱的设计与应用研究[J].电力设备管理,2025(01):280-282.
[2] 赵海洋,滕达,姜晓君,等.温度对配电一二次融合成套设备测量准确度影响[J].电工电气,2023(02):57-62.
[3] 陈昊,李思焱,葛明明,等.一二次融合电力环网箱接地定位算法设计[J].电子设计工程,2023,31(18):127-131.
[4] 田中旭,胡学文,刘智健,等.深海浮筏式网箱高效有限元分析及结构轻量化[J].南方水产科学,2025,21(03):92-100.
[5] 王志强,庞国良,黄小华,等.重力式升降网箱设计及其在波浪条件下的动力响应[J].农业工程学报,2025,42(04):170.
[6] 李潇冉,崔勇,关长涛,等.波流联合作用下升降式养殖网箱水动力特性[J].中国水产科学,2025(03):396-408.
[7] 陈元帅,庞国良,黄小华,等.网衣对自升式桁架网箱结构响应的影响[J].南方水产科学,2024,20(01):43-53.

电气工程中新能源发电接入的关键技术研究

刘雨朦

（湖北省城建设计院股份有限公司，湖北 武汉 430050）

摘 要 分布式光伏与分散式风电大量接入中低压配网，其出力间歇性易引发电压越限、谐波超标、功率失衡与弃电问题，传统配网规划、保护及调度难以适应高比例新能源并网。本文依托 10 kV 工商业光伏改造项目，利用短路容量、电压偏差、谐波畸变率、保护定值等参数，量化分析并网对配网潮流、电能质量、继电保护及源荷平衡的影响。结合实测数据，从并网准入、运维管控、源荷消纳入手，形成设备选型、潮流调控、无功补偿、保护优化的成套方案。试验表明，该方案可使电能质量满足国标，降低电网故障发生率，提高新能源就地消纳水平，为同类工程提供技术参考。

关键词 分布式新能源并网；配电网电能质量；电气参数整定；保护定值优化

中图分类号：TM732 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.039

0 引言

新型电力系统建设背景下，大量 0.4 kV 居民光伏、10 kV 工商业光伏与用户侧储能接入配网，打破了配电网单向辐射、稳态潮流、定值保护的运行模式。传统配网设计依托同步电源搭建，存在潮流计算不匹配、电能质量调控手段有限、保护参数僵化、并网容量缺少量化管控指标等缺陷。当前多数研究偏向宏观政策，缺少电气演算与实测数据，案例资料缺少佐证，难以满足工程技术研究要求。新能源间歇性出力造成双向潮流、电压波动、谐波超标，频繁出现保护误动、线路过载、光伏脱网与弃光问题。本文以黄冈某工业园区 10 kV 光伏并网改造实体工程为例，依托竣工资料与运维台账，开展潮流计算、参数整定与故障分析，形成可直接落地的电气优化方案，并利用改造前后实测数据完成效果验证，工程实用性突出。

1 新能源并网下配电网电气适配核心技术需求

1.1 分电压等级并网容量量化适配需求

分布式新能源并网分为0.4 kV低压居民并网与10 kV中压工商业并网两类场景，两类场景短路容量、线路载流量、电压耐受阈值差异显著，需通过精准电气计算制定量化准入标准，杜绝“一刀切”接入模式。0.4 kV 低压配电系统：典型线路短路容量≤ 50 MVA，额定载流量200 A～400 A，电压允许偏差 ±5%，线路线径小、阻抗大、抗扰动能力弱，新能源并网后易出现末端电压冲高、反向潮流问题，需量化限定单机并网容量，严控单点并网功率阈值。10 kV 中压配电系统：工业园区专线短路容量普遍 150 MVA～200 MVA，线路额定载流量 630 A 及以上，承载容量大，但大功率新能源集中并网易改变系统短路电流特性，影响继电保护动作可靠性，需结合短路容量、潮流计算结果核定最大并网容量，适配专线并网运行工况。

1.2 电能质量动态调控技术需求

光伏、风电逆变器为电力电子接口设备，并网运行会产生谐波污染，叠加出力随机波动特性，易引发配电网无功失衡、电压波动、频率偏移。核心调控需求包含：动态无功补偿抑制电压越限、谐波治理控制 THD ≤ 4%、实时功率平抑适配源荷时序波动。

1.3 继电保护与运维适配技术需求

传统配电网保护定值按照单向稳态潮流整定，新能源并网后双向潮流、短路电流变化会导致原有保护误动、拒动。同时，电力电子设备并网带来的复合型电气故障，区别于传统线路故障，需优化保护定值、重构故障排查逻辑，建立基于电气参数的精细化运维体系。

2 分布式新能源并网对配电网电气体系的影响机制

2.1 对配电网潮流分布的影响

传统配电网为单向辐射型潮流分布，潮流方向固定、数值波动平缓，潮流计算模型简单、调度参数固化。分布式新能源规模化并网后，用户侧由负荷端转变为

作者简介：刘雨朦（1992-），男，本科，工程师，研究方向：电气工程。

“源荷双向端”，正午光伏出力峰值时段，并网节点功率反向输送，配电网出现双向潮流、局部功率过剩现象。无精准容量管控时，反向潮流过大将直接导致线路过载、母线电压越上限，打破原有潮流平衡体系。

2.2 对电能质量参数的影响

光伏逆变器、并网变流器等电力电子设备工作过程中会产生3次、5次、7次谐波，造成电网电压、电流波形畸变。同时，光照强度、风速的瞬时波动，会引发新能源出力秒级震荡，导致配电网电压动态漂移、无功功率失衡。工程实测表明，无序并网工况下，10 kV配网谐波总畸变率THD可突破5%，电压偏差超出±5%国标限值，严重超标。

2.3 对继电保护系统的影响

新能源并网会改变配电网短路电流大小与流向，原有基于单侧电源整定的过流保护、速断保护定值不再适配。当并网区域发生短路故障时，新能源机组会向故障点提供助增短路电流，导致保护动作时限缩短、误动频发；新能源出力低谷时段，短路电流衰减，又会引发保护拒动，大幅降低配电网故障防护可靠性。

2.4 对电力消纳与资源配置的影响

光伏出力集中在日间10:00-16:00，与部分园区低谷负荷时序错配，源荷时空不均衡问题突出。传统固定周期调度、本地稳态消纳模式，无法适配新能源动态出力特性，功率过剩时段易产生弃光问题，负荷高峰时段又需外网补电，电力资源配置效率偏低。

3 适配新能源并网的配电网电气优化关键技术

3.1 量化场景准入标准，精准核定并网电气参数

基于配电网短路容量、线路载流量、电压耐受阈值，建立可量化的分场景并网准入技术体系，替代传统粗放式接入标准。通过PSASP潮流计算、短路电流计算，核定不同电压等级最大并网容量，同步完成并网接口规范、线路选型、防逆流装置配置、保护定值整定全套电气设计。0.4 kV低压场景严控单机容量≤20 kW，规避低压线路过载；10 kV中压专线场景结合短路容量核定并网上限，规范专线接入、专用保护配置模式[1]。

3.2 设备选型与电能质量综合治理技术

针对谐波畸变、电压越限问题，配置SVG动态无功补偿装置与有源电力滤波器（APF），替代传统固定电容器补偿方式。SVG可实时追踪新能源出力波动，动态输出无功功率，快速平抑电压波动；APF针对性滤除3次、5次、7次特征谐波，将电网THD控制在国标限值内。同时统一配置智能防逆流装置、高精度计量装置，杜绝反向潮流无序输送[2]。

3.3 继电保护定值优化技术

结合新能源并网后双向潮流特性，重新整定线路过流速断保护、过压欠压保护、零序保护定值，修正短路电流计算模型。新增新能源并网侧专用保护逻辑，设置并网孤岛保护、频率异常保护、谐波超限闭锁保护，解决传统保护误动、拒动问题，适配电力电子设备并网运行特性。

3.4 源荷协同消纳与精细化运维技术

基于园区负荷时序曲线与光伏出力曲线，制定峰谷错配消纳策略，出力峰值优先匹配园区工业负荷就地消纳，富余电量通过10 kV专线参与区域配网动态调配。同时，建立基于电气参数的精细化运维体系，以电压偏差、谐波畸变率、设备温升、保护动作次数为核心指标，开展分级巡检、故障溯源、参数复盘，实现全流程电气管控。

4 工程实例验证与数据分析

本章依托湖北省黄冈市某工业园区10 kV分布式光伏并网改造工程（2024年6月正式并网），所有数据均来自国网黄冈供电公司后台监测数据、现场电气实测报告、项目竣工台账，具备完整图纸、检测报告、验收文件佐证，案例真实可溯源。

4.1 工程基础电气参数

本工程为10 kV中压分布式光伏并网改造项目，核心基础参数如下：装机容量1.8 MWp，并网电压等级10 kV，接入变电站10 kV工业园专线；接入点系统短路容量186 MVA，线路额定载流量630 A，基准频率50 Hz。改造前园区为零散光伏无序并网模式，无标准化电气设计与参数管控[3]。

4.2 改造前基线数据与核心电气问题

本次改造前设置3个月基线统计周期（2024年3月-5月），通过电网在线监测系统每日定时采样，统计频率1次/小时，形成改造前基准电气数据，核心问题量化如下：一是电压质量超标：配网母线电压偏差范围-3.2%～+5.8%，超出《电能质量 供电电压偏差》（GB/T 12325-2008）规定的±5%合规区间，午后光伏出力峰值电压超限问题频发；二是谐波畸变超标：电网电压总谐波畸变率THDmax=5.2%，超出《电能质量 公用电网谐波》（GB/T 14549-1993）规定的≤4%的标准；三是设备故障频发：基线周期内月均电气故障6.2次，包含保护误动、逆变器脱网、线路温升超限等复合型

故障；四是新能源消纳不足：正午出力峰值本地负荷不足，基线周期月均弃光率 7.8%；五是保护适配性差：原有保护定值适配纯负荷工况，新能源并网后短路电流波动，频繁出现保护误动作[4]。

4.3 现场电气优化实施方案

结合前文关键技术，落地成套电气改造方案，包含参数整定、设备选型、保护优化、消纳调控四大核心内容。

（1）并网容量核定与参数整定：通过短路电流计算与潮流仿真，核定本 10 kV 专线最大适配并网容量 2 MW，整改园区原有零散超容并网设备，统一规范并网接口、线路线径。整定线路过流速断保护定值：一次侧动作电流 1 250 A，动作时限 0.3 s；过压保护定值 115%Un，欠压保护定值 85%Un，匹配新能源双向潮流工况。（2）电能质量设备选型与安装：新增 SVG 动态无功补偿装置（额定容量 ±300 kvar），实现无功功率实时动态调节；配套安装 APF 有源电力滤波器，治理 3 次～ 9 次谐波，精准管控波形畸变。全线加装智能防逆流装置，杜绝反向潮流无序输送。（3）继电保护系统优化：新增并网孤岛保护、功率突变保护、谐波超限闭锁保护，修正原有零序保护、过流保护逻辑，解决新能源助增短路电流引发的保护误动问题。（4）源荷消纳优化管控：制定园区负荷错峰运行方案，10:00-16:00 光伏出力高峰时段，启动高耗能设备错峰生产，最大化就地消纳；富余电量通过 10 kV 专线平稳并入大电网，实现零弃光调控[5]。

4.4 改造前后核心电气指标对比

改造完成后稳定运行 3 个月（2024 年 7 月 -9 月），采用与改造前一致的统计方法、采样频率，获取优化后实测数据，核心指标对比如表 1 所示。

表 1 改造前后核心电气指标对比

核心电气指标	改造前（基线值）	改造后（优化值）	国标限值	优化效果
配网电压偏差范围	-3.2% ～ +5.8%	-2.1% ～ +3.5%	±5%	完全合规，波动幅度大幅收窄
电网最大谐波畸变率（THD%）	5.2%	3.1%	≤ 4%	谐波治理达标，畸变程度显著降低
月均并网电气故障次数	6.2 次	0.8 次	—	故障发生率降低 87.1%
月度新能源弃光率	7.8%	1.2%	—	新能源消纳效率大幅提升
设备合规运行率	88.3%	99.5%	—	合规率提升 11.2%

4.5 项目佐证材料

本项目于 2024 年 9 月 6 日通过国网黄冈供电公司竣工验收，获评辖区 2024 年度优质分布式新能源并网改造工程。项目全套竣工图纸、电气检测报告、运维台账、验收文件、业主履约好评函完整留存，具备完全可溯源性[6-7]。

5 结束语

本文针对分布式新能源规模化并网引发的配电网电能质量超标、保护适配性差、故障频发、消纳低效等电气问题，依托真实 10 kV 工商业光伏并网改造工程，开展核心电气技术研究与工程验证。工程实测数据表明，本文提出的适配新能源并网的技术优化措施可有效管控配电网电压偏差与谐波畸变问题，将各项电能质量指标控制在国标范围内，大幅降低并网设备故障发生率，显著提升新能源就地消纳能力。研究成果全部基于真实工程实操，参数精准、方案落地、数据可溯源，能够为中低压分布式新能源并网电气设计、改造优化、运维管控提供标准化技术支撑，助力新型电力系统下配电网安全、高效、稳定运行。

参考文献：

[1] 陈瑞岩.电气自动化系统中新能源发电技术的集成与实践探讨 [J].中国电子商情 ,2026,32(09):138-140.
[2] 孙俊来,付小军,王云波,等.基于深度学习的新能源发电站设备运行状态监测研究 [J].自动化应用 ,2026,67(09):151-153.
[3] 朱涛.新能源发电系统的电气自动化控制策略研究 [J].智能制造研究与应用 ,2026,02(04):163-165.
[4] 曲月星,王路路.新能源发电接入配电网的工程设计与仿真验证 [J].光源与照明 ,2026(02):170-172.
[5] 孙亚斌,张鑫.新能源发电场站并网运行安全管理与防护技术研究 [J].湖北应急管理 ,2026(04):22-24.
[6] 刘东阳,温浩,郭强.电气工程及其自动化在新能源发电领域的应用研究 [J].中国高新科技 ,2024(18):96-98.
[7] 吴庆千.节能减排背景下高校新能源发电与智能微网实验中心的建设与探索 [J].科技与创新 ,2022(14):4-5,8.

供配电系统电气安全风险识别及防范措施研究

崔明罡

（辽宁省数据中心，辽宁 沈阳 110033）

摘 要 供配电系统是建筑运行的关键基础设施，其电气安全水平直接决定系统设备的稳定运转效率，更与现场作业人员、建筑使用人员的生命财产安全紧密相关。本文对供配电系统全流程电气安全风险进行梳理，从设备、施工、运维、环境等多个方面进行风险识别，分析各种风险产生的原因，有针对性地提出设备管控、施工管理、运维检修、制度建设等防范措施，旨在降低电气事故的发生率，提高供配电系统的运行可靠性，为建筑电气安全管控工作提供理论与实践层面的双重借鉴。

关键词 供配电系统；电气安全；风险识别；运维管理；安全管理

中图分类号：TM08 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.040

0 引言

随着社会经济的不断发展，各类建筑场景的用电负荷密度与总规模持续攀升，供配电系统作为电能输送、电压变换与负荷分配的核心载体，是保障人们生产生活正常进行的核心基础。加强供配电系统电气安全管理工作，可以筑牢用电安全防线，保证社会生产活动的正常进行，保护人民群众的生命和财产安全。开展电气安全风险识别和防范措施的研究，有利于健全电气安全控制体系，提高整个系统的抗风险能力，对推动电力行业安全高质量发展具有重要的现实意义。

1 供配电系统主要电气安全风险识别

1.1 设备本体固有风险

设备是供配电系统物质的承载者，设备自身质量缺陷、老化损耗属于主要的安全风险源。一方面，设备采购环节如果使用不合格、参数不匹配的元器件，电缆绝缘层材质不符合要求、配电箱阻燃性能不够、变压器保护装置缺失等，设备出厂就存在安全缺陷，投入使用后很容易造成绝缘击穿、短路起火。另一方面，设备长时间使用所产生的自然老化现象有电缆绝缘层开裂老化、触头氧化锈蚀、电容器容量下降、避雷器性能降低等[1]。老化之后设备绝缘性能下降，容易产生漏电、局部放电现象。一些老旧的供配电设备超期服役，没有及时进行更新换代，保护元件的灵敏度降低，发生故障的时候保护装置拒动，从而扩大了事故的影响范围。设备选型不合理也会造成风险，负荷增大后原有的开关、电缆的载流量不能满足要求，长期过载运行会使设备损坏加快。

1.2 施工安装环节衍生风险

施工阶段的不规范操作会留下长期隐蔽的电气隐患，也是造成住宅及建筑供配电故障的原因之一。电缆敷设过程中电缆弯折过多、外力挤压损伤绝缘外皮，后期运行出现绝缘破损短路；接线施工时接线端子压接不牢，虚接导致接触电阻增大，通电后持续发热，引燃周围线缆和柜体。接地系统施工质量不符合要求，接地极埋深不足、接地连接线截面积太小、接地电阻超差等都会导致漏电、雷击等故障发生时故障电流无法流通，造成外壳带电而发生触电事故[2]。交叉作业过程中，不同专业的施工会破坏已经敷设的电气管线；施工过程中的安全防护缺失，没有做好绝缘防护，也会导致施工阶段触电伤害。

1.3 运行运维管理风险

运维管理是保证系统长期安全运行的重要环节，管理缺失会增大各种隐患。日常巡检缺乏针对性，不能及时发现设备发热、异响、绝缘老化等早期故障的征兆，设备检修维护工作不到位，停电检修没有严格执行停电、验电、接地、挂牌制度，造成人员触电事故的发生。保护定值管理混乱，继电保护装置定值随意变动，定值与现场实际负荷工况不符，发生短路故障时保护拒动或者误动，造成停电范围扩大。作业人员专业能力欠缺、安全意识薄弱，违规带电作业，不按照操作规程进行倒闸操作。运维档案管理不健全，缺少设备检修记录和隐患整改记录，不能反映设备的历史状态，隐患整改闭环不到位，同类风险反复出现。

作者简介：崔明罡（1971-），男，本科，工程师，研究方向：电气设备运行维护与管理。

1.4 人为使用与管理体系风险

管理制度缺失属于电气安全的重大风险。安全管理制度不健全，岗位安全职责不清，质量安全管理相脱离，质量控制与安全控制各自为政，造成隐患后责任不能落实。安全培训教育不到位，运维人员、现场作业人员对电气风险认识不清，不懂操作规程。缺少安全考核机制，违章作业没有相应的约束，各种习惯性违章不能得到控制。部分单位存在着重供电保障、轻安全管控的现象，设备出现小隐患就选择带病运行，把安全隐患推到后面再处理，不断地积累安全风险。

2 各类电气安全风险产生的主要成因

2.1 物资设备管控力度不足

设备采购环节只考虑采购成本，对设备安全性能指标把关不严，材料进场验收只核对合格证，忽略绝缘、阻燃等安全性能检测，不合格设备进入施工现场。设备全生命周期台账不健全，设备投运后缺乏老化跟踪，超期服役设备没有及时识别和更换，设备缺陷不能做到早发现早处置。部分采购招标压低报价，导致低价低质设备入围，抽样检测流于形式，缺少对关键元器件的第三方复检，从源头上埋下了设备安全隐患。

2.2 施工阶段质量安全协同管控缺失

施工过程质量控制和安全控制互相分离，质量检查只关注实体工艺，忽略电气安全防护相关内容；安全检查侧重作业人员现场防护，对施工工艺质量缺陷监督不足。参建各方责任划分不清，建设、施工、监理单位之间缺乏协同，交叉作业工序管控薄弱，隐蔽工程验收不到位，很多接线、接地等隐蔽部位的施工缺陷在竣工验收时无法被发现，投运后逐渐暴露为安全事故[3]。各方没有联合检查工作机制，过程资料归档不全，出现质量安全问题时很容易造成各方互相推卸责任、责任无法界定的局面。

2.3 运维管理模式存在短板

运维工作缺乏统一的流程，风险识别大多依靠人的经验，缺少系统的风险辨识制度。PDCA 闭环管理落实不到位，隐患排查、隐患整改、复查销号流程执行不到位，部分隐患排查完成后没有跟进整改。人员队伍建设滞后，新设备、新技术不断应用，但是相应的技能培训更新不及时，作业人员专业水平跟不上设备的发展。数字化应用程度低，用人工记录的方式进行运维数据的采集和分析，风险预警能力差，不能提前预测出设备的老化故障。风险评估工作开展的次数少，没有根据负荷的变化及时更新风险清单，被动处理故障的现象比较普遍。

2.4 安全管理制度建设不完善

部分单位的电气安全管理制度照搬通用模板，没有结合本项目供配电系统实际情况细化条款，制度可操作性差。岗位责任清单不清楚，发生风险之后很难追究责任。考核奖惩制度不健全，违章作业、隐患拖延整改没有相应的约束措施，制度只停留在纸上，不能落实到实际工作中。缺乏配套的监督检查细则，制度执行情况没有被纳入常态化的督查当中，安全教育、隐患治理等管理工作缺少了硬性的约束，造成了制度和现场实际管理相脱离的情况。

3 供配电系统电气安全风险防范措施

3.1 严格设备物资全流程管控

设备源头控制属于防范固有设备风险的第一道防线。设备采购阶段严格按照设计参数选型，考虑载流量、绝缘等级、阻燃性能、防护等级等安全指标，不片面压低采购成本选用劣质设备。落实材料进场双验收制度，除核对产品合格证外，还对电缆、配电柜、避雷器等主要设备做安全性能抽样检测，绝缘、阻燃等安全指标不符合要求的设备一律退场，不得使用。建立设备全生命周期台账，完整记录设备型号、投运时间、检修记录、缺陷记录，定期对设备老化情况进行评价，对超期服役、性能劣化严重的设备及时进行更换[4]。对变压器、高压开关柜、电容器等重要设备定期做绝缘试验、耐压试验，根据试验数据了解设备健康状况，将设备本体风险消灭在萌芽状态。

3.2 强化施工安装过程质量安全协同管理

借鉴协同管理思想，使施工质量与电气安全管控一起推进。图纸会审阶段由建设单位、设计单位、施工单位、监理单位参加，对接地系统、电缆选型、保护配置等电气安全有关的设计内容进行审查，提前对设计中存在的问题进行修改。施工实施阶段成立质量安全联合检查小组，质量检查和电气安全检查同时进行。电缆敷设、接地装置施工、接线作业等重要工序实行联合检查，重点对电缆绝缘保护、接线压接质量、接地电阻数值进行检查，隐蔽工程必须经过验收合格后方可进入下一道工序。严格规范接地系统施工，保证接地极埋设深度、接地导体截面符合规范，完工后实测接地电阻。落实监理旁站制度，高风险电气作业旁站监督。竣工验收阶段除了实体质量检验之外，还同步进行电气安全评价，检查接地情况、保护装置整定、绝缘测试报告等，质量验收不合格或者安全评价不达标，不得通过竣工验收，必须整改复查。完善合同条款，明确建设、施工、监理各方在电气安全方面的责任，

形成责任清单，施工全过程做好影像、文字档案留存，实现问题可追溯。

3.3 构建标准化运维检修作业体系

完善运维巡检和检修作业流程，减少运维环节造成的安全风险。制定分级巡检制度，分为一般设备和关键重要设备，确定巡检周期、巡检内容，重点检查设备有无发热、异响、渗漏、绝缘破损等情况，做好巡检记录。严格按照电气检修安全操作规程执行，做好停电、验电、挂接地线、悬挂警示牌等安全技术措施，杜绝无票作业、带电违章作业。建立隐患闭环管理机制，用PDCA循环管理思想对排查出的风险隐患进行登记造册，确定整改责任人和整改时限，整改完毕后复查销号，形成排查、整改、复查、总结的闭环[5]。规范继电保护定值管理，定值修改要经过审批程序，负荷发生改变时立刻复核保护定值。积极采用红外测温、局部放电检测等带电检测手段，在不停电的情况下发现设备内部的早期隐患。完善运维档案，完整保存试验报告、检修记录、隐患台账，用数字化手段做风险的动态追踪。

3.4 做好环境风险防控与外力破坏防护

根据环境因素所造成的电气安全风险，采取相应的防护措施。配电房、电缆沟做防水排水设计，定期清理沟内积水，加装除湿装置，控制柜内湿度；粉尘严重场所使用高防护等级的电气设备，定期清扫设备表面积尘。健全防雷体系，定期对避雷器、防雷接地装置进行检测，雷雨季节来临前做好防雷设备的试验校验工作。配电房设防鼠挡板、封堵电缆孔洞，防止小动物进入。对户外电缆线路设置明显的警示标志，与土建施工单位做好沟通交底，防止开挖施工破坏电缆；定期检查线路周围施工活动，提前做好防护。洪涝、台风等极端天气到来之前做好设备的防护工作，灾后对电气设备进行专项安全检测，确认无隐患后再恢复送电。

3.5 完善安全管理制度，提升人员综合素养

健全供配电电气安全专项管理制度，根据项目实际情况细化设备管理、施工控制、巡检检修、隐患治理、事故处理等相关条款，保证制度具有可操作性。细化各岗位电气安全责任清单，明确建设、管理、运维各岗位的安全职责，责任到人，建立责任追溯机制。完善考核奖惩制度，把电气安全工作纳入绩效考核，对违章作业、隐患拖延整改的行为进行约束。常态化地开展人员安全教育培训和技能考核，对设备操作、风险识别、应急处置等有关内容进行培训，定期开展事故案例学习，提高作业人员的风险辨识、安全操作能力。制定触电、电气火灾等事故应急预案，定期组织应急演练，发生事故时能够及时有效地进行处置，最大限度地降低事故造成的损失[6]。

3.6 运用数字化手段提升风险预警能力

推进供配电系统数字化安全控制，创建电气安全监控系统。在配电柜、变压器等重要设备上安装温度、电流、漏电检测传感器，实时获取运行数据，一旦出现过载、温度异常、漏电超标等状况就会立刻发出警报信号，从而取代了传统的依靠人工定期巡查的方式，使风险得以提前发现。创建数字化安全档案，把设备台账、试验报告、隐患记录全部录入系统，自动追踪设备老化周期、隐患整改期限，辅助管理人员做风险评价。依靠数字化平台来达成多方信息共享，建设、监理、运维单位可以同时查看风险信息，从而提高协同管理效率。

4 结束语

供配电系统电气安全风险存在于设备采购、施工安装、运维检修的全过程之中，各种风险诱因相互交错，风险防控工作还存在着很多需要不断反思改进的地方。现阶段风险识别的方式、现场协同管控的方式还有待提高。未来要不断加强全生命周期风险识别、协同管理、闭环整改体系的完善，用数字化技术来助力安全管控，补齐安全管理的短板，减少电气事故发生的概率，保证供配电系统正常运转。

参考文献：

[1] 张俊菊.基于人工智能的供配电系统高效运行技术[J].灯与照明,2026,50(04):238-240.

[2] 肖钰.数据中心供配电系统常见故障及运维防护措施[J].现代制造技术与装备,2026,62(07):167-169.

[3] 孔先建.电气工程施工阶段监理要点与安全风险防控措施研究[C]// 北京市朝阳区国际绿色经济协会.新征程·新范式—共筑绿色经济新生态：低碳建筑工程与技术管理会议文集(2026年上),2026.

[4] 林康.提升电气工程安全管理效能的制度与实践研究[C]// 中国企业评价协会科研成果出版与交流专业委员会.“首届新技术应用与企业发展”学术交流会论文集,2026.

[5] 魏良星,王慧明,段伟明.智能配电系统安全风险的识别与控制策略研究[J].智能建筑电气技术,2025,19(03):48-52.

[6] 雷小军.低压电气配电系统安全运行及维护策略研究[J].产品可靠性报告,2025(04):116-117.

柔性直流换流站阀冷系统运行特性分析及优化控制

郭安琪，杜　杨，饶友元，周晓炜

（国网浙江省电力有限公司舟山供电公司，浙江 舟山 316000）

摘　要　柔性直流换流站阀冷系统是保障换流阀可靠运行的核心辅助系统，其设计优化与控制策略迭代对提升输电工程经济性与稳定性具有关键作用。本文系统梳理阀冷系统的基本定义与功能定位，深入剖析其工作原理、热流特性、典型工况参数特征，明确环境温度与负载波动对系统运行的影响规律。围绕主循环泵变频调节、冷却塔强化换热、水质在线监控等关键技术环节，结合两类典型故障案例深挖失效机理与处置路径，提出自适应变频优化与智能算法节能两类控制方案，仿真验证结果显示其可有效提升系统能效与工况适配能力，以期为阀冷系统结构优化与高效运维提供参考。

关键词　柔性直流换流站；阀冷系统；主循环泵变频调节技术；冷却塔；换热器

中图分类号：TM46　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.041

0　引言

随着柔性直流工程在新能源并网、海岛供电与城市电网互联场景中的大规模落地，换流阀热管理的可靠性与能效水平直接影响输电通道整体运行表现。当前，多数在运阀冷系统沿用传统定速控制模式，在轻负荷、低温等常规工况下普遍存在冷却能力冗余、能耗偏高的问题，已难以适配新型电力系统对辅助系统的精细化运行要求。本文从阀冷系统运行特性与典型故障机理切入，结合现场运维经验提出两类优化控制方案，可为换流站阀冷系统高效运维提供实用参考。

1　柔性直流换流站阀冷系统的定义

柔性直流输电是新一代直流输电技术的核心，换流站是实现电能灵活调控与高效转换的关键节点。换流阀作为核心功率设备，通断过程中会产生大量损耗并转化为热量，若热量无法及时排出，将导致 IGBT 等核心部件温度骤升，引发性能衰减、老化加速甚至永久损坏，直接威胁输电系统安全。柔性直流换流站阀冷系统作为独立密闭循环水冷系统，通过强迫循环将去离子水或水－乙二醇混合液送入换流阀内部，快速带走余热并将热量转移至外部环境，使阀塔核心部件始终维持在安全温度区间，是保障换流阀稳定运行的核心辅助系统，直接关系到整个工程的运行效率、经济性与抗风险能力。

2　柔性直流换流站阀冷系统运行特性分析

2.1　阀冷系统工作原理与热力流体特性

柔性直流换流站阀冷系统主要使用密封式内部循环水冷方法。其工作原理可表述为：主循环泵驱动冷却液体流动，流经换流阀时将功率器件产生的热量带走，使液体温度升高，成为高温工作介质。高温工作液体接着流入板式换热器，跟第二路冷却水发生间接热交换，将热量传递给第二路冷却水带走。第二路冷却水带走热量之后，温度降低下来，重新回到主循环泵的进水口，形成完整的循环过程[1]。整个系统的热力流体特点表现为一种强制对流传热的过程，其中最关键的操作数据包括工作液体的流量、进出换热器时的温度差以及整个系统的压力损失，这些数据都直接关系到换热效果的好坏和能耗水平的高低。

2.2　阀冷系统典型运行工况与参数特性

阀冷系统按照换流阀的运行状态，对应多类典型运行工况，主要包括满负荷工况、轻负荷工况、超负荷工况以及启动和停止的过程。满负荷工况下，系统供应的水量、进出阀门内部的水温差、全系统压力等重要指标均保持在设计范围内，能让冷却效果与换流阀热负荷实现精准匹配[2]。轻负荷工况下，换流阀散发出来的热量变少，系统进出水的温度差变小，但是为了满足最低流量的要求，主循环泵速运行，导致系

作者简介：郭安琪（1994-），女，硕士研究生，工程师，研究方向：柔性直流换流站运维。

统整体能效水平偏低，存在不必要的泵组功耗浪费。超负荷或者临时突发负载的工况下，换流阀热负荷突然大幅增加，水温快速升高，对系统能否迅速适应变化和短时间内提供充足冷却能力提出了更高的标准。

2.3 环境温度与负荷变化对运行特性的影响

环境温度与换流阀运行负载是决定阀冷系统运行特性的两类核心外部边界条件。环境温度直接决定二次侧冷却水的理论冷却极限，进而对一次侧循环介质的最低稳态冷却温度形成刚性约束。夏季极端高温工况下，换热器对数平均换热温差显著收窄，为维持同等换热能力，需提升冷却介质流量或冷却塔风机转速，最终导致冷却塔单元及全系统整体能耗抬升[3]。换流阀运行负载直接决定阀冷系统的总散热负荷，负载升高时一次侧循环介质的温升速率同步加快，若维持原有循环流量不变，阀冷系统出阀水温将持续攀升；为保障换流阀核心器件温度处于安全阈值范围内，通常需上调主循环泵转速以提升系统循环流量，该操作将直接增大主循环泵的轴功率与运行能耗。

3 柔性直流换流站阀冷系统关键技术

3.1 主循环泵变频调节技术

主循环泵为阀冷系统动力核心，其能耗占比于系统总能耗较高。借助引入变频调节技术，可以根据换流阀实际热负荷和环境温度实时调控泵的转速与流量，达成按需供冷。这不但避免了常规定速泵在低负荷下节流运行造成的能量浪费，明显减少了系统运行能耗，并且能平稳启动，降低水锤冲击，延缓设备寿命，是实现系统节能优化与稳定运行的关键手段。

3.2 冷却塔与换热器强化换热技术

冷却塔和换热器属于阀冷系统热量散发的主要设备。为提升换热效能，需强化系统整体传热效率，这样就能更好地应对各种恶劣的工作环境或者节约能源的需求。可采用的技术路径主要包括：挑选高性能的换热管形状设计和表面处理工艺，增加整体换热面积，同时让空气流动更加顺畅[4]；改进冷却塔内部的填充材料结构和喷淋液体的分布方式，让空气和水之间的热量交换变得更加理想。另外，还可以安装防止脏东西堆积的涂层或者定期清理的装置，确保换热效果一直保持稳定可靠。

3.3 水处理与水质在线监测技术

柔性直流换流站阀冷系统内的循环冷却水水质会直接影响到换热器的工作效率和管道及阀门的使用寿命。水处理技术会向水中加入缓蚀剂、阻垢剂和生物抑制剂等多种化学药剂，同时使用过滤设备来阻止腐蚀的发生、防止结垢的形成以及抑制微生物的繁殖。水质在线监测技术能够随时检查水的电导率、pH值以及各种离子的浓度等关键数据，这样就能做到药剂投加的精准控制，并且提前发现水质异常问题。

3.4 阀冷系统控制保护与状态监测技术

该项技术成为保障阀冷系统正常运转的重要部分。控制保护系统会持续监控压力、温度、流量、水位等重要数据，利用逻辑判断完成主备泵切换、冷却塔风机启动停止、阀门联锁等一系列自动化操作，并且在数值超出正常范围时立即发出不同级别的警报或者直接停止整个系统的运行[5]。状态监测技术采用振动分析、局部放电检测、红外测温等多种方法，针对水泵、电机、阀门等关键部件进行全面检查和早期故障诊断，帮助维修工作从事后处理转变为提前预防的管理方式。

4 柔性直流换流站阀冷系统典型故障与案例分析

4.1 阀冷系统常见故障类型及故障机理

柔性直流换流站阀冷系统长期运行中，受电气、机械、化学与环境多因素耦合作用，故障可划分为机械电气类与热力水质类两类。机械电气故障涵盖主循环泵及变频器异常、管道阀门渗漏堵塞、传感与执行机构失灵等，诱因多为设备制造缺陷、长期机械磨损、元器件老化、电气干扰或保护误动作。热力水质故障表现为冷却塔散热衰减、换热器结垢堵塞、水质不达标引发腐蚀或电导率越限，根源为换热面污垢堆积导致热阻上升，或水质管控失当引发化学腐蚀与沉积物聚集，最终造成系统换热能力下降，直接威胁换流阀温度运行稳定性[6]。

4.2 案例分析：主循环泵变频器故障分析与处理

某柔性直流工程阀冷系统主循环泵运行过程中突发停运并触发系统级告警，站级监控后台精准上报变频器过流故障事件。现场排查确认，变频器输出电流阶跃式突增触发硬件过流保护动作，故障泵停运前已持续性输出异常低频振动异响。

现场处置严格执行柔性直流站阀冷系统一级故障“先通后复”标准化抢修管控流程：第一时间联锁投运备用主循环泵，快速重建阀冷系统额定流量闭式循环，第一时间恢复换流阀全工况连续散热能力，从根源上规避换流阀因超温触发降额运行或紧急停运的主系统风险，保障直流输电通道不中断。在确认主系统运行完全稳定、备用泵持续带载无异常的前提下，履行工作票审批流程后将故障泵停运隔离，开展离线拆解检修作业，更换磨损失效轴承，同步完成阀冷闭式循环全回路杂质冲洗。硬件消缺完成后，在设备额定

运行边界内优化变频器保护参数配置，合理上调过流保护整定值并延长动作延时，从控制逻辑层面规避短时负载波动引发的保护误动作。经带载全工况校验合格后将消缺后的主泵重新切回热备用状态，故障泵复启后运行工况平稳，全流程各项运行参数均处于设计允许区间，充分验证本次故障处置与优化措施的工程有效性。

4.3 案例分析二：冷却塔散热能力下降故障分析与处理

某换流站运行人员察觉，在环境温度和换流阀负荷接近的条件下，阀冷系统进出水温差比设计值显著变小，冷却塔出口水温一直偏高。性能测试显示，冷却塔的逼近度（出水温度与湿球温度之差）明显增加，散热能力不足。原因分析归结为两个方面：其一，冷却塔填料因为长期使用导致老化、结垢以及部分坍塌，引起气水接触面积下降，换热效率下降；其二，喷淋系统部分喷嘴堵塞，引发了水分布不均，进一步恶化了换热效果。借助计划停运窗口，对冷却塔填料实施了彻底更换，并且完全清理了喷淋管路与喷嘴。改进了水处理加药方案，加大了阻垢缓蚀药剂投放。改造之后，冷却塔散热性能回升到设计水平，系统温升恢复正常，有力保证了换流阀的运行安全。

5 柔性直流换流站阀冷系统优化控制策略

5.1 优化控制目标与总体技术路线

柔性直流换流站阀冷系统的改进控制目的就是同时完成节省能源并且提高效率以及保证运行安全并且保持平稳这两个最重要的目标。整个技术路线按照从基础研究到建立模型，再到生成智能决策，最后进行效果验证这个顺序来实施。详细做法是从系统实际运行规律的深入分析入手，在保证换流阀所有重要部位温度不会超出允许范围的前提下，依靠实时改变主循环泵的工作转速、合理调节冷却塔风扇的工作状态以及改进换热器的控制方式，尽量把整个系统的总耗电量降下来。技术路线把依靠物理化学原理建立自动调整方法和依靠大量数据训练出来的智能计算方法相结合，形成了分级分步骤的改进控制结构，为后续细化各类优化控制措施提供清晰的顶层框架支撑。

5.2 基于智能算法的阀冷系统节能优化控制

为了深入发掘节能空间，建议整合智能算法的系统级节能优化控制。该控制把系统总功耗最低化设定为目标函数，把各设备运作限制以及安全限值当作约束条件。运用深度确定性策略梯度之类的强化学习算法或者改进的粒子群优化算法，针对主循环泵、冷却塔风机、喷淋泵等设备的联合运转实施实时寻优。智能控制器借助不断学习过去运行数据和环境互动经验，可以自动探索各种工作条件下全局或近似全局最优设备组合的运转方案，达成从单独设备优化到多设备联合优化的飞跃。

5.3 优化控制策略的仿真验证与效果分析

为检验所提出的阀冷系统能效优化策略实际有效性，研究人员依托 MATLAB 和 Simulink 仿真框架，结合专业热流仿真工具，构建了精细化阀冷系统仿真模型。该模型覆盖换流站所在地全年典型的天气状况，以及换流阀从轻负荷到满负荷的多种运行状态。经过多场景比较和研究发现，根据实际工作环境自动调整频率的方法，在全年典型运行日可明显减少主泵的能源消耗。结果表明，改进后的方案能够在保障冷却系统安全运行的基础上大幅提升系统的能源利用效率和经济效益。

6 结束语

本文聚焦柔性直流换流站阀冷系统运行特性与控制优化，梳理其工作原理、热流耦合特征与典型工况规律，明确环境温度与负载波动的作用机制，为控制策略优化提供理论支撑。研究结合现场故障案例深挖失效机理与处置路径，提出自适应变频与智能算法节能两类控制方案，仿真验证表明其可在保障运行可靠性的前提下，有效提升系统能效与复杂工况适配能力，可为阀冷系统优化设计与智能运维提供参考。

参考文献：

[1] 齐荣臻，魏晓斌，周德才，等．高海拔地区 ±800 kV 柔性直流换流站紧凑型布置研究 [J]. 电力勘测设计，2026(05):1-7,86.

[2] 程建伟，吴泽华，黄克捷，等．柔性直流换流站阀厅典型金具电场分布仿真分析与优化研究 [J]. 电机与控制学报，2025,29(12):171-181.

[3] 王凤云，陈寅，姜文．海上柔性直流换流站抗震性能分析 [J]. 电力勘测设计，2025(10):20-25,52.

[4] 李元昊，陈卓，郝正航，等．基于 UREP 的大规模柔性直流换流站实时仿真建模 [J]. 供用电，2025,42(08):71-79.

[5] 尹永利，张利军，叶可，等．±10kV 柔性直流换流站换流阀冷却水自动监测及补充装置的研制 [J]. 电气技术与经济，2025(05):173-177.

[6] 周啸，阳岳希，寇龙泽，等．模块化多电平柔性直流换流器高频振荡抑制策略与参数优化设计 [J]. 中国电力，2025,58(01):50-60.

复杂地形条件下互通立交线形优化与土石方平衡算法研究

裘鹏立

（浙江数智交院科技股份有限公司，浙江 杭州 310012）

摘 要 本研究针对复杂山区互通立交线形和土石方高度耦合问题，提出地形、线形、工程量、调配、施工闭环协同框架。线形优化以运行连续性、视距、平纵组合和构造物风险为约束，土石方平衡在料源、填筑区、借弃料区和运输网络下统筹料类匹配、运距、时序和跨标段调配。建立可行域生成、最小费用流粗解、混合整数非线性改进和安全仿真校验的分层算法。结果表明，山区互通应依靠构型选取、纵坡把控和集约化调配来达成安全、工程量和环境扰动的综合协调。

关键词 复杂地形；互通立交；线形优化；土石方平衡

中图分类号：U412.35+2 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.042

0 引言

复杂山区互通立交属于地形、构造物、交通流以及施工组织高度耦合的工程单元，沟谷高差、横向陡坡和生态敏感性使得线形和土石方问题互相制约。已有研究大多集中于几何线形、土石方调配或者施工时序等单个方面，不能解决填挖、桥梁、填料和运输之间的整体协调问题[1]。基于此，本研究以纵坡受控、走廊狭窄、填挖高差大的山区互通为研究对象，提出了“安全—工程量—调配—时序”闭环协同的方法框架，为方案决策和数字化设计提供参考。

1 复杂地形条件下的工程约束

1.1 空间冲突构成山区互通的主要约束

山区互通的典型地形有V形或者U形沟谷、横向陡坡、山脊鞍部、冲沟台地。暴雨汇流、崩塌、滑坡、岩堆、软弱夹层还会限制墩台、边坡和弃渣场的位置。与平原枢纽相比，山区互通不能只用占地规模或者孤立的几何指标来判断方案的好坏，桥墩基础处在陡坡稳定影响范围内，高填方会侵占沟谷行洪空间，深路堑会切断坡体地下水排泄通道。如果前期没有发现这些空间冲突，那么后续仅仅依靠纵坡微调或者土方再平衡来改善方案是很难达到根本目的的。因此，在复杂的地形条件下，首先应该找出不能让位的红线约束，然后在位置、构造物和工程量之间做出有代价的选择。地形模型除了高程之外还要叠加地质风险、汇水路径、用地边界、生态敏感区、既有设施和施工可达性等约束图层，从而形成一个面向方案搜索的约束图层。只有把不可建区、不适宜填方区、桥位可行带和运输瓶颈前置表达出来，算法搜索才不会生成大量无法实施的“理论最优”方案[2]。

1.2 互通线形必须服从运行连续性

互通线形优化目标要达到半径、纵坡、超高、视距等规范要求，同时保证分流、减速、合流、加速等运行连续性。匝道曲线、纵坡、超高、视距一起影响，如果分流鼻端前方有纵坡或者平曲线突变，驾驶人速度适应的过程会被压缩，几何合规并不一定意味着运行安全。山区下这个问题更加明显。连续曲线、紧致交织、桥隧衔接都会加大驾驶负荷，匝道出口前的纵坡突变也会引起速度偏差。因此线形评价要兼顾速度协调性、视距满足率、横向力系数、平纵组合以及交通冲突。

1.3 高填深挖是土石方问题的方案分岔点

高填方、深路堑都会加大边坡防护、排水、桥隧界面、施工便道和填料利用的复杂性。路基设计不得出现高填深挖情况；填方高度或者挖方深度达到某一个值的时候，应该和桥梁、隧道等方案一起综合考虑。该原则并不是简单地用构造物代替路基，而是在纵断面问题上不能误以为是边坡高度问题。互通区高填深挖风险可以通过四个途径放大，即增大边坡防护和排

作者简介：裘鹏立（1994-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：路线互通。

水工程的规模，形成桥隧和路基之间不均匀沉降界面，施工便道不足导致运输路线绕行，表土、普通土、软岩和硬岩的分类利用更难。

2 互通立交线形优化方法

2.1 构型选择决定方案的整体边界

喇叭形、苜蓿叶形、菱形、T 形以及它们的变体均有着各自的应用场合。在地形狭窄、转向交通集中的节点上可以使用变异构型压缩占地，在跨沟条件受限的地方可以采用桥隧组合减少横坡填挖，在主线间距受控的地方要综合考虑分层交叉、半直连匝道和变速车道布置的关系。构型选择实际上就决定着匝道的长度、桥梁的大小、填挖量以及施工组织的大致范围，应该先于局部平纵参数的改善。已有山区互通的案例显示，采用立体叠合、曲线分级、桥隧协同等集约化的手段可以改善线形、工程规模、环境影响以及安全性等各方面的情况[3]。

2.2 分层优化兼顾工程逻辑与算法自由度

山区互通线形空间复杂，直接进行全局连续搜索很容易产生很多不符合桥梁、边坡、排水、用地等约束条件的方案。本研究使用了三阶段的方法，即生成、筛选、改进，根据地形、地质和红线的限制来产生候选构型以及可行走的廊道；在既定拓扑中对平曲线、竖曲线、横断面和边坡台阶进行优化；最后用离散智能算法调整关键控制点、跨线方式和桥梁孔跨[4]。该方法可以避免遗传算法在巨大的搜索空间里产生很多不切实际的方案，但是又保留了它对于非凸、多峰问题的适应性，三个阶段的划分、主要方法以及关键约束见表 1。

表 1 互通立交线形分层优化方法

阶段	主要方法	核心作用	关键约束
初始可行域生成	地形栅格、约束图与工程规则	将不可建区、不良地质区、用地红线和桥位可行带转化为搜索边界	净空、排水、构造物边界、用地红线
连续变量优化	梯度或序列二次规划	快速确定平曲线主点、竖曲线变坡点和纵坡	平纵指标、坡向、视距、工程量
离散变量改进	遗传算法或变邻域搜索	调整构型、跨线方式、桥梁孔跨和填料路径	工程逻辑、施工进度、料类与时序

第一层要先控制总体构型、主线节点、跨线桥位置和填挖分区，第二层在已有的拓扑基础上优化匝道的平纵组合，第三层再对局部控制点做精细化调整。约束条件除了平纵指标外，还要包含净空、边坡稳定、排水坡向、填料适用性、施工便道可达性以及生态红线等。如果只把约束当作罚函数后置处理，那么算法就会把高风险边坡或者不可达料场误判成低成本方案。所以工程规则要真正进入初始可行域。

2.3 安全校验应回到运行速度与驾驶负荷

线形优化输出不能直接等于施工图。每个候选方案都要进行运行速度预测、视距检验、横向力系数校核、交通仿真；对于分流前信息识别、合流加减速、连续曲线和桥隧过渡等高风险场景，需要接入驾驶模拟。安全评价的价值就在于发现几何指标以外的隐性危险，防止出现“每个单元都符合要求，但组合起来就不连续”的情况。这里不能用单一的造价或者单行速度来作为最终评价指标，应该采用多目标评价思路，即安全目标为运行速度突变最小化、视距满足率最大化，工程目标为土石方、桥梁、隧道、边坡防护、调运成本，生态目标为高填深挖、敏感区扰动、弃渣、借方占地。三类目标之间经常出现冲突，必须经由帕累托排序才能找到综合最优的方案，之后再依照投资边界、风险偏好的地方状况做出最后决定。

3 土石方平衡算法设计

3.1 土石方平衡应转化为受约束的调配网络

土石方平衡的本质不是找到静态的填挖相等，而是在网络调运的情况下实现可用材料的最大化。将互通及相邻标段的挖方节点、填方节点、中转料场、借料场、弃料场和可行运输边等离散出来。决策内容为不同的料类、不同的时间窗从源点到终点的体积，成本包含装卸、运距、道路使用、弃渣处置、借方采购、工期延误等，并且要考虑到土石类别转换、最大运距、边坡分层、桥隧界面、便道承载力和弃渣场容量等约束[5]。

传统的调配方法是先横向平衡，后纵向调配，并且还要考虑桥涵、陡坡和大沟对运输可行性的限制。在互通区由于桥墩、深路堑、匝道环抱，横向调运一般会穿越边坡、构造物影响区，二维、三维路径的重要性明显增大。因此不能把复杂的立交看作是一条线路上桩号的简单调配问题。对山区分区明显且需进行跨区运输的项目，应先按自然台地、沟谷、施工便道等划分出子区，再建立子区间的跨区运输关系。

3.2 最小费用流提供经济基准，但不能替代工程判断

当忽略料类、时间窗、弃料优先级等复杂约束的时候，单料土石方调配可以看作是满足节点供需平衡、边容量限制的最小费用流问题。该模型计算稳定，可以用来作为基准层，快速判断某一个纵断面、横断面方案能否用较低的运输成本完成调配。但是它的边界也非常清晰，如果直接用最小费用流的结果作为施工方案，就会得到跨河绕行、先弃后借、软土填入路床等纸面上的最优路径。因此，最小费用流应该产生初始可行流，然后用工程规则进行修正。特别是将料类兼容性、压实质量、含水率处理、施工窗口、弃渣容量等作为硬约束，把不合理的料流、不可行的路径直接排除掉[6]。

3.3 料类、时序和质量共同决定平衡的可实施性

在实际工程中，开挖料的利用价值不仅仅只看数量，还要考虑它与填筑位置、层位、质量要求是否相适应。普通土、软岩、硬岩以及特殊土应按类别开挖、分类堆放、分类利用，路床、路堤、边坡平台、反滤层和临时工程对填料要求也不相同。把料类差别当作单个的“土石方体积”，即便调配成本低，也会引发质量不合格或者后期沉降隐患。

施工时序也不能忽视。填方高峰和挖方高峰错位的时候，即使总体挖方能满足填方需求，也需要设置中转料场或者借用外部料源；桥隧界面、雨季施工、弃渣场库容、便道通行能力都会影响调配的可行性。因此，本文使用分层求解的方法，第一层用总费用、弃方、环境扰动加权最小化为目标，得到初始调配方案；第二层检验料类兼容、压实质量、施工窗口、弃渣容量；第三层将不可行路径和不合格料流置零，对纵坡、通道、构造物方案进行反馈修正。

4 线形与土石方协同优化框架

4.1 “并行搜索—双向校验”优于完全串行设计

复杂山区互通立交设计，抛弃传统的串行设计模式和全变量无差别耦合的方式，用并行搜索、双向校验相结合的思路进行协同优化。依靠高精度地形、地质、用地和施工组织等基础数据创建出各种各样的数字约束图层，从而得到多种类型的互通候选构型。利用线形优化和土石方调配两个模块并行计算，同时对方案的行车安全指标、工程量指标进行校核，提前保存可行构型。该模式可以很好地避免串行设计过早锁定局部最优解、全局适配性差的问题，为后面方案收敛优化打下基础，兼顾算法搜索效率和工程方案的合理性。

4.2 工程量映射与约束反馈驱动方案收敛

本文主要研究工程量动态映射和双向约束反馈，从而达到线形和土石方方案的迭代收敛。将互通匝道、跨线桥等构造物断面转为填挖工程量需求，结合高填深挖、取弃土场、桥隧替换工程，实时更新土方供需和运输边界。对线形合规但是土石方调配成本高、料源时序不匹配的问题，创建惩罚反馈机制，反向微调纵坡、通道、构造物的设计方案。同时，打破单一互通内部平衡的局限，依靠跨标段土石方调配模式，把隧道洞渣、区间填方等可以利用的资源盘活起来，在合规的前提下达到工程量和调配方案的动态最优适配[7]。

4.3 工程否决机制保障算法落地

为了克服算法理论最优方案与工程实际相脱离的情况，创建七步闭环优化流程，并且实行刚性的工程否决制度。全过程边坡稳定、排水系统、弃渣场库容、填料质量、施工仿真等各方面进行多方面校验，把视距不足的、地质灾害风险超标的、料源不合格的、施工路径无法闭合的设为否决项。算法只是挑选出效率高的优化方案，不会削减工程的安全界限。

5 结束语

针对复杂山区互通立交线形和土石方相互脱节的问题，本研究建立了一个以地形、线形、工程量、调配、施工为协同优化的框架。研究结果表明，互通线形优化要以运行连续性校验为主，把速度协调性、视距和驾驶负荷当作构型否决条件；土石方平衡要依照料类、时间窗、网络容量综合安排，用最小费用流为基础，再联系施工次序、填料品质和跨标段协作加以修正。构型集约化和调配协同，在保证安全的基础上可以兼顾工程规模、施工可行性以及环境扰动。研究成果能为山区互通方案选取、数字化设计提供支撑。

参考文献：

[1] 桂兆可，周娟，张健. 复杂地形条件下互通立交设计关键技术与安全性评价 [J]. 公路，2026,71(06):353-357.
[2] 范佳. 山区不良地形条件下互通立交方案研究 [J]. 城市道桥与防洪，2026(05):170-174.
[3] 张驰，刘锴，王世法，等. 高速公路互通式立体交叉出入口安全性研究综述 [J]. 交通信息与安全，2023,41(02):1-17.
[4] 钟烈. 复杂地形地质条件下互通式立交方案设计与造价控制 [J]. 交通世界，2023(Z1):214-216.
[5] 丁虎成. 互通立交平面线形自动化设计研究 [D]. 南京：东南大学，2023.
[6] 熊丽. 山区高速公路互通立交与服务区合并设置方案及控制指标 [J]. 工程技术研究，2026,11(02):190-192.
[7] 陈泽，刘建国，王晓玉，等. 高速公路互通立交与服务区合建交通标志设计 [J]. 山东交通科技，2024(01):62-64.