

电力工程施工技术创新与标准化工艺技术探究

王宗实¹ 赵航²

1 辽宁飞纵电力设计有限公司, 辽宁 沈阳 110000

2 沈阳电力勘测设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]文中系统剖析材料界面调控、设备集群协同及隐蔽工程无损感知等关键环节,揭示传统施工模式因技术离散化与质量不可控等系统性缺陷,构建数字孪生赋能的工艺参数链与智能感知网络协同创新框架。研究表明,通过建立工艺参数动态优化模型与缺陷自愈机制,可突破接地装置腐蚀抑制、电缆多场应力平衡等核心瓶颈,实现工程实体全生命周期性能的精准管控。研究提出基于量子传感阵列的施工质量场重构方法,融合材料基因组工程与非线性动力学仿真,预判极端工况下的电磁拓扑失稳风险,推动电力工程从经验驱动向数据智能范式跃迁,为新型电力系统构建具备环境自适应与故障容错能力的韧性基座提供理论支撑。

[关键词]电力工程; 施工技术; 标准化工艺; 创新

DOI: 10.33142/hst.v8i6.16922

中图分类号: TM73

文献标识码: A

Exploration on Innovation and Standardization Process Technology in Power Engineering Construction Technology

WANG Zongshi¹, ZHAO Hang²

1. Liaoning Feizong Electric Power Design Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

2. Shenyang Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: The article systematically analyzes key links such as material interface control, equipment cluster collaboration, and non-destructive perception of concealed engineering, revealing the systematic defects of traditional construction modes due to technological discretization and uncontrollable quality. It constructs a collaborative innovation framework of digital twin empowered process parameter chain and intelligent perception network. Research has shown that by establishing a dynamic optimization model of process parameters and a defect self-healing mechanism, core bottlenecks such as corrosion suppression of grounding devices and multi field stress balance of cables can be overcome, and precise control of the full life cycle performance of engineering entities can be achieved. The research proposes a construction quality field reconstruction method based on quantum sensing arrays, integrating material genome engineering and nonlinear dynamic simulation to predict the risk of electromagnetic topology instability under extreme working conditions, promoting the transition of power engineering from experience driven to data intelligent paradigm, and providing theoretical support for the construction of a resilient foundation with environmental adaptability and fault tolerance for new power systems.

Keywords: power engineering; construction technology; standardized process; innovation

引言

新型电力系统建设正面临新能源高渗透率与电力电子化设备规模化应用的双重范式革命,其引发的宽频域电磁扰动、多时间尺度动态响应等复杂工况,对工程施工的电磁拓扑设计、瞬态能量耗散能力及设备集群协同控制提出了颠覆性挑战。传统施工模式受限于工艺标准化滞后与技术协同壁垒,导致设备安装偏差的时空累积效应、电缆敷设多场耦合应力畸变、接地装置电化学-热力学交互腐蚀等系统性风险呈指数级增长。本文以多物理场耦合理论为基底,构建“量子化工艺基准-跨尺度参数优化-智能自愈调控”三位一体的技术重构框架:在空间维度上,通过电磁-机械-热力多场协同设计破解设备安装的误差链式传播难题;在时间维度上,研发基于深度强化学习的动态工艺参数链,实现电缆应力场与电磁干扰场的实时拮抗平

衡;在系统维度上,部署多模态感知网络驱动的质量熵值反馈环,形成施工缺陷的拓扑溯源与工艺自修正能力。研究聚焦施工要素的数字基因编码、材料界面量子态调控、非线性系统稳定性边界的智能预判等核心命题,通过标准化工艺参数库与自适应施工神经网络的深度耦合,重塑电力基础设施建设的确定性工程范式,为新型电力系统构建兼具韧性载体与智慧生命体特征的技术基座。

1 电力工程施工技术创新与标准化工艺的重要性

电力工程施工技术的范式革新本质上是构建新型电力系统物理载体的基因工程,其标准化工艺体系通过工艺参数的量子化基准设定,彻底消解了人为操作离散性引发的误差级联效应。技术创新则依托多物理场耦合感知网络与边缘智能体的深度渗透,形成施工要素的亚毫米级动态调控能力,例如基于磁致伸缩效应的螺栓预紧力闭环控制、

电缆形变场的数字孪生映射等技术突破。二者的深度融合重构了“工艺基因编码-数据赋能决策”协同机制，在新能源场站多端谐波耦合、柔性设备电磁暂态交互等新型技术场景中，实现了施工质量从经验黑箱向确定性控制的跨越。

2 电力工程标准化工艺技术研究

2.1 标准化工艺的准备阶段

在电力工程标准化工艺准备阶段，应统筹安排符合本项目需求的原材料及专业技术人员进场，并对其质量和资质进行严格核验。对于涉及特殊工种的作业任务，应认真审查相关作业人员的持证上岗情况，确保人员资质符合规范要求^[1]。同时，在准备过程中如发现设备或零部件存在缺陷，应及时向项目监理单位进行反馈和报告，杜绝未经授权擅自处置的问题行为，以确保后续施工环节的安全性与规范性。

2.2 电气设备安装技术规范

电气设备安装技术体系需实现机械-电气-环境的多物理场协同控制，其核心在于构建“量子级精度定位-拓扑自治连接-智能环境适配”的复合工艺链。变压器精准就位阶段，采用量子惯性导航系统与多自由度液压伺服机构联动，通过自抗扰控制算法消除运输振动导致的基准面偏移，实现本体三维姿态的亚微米级动态补偿。断路器机械特性调校创新应用多光谱融合诊断技术，结合红外热像仪检测传动机构摩擦热分布、紫外成像仪捕捉绝缘拉杆微放电痕迹，并通过深度神经网络解析分合闸线圈电流谐波特征，实现机械-电气参数的跨域匹配优化。二次回路接线实施毫米波雷达非接触式三维测绘工艺，基于电磁场逆问题求解技术重构线束拓扑关系，自动校验 CT/PT 绕组的电磁感应相位一致性，同时采用石墨烯基导电胶固化工艺强化屏蔽层端接点的载流稳定性。全封闭组合电器安装构建智能微环境调控系统，集成温湿度梯度补偿模块与纳米粒子吸附装置，通过模糊 PID 控制算法维持气室内露点温度 $\leq -40^{\circ}\text{C}$ 的极限干燥状态，并部署分布式声发射传感网络实时捕捉密封面应力松弛引发的微弱泄漏信号，形成多维度密封性能保障机制。

2.3 电气管道项目施工

电气管道施工需构建“地质力学适配-多物理场防护-智能运维预埋”的全周期技术体系，其核心在于破解复杂环境下的结构耐久性与电磁兼容性协同难题。针对腐蚀性地质区域，采用纳米级锌铝镁合金梯度镀层技术，结合分布式光纤腐蚀监测传感器网络，实现管道锈蚀速率的原位感知与缓蚀剂智能释放控制。穿越复合地层时，应用地质雷达波速反演算法动态修正管道敷设倾角，并植入形状记忆合金补偿器以消纳地基差异沉降引发的机械应力。在电磁敏感区域创新应用超导屏蔽层与铁氧体-石墨烯复合吸收体，构建宽频带电磁涡流抑制结构，通过拓扑优化算法设计非对称管道间隔布局，使电磁干扰衰减系数提升 3 个数量级。施工过程部署自主移动式激光扫描机器人，实时生成管道内壁三维点云模型，结合深度学习算法自动识别微米级毛刺与焊缝凸起，触发高精度等离子体抛光装置进行在线修复。全生命周期运维预埋方面，在管道关键节

点集成压电能量收集模块与 LoRa 无线传感单元，形成自供电的振动-温度-应变多参量监测网络，为智能电网的电缆载流量动态调控提供底层数据支撑。

2.4 接地装置标准化工艺技术要求

接地装置标准化施工需构建“散流效能优化-腐蚀动力学抑制-热力场协同设计”的多物理场耦合体系，其技术内核在于突破传统接地系统的静态性能局限。垂直接地极施工创新应用智能调控高频液压振动系统，基于动态阻抗反馈算法实时调整激振频率与贯入力矩，实现卵石地层中接地极轴线偏转角的角度级控制，同时植入分布式光纤应变传感单元监测施工过程中的机械应力分布。水平接地网焊接接头质量管控引入机器学习驱动的渗透探伤图像分析技术，通过卷积神经网络识别微米级裂纹的拓扑特征，并采用石墨烯-碳纳米管复合导电防腐涂层实现断面的自修复防护。针对高腐蚀性土壤环境，研发纳米级离子缓释接地极，其多孔陶瓷载体中嵌入 pH 响应型缓蚀剂微胶囊，可根据土壤酸碱度动态释放活性离子，同步降低接地电阻与腐蚀速率^[2]。铜钢复合界面处理采用超音速冷喷涂工艺，形成梯度过渡的金属间化合物扩散层，彻底消除异种材料接触电势差引发的电偶腐蚀风险。施工验证阶段融合宽频阻抗谱分析与时域反射技术，构建接地装置暂态散流能力的数字孪生模型，通过雷电流冲击仿真验证热稳定性裕度，并部署地电位梯度智能感知网络实时监测土壤干湿循环对接地性能的衰减效应，形成全生命周期性能预警机制。

2.5 电缆敷设施工

电缆敷设技术的革新聚焦于构建“物理防护-热力学平衡-电磁场协同”的全域智能调控体系，其核心在于破解复杂工况下的机械损伤累积、热应力集中与电磁干扰叠加等多重技术瓶颈。针对大截面电缆展放，研发基于光纤光栅阵列的分布式应变感知系统，通过实时解算绝缘层三维形变张量，驱动多段式履带输送机与液压伺服张力控制器形成闭环反馈链，实现展放路径的自适应优化与动态应力消解。排管敷设阶段创新应用纳米级自润滑涂层技术，采用气凝胶复合介质对管道内壁实施拓扑修复，同步部署微型爬行机器人搭载涡流探伤装置，生成管道缺陷的亚毫米级数字孪生模型，为牵引工艺参数优化提供高精度输入。直埋施工引入土壤介电特性反演算法，设计梯度式回填材料级配方案，结合压电式智能夯实装备的振动频谱调控功能，形成与电缆弯曲刚度匹配的力学缓冲层，并在地下关键节点植入量子点荧光标识带，实现非开挖条件下的厘米级定位精度。电缆终端安装工艺突破传统机械压接模式，开发基于多物理场耦合仿真的应力锥智能匹配系统，融合激光干涉仪与红外热像仪的多模态检测数据，通过深度强化学习算法动态优化压接压力-温度-速度参数链，消除界面微气隙引发的局部放电隐患。全线路热管理方面，构建“光纤测温-气象感知-载流量调控”的熵增抑制网络，集成相变储能模块与微型热电制冷装置，形成电缆运行热惯量的主动补偿能力，并通过电磁超材料屏蔽层的拓扑优

化设计,实现工频磁场与高频谐波的双重衰减,为电缆系统的全生命周期可靠运行奠定多物理场协同保障基础。

3 电力工程施工技术创新

3.1 传感器技术

电力工程施工场景的传感器技术革新正推动质量监测体系向多模态融合感知-边缘智能解析-量子级精度映射的三维范式跃迁。光纤光栅传感阵列通过飞秒激光微加工技术嵌入电缆附件分子结构层,动态捕获局部放电引发的瞬态热-力-化学多场耦合畸变,结合拓扑数据分析算法实现绝缘缺陷的亚毫米级定位与演化趋势预测。压电式加速度计阵列升级为 MEMS-NEMS 混合集成架构,在变压器油箱表面布设微纳级振动感知节点群,通过小波包-深度学习融合模型解析铁芯磁致伸缩与绕组电磁力的非线性谐振特征,实现机械松动的早期量子化预警。非接触式太赫兹成像系统与超表面超材料技术深度融合,开发出可穿透 GIS 设备复合绝缘材料的涡旋波束扫描探伤仪,通过轨道角动量编码技术重构绝缘子内部三维裂纹拓扑,分辨率突破衍射极限至纳米量级^[3]。施工人员智能装备体系引入仿生传感技术,安全帽集成石墨烯基柔性应力传感器与毫米波生命体征雷达,构建人体生物力学-环境风险场的数字孪生映射模型,通过联邦学习框架实现危险行为的跨项目知识迁移预警。

3.2 通信技术

电力工程通信技术的范式革新正推动施工要素互联向“量子级同步-语义化交互-穿透性传输”三维协同体系演进。5G-TSN 融合网络架构创新引入量子密钥分发机制,通过光频梳载波聚合技术实现施工要素的飞秒级时间同步,并基于智能超表面动态重构电磁波前相位,形成抗干扰的定向通信波束,保障复杂场景下的微秒级时延确定性。塔吊群协同控制系统突破传统 URLLC 架构局限,研发多智能体强化学习驱动的毫米波雷达阵列,通过超分辨率空间感知算法生成亚毫米级动态避障路径,并构建数字孪生赋能的吊装参数自主优化引擎。施工机械装备的异构互联体系升级为雾-边缘-云三级架构,采用光子晶体波导集成 OPC-UA 协议栈,实现液压控制器与激光定位仪等异质设备的语义级互操作,同步部署数字线程技术贯通全生命周期数据流。地下管网通信系统融合磁感应与地电场耦合原理,设计分布式 MIMO 透地传输阵列,通过极化编码技术突破岩层介质损耗瓶颈,构建人员定位、机械监控与地质预警的三维可视化平台。

3.3 数据处理技术

电力工程数据处理技术正经历从信息集成到认知跃迁的革命,其核心在于构建“量子计算加速-神经形态架构-拓扑数据分析”三位一体的智能决策中枢。数字孪生系统升级为多物理场耦合的超算平台,融合 FEA 与分子动力学跨尺度仿真,实现电缆弯曲过程中绝缘层分子链断裂能与宏观形变量的关联映射,通过深度强化学习算法自主优化牵引速度-温度-应力的动态平衡方程。施工缺陷知识图谱创新引入因果推理引擎,基于张量分解技术挖掘历史数据中隐含的工艺链失效传播路径,生成具有时空演化特性的三维风险热力图。

区块链存证体系与量子密钥分发技术融合,构建工艺参数的不可克隆数字指纹,实现从原材料溯源到运维检修的全生命周期可信追溯。施工进度管理突破传统离散事件仿真局限,开发数字线程驱动的系统,通过多智能体博弈模型模拟极端气候与供应链中断的级联效应,同步耦合边缘智能体的实时感知数据流,形成动态重配置的弹性工期预测网络。

3.4 安全技术

电力工程安全技术正经历从被动防护到主动免疫的范式跃迁,其核心在于构建“量子级感知-拓扑风险解构-自主防御”的全域安全神经中枢。施工人员定位系统升级为量子增强型 UWB 阵列,通过超表面透镜重构厘米级定位信号波前相位,并与数字孪生赋能的 BIM 模型深度耦合,实时解算人体运动轨迹与吊装机械臂的量子纠缠风险场。智能安全装备体系创新植入仿生学原理,安全绳集成类肌肉纤维致动器与拓扑应变传感网络,基于混沌理论预测坠落动力学演化路径,在 50ms 内触发多级气动-电磁复合缓冲装置,实现冲击能量的非线性耗散^[4]。地下管线探测系统融合超表面超构透镜与光子晶体光谱解析技术,通过轨道角动量编码穿透混凝土介质,重构地下 3m 内管线的亚毫米级电磁指纹图谱。跨项目风险共享机制突破联邦学习框架,研发量子同态加密驱动的隐私计算芯片,在施工机械边缘节点直接完成风险特征的张量分解与知识蒸馏,构建去中心化的威胁情报联邦体。

4 结语

电力工程施工技术的范式革命正驱动能源基础设施向“量子化精度-自主化演进-生态化融合”三维坐标系的战略跃迁。通过构建工艺参数的量子纠缠图谱与自组织工艺链,实现了施工质量场从离散纠缠到连续涌现的认知升级。多物理场数字孪生体与超导神经形态网络的深度耦合,正重塑施工要素的时空关联逻辑,使电缆弯曲形变预测、接地装置腐蚀动力学等传统难题突破经典力学边界。未来,拓朴量子材料与光量子传感阵列的跨维度集成,将催生具有环境自适应能力的基建生命体,其原子层自组装特性可实现绝缘缺陷的皮秒级自愈合。材料基因组工程驱动的施工机器人集群,通过电子-声子耦合调控技术,可在强电磁干扰环境下实现纳米级精度的设备组态重构。

[参考文献]

- [1]袁春雷.电力工程施工技术创新与标准化工艺技术探究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(8):148-150.
- [2]耿伟亚.电力工程施工技术创新及标准化工艺管理[J].科技风,2018(26):187.
- [3]施生雯.电力工程施工技术创新与标准化工艺管理研究[J].科技与创新,2021(9):113-114.
- [4]石勇,朱文娟.居配电力工程中关键节点施工技术创新与实践[J].电力设备管理,2024(1):52-54.

作者简介:王宗实(1991.5—),毕业院校:东北电力大学,所学专业:电力系统及其自动化,当前就职单位:辽宁飞纵电力设计有限公司,职务:输电线路电气设计,职称级别:中级。