

电气工程输电线路施工工艺的分析

刘 鹏

宁夏水利水电工程局有限公司 宁夏 银川 750003

摘 要：输电线路作为电气工程的核心组成部分，其施工工艺直接影响电力系统的运行稳定性与安全性。本文从基础施工、杆塔组立、架线工程、防雷接地等关键环节出发，结合机械化施工、智能化控制、环保材料应用等前沿技术，系统分析输电线路施工工艺的创新发展与质量控制要点。为电气工程输电线路建设提供理论支持与实践指导。

关键词：输电线路；施工工艺；机械化施工；防雷接地；质量控制

1 引言

输电线路是电力系统的“血管”，承担着电能传输与分配的核心功能。其施工工艺的优劣直接决定了电网的可靠性、经济性与环保性。随着“双碳”目标推进与新型电力系统建设，输电线路施工面临复杂地形适应性、高效率作业、低碳环保等多重挑战。传统施工工艺依赖人工操作、设备自动化程度低、质量控制手段单一，已难以满足现代电网对安全性、效率与可持续性的要求。因此，机械化、智能化、标准化成为输电线路施工工艺升级的核心方向。本文从施工全流程出发，结合行业前沿技术，系统分析输电线路施工工艺的关键环节与创新路径，为电气工程输电线路建设提供理论支持与实践指导。

2 输电线路施工工艺的核心环节与技术要点

2.1 基础施工：从刚性支撑到柔性适配

基础工程是输电线路稳定性的根本保障，其设计需充分考虑地质条件、气候环境与杆塔荷载的复杂性。在硬质岩层地区，岩石锚杆基础通过钻孔、锚杆植入与高强灌浆实现杆塔与岩体的刚性连接。例如，青藏高原500kV线路施工中，地质勘探显示岩层抗压强度达120MPa，采用金刚石钻头完成 $\Phi 80\text{mm}$ 孔径，注浆压力控制在0.8-1.2MPa，单锚承载力达200kN。通过有限元分析优化锚杆布置角度，使基础抗拔力提升30%，较传统大开挖方案减少土方量70%，同时避免了对高原生态的破坏。

针对软土地基，阶梯式现浇混凝土基础需解决沉降不均与裂缝控制难题。在110kV线路施工中，通过分层浇筑与智能温控技术，在混凝土内部埋设温度传感器，实时监测温差并调整养护措施。例如，当监测到内部温差超过15℃时，自动启动喷淋系统降温，确保温差控制在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内。经检测，基础28天抗压强度达45MPa，强度达标率提升至98%，裂缝发生率降低至0.5%以下。

在生态敏感区，装配式预制基础通过模块化设计实

现快速安装与低环境影响。以东北黑土地500kV线路为例，工厂预制基础构件采用高强度混凝土与防腐钢材，现场通过螺栓连接拼装，安装周期缩短至3天^[1]。施工后对周边土壤进行理化性质检测，结果显示pH值、有机质含量等指标与施工前差异小于5%，植被恢复率提高40%，有效平衡了工程建设与生态保护的需求。

2.2 杆塔组立：从人工吊装到智能协同

杆塔组立是施工风险最高的环节，需兼顾效率、安全性与地形适应性。在山区铁塔施工中，分解组立技术通过内悬浮抱杆实现构件分步安装。例如，220kV线路施工采用500kN级起重机配合专用吊具，通过四向拉线调节抱杆垂直度，偏差控制在 $\leq 1\%$ 。施工前利用BIM技术进行虚拟组装模拟，优化构件吊装顺序，使单日组塔量达3基，较传统方法效率提升50%。同时，在抱杆顶部安装风速传感器，当风速超过8级时自动锁死吊装系统，确保高空作业安全。

在高原无人区，无人机辅助组立技术突破了人工展放导引绳的局限。以川藏联网工程为例，采用八旋翼无人机搭载轻质迪尼玛绳，通过GPS定位实现精准抛投，跨越1000米峡谷仅需2小时，较传统方法效率提升10倍。无人机还配备高清摄像头与激光雷达，实时传输施工画面至指挥中心，技术人员可远程指导作业，减少现场人员投入70%。此外，通过路径规划算法优化飞行轨迹，避免无人机与杆塔碰撞，事故率降至0.1%以下。

平原地区则广泛采用机械式整体组立技术，利用履带式起重机完成铁塔整体吊装。例如，特高压线路施工中，单次起吊重量达200吨，需精确控制起重臂角度与吊装速度。通过在起重机操作室安装力矩限制器与角度传感器，实时监测吊装参数，当负载超过额定值90%时自动报警并限制动作。同时，在铁塔底部设置液压调平系统，确保起立过程中垂直度偏差 $\leq 0.5^\circ$ ，避免因倾斜导致的结构损伤。

2.3 架线工程：从拖地展放到张力控制

架线质量直接影响导线寿命与电网安全，需根据地形选择差异化施工方案。张力展放技术通过控制导线张力减少摩擦损伤，适用于大截面导线施工。例如， $\pm 800\text{kV}$ 特高压线路施工中，采用一牵四走板牵引系统，牵引机输出张力稳定在15%-25%额定拉断力区间，放线速度控制在60m/min以内。通过在走板前端安装张力传感器，实时反馈数据至控制系统，自动调整牵引机输出功率，确保张力波动 $\leq 5\%$ 。同时，利用无人机展放初导绳，在山区跨越施工中减少植被砍伐面积80%，生态保护效果显著。

紧线与附件安装环节需精确控制导线弧垂与应力分布。在500kV线路施工中，采用液压张力机紧线，通过旋转连接器实现过牵引长度精确控制，误差不超过设计值的1.2%。紧线后使用红外定位仪标记耐张线夹压接位置，压接机配备力矩-位移双控系统，确保压接弯曲度 $\leq 1.5\%$ 管长^[2]。防振锤安装则通过激光测距仪确定位置，误差控制在 $\pm 10\text{mm}$ 以内，有效抑制导线微风振动，延长使用寿命。

智能化技术的应用进一步提升了架线精度。例如，智能弧垂监测系统结合经纬仪与传感器，实时采集导线温度、张力与弧垂数据，通过算法模型预测弧垂变化趋势。当监测值偏离设计值5%时，系统自动发出调整指令，通过张力机微调导线张力，确保弧垂偏差 $\leq 200\text{mm}$ ，较人工观测精度提升80%。此外，自锁式间隔棒的应用减少了人工高空作业，安装效率提高60%，同时降低了坠落风险。

2.4 防雷接地：从被动防护到主动控制

防雷接地是保障线路安全的关键环节，需结合地质条件优化设计方案。在雷击频发地区，复合放射形接地装置通过水平接地体与垂直接地极的组合降低接地电阻。例如，水平接地体采用60×6mm镀锌扁钢，垂直接地极采用 $\Phi 20\text{mm}$ 镀铜钢棒，开挖沟深800mm，回填土掺入30%降阻剂分层夯实。经检测，接地电阻降至4 Ω 以下，较传统设计降低50%，雷击跳闸率下降70%。

针对腐蚀性土壤，石墨基柔性接地体展现出优异性能。其耐腐蚀寿命达30年，较镀锌钢接地体延长2倍，且导电性能稳定。在沿海地区500kV线路施工中，采用石墨基接地体后，接地电阻年增长率 $\leq 0.5\Omega$ ，维护成本降低60%。此外，可控避雷针通过电场感应技术主动捕捉雷云，将雷击引导至预设路径，进一步减少线路受雷击概率。

智能化监测系统的应用实现了防雷接地的动态管

理。接地电阻在线监测系统通过物联网技术实时上传数据至云平台，当电阻超标时自动报警并定位故障点，维护响应时间缩短至2小时内。雷电定位系统结合GIS技术，可精确定位雷击点坐标，误差 $\leq 100\text{米}$ ，故障排查效率提升90%。例如，在某220kV线路雷击事故中，系统在10分钟内锁定故障杆塔，抢修人员快速更换绝缘子后恢复供电，减少停电时间8小时。

3 输电线路施工工艺的创新方向与实践案例

3.1 机械化施工：全地形覆盖与全流程替代

机械化施工是提升效率、降低风险的核心手段。在山地地形中，微型挖掘机通过轻量化设计与履带式底盘，实现了复杂地形的适应性。例如，青海-河南 $\pm 800\text{kV}$ 特高压工程中，开发的3吨级微型挖掘机可穿越40°斜坡，在狭窄山脊完成基础开挖，机械化率达95%。同时，自升式抱杆通过液压系统实现高度自动调节，适应不同塔型施工需求，减少人工爬杆次数90%，高空作业风险显著降低。

全流程机械化施工体系的应用进一步提升了工程效益。以张北-雄安1000kV特高压工程为例，通过集成基础开挖、杆塔组立、架线工程等环节的机械化设备，施工周期缩短40%，人员投入减少60%^[3]。其中，无人机巡检系统在架线阶段实时监测导线展放情况，结合AI图像识别技术自动检测导线缺陷，准确率达95%，较人工目检效率提升20倍。

3.2 智能化控制：数据驱动与远程协同

智能化技术贯穿于施工全生命周期。BIM技术通过三维建模实现施工方案模拟优化，提前发现碰撞点1200余处，减少设计变更成本2000万元。例如，在雅中-江西 $\pm 800\text{kV}$ 特高压工程中，BIM模型集成地质、气象与设备数据，优化杆塔位置与导线弧垂，使线路走廊宽度缩小15%，减少土地占用面积300公顷。

5G+无人机巡检系统构建了远程协同管理体系。在施工阶段，无人机搭载高清摄像头与激光雷达，实时传输4K画面至指挥中心，技术人员可通过VR设备进行沉浸式监控，指导现场作业。例如，某山区线路施工中，无人机发现杆塔螺栓未紧固问题后，指挥中心立即通知施工人员补拧，避免质量隐患。同时，5G网络支持多机协同作业，单日巡检效率提升5倍，覆盖范围扩展至200平方公里。

3.3 环保材料：低碳化与可循环

环保材料的应用推动了施工工艺的绿色转型。高强度铝合金导线通过优化合金配比，导电率提升10%，重量减轻30%，减少铁塔荷载后降低钢材消耗20%。在某500kV线路改造中，采用铝合金导线后，单公里线路碳减

排量达12吨,经济效益与环保效益显著。

生物降解防尘网解决了传统塑料网污染难题。在施工裸露区覆盖可降解防尘网后,6个月内自然分解为二氧化碳与水,避免土壤板结与微塑料污染。例如,在雄安新区110kV线路施工中,使用生物降解防尘网后,周边土壤有机质含量提升8%,植被覆盖率恢复至95%以上,为城市电网建设提供了生态友好型解决方案。

4 输电线路施工工艺的质量控制与安全管理

4.1 质量控制体系

标准化流程是质量控制的基石。通过编制《输电线路施工工艺标准手册》,明确基础施工、杆塔组立、架线工程等环节的286项质量控制点,实现全流程标准化管理。例如,在混凝土基础施工中,手册规定砂石含泥量 $\leq 3\%$ 、水泥强度等级 $\geq 42.5\text{MPa}$ 等参数,并通过移动质检APP实时上传检测数据,确保执行到位。

检测技术的创新提升了质量判定精度。X射线探伤技术可检测杆塔焊缝内部缺陷,缺陷检出率达99.9%,较人工目检提升50倍^[4]。在某特高压铁塔生产中,通过X射线探伤发现1处未熔合缺陷,及时返修后避免结构失效风险。拉力试验机则对导线、金具进行极限拉力测试,确保承载能力符合设计要求。例如,某型号导线额定拉断力为120kN,试验机施加132kN负荷后未断裂,验证了产品可靠性。

4.2 安全管理体系

风险预控机制通过危险点辨识与预控降低事故概率。针对高空作业、交叉跨越等高风险环节,编制专项安全措施128项。例如,在跨越高速公路施工中,采用封闭网防护与限高警示标志,同时安排专人监护,确保施工期间车辆通行安全。VR安全培训系统模拟坠落、触电等事故场景,使作业人员直观感受风险后果,培训后安全

知识考核通过率提升至98%。

应急管理体系保障了事故快速响应。编制《输电线路施工应急预案》,配备无人机、便携式发电机等应急设备,确保事故响应时间 ≤ 30 分钟。例如,在某线路施工触电事故中,应急系统在5分钟内定位故障点并切断电源,10分钟内启动医疗救援,伤员得到及时救治后康复出院。定期组织应急演练,2024年全国输电线路施工领域累计开展演练1.2万次,参与人员超50万人次,应急处置能力显著提升。

结语

输电线路施工工艺的升级是电气工程高质量发展的核心驱动力。通过机械化替代、智能化控制、环保材料应用等技术创新,实现施工效率提升,安全事故率降低,碳排放减少。未来,随着“云大物移智链”技术的深度融合,输电线路施工将向“无人化、远程化、精准化”方向演进。例如,5G+AI技术可实现施工设备自主协同作业,区块链技术可追溯材料全生命周期质量,数字孪生技术可模拟施工过程优化方案。这些创新将进一步推动输电线路施工工艺向更高水平迈进,为构建新型电力系统提供坚实支撑。

参考文献

- [1]黄悦.架空输电线路传统施工工艺技术研究[J].电气开关,2021,59(04):31-33.
- [2]凌建峰.电力工程输电线路施工工艺的分析[J].科学技术创新,2019,(19):64-65.
- [3]王晓阳,张琳果,李金阳,等.电力工程及其输电线路设计与施工的技术分析[J].中国设备工程,2025,(14):205-207.
- [4]黄冕.电力工程输电线路施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(20):4-6.