

# 电力主网线路跨越复杂地形的设计挑战与解决方案

周世霞 章程萍 罗 秧

杭州交联电力设计股份有限公司 浙江杭州 310011

**摘要：**随着电力需求增长，电力主网线路需跨越复杂地形。本文聚焦其设计面临的难题与应对策略，分析地形、气象、地质等带来的挑战，探讨新型杆塔结构、智能监测系统、多学科协同设计等解决方案，并展望技术发展趋势，旨在为复杂地形下电力主网线路设计提供理论与实践参考，提升线路建设的安全性及经济性。

**关键词：**电力主网线路；复杂地形；设计挑战；解决方案

## 引言

在能源输送网络不断扩张的背景下，电力主网线路不可避免地要穿越山地、峡谷、水域等复杂地形。复杂地形对线路设计提出更高要求，不仅关乎工程建设成本与施工难度，更影响电力系统长期稳定运行。深入剖析设计挑战并探寻有效解决方案，对保障电力可靠供应、推动电网高质量发展具有重要意义。

## 一、电力主网线路跨越复杂地形的设计挑战

### 1. 地形地貌的限制

复杂地形极大制约着电力主网线路的路径规划工作。山区地势高低错落，为保障线路安全距离、满足弧垂标准，线路走向需频繁调整，致使线路长度显著增长，转角数量大幅增加，不仅推高了工程建设成本，还加剧了电能传输损耗。而在峡谷等特殊地形区域，传统大型施工设备难以抵达作业现场，杆塔基础施工只能依赖人工挖孔、索道吊运建材等方式，施工效率极低，安全隐患突出。像在坡度陡峭的山坡施工时，土方开挖作业极易打破山体原有的稳定结构，引发滑坡、塌方等地质灾害，不仅危及施工人员生命安全，还会给线路后期运行留下严重隐患，且灾害后的修复工作成本高昂，严重拖延工程建设进度，影响工程整体质量。

### 2. 气象条件的影响

极端气象因素严重威胁电力主网线路的稳定运行。在强风侵袭时，杆塔承受超出常规的水平推力，极易出现倾斜、倒塌等状况；输电导线也会因风振产生持续性摆动，久而久之引发金属疲劳导致断股。暴雪天气致使导线覆冰加重，显著增加线路垂直负荷，进而造成杆塔超载、导线弧垂超限，严重时引发倒塔、断线事故。雷电天气产生的瞬间过电压，能够轻易击穿绝缘子，致使

线路短路跳闸。

此外，复杂地形加剧了气象条件的复杂性，山顶与山谷、向阳坡与背阴坡的气象参数差异巨大。传统气象预测技术难以准确把握这些局部细微变化，使得线路设计在抵御极端气象方面存在不足，大幅提升了线路故障概率，严重影响电力供应的稳定性与可靠性。

### 3. 地质条件的难题

复杂地质条件对电力主网线路杆塔基础的稳固性构成严峻考验。在软土地基分布区域，由于土体压缩性高、承载能力弱，难以承受杆塔传递的巨大荷载，极易引发基础不均匀沉降，导致杆塔倾斜甚至倒塌；而在冻土广布地区，季节性的温度变化使得土体在冻结与融化间交替转换，冻胀力与融沉作用不断冲击基础结构，严重威胁线路稳定性。当线路途经岩石破碎带时，岩体破碎松散、完整性差，传统锚固技术难以获得足够的锚固力，杆塔基础的抗拔、抗倾覆能力大幅削弱，无法为线路提供可靠支撑。

### 4. 生态环境保护和施工矛盾

复杂地形区常伴有自然保护区、珍稀动植物生境等敏感生态环境，电力线路施工和生态保护矛盾突出。在山地等地形条件下进行输电线路的敷设，往往会对铁塔地基及建设隧道造成一定程度的破坏，从而引起土壤侵蚀；在经过湿地和江河的过程中，会产生大量的建筑粉尘和泥浆，从而对周围水体造成一定的污染，并对生物生存造成一定的影响。如云南横断山地区的一条输电线路，采用传统的爆破方法将塔基周围植被破坏掉30%，在雨季时，施工边坡的土壤侵蚀是正常情况的4倍以上，这既违背生态保护规定，又需要付出高昂的生态修复成本。又如，青藏高原冻土区修建铁路，阻断了藏羚羊的迁移路线，并引起了当地的生态平衡。然而，在环保政

策日趋严厉的背景下,建设项目往往需要经过生态影响评价,施工周期也会因为环保审批的原因而延长,一些地区为了保护生态环境,不得不对线路进行调整,使施工费用高达20%~30%。

### 5. 施工安全和运输效率的双重制约

在复杂地质条件下,施工过程中的安全风险和物料搬运困难构成恶性循环。在悬崖峭壁等特殊地形上,常规的交通工具很难到达,建筑材料只能靠人工或骡马搬运,效率低下。如川藏高原某条铁路,单座铁塔上的钢筋混凝土输送需要60匹骡马,5天的时间才能完成,而在运输过程中,由于地形陡峭造成的材料坠落事故频发,年平均安全事故率较平原地区高8倍。同时,混凝土泵车等大型工程机械无法进入,只能靠人工挖掘,高海拔低氧地区作业效率降低40%,单孔掘进时间超过15天。另外,由于恶劣的气候条件,山区公路在强降雨季节道路的泥泞和滑流更是雪上加霜,材料的运输中断率高达35%;在雨雪天气时,索道在运行过程中容易打滑,曾经发生过铁塔部件脱落,损伤植物的事件。在施工安全方面,在陡坡上架设脚手架非常困难,一旦边坡支护不足而发生塌方,很容易导致人员受伤,造成经济损失。

## 二、应对复杂地形设计挑战的解决方案

### 1. 创新杆塔结构与材料应用

面对复杂地形的特殊受力需求,杆塔结构设计迎来革新突破。以柔性塔为例,其突破传统刚性架构限制,采用柔性拉索构建支撑体系,这种设计能有效缓冲强风带来的振动冲击,将风振能量转化为结构内部的弹性势能,从而显著降低疲劳损耗,特别适用于多风地区的线路架设。格构式塔则另辟蹊径,通过对空间桁架结构的优化设计,在确保力学性能的同时大幅削减自重,对于交通条件恶劣的山区,可通过模块化拆分运输,有效解决大型施工设备难以进场的难题。在材料应用层面,高强度合金钢凭借优异的力学性能脱颖而出。相较于传统钢材,在相同荷载条件下,使用高强度合金钢可使杆塔构件截面积缩减,进而降低整体重量,却能够实现更高的承载能力。而复合材料杆塔的研发应用,更是为特殊环境线路建设提供了新选择。这类杆塔具备出色的抗腐蚀特性,在沿海盐雾环境或化工污染区域,能抵御化学介质侵蚀,有效延长服役周期;其良好的绝缘性能,可减少绝缘子串配置数量,不仅优化线路结构,还能降低工程造价与运维强度。

### 2. 智能监测与分析技术

智能监测体系的构建是保障电力主网线路稳定运行

的关键防线。通过在杆塔关键节点与输电导线上,部署振动传感器、应力应变传感器、红外测温装置以及微型气象站等多元化感知设备,能够对线路的动态力学响应、设备运行温度、气象环境变化等核心参数进行24小时不间断监测。这些采集到的实时数据,借助5G、物联网等通信技术,以加密传输的方式快速汇聚至智能监控平台。在数据处理环节,运用大数据分析引擎,对海量历史数据与实时数据进行交叉比对和深度剖析,结合机器学习算法构建出多维度的线路健康评估模型,实现对线路运行状态的精细化诊断。同时,依托人工智能预测算法,对气候变化趋势、设备老化规律等潜在影响因素进行模拟推演,能够提前预判线路可能出现的故障隐患,并自动生成分级预警信息。运维人员可根据预警级别,及时调整线路运行参数,科学制定设备检修计划,实现从被动应急抢修向主动预防维护的模式转变,从而有效提升电力主网线路运行的安全性与运维管理效率。

### 3. 多学科协同设计方法

多学科交叉融合的设计模式正成为破解复杂地形线路设计难题的关键路径。该模式打破学科壁垒,构建起电力工程、地质勘查、气象研究、结构力学等多领域专家协同工作机制。在项目规划阶段,地质专家运用地球物理探测技术,对沿线地层结构、岩土特性进行精准勘察,识别断层、溶洞等不良地质区域;气象团队结合区域气候数据与微气象监测,提供强风、覆冰等极端天气参数,为杆塔抗风、抗冰设计提供数据支撑。电力与结构工程师基于上述成果,运用力学计算与材料科学知识,对杆塔结构形式、导线规格进行精细化设计。同时,依托三维地理信息系统(3D GIS)与有限元仿真技术,将地形地貌数据与线路结构模型深度融合,构建可视化数字孪生场景。通过模拟强风、地震等不同工况下线路的力学响应与运行表现,生成多套设计方案。

### 4. 生态友好型施工技术体系

建立完整的生态防护技术体系,是实现项目建设和生态环境协调发展的核心途径。在前期规划阶段,采取“避让优先”的思路,利用遥感与生态红线数据库相结合的方法,以西南山地为例,利用GIS空间分析方法,避开了3个自然保护地的核心地带,减少了120km<sup>2</sup>的毁林面积。在施工过程中,推进了“最小扰动”处理:利用螺旋钻机进行地基施工,较传统的爆破方法可以将岩石的震动损伤降低60%以上,如甘肃祁连山线上某条线路,采用水力螺旋钻,可以将单一地面上的植物损害控制在5m<sup>2</sup>以内。采用气垫船等对生态环境影响小的装备

进行物料运输, 在新疆塔里木河湿地地区, 采用轨道缆车运载方式, 使地面碾压面积降低85%以上。在内蒙古草地沿线, 利用“原位植被”技术, 将表层土壤和植物种子进行收集, 并将其进行保存, 完成后再喷播, 一年之内, 将坡面植被覆盖恢复到85%以上。某秦岭铁路项目就是利用这一系统, 预先判断出川金丝猴的迁移路线, 并在施工现场临时调整施工时间, 规避人为扰动。

### 5. 智能化运输和安全管控方案

为解决复杂地势条件下的建设“瓶颈”, 建立“空天地”一体化的客货运安全控制系统。在物料输送上, 推广模块化设备和智能搬运技术: 采用预制装配的铁塔基础, 使混凝土浇筑过程提前到厂区, 现场安装工期减少60%, 例如浙江舟山海岛铁路采用模块化基础, 将单体基础设施建设工期由21天缩短到7天; 研制最大载重500 kg的重型无人机运载系统, 在四川大凉山河谷地区, 无人机运载效率比骡子车队高出10倍以上, 可以防止3次交通安全事故。针对超大型构件, 采用架空索道与地面轨道车辆协同运送, 云南滇西山地一期工程采用立体索道网络, 可以实现1.2 km长的塔件吊装, 输送效率比传统方法提升3倍。在安全控制方面, 建设智慧监控网络, 通过毫米波雷达和AI视频等手段, 实现对违章操作和设备异常的实时检测, 在贵州山区的工程中, 安全违章率降低72%; 研发集定位和坠落预警于一体的可穿戴智能头盔, 可以在斜坡上工作, 实现边坡稳定预警。以西藏林芝铁路工程为例, 采用BIM建模方法模拟高原地区的高海拔建设情景, 使施工效率提高了40%。利用VR技术, 可以让员工在虚拟环境下熟悉复杂地形的工作过程, 利用VR技术, 使员工在紧急情况下的应变能力有所提高。

## 三、电力主网线路设计的技术发展趋势

### 1. 数字化与智能化迭代革新

数字孪生技术正重塑电力主网线路管理模式, 通过搭建与实体线路高度契合的虚拟数字模型, 实现线路运行数据的实时同步与动态呈现, 构建起全生命周期的数字化管控体系。运维人员依托该虚拟平台, 能够模拟各类故障场景, 开展方案预演与优化, 显著提升决策科学性。与此同时, 智能巡检设备加速普及, 具备高精度检测功能的机器人可在杆塔上自主完成部件松动检测、绝缘性能评估等工作; 搭载先进传感设备的无人机, 凭借高清摄像与激光雷达技术, 快速构建线路三维场景, 结合深度学习算法, 精准识别线路隐患, 极大提高巡检效率, 有效规避人工巡检的安全风险与视觉盲区。

### 2. 绿色生态设计理念纵深推进

在电力主网线路规划建设中, 绿色低碳理念贯穿设计全流程。施工工艺层面, 装配式模块化施工技术得到广泛应用, 减少现场湿作业与土方工程, 降低对地貌与植被的破坏; 材料选用上, 可降解高分子材料逐步替代传统不可回收材质, 从源头上减少环境负担。线路选线时, 综合运用生态红线评估系统, 主动避让生态敏感区域, 采用大跨越、高净空设计跨越自然水体与林区, 降低对生态廊道的干扰。同步实施生态修复工程, 对施工扰动区域进行植被恢复与水土保持, 推动电网建设与生态保护协同共生, 助力电力行业绿色转型。

### 3. 前沿输电技术融合创新

复杂地形下的电力输送难题正借助新型输电技术取得突破。柔性直流输电凭借其灵活的潮流控制特性与低损耗优势, 在跨海、跨山长距离输电场景中展现独特价值, 通过减少换流站布点, 降低工程建设与运维成本。超导输电技术在低温环境下实现近乎零电阻传输, 大幅提升输电容量与能效, 为高海拔、远距离电力输送提供新可能。顺应新能源发展浪潮, 风光储一体化输电线路成为新方向, 通过有机整合风力发电、光伏发电与储能系统, 优化线路拓扑与电力调度策略, 有效解决新能源间歇性问题, 增强电力系统稳定性, 推动能源结构向清洁化、高效化转型。

## 结束语

复杂地形为电力主网线路设计带来重重困境, 而借助杆塔结构创新变革、智能技术深度应用以及多学科协同设计模式, 能够切实攻克这些难题。展望后续发展, 线路设计将朝着数字化深度赋能、绿色化全面覆盖、新技术多元融合的方向演进。唯有不断开展探索实践, 才能持续提升复杂地形下电力主网线路设计水准, 为电力供应筑牢安全、稳定、高效的坚实防线。

## 参考文献

- [1] 杨伟祯. 电力主网工程项目管理提升策略研究[J]. 电力设备管理, 2024, (19): 206-208.
- [2] 余光海, 李鹏. 新能源互补电力主网谐波补偿孤岛检测方法研究[J]. 能源与环保, 2022, 44(03): 242-247+254.
- [3] 洪焕森. 电力主网运检一体化模式分析[J]. 集成电路应用, 2019, 36(08): 108-109.