

架空电力线路在复杂地形条件下的杆塔优化布设方法分析

侯艳菊

宁夏先科电力设计咨询有限公司 宁夏回族自治区 750002

【摘要】：架空电力线路的杆塔布设是电力工程建设中的关键环节，尤其在山地、丘陵、河谷等复杂地形条件下，其布设合理性直接影响线路的安全性、经济性和稳定性。本文结合复杂地形对杆塔布设的影响，分析了当前杆塔布设存在的问题，探讨了优化布设的原则与具体方法，包括地形适应性分析、杆塔选型优化、路径规划优化等，并通过案例验证了优化方法的有效性，旨在为复杂地形条件下架空电力线路杆塔布设提供技术参考，推动电力工程建设的高效开展。

【关键词】：架空电力线路；复杂地形；杆塔布设；优化方法；路径规划

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.008

1 引言

随着我国电力事业的快速发展，架空电力线路不断向山区、丘陵等复杂地形区域延伸。复杂地形条件下，地形地貌复杂、地质条件多变、气象环境恶劣，给杆塔布设带来了诸多挑战。不合理的杆塔布设不仅会增加工程成本，还可能导致线路故障频发，影响电力系统的安全稳定运行。因此，研究复杂地形条件下架空电力线路杆塔优化布设方法具有重要的现实意义。本文基于复杂地形的特点，结合相关工程实践，对杆塔优化布设方法进行深入分析，旨在为类似工程提供借鉴。

2 复杂地形对架空电力线路杆塔布设的影响

2.1 地形地貌的影响

山地、丘陵地形坡度较大，杆塔基础开挖难度大，且容易引发滑坡、崩塌等地质灾害，对杆塔的稳定性要求较高。河谷地带地势低洼，易受洪水冲刷，杆塔需具备较强的抗洪能力。此外，复杂的地形地貌还会导致杆塔之间的档距不均匀，增加导线的受力复杂度。

2.2 地质条件的影响

地形坡度较大，导致杆塔之间的档距不均匀，增加导线的受力复杂度，对导线安全距离控制提出更高要求。河谷地带地势低洼，杆塔高度需适应水位变化，确保导线对地安全距离。复杂地形还会影响导线弧垂变化，需精准计算杆塔高度以避免交叉跨越隐患。

2.3 气象环境的影响

复杂地形区域的气象条件多变，如强风、暴雨、覆冰等灾害性天气频发。强风可能导致杆塔受力过大而损坏，覆冰会增加导线和杆塔的荷载，引发断线、倒塔等事故。同时，山区的浓雾和高湿度环境还会加速杆塔金属部件的腐蚀，缩短其使用寿命。

3 当前复杂地形条件下杆塔布设存在的问题

3.1 地形适应性不足

部分工程在杆塔布设过程中，未能充分考虑复杂地形对电

气安全距离的影响，一味采用常规布设方式，导致安全距离不达标。例如，在陡峭山坡未根据坡度调整杆塔呼高，导线对地距离仅 5-6 米（低于 220kV 线路 7 米的规范要求）；在河谷地带未结合水位变化动态计算弧垂，洪水期导线对水面距离不足，存在触电风险。此外，在地形起伏较大区域未合理分段设置杆塔高度，导致导线悬垂角过大，超过允许值引发断线隐患。

3.2 杆塔选型不合理

杆塔选型未结合电气性能需求，缺乏针对性：在强风区域选用普通杆塔且未配置相间间隔棒，导线舞动幅度达 1.2 米以上，相间安全距离不足引发闪络；覆冰严重地区仍采用常规导线（安全系数 1.8），覆冰厚度超过 20mm 时导线应力超标，同时杆塔绝缘配置未升级，绝缘子片数比规范要求少 2-3 片，雾天易发生污闪事故。高海拔地区（海拔 > 1000m）未选用加强型绝缘杆塔，因空气稀薄绝缘强度下降，导致雷击跳闸率比设计值高 40%。

3.3 路径规划不科学

路径规划未纳入电气安全因素，在高雷区（年雷击次数 > 35 次/km²）未绕行，且未设置差异化防雷措施，雷击故障占比达总故障的 60% 以上；线路频繁穿越峡谷强风通道，未采用流线型杆塔设计，导线风荷载增加 20%，加速金具磨损；跨越公路、河流时路径选择不合理，导致跨越档距过大（超过 500m），导线弧垂超出设计范围，对被跨越物安全距离不足。此外，部分路径未避开工业污染区，绝缘子积污速度加快，清扫周期缩短至原设计的 1/2，增加运维成本。

4 复杂地形条件下杆塔优化布设原则

4.1 安全性原则

安全性是杆塔布设的首要原则，必须确保杆塔在各种复杂条件下能够稳定运行。在布设过程中，要充分考虑地形、地质、气象等因素对杆塔的影响，采取有效的防护措施，提高杆塔的抗风险能力。例如，在滑坡易发区设置抗滑桩、挡土墙等防护结构；在强风区域选用抗风性能优良的杆塔。

4.2 经济性原则

在保证安全的前提下,应尽量降低工程成本。通过优化杆塔选型、路径规划和基础设计,减少杆塔数量和材料消耗,降低施工难度和后期维护费用。例如,合理增大档距,减少杆塔数量;采用轻型化杆塔,降低运输和安装成本。

4.3 环保性原则

杆塔布设应尽量减少对生态环境的破坏,避开生态敏感区和文物保护单位。在施工过程中,要采取有效的环保措施,如减少植被砍伐、妥善处理弃土弃渣等,实现工程建设与生态保护的协调发展。杆塔布设方案应具有较强的可操作性,便于施工和维护。在选择杆塔位置和基础形式时,要考虑施工设备的可达性和施工工艺的可行性,避免因施工困难而延误工期。

5 复杂地形条件下杆塔优化布设具体方法

5.1 地形适应性分析与杆塔定位优化

在杆塔定位前,采用无人机航拍、三维激光扫描等先进技术对地形进行详细勘察,建立高精度的地形模型。根据地形模型,结合杆塔的受力特点,合理确定杆塔位置。在陡峭山坡上,可采用高低腿杆塔,减少基础开挖量,提高杆塔的稳定性;在河谷地带,将杆塔布置在地势较高、不易受洪水冲刷的位置,并适当抬高杆塔高度。同时利用地形的遮挡作用,合理选择杆塔位置,减少强风、覆冰等气象因素对杆塔的影响。例如在山体背风坡布设杆塔,可降低风荷载;在山谷底部避开冷空气聚集区,减少覆冰现象。

5.2 杆塔选型优化

根据不同的地形、地质和气象条件,选择合适的杆塔类型。在山地陡坡地段,选用自立式铁塔,其具有较强的抗倾覆能力;在跨越河谷时,采用跨越杆塔,增加档距,减少杆塔数量。对于特殊气象区域,如强风区、覆冰区,应选用专用杆塔。强风区可采用流线型杆塔,减少风阻力;覆冰区选用加强型杆塔,提高杆塔的承载能力。此外,还可根据工程需要,采用组合式杆塔,灵活适应不同的地形条件。

5.3 路径规划优化

运用GIS技术和遥感技术,对线路路径进行多方案比选。路径规划需重点规避年雷击次数超过35次/km²的高雷区,若无法完全避开,应选择山体坡脚或植被茂密区域,利用地形和植被的屏蔽作用降低雷击概率。同时,避开峡谷、山口等强风通道,减少导线舞动风险,降低因风偏导致的相间短路故障。对于污染等级较高的工业区、矿区,路径应保持500米以上的安全距离,避免绝缘子积污过快增加清扫负担和污闪风险。

充分利用已有交通线路、输电走廊等,不仅能降低施工难度和成本,还能借助现有走廊的电气环境优势,如沿已建线路平行敷设可共享接地网和防雷设施,提高线路整体防雷水平。

在跨越公路、铁路、河流等区域时,结合电气安全距离要求优化跨越角度和档距,确保导线在最大弧垂和最大风偏情况下,对被跨越物的距离符合规范,220kV线路跨越公路时对地距离不小于7米,跨越河流时对水面距离不小于8米。路径规划应避开生态敏感区、文物保护单位等区域,若必须穿越,应采取有效的保护措施。例如,在生态敏感区采用高塔跨越,减少对地表植被的破坏;在文物保护单位设置防护屏障,避免施工对文物造成损害。

5.4 电气参数优化

5.4.1 导线选型

综合地形坡度、档距大小及气象荷载等因素,采用差异化配置策略。对于大档距(>500m)且地形坡度>25°的路段,优先选用JL/G2A-630/45等高强度钢芯铝绞线,其抗拉强度较常规导线提升20%以上,安全系数提高至2.5,以应对陡坡地形下导线张力的额外增量。在覆冰厚度>20mm的区域,导线截面需按覆冰荷载校验结果加大1-2个规格,例如将原设计400mm²导线升级为500mm²,同时配置预绞式耐张线夹,增强导线与杆塔连接的可靠性。

5.4.2 绝缘配置

根据海拔高度和污染等级进行阶梯式调整。海拔每升高1000m,绝缘子串片数按基准值(如220kV线路采用13片XP-70绝缘子)增加1片,且在高海拔(>3000m)区域选用防污型绝缘子(如FXWP-70),其爬电比距提升至3.1cm/kV以上。对于山区浓雾频发路段,采用复合绝缘子替代传统瓷绝缘子,利用其憎水性强的特点,降低雾闪事故发生率,同时绝缘子串长度较常规配置缩短15%-20%,减少杆塔荷载。

5.4.3 防雷设计

实施"分区防控"策略,在年雷击次数>40次/km²的高雷区,每2基杆塔增设氧化锌避雷器(如YH10WZ-204/530),并采用"长短针结合"的避雷针布置方式,保护角控制在25°以内。接地网设计根据土壤电阻率差异化处理:在黏性土区域采用水平敷设的镀锌扁钢(40×4mm)+垂直接地极(φ50mm镀锌钢管,长2.5m)组合,接地电阻控制在10Ω以下;山区岩石地段采用爆破接地技术,将φ20mm铜包钢接地极植入岩层3-5m深度,配合降阻剂(电阻率≤5Ω·m)使用,确保接地电阻≤30Ω。同时,利用地形特点将接地网沿等高线敷设,增加散流面积,提升防雷效果。

6 案例分析

6.1 工程概况

某220kV架空电力线路工程位于西南山区,线路全长50km,共需架设杆塔186基。途经区域山地占比60%,平均坡度35°;河谷段长8km,最大风速25m/s,覆冰厚度达30mm,年雷击次数35次/km²。线路需跨越3条县级公路和2条河流,

沿线涉及自然保护区边缘。

6.2 优化布设方案

6.2.1 地形数据采集与路径优化

采用三维激光扫描技术对全线地形进行高精度采集，扫描点密度达 50 点/m²，建立 1:500 的三维地形模型，为杆塔定位提供精准数据支撑。结合 GIS 技术进行路径优化，将地形、地质、气象、生态及交叉跨越等因素纳入分析模型，通过多方案比选，最终确定的优化路径较原设计路径缩短 3.2km，减少迂回段 4 处。

6.2.2 杆塔类型与布置优化

针对不同地形条件，采用差异化的杆塔类型及布置方式，具体如下。

表 1 杆塔类型与布置优化

地形类型	优化前方案	优化后方案	优化亮点
陡峭山坡（坡度>30°）	采用常规直线铁塔，基础开挖量达 80m ³ /基	采用高低腿铁塔（腿长差最大达 5m），基础开挖量降至 35m ³ /基	通过调整塔腿长度适应地形坡度，减少土方开挖及植被破坏
河谷地带	杆塔布置在河床边缘，塔高 12m	杆塔布置在海拔较高的阶地（高于历史最高洪水位 2m），塔高 15-18m	避开洪水直接冲刷范围，增加杆塔高度确保导线对地安全距离
强风区域（风速>20m/s）	采用普通抗风铁塔	采用流线型抗风铁塔（风荷载系数降低 15%）	优化塔身截面形状，减少风荷载影响
覆冰严重地段（覆冰厚度>20mm）	采用常规铁塔（设计覆冰厚度 20mm）	采用加强型铁塔（设计覆冰厚度 30mm，塔身强度提高 20%）	增强杆塔抗覆冰能力，适应极端气象条件
跨越河谷（跨度 450m）	采用两基耐张铁塔+悬索跨越	采用大跨越铁塔（单基塔重增加 30%，档距 500m）	减少一基跨越杆塔，简化施工流程

6.2.3 电气参数优化实施

导线选型方面，将原设计的 JL/G1A-400/35 导线更换为高强度 JL/G2A-500/45 导线，在大档距（450-500m）路段安全系数达 2.5，满足覆冰 30mm 时的荷载要求。绝缘配置根据海拔调整，海拔 1200m 以上路段绝缘子片数较基准值增加 2 片，III 级污染区采用 FXWP-70 防污绝缘子，爬电比距达 3.1cm/kV。

参考文献：

- [1] 刘嵘,戴建强,李珊,等.多种布设方式下交流 220kV 线路瓷绝缘子劣化判别的仿真与实测研究[J].绝缘材料,2024,57(07):127-134.
- [2] 蒋昊楠.软土地基条件下输电线路杆塔基础施工[J].人民黄河,2025,47(S1):168-169.
- [3] 张宇蓉,钱彬.倒塔作业杆塔与周边建筑物实时动态碰撞风险仿真分析[J].粘接,2025,52(07):175-178.
- [4] 谭笑,周锐,刘耀东,等.考虑锈蚀影响的输电杆塔抗风性能评估[J/OL].哈尔滨工程大学学报,1-9[2025-07-17].
- [5] 张一睿,陶劲松,申政,等.输电线路杆塔周围人身安全风险评估与接地装置结构优化[J].智慧电力,2025,53(06):78-84.

防雷措施优化中在年雷击次数 35 次/km²的区域，每 2 基杆塔增设 YH10WZ-204/530 氧化锌避雷器；山地岩石区采用爆破接地技术，植入φ20mm 铜包钢接地极，配合降阻剂使接地电阻从原 100Ω降至 25Ω；河谷区采用水平+垂直接地网组合，接地电阻控制在 8Ω以内。

6.2.4 杆塔数量优化

通过优化路径、增大档距（平均档距从 250m 增大至 280m）及采用大跨越技术，杆塔总数量从原设计的 219 基减少至 186 基，减少 15%，其中直线塔减少 28 基，耐张塔减少 5 基。同时，因电气参数优化，减少避雷器配置 12 组，降低设备成本。

6.3 实施效果

6.3.1 电气性能提升

投运后经历 3 次覆冰（最大厚度 28mm）和 2 次强风（风速 23m/s）考验，导线舞动幅度控制在 0.5m 内，未发生安全距离不足问题。雷击跳闸率较同类线路降低 60%，绝缘闪络事故为零，各项电气指标均符合规范要求。

6.3.2 经济效益改善

优化方案较原方案总投资减少 680 万元，降幅达 10%，其中因路径缩短及杆塔数量减少节约钢材 120t；电气参数优化使线路损耗降低 8%，年节约电能 15 万 kWh，运维成本减少 15 万元/年。

6.3.3 生态环境效益

植被保护通过采用高低腿铁塔及优化基础形式，减少植被破坏面积 1.2 万 m²，植被恢复率提高至 90%。基础开挖量减少 60%，设置的水土保持措施（挡土墙、截排水沟等）有效控制了水土流失，水土流失量较原方案减少 70%。

7 结论

复杂地形下架空电力线路杆塔优化需聚焦电气专业核心，通过地形适应性分析优化杆塔定位与高度，结合气象参数优化导线选型和绝缘配置，强化防雷设计。工程实践表明，该方法能有效提升线路安全性与经济性。未来应结合智能化技术，实现杆塔布设与电气参数的动态匹配，推动线路工程高质量发展。