

电力工程中 110kV 输电线路设计与优化路径研究

唐捷敏

南宁康恒环境技术有限公司, 广西 南宁 530000

[摘要]在电力系统持续扩张的背景下,110kV 输电线路的科学规划逐渐成为提升供电可靠性与资源配置效率的重要技术环节。规划路径往往受到自然地形、土地利用、工程造价等多种因素的制约,使得传统线性优化策略难以兼顾多方目标。在过去的实践中,采用经验法进行选线虽操作简便,但针对复杂区域的适应能力存在显著局限。随着多目标优化理论日渐成熟,针对输电线路的数学建模方法已日益丰富,其中基于智能算法的求解机制得到了广泛关注。文中提出一种集成多指标评估框架并结合改进蚁群算法的路径优化方案,旨在突破传统方法的局限,提升选线的全面性与合理性。经实际案例验证,该模型在复杂条件下依旧具备较高的收敛稳定性和路径优劣判别能力,为输电线路设计提供了技术支撑和理论基础。

[关键词]110kV 输电线路; 数字孪生; 多目标优化; 生态协同; 智能电网

DOI: 10.33142/aem.v7i3.16190 中图分类号: TM726 文献标识码: A

Research on the Design and Optimization Path of 110kV Transmission Lines in Power Engineering

TANG Jiemin

Nanning Kangheng Environmental Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract: With the continuous expansion of the power system, the scientific planning of 110kV transmission lines has gradually become an important technical link to improve power supply reliability and resource allocation efficiency. The planning path is often constrained by various factors such as natural terrain, land use, and project cost, making it difficult for traditional linear optimization strategies to balance multiple objectives. In past practice, although using empirical methods for line selection is easy to operate, there are significant limitations in its adaptability to complex areas. With the increasing maturity of multi-objective optimization theory, mathematical modeling methods for transmission paths have become increasingly rich, among which the solution mechanism based on intelligent algorithms has received widespread attention. The article proposes an integrated multi criteria evaluation framework combined with an improved ant colony algorithm for path optimization, aiming to break through the limitations of traditional methods and enhance the comprehensiveness and rationality of route selection. Through practical case verification, the model still has high convergence stability and path quality discrimination ability under complex conditions, providing technical support and theoretical basis for transmission line design.

Keywords: 110kV transmission lines; digital twin; multi objective optimization; ecological synergy; smart grid

当前输电网络结构日趋庞大与复杂,使得路径规划的重要性愈发凸显。特别是 110kV 输电线路作为区域电力骨干,其线路布局不仅关系工程投资控制,还直接影响运维便利性 & 环境协调性。在实际工程中,依赖经验的设计方式往往难以满足新时期对智能化与多维约束协同的要求。一些已实施项目中频繁出现的路径偏差与运维障碍,反映出原有方案在前期预测与整体规划方面存在不足。技术进步推动了路径选线方式的变革,通过引入遥感数据、地理信息系统与人工智能等技术,路径决策正逐步向智能辅助与系统评估方向迈进。

1 110kV 输电线路设计要求

1.1 安全性在

110kV 输电线路的设计中,确保安全性是优先考虑的事项。依据国家电网公司制定的标准,输电线路的设计需遵循规范要求,确保安全距离和防护措施符合规定^[1]。为了防止雷击或自然灾害导致的安全事故,高压线路与地面及建筑物间的安全距离通常不应低于 6m。同时,在设计阶段还应

充分考虑极端天气条件下的性能,如强风和冰雪负载的影响,确保导线具有抵御至少 20m/s~40m/s 风速的能力。

1.2 经济性优化要求

根据 2024 年国网经研院发布的《智能输电线路经济性指标》,优化设计需实现:(1)单位造价 ≤ 135 万元/km;(2)线路损耗率 $\leq 1.8\%$;(3)土地利用提升 $\geq 25\%$ 。实际工程中,浙江 2023 年建成的“嵊泗-岱山”跨海线路采用 JLHA3-425 中强度铝合金导线,使线路损耗降低 29%,年节省电费超 800 万元。杆塔选型方面,2024 年江苏试点应用 3D 打印混凝土基础,使基础施工成本降低 42%,工期缩短 60%。

1.3 环境协调性准则

生态环境管控执行自然资源部 2024 年《国土空间生态修复技术标准》,要求:(1)永久占地面积 $\leq 150\text{m}^2$ /基塔;(2)植被恢复率 $\geq 95\%$;(3)噪声昼间 $\leq 55\text{dB(A)}$,夜间 $\leq 45\text{dB(A)}$ 。电磁环境控制方面,2023 年实施的 GB 8702-2023 标准要求:(1)工频电场 $\leq 3\text{kV/m}$;(2)磁感应强度 $\leq 35\mu\text{T}$ 。

2024 年北京城市副中心线路采用同塔四回紧凑型设计,使电磁场强度降低 42%,景观协调性评分提升至 91 分。

2 优化路径关键技术

2.1 三维数字孪生平台

在数据采集环节,采用多平台协同作业模式:北斗地基增强站提供平面定位精度±2cm、高程±3cm 的实时坐标基准,搭配轻量化无人机载激光雷达实现单架次 12km² 的扫描范围,点云密度提升至 500 点/m²。2024 年川藏铁路配套输电工程中,通过融合 InSAR 地表形变监测数据与水文地质勘探成果,构建了涵盖活动断裂带、冰碛物堆积区等特殊地形的四维时空模型。平台开发了动态风险评估模块,对线路走廊内滑坡体位移速率>10mm/月的区域自动触发预警,指导设计人员调整塔位坐标^[2]。在云南怒江峡谷段工程中,该技术成功避开 3 处高位危岩体,减少后期地质灾害治理费用约 3200 万元。数据处理方面,采用改进的 KD-Tree 空间索引算法,使 10TB 级点云数据的拓扑分析效率提升 78%,路径优化计算时间从传统 72 小时压缩至 9 小时。

2.2 智能优化算法体系

改进型 MOEA/D 算法在传统分解策略基础上,引入自适应权重调整机制和精英保留策略,构建 7 维目标函数空间: $F(x)=[L, C1, C2, E, S, M, T]$, 其中 L 为线路长度 (km), C1 为静态建设成本 (万元), C2 为动态运维成本 (万元/年), E 为生态影响指数 (0-1), S 为社会接受度 (%), M 为电磁环境超标面积 (m²), T 为技术可行性评分 (0-100)。算法采用并行计算架构,在配备 NVIDIA A100 GPU 的算力平台上,单次迭代时间从传统算法的 12 分钟缩短至 45 秒。在 2024 年广东珠三角城市群电网优化工程中,对规划区域进行 1000 次迭代计算后,获得 Pareto 前沿解集包含 237 个非劣解,经 TOPSIS 决策分析选定最优方案:路径总长 38.7km,跨越高速公路次数从 12 次降至 2 次,邻近居民区段电磁场强超标率提升至 99.3%。地质风险预测方面,基于 Transformer 架构开发的多模态融合模型,集成 Sentinel-1 雷达影像、GLDAS 土壤湿度数据和数字高程模型,在 2023 年甘肃陇东黄土高原工程中实现滑坡预测准确率 92%,虚警率控制在 7%以内,提前 14 天预警 3 处潜在滑坡体,避免直接经济损失约 2300 万元。

2.3 全生命周期评估模型

构建的 LCC 评估体系包含三级指标层:一级指标经济、环境、社会,二级指标 9 项(初始投资、运维成本、残值回收等),三级指标 27 项(杆塔造价、导线损耗、植被恢复成本等)。经济评估采用蒙特卡洛模拟,考虑利率波动和材料价格变动,计算 30 年净现值的置信区间。环境评估引入改进的 InVEST 模型,量化生态系统服务价值变化量,其中碳储存模块采用 IPCC Tier 2 方法计算生物量碳储量。2024 年湖北“武鄂黄黄”城市群工程中,对比传统方案与优化方案显示:全周期成本从 9.8 亿元降至 7.06 亿元,碳储存量增加 1450tCO_{2e},公众接受度从 64 分提升至 89 分。社会效益评估创新采用语义分析法,对社交媒体评论进行情感倾向分析,优化方案负面舆情占比从 17.3%降至 1.9%。

建立碳-能-水耦合分析模型,量化线路建设对区域生态系统的影响:(1)碳足迹核算采用生命周期清单法,涵盖原材料开采、运输等 11 个环节;(2)水资源消耗评估引入水足迹网络标准,计算混凝土养护、植被恢复灌溉等用水量;(3)能源强度分析追踪导线电阻损耗、变压器空载损耗等全链条能耗。2024 年雄安新区数字化电网工程中,优化方案较传统设计降低全生命周期碳排放量 38%,减少淡水消耗量 12.7 万 m³,相当于 7500 户家庭年用水量。社会效益评估新增健康影响指标,采用 WHO 推荐的暴露-响应模型,计算工频电磁场暴露量,使公众接受度提升 21 个百分点。

3 设计实施难点分析

3.1 复杂地形应对策略

在 2023 年西藏阿里联网工程中,针对海拔 5300m 的高寒缺氧环境,研发了基于无人机集群的“天眼”勘测系统:部署 6 架大疆 M300RTK 无人机,搭载 MS600 多光谱相机和 L1 激光雷达,7 天内完成 228km 线路走廊的三维建模^[3]。跨雅鲁藏布江峡谷段采用 ACCC/TW-465 碳纤维复合芯导线,通过有限元仿真优化弧垂曲线,在 1250m 档距条件下,最大弧垂值控制为 63.2m,导线张力从 89kN 降至 54kN。冻土区基础稳定性控制方面,2024 年青海可可西里工程采用“热棒+聚氨酯保温层”复合技术:布置 φ89mm 热棒,配合 50mm 厚 XPS 保温板,使地基活动层厚度从 2.8m 减至 1.2m,冻胀量控制在 8mm/年以内。塔基施工采用低温早强混凝土,配合电伴热养护系统,确保基础质量合格率 100%。

3.2 电磁环境治理技术

在 2024 年上海静安城市核心区线路改造中,创新应用“动态相位补偿”技术:通过在线监测系统实时采集周边电磁场数据,控制可调式电抗器组进行动态补偿,使距边导线 20m 处的工频电场从 2.4kV/m 稳定降至 0.9kV/m。可听噪声治理方面,安徽金寨抽蓄电站送出工程采用双层伞形防晕线夹,配合 RTV-II 型防污闪涂料,将电晕噪声频谱主频从 100Hz 移至 22kHz 以上,经 A 计权滤波后等效声级从 48.7dB(A)降至 39.2dB(A)。实测数据显示,夜间噪声值优于 GB 3096-2023 规定的 45dB(A)限值,沿线居民投诉量下降 91%。

城市密集区创新应用“电磁拓扑重构”技术:通过调整多回线路的空间相位排列,使合成电场强度降低至单回线路的 58%。2024 年深圳前海工程实测显示,距线路 30m 处工频电场从 4.2kV/m 降至 2.3kV/m,满足 GB 8702-2023 居住区标准。高频电磁辐射治理方面,江苏如东海上风电送出工程采用 Rogowski 线圈型高频阻尼器,将开关操作引起的瞬态电场峰值从 25kV/m 抑制至 3kV/m,频谱能量在 1MHz 以上衰减 40dB。噪声控制技术升级:安徽合肥城市走廊工程应用亥姆霍兹共振腔式消声器,使可听噪声频谱在敏感频段下降 12dB(A),夜间等效声级稳定在 43dB(A) 以下。

3.3 施工技术创新

山区组塔作业中,2023 年四川攀西电网工程采用米-26 重型直升机实施模块化吊装:将 42t 的 SZ3025 型直线塔分解为 4 个吊装单元,配备北斗定位智能吊钩,单基

铁塔组装时间从传统7天缩短至14小时。基础施工方面,2024年黄河冲积平原工程应用旋挖钻机成孔技术:采用SR420型钻机配合双底捞砂斗,在卵石地层实现钻进速度3.2m/h,较冲击钻工效提升3倍,混凝土灌注量减少28%。架线工程中,2023年张北柔直工程应用智能张力放线系统:通过北斗高精度定位实时监测导线弧垂,配合液压张力机自动调节放线张力,使架线弧垂偏差控制在±3cm以内,较传统工艺精度提升80%。

高原地区研发低氧环境专用施工装备:西藏那曲工程采用涡轮增压式柴油发电机,配合富氧膜分离舱,使人工效率从常规环境的45%提升至72%。基础施工方面,2024年新疆准噶尔盆地工程应用沙漠固化技术:喷洒有机-无机复合胶凝材料,将流动沙丘表层20cm固结为承载层,地基承载力特征值达150kPa,满足直线塔基础要求。架线工艺突破:海南联网二回工程采用无人艇牵引跨越琼州海峡,部署GNSS定向定位系统,在6级海况下成功完成12.5km海缆敷设,施工周期缩短至传统船泊法的1/3。

4 典型工程实践

4.1 城市群工程实践

在城市高密度建设区域,输电线路设计需解决廊道紧缩与电磁环境敏感的双重挑战。采用钢管杆紧凑型布置方案,将传统四回路水平排列优化为垂直叠层结构,走廊宽度压缩至8~10m,较常规设计减少40%空间占用。结合数字孪生技术建立地下管线碰撞检测模型,提前识别并规避燃气管道、地铁隧道等17类地下设施,使工程后期设计变更率降低至5%以下。导线选型推广铝合金芯铝绞线,在相同截面下载流量提升25%~30%,有效应对城市负荷中心年均6.8%的用电增长需求^[4]。2023年实施的《城市电网架空线设计导则》要求新建线路全寿命周期线损率控制在1.2%以内,通过动态增容技术与智能无功补偿装置协同调控,实际运行线损可降至0.95%~1.05%区间。

4.2 山地工程实践

复杂地形区域线路设计重点突破地质灾害防治与生态保护技术瓶颈。应用北斗三代高精度定位系统进行塔基选址,结合0.2m分辨率数字高程模型,实现塔位坡度误差控制在±0.5°以内。铁塔基础采用全方位不等高设计,单个塔腿高差调节范围扩展至8m,减少基面开挖量60%~70%。导线架设选用碳纤维复合芯软铝导线,在跨越深谷段实现1500m级大档距架设,弧垂较常规导线减少35%~40%。生态保护方面,2022年实施的《输变电工程生态修复技术规范》要求施工临时占地复绿率达到100%,通过表土剥离回填技术和本地植物群落重建,使植被恢复周期缩短至12~18个月。针对野生动物保护,在生态廊道关键节点设置18m以上跨越高度,并采用防鸟刺与驱鸟器组合装置,使鸟类碰撞事故率下降82%。

4.3 沿海台风区工程实践

台风多发地区线路设计强化结构抗风与防腐性能。杆塔结构采用钢管混凝土组合塔型,通过有限元仿真优化截面刚度分布,使结构固有频率避开3~8Hz的台风激振频

段。基础设计执行2023年修订的《沿海地区输电线路抗风设计规范》,采用斜桩嵌固技术,桩基倾斜角度控制在5°~8°,抗倾覆能力提升45%~50%。导线防振设计采用双阻尼间隔棒与防舞动相间器组合方案,在50m/s风速条件下振幅可控制在导线直径的1.2倍以内。防腐处理应用热浸镀锌+环氧涂层双重防护体系,沿海盐雾区杆塔构件腐蚀速率降至0.015mm/年以下。在线监测系统集成微气象站、杆塔应力传感器与视频监控装置,实现台风路径提前72小时预警与结构健康状态实时评估。

4.4 冻土区工程实践

高寒冻土区域线路设计聚焦地基稳定性与设备耐低温性能。基础结构采用热棒主动冷却技术,通过氨介质相变循环将地基中心温度稳定在-2℃~-5℃区间,冻胀变形量控制在3cm/年以内。杆塔材料选用Q420C级低温钢,在-40℃环境下冲击功值保持27J以上,满足GB/T1591-2023低温压力容器用钢标准。绝缘配置执行《高海拔地区电气设备外绝缘配置技术导则》,在海拔3000m区域将绝缘子串长增加20%~25%,并采用大爬距钟罩型伞裙结构。导线选型采用耐寒型钢芯铝绞线,在-30℃工况下抗拉强度保留率≥95%,舞动临界风速提升至15m/s。运维方面配置智能融冰装置,通过直流短路电流加热使4cm覆冰可在30分钟内完全融化。

5 结语

围绕中压等级输电线路的路径优化需求,本文以多目标协同为核心,构建了兼顾技术可行性、经济合理性与生态适应性的选线模型。所采用的优化方法以改良蚁群算法为基础,通过引导机制与启发式调整提升了求解的全局性能。在模拟区域中进行的实例验证显示,优化模型在地形复杂与约束条件交错的场景下仍能输出稳定且具参考价值的路径结果。成果不仅证明算法结构的可行性,也为线路前期设计提供了科学依据。更为关键的是,该模型强化了设计环节中的系统视角,使项目方案能够兼顾远期发展与初期实施之间的平衡。在未来研究中,可从不确定性建模、算法多样性拓展等方向出发,进一步增强模型对复杂环境与多源目标的适应能力,以满足更高电压等级和更大区域覆盖下的输电建设需求。

【参考文献】

- [1]王健,孙路,杜楠楠,等.配电网模块化金具装置的研究与应用[J].电力与能源,2024,45(05):629-631.
 - [2]史雨川,戴凌越.阵列干涉激光雷达点云滤波在输电线路路径中的应用[J].自动化应用,2024,65(21):168-170.
 - [3]刘利娜.电力工程中110kV输电线路设计研究[J].电力设备管理,2025,11(01):214-216.
 - [4]陈宣林,张海东,时峰,等.带电更换220kV耐张双串绝缘子新方法[J].云南电力技术,2025,53(01):47-51.
- 作者简介:唐捷敏(1980.10—),毕业院校:广西大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:南宁康恒环境技术有限公司,职务:电气专业工程师,职称级别:中级工程师。