

输电线路设计中导线选型与结构优化研究

邹析

准格尔旗浩普电力勘测设计有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010399

摘要: 随着电力需求的不断增加, 高压输电线路是现代电力系统中必不可少的一部分。而导线作为高压输电线路的核心组成部分, 其选型和优化设计对于线路的可靠性、经济性以及环境影响都起着至关重要的作用。随着新型节能材料的不断涌现, 合金化及碳纤维技术的逐步成熟, 在实现导线的进一步节能方面发挥了重要作用, 保障了高压输电线路综合性能的提升。

关键词: 高压输电线路; 新型节能导线; 线路设计; 选型

在进行导线选型和优化设计之前, 首先需要明确导线所需满足的基本要求。高压输电线路的导线需要具备高的导电性能、强的机械强度、良好的耐腐蚀性能以及适应不同气候条件的抗风能力。此外, 导线还需具备较低的电阻和电感, 以降低线路的电功率损耗和电磁干扰。

1 输电线路导线选型基本原则

输电线路导线选型需综合考虑技术性能、经济性和环境适应性, 主要遵循以下基本原则:

1.1 核心选型原则。载流量原则(发热条件), 导线截面须确保最大负荷电流下发热温度不超过允许值, 避免绝缘老化或失效。计算依据线路最大持续工作电流和导线允许载流量。公式参考: $I_{\max} \leq K \cdot I_{al}$, I_{\max} : 最大计算电流; I_{al} : 允许载流量; K : 修正系数)。电压损失原则, 线路末端电压降需满足设备运行要求, 一般控制在额定电压的 $\pm 5\%$ 内。长距离输电时此原则尤为重要。

公式参考: $\Delta U\% = \frac{PR + QX}{10U^2} \times 100\%$ (P, Q : 有功/无功功率; R, X : 导线电阻/电抗; U : 额定电压)

机械强度原则, 导线需抵抗自重、风压、覆冰等机械应力, 最小截面需满足规范要求(如钢芯铝绞线 $\geq 25\text{mm}^2$)。特高压线路安全系数 ≥ 2.5 , 地线 ≥ 41011 。

经济电流密度原则, 高压线路按经济电流密度选择截面, 平衡初始投资与长期线损成本。公式参考: $S = \frac{I_{\max}}{J}$ (S : 导线截面; J : 经济电流密度, 随负荷类型变化)。

1.2 特殊场景补充原则。电晕与电磁环境影响, 110kV及以上线路需校验电晕临界电压, 控制无线电干扰和可听噪声。分裂导线可优化电场分布。环境适应性, 材料选择: 爆炸、振动场所或重要建筑需用铜芯(BVR/BV), 一般场景可选用铝芯。敷设条件: 高海拔、强风、覆冰区需增强机械强度或耐腐蚀性。

1.3 选型流程建议。高压输电网($\geq 35\text{kV}$), 经济

电流密度, 电晕、机械强度、电压损失。中低压配网, 电压损失、载流量, 机械强度。大负荷干线, 载流量+经济电流密度, 电压损失、热稳定。短距离支线, 载流量, 机械强度。

1.4 关键注意事项。保护配合: 导线截面须与熔断器、断路器等保护设备匹配, 确保短路时及时切断。绝缘等级: 绝缘层需满足额定电压(如450/750V)及环境温度要求。可持续发展: 特高压线路需权衡输送容量与生态影响。

2 输电线路导线排列方式优化

输电线路导线排列方式的优化需综合考虑电气性能、电磁环境、机械强度及走廊利用率等因素, 以下是核心优化措施及技术要点:

2.1 基础排列方式的选择优化。单回线路排列, 水平排列: 适用于重冰区、多雷区, 降低雷击风险及不均匀脱冰导致的相间闪络, 但走廊宽度较大、造价较高。

三角排列: 经济性好, 但下层导线易跃起引发故障, 普通地区(电压 $\leq 220\text{kV}$)可采用。双回线路排列, 六角形排列: 主流方式, 缩短横担长度、减少塔身扭力, 防雷保护角更优(耐雷水平提高)。垂直逆相序排列: 通过非对称相序降低电磁耦合效应, 使负序不平衡度降至同相序的30%-50%, 工频磁场影响范围缩小30%以上(适用于220kV/500kV同塔双回线路)。

2.2 紧凑型技术的子导线优化。针对特高压线路(如1000kV), 通过增加分裂数、压缩相间距优化排列: 分裂导线重组: 调整子导线空间分布(如4×LGJ-900/75), 使电荷均匀分布, 降低表面最大场强8%-12%, 减少可听噪声与无线电干扰。子导线排列创新: 优化子导线间距与角度(如多边形排列), 提升线路电容、减小电抗, 波阻抗降低可提高输送能力15%-30%。

2.3 电磁环境控制技术。工频电场/磁场抑制, 导线

高度调整：500kV线路居民区导线高度需 $\geq 19\text{m}$ ，使工频电场强度 $\leq 4\text{kV/m}$ ；非居民区高度 $\geq 11.5\text{m}$ 时电场强度 $\approx 9.6\text{kV/m}$ 。逆相序应用：磁场衰减遵循 r^{-3} 规律（优于对称排列的 r^{-2} ），边导线外5m处磁感应强度显著降低。电晕与干扰控制，海拔 $> 1000\text{m}$ 时，导线截面积需增加10%-20%以抑制电晕；逆相序排列可能使无线电干扰增加2-3dB，需结合屏蔽措施。

2.4 换位策略的优化。换位必要性：长度 $> 100\text{km}$ 的线路需换位，限制不对称电流（中性点接地系统），换位循环长度 $\leq 200\text{km}$ 。换位点设计：避免过度换位（增加绝缘薄弱点），优先采用杆塔换位而非中间接头。

2.5 经济性与安全性的平衡。走廊压缩，F型塔垂直排列，边导线间距缩至6-8m（原12-14m）。档距经济性，110kV双回线路窄基塔，安全系数 $K = 6.0$ ，经济档距350m。动态荷载控制，共振频率模型（1.7-2.5Hz），脉动风载按150%静载模拟。

3 输电线路导线选型经济性分析

输电线路导线选型经济性分析需综合考虑初始投资、运行损耗、维护成本及全生命周期效益，核心要素如下：

3.1 成本构成分析。初始投资成本，导线材料费用：铜芯电缆初始成本比铝芯高30%-40%，但导电性与寿命更优；铝导线凭借轻量化（密度仅为铜的30%）和低价，在高压架空线路中占主导。附属设施成本：导线截面增大可缩减铁塔数量，但截面过大会增加杆塔荷载和基础造价（如特高压线路铁塔成本占比达25%-28%）。典型成本区间：66kV线路建设成本约500-1000万元/公里，其中导线材料占15%-25%。运行损耗成本，电阻损耗主导：铜芯电缆电阻率比铝低38%，同等条件下年电能损耗减少约5%，长期运营效益显著。经济电流密度优化：按公式 $S = I_{\text{max}}/J$ 选择截面（ J 取值 $1.65\text{A}/\text{mm}^2$ ），可使20年总成本最低。例：2000km线路年损耗达1.12亿千瓦时，降低损耗5%年省电费超560万元（电价 $0.5\text{元}/\text{kWh}$ ）。

3.2 材料选型的经济性对比分析如表1。

表1 输电线路导线材料选型的经济性对比分析

指标	铜芯导线	铝芯导线
初始成本	高（约+35%）	低
电阻损耗	低（电阻率 $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ）	高（电阻率 $2.78 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ）
寿命周期	≥ 40 年（耐腐蚀性强）	25-30年（需防氧化处理）
适用场景	城市密集区、关键节点	高压架空线路、长距离输电

3.3 经济性决策模型。全生命周期成本（LCC）计算， $LCC = \text{初始} + \sum \frac{C_{\text{损耗}} + C_{\text{维护}}}{(1+r)^t}$ ， $C_{\text{损耗}} \propto I^2 R t$ （电阻损耗与电流平方、电阻成正比），维护成本占比：铝导线约2%-5%/年，铜导线 $\leq 2\%$ /年。截面优化方法，粒子群算法：动态匹配负荷分布与经济载荷距离，非典型负荷线路优化后电压偏差降低12%，年损耗成本减少8%。

3.4 特殊场景经济性调整。高海拔与极端环境，海拔 $> 3000\text{m}$ 需增大截面15%-20%以抑制电晕损耗，初始成本上升但避免后期改造费用。重冰区采用碳纤维复合芯导线，强度提升60%，虽单价高40%，可减少30%塔杆数量。可再生能源并网，风电/光伏配套线路需按波动负荷选型：截面过小导致弃电损失，过大则投资回收期延长（推荐 $NPV > 0$ 方案）。

3.5 关键注意事项。电压损失约束：末端压降 $\Delta U\% > 5\%$ 时需升级截面，避免低电压引发设备故障。政策影响：碳关税（CBAM）推高铝材成本，铜铝价差缩窄可能改变选型策略。走廊成本：紧凑型排列（如F型塔）节省走廊宽度40%，土地补偿费用占比降至10%以下。

4 输电线路导线选型的环保与节能考虑

4.1 节能核心：材料创新与损耗控制。新型节能导线应用，钢芯高导电率铝绞线：导电率提升至63% IACS（常规导线61%），电阻损耗降低3%-5%，全生命周期节约电费超初始成本15%。碳纤维复合芯导线：强度为钢芯的2.5倍，载流量提升50%，弧垂减少25%，重覆冰区塔杆数量可缩减30%。中强度铝合金绞线：无钢芯设计消除磁滞损耗，电阻率较常规导线低3.5%，适用于腐蚀性环境。截面优化节能机制，按经济电流密度选型：截面增大1级（如 $400\text{mm}^2 \rightarrow 500\text{mm}^2$ ），电阻损耗可降8%-12%，投资回收期约7-10年。

4.2 环保关键技术措施。电晕与噪声抑制，分裂导线优化：特高压线路采用6-8分裂结构，表面场强降低12%，无线电干扰值控制在55dB($\mu\text{V}/\text{m}$)以下（国标GB/T要求）。高海拔适应性：海拔 $> 1000\text{m}$ 时截面增大10%-20%，避免电晕损耗增加导致的臭氧污染。材料绿色化转型，无铅化护套：绝缘层采用交联聚乙烯（XLPE）替代PVC，减少重金属污染（符合RoHS 2025指令）。循环利用设计：铝合金导线回收利用率达95%，较铜导线碳足迹减少40%（生命周期评估LCA数据）。生态敏感区保护，电磁场控制：居民区导线对地高度 $\geq 19\text{m}$ （500kV线路），工频电场强度 $\leq 4\text{kV}/\text{m}$ 。鸟类防护：采用防鸟型绝缘子及导线间隔棒，降低鸟类触电风险。

4.3 政策与标准约束。碳减排目标，单位输电碳排

$\leq 0.5\text{kgCO}_2/\text{kWh}$, 《中国能源数据报告(2025)》。噪音控制雨天可听噪声 $\leq 55\text{dB(A)}$, HJ 1113标准。有害物质限制铅含量 $\leq 0.1\%(\text{wt})$, EU CBAM。清洁能源发电占比达36.81%10, 配套输电线路需适配波动性负荷, 导线选型优先采用高疲劳强度的节能材料(如ACAR导线)。

4.4 综合决策建议。经济环保平衡, 常规线路: 钢芯高导电率铝绞线(初始成本+5%, 20年LCC降12%)。重冰/腐蚀区: 碳纤维复合芯导线(强度提升60%, 运维成本降40%)。技术验证流程, [负荷预测]--> [初选截面与材料]--> {环保校验}--> |电场/噪声超标|调整分裂数或高度]--> [达标|节能验算]--> [全生命周期碳评估]--> [最终方案]。政策敏感性, 欧盟CBAM碳关税实施后, 铝导线成本优势缩减, 需动态评估铜铝价差。新建线路需预留10%扩容裕量, 适应新能源并网波动。

5 输电线路结构优化策略

输电线路结构优化策略需结合荷载特性、环境适应性及经济性因素, 以下为关键优化方向与技术看案:

5.1 杆塔结构轻量化设计。材料创新, 复合材料应用: 碳纤维复合芯导线强度提升60%, 塔重降低25%, 适用于重冰区与大跨越段。高强钢材替代: Q420高强钢比Q235减重15%-20%, 降低基础造价10%以上。塔型优化, 窄基塔应用: 110kV双回线路采用窄基塔, 走廊宽度压缩40%, 经济档距达350m。F型塔垂直排列: 边相间距缩至6-8m(常规12-14m), 减少土地占用与拆迁成本。

5.2 极端环境适应性优化。重冰区, 增强型塔头设计, 覆冰厚度分级防控(霜淞/雾淞/雨淞差异化设计)。高海拔区, 增大导线截面+防电晕涂层, 截面积提升15%-

20%, 绝缘层耐压 $\geq 35\text{kV}$ 。软土地基, 螺旋锚基础替代扩展式基础减少土方开挖30%, 承载力提升25%。

5.3 防灾与稳定性强化。防风防振, 动力响应控制: 共振频率设计为1.7-2.5Hz, 脉动风载按150%静载模拟。防振锤优化布局: 基于有限元分析确定安装间距, 降低断股风险40%。防雷与绝缘配合, 六角形双回排列: 保护角 $\leq 10^\circ$, 耐雷水平提升30%。避雷线差异化架设: 多雷区采用双避雷线+负保护角设计。

5.4 实施流程与规范。设计验证, 杆塔强度校验: 基于GB 50545进行荷载模拟; 电磁兼容性: ATP/EMTP平台仿真电场/磁场分布。政策适配, 符合EU CBAM有害物质限制(铅含量 $\leq 0.1\%$); 碳足迹核算: 单位输电碳排放 $\leq 0.5\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ 。

新建线路预留10%扩容裕量, 适配新能源波动负荷; 重腐蚀区优先选用中强度铝合金导线。

在输电线路设计中, 导线选型与结构优化是保障电力系统安全经济运行的核心环节。导线选型与结构优化是输电线路设计的基石, 直接影响电网的传输效率、安全边界及长期经济性。未来需进一步融合智能算法、新材料技术, 支撑新型电力系统构建。

参考文献

- [1]张保志.输电线路新型节能导线选型与技术经济比较分析[J].中国外资,2023(20):385-386.
- [2]秦强.新型节能导线在500kV输电线路设计中的选型方法[J].现代工业经济和现代化,2024(16):151-153.
- [3]张祥.架空导线用芯线材料综述[J].热加工工艺,2022(6):20-22.