

高海拔地区高压输电线路电气间隙优化设计研究

李 润

中国电建集团青海省电力设计院有限公司 青海西宁 810008

摘 要：高海拔地区高压输电线路电气间隙设计，面临低气压、强紫外线等特殊环境挑战。本文系统分析了海拔对空气绝缘强度的影响机制，提出包含理论计算模型、试验验证和优化策略的完整设计方法，探讨动态调整间隙距离和新型绝缘材料的应用。通过典型工程案例验证，优化后的设计方案在雷电冲击耐受能力提升的同时，实现了钢材用量减少、成本降低的综合效益，为高海拔输电工程提供了可靠的技术解决方案。

关键词：高海拔地区；高压输电线路；电气间隙；优化设计

引言

随着我国西部大开发战略推进，高海拔地区电网建设规模不断扩大。然而，海拔升高导致的低气压环境，使输电线路电气间隙设计面临严峻挑战。传统设计方法往往简单采用海拔修正系数，难以满足工程实际需求。本研究旨在建立科学的高海拔间隙优化设计体系，通过多物理场耦合分析、试验验证和工程实践，解决高海拔环境下绝缘配合的关键技术难题，为提升输电线路安全经济运行水平提供理论支撑和实践指导。

一、高海拔环境对线路电气间隙的影响分析

高海拔地区独特的气候条件，对高压输电线路的电气间隙设计提出了特殊要求。海拔升高带来最显著的变化是大气压力降低，在海拔3000米处，大气压力仅为海平面的70%左右，空气密度相应减小。这种变化直接影响空气的绝缘性能，使得相同电极间距下的击穿电压明显降低。根据帕邢定律修正模型，气体击穿电压与气压和极间距离的乘积（pd值）呈非线性关系，当海拔超过1000米时，每升高100米，空气的绝缘强度约下降0.8%~1%。

除气压因素外，强紫外线辐射会加速绝缘材料的老化，特别是对有机复合绝缘材料的影响更为显著。昼夜温差大导致的凝露现象可能形成连续水膜，进一步降低绝缘子表面闪络电压。这些环境因素的叠加效应，使得

高海拔地区的绝缘配合设计变得更为复杂^[1]。

不同电压等级的输电线路，对电气间隙的要求存在明显差异。交流输电线路由于存在工频电压的周期性变化，需要考虑操作过电压和雷电过电压的共同作用。对于直流输电线路，虽然不存在周期性电压变化，但空间电荷效应在低气压环境下更为显著，会导致电场分布畸变。实际工程中，500kV交流线路在海拔3000米地区所需的电气间隙比平原地区增加约25%，而±800kV直流线路的间隙增幅可达到30%以上。

二、高压输电线路电气间隙的优化设计方法

1. 理论计算模型

在高海拔地区进行高压输电线路电气间隙设计时，传统的经验公式和标准规范难以准确反映实际工况。为此，需要建立更为精确的理论计算模型，综合考虑多种环境因素的影响。

（1）有限元分析（FEM）是目前最有效的电场分布仿真方法之一

有限元分析模型构建时，需要建立包含导线、绝缘子、杆塔等部件的三维几何模型，并设置适当的边界条件。针对高海拔特点，模型需重点考虑以下关键参数：空气相对密度修正系数、湿度影响因子、温度梯度参数等^[2]。求解泊松方程，可以获得空间电场分布云图，识别出场强集中区域。计算结果表明，在海拔3000米地区，导线表面最大场强比平原地区增加约20%，这直接影响间隙距离的确定。另外，模型需要特别考虑低气压对介质特性的影响。具体而言，空气的相对介电常数和电导率会随气压变化，这些参数需要根据实际海拔高度进行动态调整。

作者简介：李润（1991.07—），男，汉族，陕西人，大学本科，工程师，主要从事高压输电线路电气专业方面的研究。

(2) 多物理场耦合, 提升模型精度

除了基本的静电场分析外, 还需要耦合以下因素: 温度场, 高原地区昼夜温差可达 30°C 以上, 导线的热胀冷缩会改变极间距离; 湿度场, 相对湿度的变化会影响空气的击穿特性, 特别是在清晨结露时段; 气流场, 强风环境下可能产生电晕放电, 需要评估其对电场分布的扰动。

(3) 针对不同电压等级, 模型需要采用差异化的建模策略

对于交流输电线路, 时域仿真必须考虑工频电压的周期性变化, 重点分析过零点的放电特性。直流线路则需要引入空间电荷输运模型, 模拟持续电场下的离子迁移过程。研究案例表明, 在海拔3000米地区, $\pm 800\text{kV}$ 直流线路的最大场强比平原地区高出约20%, 这要求间隙距离相应增加约25%。模型验证是确保计算结果可靠的重要环节。通常采用两种方法: 缩比试验, 在可控环境舱内进行低气压放电试验; 现场实测, 就是在已建高海拔线路上进行电场强度测量。当前研究趋势是将机器学习算法与传统数值计算相结合。借助训练神经网络, 预测不同环境参数组合下的击穿电压, 可以显著提高计算效率。

2. 试验验证

试验验证是确保高海拔地区电气间隙设计可靠性的关键环节。由于理论模型存在简化假设和计算误差, 必须通过实际测试来验证设计方案的合理性。目前主要采用两种试验方法: 高海拔现场试验和低气压模拟试验。

(1) 高海拔试验站能提供最真实的测试环境

我国在青藏高原建有多个专业的高海拔电力试验基地, 如青海共和特高压试验基地(海拔3200米)。这些试验站可开展全尺寸线路的放电特性测试, 获取的数据具有直接参考价值。

典型的试验项目包括: 标准操作冲击电压试验($250/2500\mu\text{s}$ 波形)、雷电冲击电压试验($1.2/50\mu\text{s}$ 波形)、长时间工频耐压试验、污秽条件下的绝缘性能测试。试验数据显示, 在海拔3000米处, 绝缘子的50%放电电压比海平面降低约25%, 这与理论预测基本吻合。

(2) 低气压模拟试验是更经济便捷的替代方案

通过使用可调压试验舱, 可以在平原实验室模拟不同海拔的气压条件。现代先进的低气压试验舱可实现 $10\text{--}100\text{kPa}$ 的气压调节范围, 对应海拔 $0\text{--}5000$ 米的模拟环境。

关键测试技术包括气压精确控制系统(波动范围 $\pm 0.5\text{kPa}$)、温湿度综合调节装置、高速摄像记录系统(帧率 $\geq 10000\text{fps}$)。试验过程中需要特别注意几个技术细节: 放电起始点的精确定位; 空间电荷分布的测量; 不同湿度条件下的击穿特性对比^[3]。某次模拟试验发现, 在模拟海拔4000米条件下, 操作冲击电压的分散性比海平面大30%, 这意味着在高海拔地区需要更大的安全裕度。

(3) 对比分析两种试验方法的优劣

高海拔现场试验的优势在于环境真实, 但受天气条件限制大, 试验周期长, 成本高昂。一次完整的现场试验可能需要3-6个月时间。低气压模拟试验虽然成本较低, 但无法完全复现高原的紫外线辐射、温度变化等综合因素。

试验技术发展新趋势是采用数字孪生方法, 将实测数据与仿真模型动态结合。通过部署在线监测装置, 实时采集运行线路的放电数据, 反馈修正理论模型。

3. 优化策略

(1) 动态调整间隙距离

高海拔输电线路的电气间隙设计, 必须突破传统“一刀切”的模式, 采用动态调整策略。电气间隙的动态调整需要建立多参数耦合的工程体系, 其核心在于突破传统线性海拔修正的局限, 实现精准化配置。基于帕邢定律的海拔修正必须结合具体环境特征进行细化, 特别是在3000米以上海拔区域, 需要考虑击穿电压非线性下降的特性。分段设计方法, 就是根据沿线海拔变化将线路划分为若干区段, 每个区段采用不同的间隙标准。分段设计应以500米为间隔划分设计区段, 同时整合微地形特征、局部气象条件、污秽等级分布等关键参数, 其中水平间隙需考虑10-15%的风偏裕度, 垂直间隙需预留20-25%的覆冰下垂裕度, 斜向间隙则要确保三维空间安全距离^[4]。

工程实现需要依托数字化设计平台, 通过高精度数字高程模型、气象观测数据库、雷电定位系统数据等多源信息融合, 构建包含绝缘配合计算模块的智能设计系统。动态调整的核心算法涉及多物理场耦合计算、随机过程模拟和可靠性评估等技术, 重点解决不同海拔区间参数的非线性转换、极端气候条件模拟验证等关键技术难点。在实施过程中, 必须注重过渡区段的平滑处理、特殊地形的局部强化, 并建立包含设计参数交叉验证、施工误差控制、运行数据反馈在内的全过程质量控制体系。基于多维度参数分析的动态调整方法, 相比传统设

计具有安全裕度更精确、材料使用更经济、运行可靠性更高等显著优势，为高海拔地区输电线路设计提供了新的技术路径。值得注意的是，该方法的工程应用需要配套建立严格的质量控制标准和智能运维体系，以确保设计理念的完整落实和长期运行效能。

(2) 新型绝缘材料与结构应用

复合绝缘材料在高海拔环境展现显著优势。硅橡胶复合绝缘子相比传统瓷绝缘子具有显著优势，重量减轻40%，便于高海拔运输安装，耐紫外线性能提升3-5倍，并且表面憎水性更好，污闪电压提高30%。新研发的纳米改性复合绝缘材料进一步提升了性能：添加TiO₂纳米颗粒，紫外线防护率提升至99%；石墨烯增强材料使机械强度提高50%；超疏水涂层使表面接触角达160°。

均压环的优化设计，能有效改善电场分布。通过有限元分析可以确定：最优环径与导线直径的比例关系；最佳安装位置（通常距绝缘子串端部1.2-1.5m）；环体截面形状对电场均匀度的影响。某高海拔换流站采用新型双环结构均压装置后，最大场强降低35%，电晕损耗减少60%，无线电干扰水平下降8dB。

其他创新结构还包括：自适应调节间隙装置，可根据气象条件自动调整；三维立体均压系统，用于特高压直流场；智能监测型绝缘子，内置传感器实时监测泄漏电流。

三、典型工程案例

青藏联网工程是高海拔交直流混合输电工程，其中某段500kV交流输电线路的电气间隙设计面临严峻挑战。该线路平均海拔3850米，最高塔位达4980米，环境气压仅为海平面的55%-60%，紫外线强度超平原地区3倍，年温差高达60℃。初期设计直接采用平原地区3.2米的标准间隙距离，导致试运行期间雷电冲击故障率达到0.87次/百公里·年，操作过电压闪络事故频发，复合绝缘子年异常老化率达12%。

针对这些问题，工程团队创新性地采用了“动态海拔修正+新型绝缘配置”的技术方案。建立了精确的海拔梯度模型，将全线划分为<3000m、3000-4000m、>4000m三个区段，相应设置3.5m、4.1m、4.8m的差异化间隙距离。同时采用具有纳米改性涂层的耐紫外线复合绝缘子，并配置自适应均压环系统^[9]。

在安全性方面，优化后的线路雷电冲击耐受电压提升28%至1980kV，操作过电压安全裕度从1.15提高到

1.38，绝缘子年老化率控制在2%以内，污闪电压达到原设计的1.32倍。

经济效益方面，通过精准计算实现了显著优化：在<3000m区段塔高降低1.8m，3000-4000m区段降低0.9m，总计减少钢材用量8200吨（14%），绝缘子采购成本节约2300万元。

工程创新性地提出了海拔-气象耦合修正系数，开发高海拔专用绝缘子伞形结构，建立动态间隙计算软件平台，实现了“一塔一设计”的精准化配置。这些技术创新使工程安全运行8年，全寿命周期成本降低19%，相关技术已成功推广至后续多个高海拔输电工程。

该案例证明，高海拔地区电气间隙设计必须突破标准规范限制，采用基于实测数据的动态优化方法。通过精确计算与技术创新，在确保安全性的同时实现了显著的经济效益，为高海拔输电建设提供了重要参考。工程团队开发的动态间隙计算方法和新型绝缘配置方案，为类似环境条件下的输电线路设计建立了技术标杆。

结语

本研究提出的高海拔地区电气间隙优化设计方法，通过理论创新和技术集成，有效解决了传统设计存在的安全隐患和经济性问题。工程实践证明，动态调整间隙距离和新型绝缘材料的应用显著提升了线路运行可靠性。未来研究应进一步关注智能化监测技术和自适应调节装置的开发，推动高海拔输电技术向更安全、更经济、更智能的方向发展，为我国能源战略实施提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 余明智. 高海拔地区220kV输电线路复合材料杆塔应用研究[D]. 昆明理工大学, 2023.
- [2] 丁祥根. 基于温度对电气间隙设计影响的叠加修正方法研究[J]. 传动技术, 2024, 38(02): 10-14.
- [3] 朱瑞凝. 基于交直流电源的智能电网系统设计与优化[J]. 电气时代, 2023, (10): 93-96+110.
- [4] 马海木呷, 刘炯, 梁明, 等. 特重冰区特高压交流输电线路相间距研究[J]. 电工技术, 2024, (07): 121-123.
- [5] 程元智, 于雯静. 架空输电线路规划设计电气技术研究[J]. 电工技术, 2024, (08): 203-205+209.