

# 高海拔环境下高压输电线路外绝缘特性及电气设计研究

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：**本研究针对高海拔环境下高压输电线路外绝缘特性变化，系统分析了低气压、强紫外、温差大等因素对绝缘性能的影响。通过理论分析、仿真模拟及工程案例，探讨了不同绝缘材料的适应性及合理的电气设计策略，提出了优化外绝缘结构和提升防污闪能力的技术路径。研究结果对提升高原地区输电线路运行稳定性与设计水平具有重要工程意义。

**关键词：**高海拔环境；高压输电线路；绝缘特性

## 一、高海拔环境特征及其对外绝缘性能的影响

### 1. 高海拔环境的主要特征

高海拔地区通常指海拔在2500米以上的区域，其自然环境具有明显不同于平原地区的特征。首先，大气压随海拔升高而降低，空气密度显著减小，导致电气设备周围介质的绝缘强度下降。其次，日照强、紫外辐射增强，加速了绝缘材料的老化。第三，高原气候多变，昼夜温差大，易引发结露和冰冻，对外绝缘形成不均匀应力。同时，这些地区降水、雷电和大风天气频繁，空气中尘土及风沙含量高，容易形成污秽沉积，对电气设备的表面绝缘能力构成威胁。

### 2. 高海拔对外绝缘的主要影响

在高海拔环境中，由于空气密度降低，外绝缘的击穿电压明显下降，电晕起始电压也随之降低，这使得输电线路更容易发生局部放电甚至闪络事故，增加了运行风险。与此同时，高原地区强烈的紫外线辐射对绝缘子材料造成加速老化，导致其表面憎水性能下降，进而更易吸附湿气和各种污染物，形成导电路径。当遇到雨雪天气或融雪水分渗透时，绝缘子表面的局部电场会发生畸变，极易引发闪络放电，严重威胁输电线路的安全和稳定运行。基于这些环境特性，传统的外绝缘设计方案显然不足以满足高海拔地区的需求。必须通过增加爬电距离，提升绝缘水平，同时优先选用耐紫外老化、憎水性能优异的绝缘材料，来有效抵抗环境的恶劣影响。此外，绝缘结构设计也应注重防污和排水性能，确保绝缘

表面在复杂气候条件下保持良好绝缘状态，从而保障输电线路的长期安全运行。

## 二、高压输电线路外绝缘设计原则与技术要求

### 1. 常规外绝缘设计原则

常规高压输电线路外绝缘设计遵循安全性、经济性、可维护性和适应性的基本原则，旨在确保线路长期稳定、安全运行。首先，设计时必须保证爬电距离满足最小安全要求，充分考虑线路所处的环境条件和电压等级，从而有效防止闪络和击穿现象。其次，绝缘材料的选择极为重要，应优先采用性能稳定且耐候性强的材料，如陶瓷、玻璃及复合绝缘子，以确保其在多变气候条件下依然具备优良的绝缘性能和机械强度。绝缘子的几何结构设计也需重视，要求具备良好的排水能力和自清洁性能，有效防止雨雪、灰尘、盐分等污染物积聚导致的绝缘性能下降，从而降低污染风险。此外，设计应优化电场分布，保证电压均匀分布，避免局部电场过强，减少电晕放电和局部放电的可能性，这不仅提升了绝缘可靠性，也延长了设备使用寿命。常规设计还应注意设备的通用性和互换性，便于后期维护和更换，降低运维成本。整体来看，以上设计原则和方法构成了外绝缘设计的核心，确保高压输电线路能够在多种环境条件下稳定、高效地运行，为电力系统的安全供电提供坚实保障。

### 2. 高海拔特殊设计要求

在高海拔环境下，空气密度显著降低，导致其介电强度随之下降，使得绝缘电气间隙的耐压能力减弱。为确保输电线路的运行安全，外绝缘设计中必须适当增加爬电距离，以满足降低气压条件下的绝缘要求。设计中通常采用气压修正系数对标准爬电距离进行折算，确保在实际海拔高度下仍具备足够的绝缘裕度。此外，高海

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

拔地区紫外辐射强烈，绝缘材料需具备良好的耐紫外老化性能。复合绝缘子因其具备优异的憎水性、轻质量和抗老化能力，成为优选材料，可有效延长使用寿命并减少维护频次。同时，为应对高原常见的尘土沉积、风沙侵蚀和冰雪凝附，绝缘结构应采用伞裙密集、下垂角较大、具自清洁功能的设计，以降低污染发生概率。极端的昼夜温差也需引起关注，不同材料之间的热膨胀系数差异可能引发应力集中，进而导致裂纹或绝缘失效，因此需在结构设计时采用热稳定性好的复合结构。针对雷电活动频繁的地区，还应配置避雷器、电晕环和均压装置，以均衡电场分布，提升线路整体抗雷能力和电气绝缘安全等级，实现高海拔输电线路的长期安全可靠运行。

### 三、典型外绝缘元件性能分析与对比

#### 1. 陶瓷与玻璃绝缘子在高海拔的适应性

陶瓷和玻璃绝缘子是传统高压输电线路中应用广泛的外绝缘元件。陶瓷绝缘子具有较高的机械强度和良好的热稳定性，适用于多种气候条件。但在高海拔地区，由于空气稀薄，其对电场变化的适应性不足，且表面易积聚污秽，憎水性差，遇湿易形成导电膜，造成闪络事故。玻璃绝缘子具有较强的介电强度和良好的自清洁性能，适用于有一定风力和雨水冲刷的地区，但其在高海拔环境下易受紫外线照射导致结构疲劳，同时玻璃材料在极端温差下存在爆裂风险。此外，两者重量大、安装维护工作量大，也限制了其在高原恶劣环境下的应用优势。因此，在高海拔地区，传统陶瓷与玻璃绝缘子在长期运行稳定性上仍存在一定局限。

#### 2. 复合绝缘子优势分析

复合绝缘子因其卓越的绝缘性能和结构设计优势，近年来在高海拔输电线路领域得到了广泛推广和应用。其伞裙部分采用有机硅橡胶材料，这种材料具有优异的憎水性和自清洁能力，能够有效抑制绝缘子表面导电通道的形成，显著降低因污染引起的污闪风险。相比传统的陶瓷和玻璃绝缘子，复合绝缘子的重量更轻，安装更为便捷，且具备更强的抗冲击能力，特别适合在地形复杂、气候恶劣的高原环境中使用。高海拔地区紫外线辐射强烈，而经过改性处理的硅橡胶材料表现出良好的抗紫外线老化性能，延长了绝缘子的使用寿命。此外，复合绝缘子的核心材料为玻璃纤维增强塑料（FRP），这种材料不仅机械强度高，还具备优良的耐高温特性，能够在高原地区极端的温差变化和强风载荷作用下保持结构稳定和绝缘性能的可靠性。综合来看，复合绝缘子因其优越的环境适应性、轻便耐用和高可靠性，成为高海拔高

压输电线路外绝缘设计的理想选择，有助于提升线路整体运行的安全性和稳定性。

### 四、高海拔下绝缘性能的仿真分析与试验研究

#### 1. 仿真模型构建

为研究高海拔环境对高压输电线路外绝缘性能的影响，需构建符合实际工况的仿真模型。仿真模型通常基于有限元分析（FEA）方法，结合电场分布、电压应力、材料特性及环境因素进行建模。模型中应详细考虑绝缘子结构参数、伞裙形状、安装位置、复合材料电气特性，以及高海拔下空气介电常数、压力和温度的变化。尤其是在高原低气压条件下，大气折减因子必须被准确引入，以确保仿真电场强度真实反映现场工况。

#### 2. 关键参数仿真分析

在仿真研究中，关键参数包括爬电距离、电场强度分布、电晕起始电压以及表面电压梯度等。通过对不同海拔高度（如3000m、4000m、5000m）下的仿真结果对比，可以发现空气介电强度随海拔升高显著下降，电场集中区域增多，容易形成局部放电。绝缘子伞裙结构对电场均匀性的影响也较为明显，伞裙密度越高，表面电压梯度越均匀，有利于抑制电晕和闪络发生。同时，通过调整伞裙长度、间距、材质等参数，可以优化电场分布，提升绝缘性能。仿真还可揭示污染沉积、冰雪附着等因素对局部电场的增强效应，为制定更具针对性的设计与运维策略提供理论依据。

#### 3. 试验研究及验证方法

为验证仿真结果的准确性，必须结合实际环境进行高海拔绝缘性能的系统试验。通常，研究人员会利用能够模拟高海拔环境的高压实验室设备，或者直接在高原现场搭建专门的测试平台，对不同类型的绝缘子进行全面的性能评估。试验内容主要包括污闪电压试验、雷电冲击试验以及电晕起始电压测定等关键指标，通过这些试验可以真实反映绝缘子在复杂环境下的电气性能。为了更精准地模拟高海拔环境，试验中通常采用可控气压舱调整内部气压，模拟不同海拔高度下的气压变化，观察绝缘子在受污染、受潮、结冰和积雪等多种工况下的击穿电压和放电特征。此外，试验还辅以红外热成像技术和电场分布测量，监测局部放电的发生位置和强度，评估绝缘材料的老化程度和热损伤情况。通过这些丰富的试验数据与仿真模型输出进行对比，能够有效校验仿真模型的准确性与合理性，发现模型中可能存在的偏差和不足。进一步基于试验反馈修正仿真参数，优化模型结构，从而显著提升仿真结果的可靠性和工程适用性，

为高海拔高压输电线路的设计和运行维护提供科学依据和技术保障。

## 五、电气设计优化策略

### 1. 绝缘水平修正方法

在高海拔地区，由于大气压力显著降低，空气的介电强度相应下降，导致传统设计的绝缘水平难以满足安全运行的要求。空气稀薄使得电晕放电、电弧闪络等电气故障风险增加，因此，电气设计中必须对绝缘水平进行科学合理的修正。常用的修正方法是引入“气压修正系数”或“高海拔修正因子”，该系数基于实际海拔高度和对应的大气压力，对标准爬电距离、工频耐电压值以及雷电冲击电压等关键绝缘参数进行调整。例如，对于海拔3000米以上的地区，通常需要将常规爬电距离增加30%以上，以确保绝缘性能达到与低海拔地区相同的安全裕度。此外，设计过程中应参考国家标准GB/T20138以及国际电工委员会（IEC）的相关规范，根据具体的局部海拔、大气压力和污染等级等环境因素，进行更加精细化的修正计算。通过这些修正措施，既能有效提高输电线路的绝缘安全性，防止因环境恶劣引发的电气故障，又避免了因过度设计带来的材料浪费和成本增加，从而实现技术与经济的双重优化。这一高海拔绝缘水平修正方法，已成为高原输电线路电气设计中的关键技术保障。

### 2. 典型优化措施

为了提升高海拔输电线路的绝缘可靠性，设计中应采取多种典型优化措施。首先是在绝缘材料选择方面，优先采用憎水性强、耐紫外、耐老化的复合材料，如高性能硅橡胶，减少日晒风蚀造成的性能衰退。其次，在结构设计方面，应优化绝缘子的伞裙结构，采用多伞裙、高密度伞裙或大尺寸伞裙形式，增强其抗污能力和自清洁性，降低污染风险。同时，可合理配置电晕环和均压环，控制电场分布，减少局部电场畸变带来的放电隐患。在导线布置方面，应注意相间距和相对地距离的合理匹配，防止高电压下的跨越放电。此外，还可结合气象数据建立动态防污预警系统，实现输电线路运行状态的实时监测和远程维护，大幅度提升线路运行安全水平。

### 3. 工程设计建议

结合高海拔环境的特殊性及相关研究成果，提出以下电气工程设计建议以保障输电线路的安全稳定运行。首先，电气绝缘水平设计必须依据最不利工况进行修正，尤其应重点考虑雷电冲击和污闪等级的影响。在高原复

杂气象条件下，忽视这些因素可能导致绝缘击穿和设备损坏，严重影响电网安全。其次，在设备选型方面，推荐优先采用高性能复合绝缘子，因其具备优异的憎水性、耐紫外辐射和低温性能，能够有效适应高海拔强烈日照和极端气候条件，延长使用寿命并减少维护频率。第三，施工布线设计时，应合理增加导线与地面、相间的安全距离，以降低因空气稀薄引起的放电风险。同时，必须采用高强度防风结构，以抵御高原地区常见的强风和冰雪载荷，确保线路机械强度和稳定性。第四，建议沿输电线路设置绝缘性能在线监测装置，结合大数据分析技术，对绝缘状态进行实时评估，实现隐患的早期发现和精准维护，提升运行可靠性。最后，加强运维人员的专业培训，提高其对高海拔环境特殊性的理解和应对能力，制定切实可行的专项维护方案和应急预案，确保突发情况下的快速响应与处理。综上所述，这些设计与管理措施相结合，有助于构建安全可靠、适应性强的高原输电系统，保障清洁能源稳定输送和电力供应安全。

## 结束语

高海拔地区特殊的气候与环境条件对高压输电线路的外绝缘性能提出了更高的要求。本文围绕高海拔环境的特征、电气设计原则、典型绝缘元件分析、仿真与试验研究，以及优化设计策略等方面进行了系统探讨。研究表明，只有全面考虑气压变化、环境污染、紫外辐射等因素，采用科学的绝缘水平修正方法与高性能材料，辅以先进的仿真技术与现场试验验证，才能确保输电线路在高原复杂环境中的长期安全稳定运行。未来，随着输电规模的不断扩大与技术的持续发展，高原电网外绝缘设计与运维将更加智能化、精细化，为清洁能源输送和电力系统可靠性提供有力保障。

## 参考文献

- [1] 甄永赞, 崔翔, 卢铁兵, 等. 高压直流输电线下合成电场的有限元快速算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 113-118.
- [2] 李永明, 柴贤东, 张淮清, 等. 计算高压直流线路地面电场和电晕损耗的简单方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 6-9.
- [3] 卢铁兵, 冯晗, 崔翔, 等. 基于上流有限元法对高压直流输电线路下合成电场的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 13-16.