

# Research on Optimal Design of Transmission Line Tower Structure in Complex Terrain

Dun Chong

China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830063, China

## Abstract

This paper analyzes the influence mechanisms of complex terrains such as mountains, swamps, coastal areas, and karst areas on the construction of poles and towers, load distribution, and foundation stability, and clarifies core risks such as wind load distortion, uneven ice coverage, and the impact of landslides and debris flows. Based on the DL/T5486-2020 specification and the principles of mechanical design, the limitations of the existing design in terms of terrain coupling, material compatibility, and structural form diversity are pointed out, and then a multi-dimensional optimization scheme is proposed. Based on structural mechanics, the slope of the tower body and the layout of inclined materials were adjusted. Q420 high-strength steel and carbon fiber composite materials were preferred. The pile foundation and rock anchor foundation were optimized. The weak links were located by finite element simulation and the advantages and disadvantages of the schemes were compared. Research shows that the above-mentioned methods can effectively enhance the strength, stability and economy of transmission towers, providing theoretical support and engineering reference for the design of transmission line towers in complex terrains.

## Keywords

Complex terrain Transmission lines; Tower structure "Optimized design

## 复杂地形下输电线路杆塔结构优化设计研究

崇敦

中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830062

## 摘要

本文剖析山地、沼泽、沿海、喀斯特等复杂地形对杆塔建设施工、荷载分布及基础稳定性的影响机制,明确风荷载畸变、覆冰不均、滑坡泥石流冲击等核心风险。结合DL/T5486-2020规范与力学设计原理,指出现有设计在地形耦合性、材料适配性、结构形式多样性上的局限,进而提出多维度优化方案。基于结构力学调整塔身坡度与斜材布置,优选Q420高强度钢及碳纤维复合材料,优化桩基础与岩石锚杆基础,借助有限元模拟定位薄弱环节并对比方案优劣。研究表明,上述方法可有效提升杆塔强度、稳定性与经济性,为复杂地形输电线路杆塔设计提供理论支撑与工程参考。

## 关键词

复杂地形; 输电线路; 杆塔结构; 优化设计

## 1 引言

随着我国“西电东送”“北电南供”能源战略深入推进,输电线路作为能源传输核心载体,需跨越山地、沼泽、沙漠、喀斯特等复杂地形区域的比例显著提升。此类地形具有地形破碎、微气象复杂、地质条件不稳定等特征,给杆塔结构设计带来严峻挑战。国内外学者围绕输电线路杆塔设计已开展诸多研究,在常规地形杆塔力学计算、基础选型等方面形成成熟理论,但针对复杂地形的研究仍存在短板。基于此,本文对复杂地形下输电线路杆塔结构优化设计展开相关研究。

【作者简介】崇敦(1986-),男,中国甘肃人,硕士,高级工程师,从事输电结构研究。

## 2 复杂地形对输电线路杆塔结构的影响

### 2.1 复杂地形的类型与特点

复杂地形类型多样且特征各异,对输电线路杆塔的建设、运行及维护均构成显著影响。山地地形起伏剧烈、地势落差显著且地形破碎,不仅导致杆塔基础施工受限,大型设备难以进场、材料运输多依赖人力或畜力,其复杂多变的微气象还进一步提升了杆塔设计复杂度<sup>[1]</sup>。丘陵地形虽然较山地和缓,但仍存起伏,杆塔基础施工需要随地形调整且基础形式需结合地形地质条件,且区域植被茂密需要预处理,既增加施工成本又可能破坏生态。沼泽地形低洼、地下水位高且土壤饱和松软、承载力极低,易引发杆塔地基沉降与滑移,恶劣施工环境还威胁人员健康并加大施工难度。沿海地区受台风、风暴潮侵袭,强风巨浪产生的水平推力与上拔力可能

致杆塔倾斜、倒塌或基础破坏。沙漠地区干旱多风沙，沙质土壤疏松致地基不稳，风沙侵蚀还会损坏杆塔结构与设备、缩短使用寿命。因此，复杂地形对杆塔设计、施工及运维要求极高，需要结合地形特征制定针对性措施以保障输电线路安全稳定运行。

## 2.2 复杂地形下杆塔所受荷载分析

复杂地形下输电线路杆塔所受荷载类型多样且与常规地形存在显著差异。风荷载作为核心荷载，受地形起伏、山体阻挡及峡谷效应影响，近地风场发生畸变，风速与风向分布复杂化。山地中地形的阻挡与加速作用使山顶、山坡风速远高于平原，且风向不稳定，易形成局部强风区与紊流，对杆塔产生额外风压力及扭矩，增加结构受力复杂度。覆冰荷载在高海拔、寒冷或高湿山区尤为突出，复杂地形微气象差异导致覆冰厚度、密度及形状不均，不均匀覆冰诱发不平衡荷载，提升杆塔倾斜、倒塌风险<sup>[2]</sup>。地震荷载在地震活跃复杂地形区威胁显著，区域地质条件复杂使地震波传播特性异于常规地形，还可能引发滑坡、泥石流等地质灾害，进一步加剧杆塔受力，导致基础松动、结构损坏。山区地形起伏与档距变化使杆塔承受不均导线张力及垂直荷载，多荷载综合作用下受力更恶劣，对杆塔强度、稳定性及耐久性要求更高，设计中需充分考量这些因素，采用合理设计方法与计算模型，保障杆塔工况安全可靠。

## 2.3 复杂地形对杆塔基础的影响

复杂地形易诱发杆塔基础稳定性问题，对输电线路安全运行构成潜在威胁。山区中，滑坡作为典型地质灾害，受重力、雨水及地震等作用，山坡土体或岩体沿滑动面整体下滑，若杆塔基础处于滑坡区域，滑坡推力将使基础承受巨额侧向力，致其位移、倾斜乃至破坏，进而引发杆塔倒塌。泥石流由暴雨、冰雪融化诱发，含大量固体物质的洪流冲击力极强，易冲毁途经杆塔基础，使杆塔失稳倒塌。沼泽地区土壤松软、承载力低，基础易发生沉降，长期沉降会导致杆塔倾斜、导线弧垂变化，破坏安全距离，严重时引发线路短路。喀斯特地貌区因地下溶洞发育，基础可能因溶洞塌陷失稳。针对上述问题，基础设计需结合地形地质条件采取专项措施。山区滑坡段采用抗滑桩、挡土墙增强抗滑能力，泥石流多发区将基础设于影响范围外或设防护，沼泽区用桩基础将荷载传递至坚实土层/岩层，喀斯特区需详勘溶洞分布，通过跨越、填充加固保障基础稳定。复杂地形下杆塔基础设计需综合多因素，确保其强度、稳定性与耐久性，以保障输电线路安全稳定运行。

# 3 输电线路杆塔结构设计原理与规范

## 3.1 杆塔结构设计的基本原理

输电线路杆塔结构设计的力学原理以材料力学、结构力学及理论力学为基础，核心目标是保障杆塔在各类荷载作用下安全稳定运行，关键围绕强度、稳定性与刚度三大维度展开计算。强度计算旨在控制构件应力不超材料许用值，如

轴心受力构件中，拉杆应力公式为

(为应力，为轴向拉力，为净面积，为许用拉应力)，压杆则引入稳定系数，公式为(为毛面积)。

稳定性计算对受压构件至关重要，理想轴心受压构件临界力采用欧拉公式(为临界力，为弹性模量，为截面惯性矩，为计算长度系数，为构件长度)，实际需考虑初始缺陷、残余应力，引入折减系数修正。刚度计算以控制变形为目的，重点计算水平荷载下杆塔水平位移，常用材料力学建模计算与有限元离散单元数值分析两种方法，设计中需结合工程实际选择方法，确保满足规范要求。

## 3.2 相关设计规范与标准解读

输电线路杆塔结构设计需以相关规范标准为依据，确保科学性、合理性与安全性，其中 DL/T5486-2020《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》作为核心行业标准，针对不同电压等级、杆塔类型及环境条件制定了全面细致的设计要求。该规程明确设计基准期为 50 年，要求此周期内杆塔持续满足预定功能<sup>[3]</sup>。在可靠性层面，规定杆塔需在设定时间与条件下具备功能完成能力，荷载取值及组合上，细化永久、可变、偶然荷载的取值标准与不同工况下的计算方法，保障杆塔强度、稳定性及刚度达标。复杂地形应用该规范时，需重点关注地形对荷载的影响。山区地形起伏导致风荷载分布复杂，可能出现局部强风区，需结合地形调整风荷载取值，覆冰荷载受微气象差异影响更复杂，需考量不同地段覆冰厚度、密度及形状，按规范精准计算，基础设计针对软土地基、岩石地基等特殊地质，需依据实际勘察结果遵循规范方法，确保基础稳定。

## 3.3 现有杆塔结构设计存在的问题分析

现有输电线路杆塔结构设计在复杂地形适应性、材料选择及结构形式维度存在明显局限，需针对性优化。复杂地形适应性不足表现为设计未充分耦合地形与地质特征。山区杆塔基础未充分考量滑坡、泥石流等灾害影响，抗滑与抗冲刷能力薄弱；高海拔地区设计对材料低温性能及结构保温性重视不足，影响服役寿命与安全性；地形起伏区杆塔高度、档距参数不合理，易导致导线弧垂异常，干扰线路正常运行。材料选择上，传统钢材与混凝土存在环境适应性与施工适配性局限。钢材在潮湿腐蚀环境易锈蚀，需高频防腐维护以提升成本，且在复杂地形运输安装难度大；混凝土自重，山区施工难度高，且抗震性能较弱，难以满足地震频发区设计要求。结构形式单一化导致地形适配性差。常规自立式铁塔在狭窄山谷、陡峭山坡等特殊地形占地面积大且施工困难，部分老旧杆塔因设计未考虑复杂地形荷载变化，结构冗余度不足，极端天气或地质灾害下易发生倒塌事故。

# 4 复杂地形下输电线路杆塔结构优化设计方法

## 4.1 基于结构力学的优化方法

结构力学原理是提升输电线路杆塔结构性能的核心优化途径，主要通过塔身坡度调整与斜材布置优化实现性能提

升。塔身坡度对结构受力具有显著调控作用，合理增大坡度可使主材受力均匀化、缓解应力集中。某山区工程案例中，将塔身坡度从常规 $12^\circ$ 增至 $20^\circ$ 后，计算显示主材最大应力降低20%，承载能力与杆塔稳定性同步提升，同时还能优化整体刚度，将风荷载等作用下的变形量控制在安全范围，保障线路运行安全。斜材作为承受剪力与扭矩的关键构件，其布置直接决定杆塔抗剪抗扭性能，采用K型、X型等布置形式可增强空间稳定性——如K型布置通过斜材与主材构成三角结构，强化局部稳定以抵抗水平荷载与扭矩。研究表明，当斜材角度处于 $45^\circ$ 至 $60^\circ$ 区间时，杆塔受力状态最优且材料利用率最高，实际工程中需结合杆塔受力特点与地形条件，选定适配的斜材布置方案，进一步优化结构受力性能。

#### 4.2 材料选择与优化

适配复杂地形的输电线路杆塔材料需满足高强度、耐腐蚀性及轻量化核心特性，以适配复杂环境服役需求。Q420、Q550等高强度钢为常用选型，其屈服强度显著优于普通钢材——相较于Q345钢，Q420钢屈服强度提升约22%，相同设计条件下可减少15%-20%钢材用量，既保障杆塔强度与稳定性，又降低自重，便于复杂地形运输施工，且耐腐蚀性能可减少维护成本、延长服役寿命。碳纤维复合材料具广阔应用前景，其密度仅为钢材的 $1/4$ 左右，强度却远超钢材，能减轻山区等区域的运输安装难度、提升施工效率，且绝缘性可减少绝缘子用量降低成本，但当前较高成本限制其规模化应用，未来随技术发展成本下降有望普及。材料选择需要综合输电线路重要性、运行环境及建设成本权衡。重要线路或恶劣环境优先选高性能材料，一般线路在满足设计要求下选低成本材料，同时可通过杆塔结构优化进一步提升材料利用率、控制成本。

#### 4.3 基础设计优化

适配复杂地形的输电线路杆塔基础中，桩基础为常用高效形式，其核心原理是将杆塔荷载传递至深层稳定土层或岩层，以此提升基础承载能力与稳定性，在软土地基、沼泽等低承载力区域优势尤为显著。灌注桩可依据地质条件与荷载需求灵活调整桩径、桩长及布置方式，预制桩则具备施工速度快、质量易控的特点，适用于进度要求高的项目。某沼泽区输电工程采用灌注桩基础，桩径设为800mm、桩长达15m，成功解决地基承载力不足问题，保障杆塔稳定运行。

岩石锚杆基础适用于岩石地基复杂地形，凭借锚杆与岩石的粘结力承受杆塔上拔力及水平力，且施工简便、成本较低。设计时需结合岩石性质、锚杆参数计算极限抗拔承载力与锚固长度——坚硬岩石可缩短锚固长度，软质岩石需延长以保稳定。某山区岩石地基工程采用该基础，锚杆直径32mm、锚固长度4m，经现场试验验证，基础承载能力与稳定性符合设计要求，且施工过程中对周边环境破坏较小。

#### 4.4 利用数值模拟进行优化设计

有限元分析等数值模拟方法是复杂地形下输电线路杆塔结构优化设计的关键支撑手段，通过构建杆塔结构有限元模型，可精准表征其在多荷载工况下的力学响应。建模过程中需合理遴选单元类型、赋值材料属性及界定边界条件以保障模型精度。杆塔主材与斜材可采用梁单元或杆单元模拟，基础部分则依据类型匹配对应单元。施加风荷载时结合地形特征与气象数据确定荷载大小及方向，模拟覆冰荷载时需纳入覆冰厚度、密度及分布不均性等参数。通过有限元分析可获取杆塔各部位应力、应变及位移分布特征，进而定位结构薄弱环节。数值模拟可用于多设计方案的性能-成本对比，助力遴选最优方案，提升设计科学性与经济性。

### 5 结语

本文围绕复杂地形下输电线路杆塔结构优化设计开展系统性研究，厘清了不同类型复杂地形的差异化影响规律，明确了山地风荷载畸变、沼泽地基沉降、喀斯特溶洞塌陷等风险的作用机制，为后续设计提供精准的风险识别依据，构建了“结构-材料-基础-数值模拟”一体化优化体系，通过调整塔身坡度与斜材布置优化结构受力，优选高强度钢与复合材料平衡性能与成本，设计特种基础适配特殊地质，借助有限元模拟提升设计精度，且多个工程案例验证了方案的有效性。结合了DL/T5486-2020规范，明确复杂地形下荷载取值、基础选型、材料选用的关键参数与计算方法，形成可落地的设计指引。

#### 参考文献

- [1] 刘海永.山区复杂地形下输电线路杆塔选址与线路路径设计研究[J].自动化应用,2025,66(8):167-169.
- [2] 邵国栋,邹杰,田玉波,于明辉,赵戈,李东.复杂地形输电塔设计及施工关键技术分析[J].安装,2025(5):83-86.
- [3] 张斌.输电线路杆塔塔身结构设计优化研究[J].电气传动自动化,2018,40(4):25-27.