

复杂地形区域特高压输电线路的力学特性与杆塔优化设计

卓殿存

卓高建设集团有限公司 河南 新乡 453400

【摘要】：随着我国能源结构的调整与大型能源基地的建设，特高压输电线路需穿越大量复杂地形区域，如山地、丘陵、峡谷等。这些区域特殊的地形地貌与气候条件对特高压输电线路的力学性能及杆塔结构设计提出了严峻挑战。本文系统阐述了复杂地形环境下特高压输电线路所面临的特殊力学问题，包括风荷载、覆冰荷载、地震作用等动态荷载的分布不均与放大效应，以及导线舞动、次档距振荡等典型振动现象。在此基础上，深入探讨了适用于复杂地形的杆塔优化设计方法，涵盖塔型选择、结构荷载精细化分析、高强度材料应用、基础稳定性设计及数字化设计技术。研究表明，通过建立考虑地形效应的精细化荷载模型，采用钢管塔、紧凑型塔等新型结构，并结合有限元分析与智能优化算法，可有效提升杆塔在复杂地形下的安全性与经济性。最后，对未来的研究方向，如耦合场分析、智能监测与防灾设计等进行了展望。

【关键词】：特高压；输电线路；复杂地形；力学特性；杆塔优化；结构设计

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.046

引言

特高压输电技术是实现远距离、大容量、高效率电力输送的关键，是我国能源战略的重要组成部分。与常规输电线路相比，特高压线路具有电压等级高、输送容量大、线路走廊宽、电磁环境复杂等特点，其杆塔结构承受的荷载也更为巨大。我国幅员辽阔，特高压线路走廊不可避免地需要穿越地形、地质条件极为复杂的区域，包括高山峻岭、深谷沟壑、黄土高原、喀斯特地貌以及高海拔、强风、重冰区等。这些复杂地形不仅给施工带来巨大困难，更从根本上改变了线路所受的力学作用环境，导致荷载分布高度不均匀、动力效应显著增强，严重威胁线路的安全稳定运行。

复杂地形对特高压线路力学特性的影响是多方面的。地形起伏会导致风速加速、风攻角变化，使得风荷载远超平地设计值；微地形差异会造成局部覆冰厚度剧增；地震波在山地中传播会产生复杂的放大与滤波效应；不均匀沉降则直接影响塔基的稳定性。传统的基于平地或简单地形假设的线路力学分析与杆塔设计方法已难以满足复杂地形区域的工程需求。因此，深入研究复杂地形区域特高压线路的力学行为，并以此为基础进行杆塔结构的针对性优化设计，具有重大的理论意义和工程价值。本文旨在系统梳理相关力学问题，总结优化设计策略，以期复杂地形区特高压线路的安全、经济、可靠建设提供理论参考。

1 复杂地形下特高压输电线路的力学特性

特高压输电线路的力学系统主要由导线、地线、绝缘子串、金具和杆塔构成。在复杂地形中，这一系统所受的荷载与环境相互作用呈现出显著的特殊性。

1.1 风荷载特性

风荷载是输电线路设计的主要控制荷载之一。复杂地形（如山坡、垭口、峡谷）会显著改变近地风场的特性，包括风速廓线、湍流强度、风攻角等。地形抬升效应可能导致局部风速增大30%-50%甚至更高，形成所谓的“风口”效应。此外，山脉的绕流和尾流效应会在背风侧形成复杂的涡旋区，导致风向多变、湍流剧烈，对线路产生不稳定的动态风压。对于大跨越线路，峡谷地形还可能产生“峡谷风”，风向与峡谷走向一致，风速稳定但强度大。这些因素使得风荷载的取值、分布和作用方向均变得极为复杂，传统的均匀风场假设将导致设计偏于危险或保守。

1.2 覆冰荷载特性

覆冰是威胁输电线路安全运行的另一种主要灾害。复杂地形，特别是山地，由于海拔、湿度、温度、风速等微气象条件的差异，极易形成严重的局部覆冰。例如，在迎风坡、山脊或水汽充足的沟谷地带，过冷却水滴碰撞导线的概率大增，导致覆冰厚度远超气象台站的观测值。不均匀覆冰（如单侧覆冰、上下层覆冰差异）会在导线上产生不平衡张力，并通过绝缘子串传递至杆塔，引发扭矩和弯矩，是导致倒塔、断线的主要原因之一。此外，覆冰脱落时的跳跃荷载，也是一种强烈的动力冲击。

1.3 地震与地质作用

特高压线路跨越多个地震带，杆塔作为高耸结构，对地震作用敏感。复杂地形下的地震动输入与平地不同，存在局部场地放大效应、地形放大效应以及多点多维激励效应。山体可能对特定频率的地震波产生放大作用，加剧杆塔的动力响应。同

时,复杂地形往往伴随不良地质条件,如滑坡、崩塌、泥石流、岩溶塌陷等,这些地质灾害直接威胁塔基稳定。软弱地基的不均匀沉降也是导致杆塔倾斜、构件内力重分布甚至结构破坏的重要因素。

1.4 导线振动与舞动

特高压线路多采用多分裂大截面导线,其风致振动问题更为突出。微风振动可能引起导线疲劳断股;次档距振荡可能导致子导线鞭击,损坏间隔棒。在复杂地形风场下,这些振动的激发机制更为复杂。更为严重的是舞动,这是一种低频率、大振幅的自激振动,在覆冰导线和特定风场下极易发生。复杂地形形成的非均匀、非定常风场,结合线路本身的档距、高差变化,为舞动的产生和传播提供了条件。舞动产生的动态张力可达到静态张力的数倍,对杆塔和基础造成巨大的疲劳损伤和过载风险。

2 复杂地形区域特高压杆塔的优化设计策略

针对上述力学特性,杆塔设计必须从“标准化”向“差异化”、“精细化”和“适应性”转变。优化设计旨在保证结构安全的前提下,实现经济性、环境友好性和施工便利性的统一。

2.1 塔型选择与结构形式优化

塔型选择是适应复杂地形的首要环节。我国特高压线路中,拉线塔因占地面积大、运行维护不便,使用受限;单回路自立塔(如酒杯塔、猫头塔)和双回路自立塔是主流。

走廊紧张区域:宜采用三相导线垂直排列的紧凑型塔(如鼓型塔、伞型塔),能有效压缩线路走廊宽度,减少林木砍伐和征地难度,尤其适用于山区。

大高差、大档距区域:耐张塔的使用比例需增加,以有效分割线路,控制事故范围,并承担更大的不平衡张力。转角塔多采用结构简洁、受力清晰的干字型塔。

材料与截面形式:为应对更大的荷载并减轻塔重,高强度钢材(如 Q420、Q460)的应用日益广泛。钢管塔相较于角钢塔,具有风阻系数小、截面材料分布均匀、承载力高、外形美观等优点,特别适用于荷载大、高度高的山区塔位,但其加工和防腐要求较高。

2.2 荷载精细化分析与组合

设计荷载的准确确定是安全与经济的基础。对于复杂地形,必须进行风场、覆冰的精细化模拟和观测。

风荷载:应基于微地形、微气象资料,采用计算流体动力学(CFD)模拟或现场实测,确定不同塔位的设计基本风速、风压高度变化系数和体型系数。考虑风向与线路走向的不同夹

角,进行最不利荷载组合分析。

覆冰荷载:需结合区域气候特征和微地形分析,划分冰区图。对于重要线段,应设立覆冰观测站,获取准确的覆冰厚度、密度及重现期数据。设计时必须考虑不均匀覆冰工况(如验算覆冰、不同期脱冰)产生的纵向不平衡张力。

动力荷载:需进行导线舞动、微风振动的仿真分析与防治设计。例如,通过安装防舞器(如双摆防舞器、失谐摆)、采用线夹回转式间隔棒、优化档距和弛度等手段抑制舞动。

2.3 基础设计与地基处理

“万丈高塔,始于基础”。在复杂地质条件下,基础设计是确保输电线路安全稳定运行的关键环节,其科学性与合理性直接决定工程的全寿命周期性能。

基础选型原则:基础型式的选择应以地勘报告为依据,遵循“因地制宜、安全可靠、经济环保”的原则。对于覆盖层较厚的软土、粘土地区,推荐采用灌注桩基础,通过桩侧摩阻力与端承力共同作用承载上部荷载;对于中风化或微风化岩石地基,可采用岩石锚杆基础或岩石嵌固基础,充分利用岩体高强度特性;对于原状土性质良好的地区,优先选用掏挖扩底基础、人工挖孔桩等原状土基础,最大限度发挥地基土承载潜力,减少土方开挖量,降低生态环境扰动。

特殊地基处理技术:针对滑坡、崩塌、岩溶、采空区、液化土等不良地质地段,必须采取专项处理措施。滑坡地段可设置抗滑桩、预应力锚索或重力式挡土墙;岩溶发育地区宜采用钻探逐桩探查,对溶洞采取注浆填充、跨越处理或加长桩基穿越;采空区需进行稳定性评价,必要时采用注浆加固或调整线路避让;软土地基可通过换填、强夯、水泥搅拌桩等方式改善力学性能。处理方案应经多方案技术经济比选确定。

差异化设计理念:推行“一塔一设计”的精细化设计模式。同一基塔四个塔腿可根据实际地形地貌、地质分层、地下水位等条件差异,分别采用不同基础型式与埋深组合。例如,上坡侧采用浅埋掏挖基础,下坡侧采用深埋桩基础,以适应地形起伏并平衡土压力。通过 BIM 技术与地质三维建模,实现基础设计的数字化、可视化和精准化,确保每一处基础都与地质条件完美匹配,达到安全可靠与经济效益的最优平衡。

2.4 数字化设计与智能优化

现代信息技术与智能算法的深度融合,为复杂地形杆塔设计提供了前所未有的技术支撑,推动传统设计模式向数字化、智能化方向转型升级。

参数化三维建模技术:基于 BIM(建筑信息模型)技术或专业输电线路设计软件(如道亨、百合等),构建涵盖地形

地貌、杆塔结构、导线弧垂、绝缘子串及金具的全参数化三维信息模型。该模型可实现多专业协同设计与数据共享,支持地形曲面精确拟合、塔位自动优化布置、电气间隙动态校验等功能。设计人员可直观分析大风工况下的导线风偏角、交叉跨越净空距离、绝缘子串摇摆角等关键参数,提前识别潜在电气安全隐患。三维可视化技术还可生成逼真的工程场景渲染图,辅助设计方案评审与公众沟通,显著提升设计质量与决策效率。

有限元分析与智能优化算法:采用 ANSYS、SAP2000 等通用有限元软件或铁塔专用计算程序,对杆塔结构进行精细化静力分析、动力特性分析及稳定性验算,准确模拟构件应力分布、节点变形与整体屈曲模态。在此基础上,引入遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等智能优化方法,建立以结构重量最轻、全寿命周期造价最低或多目标综合最优为优化目标,以强度、刚度、稳定性、构造要求及加工工艺为约束条件的数学优化模型。通过算法自动迭代搜索,实现杆塔主材截面规格、斜材布置角度、节点板尺寸等设计参数的自动化寻优,突破传统经验设计的局限性,获得技术经济指标更优的创新型结构方案。

荷载-结构耦合分析:针对强风、覆冰等复杂气象条件,开展导线-杆塔耦联体系的风致振动、覆冰舞动、脱冰跳跃等流固耦合或气动弹性分析。采用 CFD (计算流体动力学) 模拟风场分布,结合时程分析方法,更真实地反映脉动风与结构之间的动力相互作用,精确评估杆塔疲劳损伤与导线动态张力。对于大跨越、高风速区等特殊工程,进行风洞试验或现场实测数据验证,确保极端工况下结构安全裕度满足规范要求,为复杂地形杆塔设计提供坚实的理论依据与技术保障。

参考文献:

- [1] 杨明浩,安韵竹,胡元潮,等.改进 EGM 模型对特高压输电线路的适用性与验证[J].电力系统保护与控制,2023,51(1):1-10.
- [2] 靳雨柱,任才横,桂和怀,等.特高压铁塔组立过程中异形构件吊装方案研究[J].电力建设,2024,45(2):1-9.
- [3] 张文亮,谷琛,廖蔚明,等.超/特高压直流输电线路塔头间隙冲击放电特性研究[J].高电压技术,2010,36(1):1-6.
- [4] 郝嘉敏.基于特高压输电线路运维管理的研究[J].电力设备管理,2023(2):100-103.
- [5] 黄汇益.植被对特高压交流输电线路电磁环境的影响研究[D].兰州:兰州交通大学,2023.

3 小结与展望

复杂地形区域特高压输电线路的建设是一项充满挑战的系统工程。其力学特性因地形放大效应而变得异常复杂,主要表现为风、冰、地震等荷载的时空非均匀性和强动力特性。传统的均质化设计理念已不适用,必须转向基于精细化环境荷载评估的差异化设计。杆塔优化设计的核心在于使结构“适应”环境,具体策略包括:选择与环境约束相匹配的塔型;采用高强度材料和先进结构形式以减轻自重、提高承载力;进行荷载的精细化模拟与最不利组合;实施“一基一策”的基础差异化设计与地基处理;并充分利用数字化设计工具与智能优化算法。

未来研究可在以下方面进一步深化:

多场耦合精细化分析:发展更精确的“气象-地形-流体-结构”多物理场耦合数值模型,量化复杂风场、覆冰增长与结构响应的相互作用机制。

基于监测数据的智能设计:利用部署于复杂地形线路上的传感器网络,长期监测风、冰、振动及结构响应数据,建立荷载与响应的真实数据库,用于修正设计模型和指导后续工程。

新型防灾减灾技术:研发更高效的主动/被动防舞、防振装置,以及适用于陡峭边坡、不稳定地基的新型杆塔基础与纠倾加固技术。

全生命周期性能与风险评估:建立考虑材料退化、荷载时变性和极端灾害的杆塔全生命周期性能评估模型与风险预警体系。

通过持续的理论创新与技术实践,不断提升复杂地形下特高压输电线路的力学性能与安全水平,对于保障我国大电网安全稳定运行、促进清洁能源跨区域优化配置具有重大意义。