

山地地形下高压输电线路杆塔基础稳定性设计

刘盼

中国南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要: 山地地形复杂多变,地质条件差异显著,对高压输电线路杆塔基础的稳定性设计提出了严峻挑战。本文系统分析了山地地形特征对杆塔基础稳定性的影响机制,结合工程实践中的关键技术问题,从基础选型、结构优化、施工工艺控制及监测维护体系构建等方面,提出了基于多因素耦合的稳定性设计方法。研究表明:通过地形适应性基础选型、原状土力学性能利用、动态施工控制及智能监测技术的集成应用,可显著提升山地杆塔基础的抗灾能力和长期稳定性,为复杂地形下输电线路工程提供理论支撑和技术指导。

关键词: 山地地形; 高压输电线路; 杆塔基础; 稳定性设计

引言

高压输电线路作为能源传输的核心通道,其安全运行直接关系到国家能源战略的实施与经济社会发展的稳定性。在山地地形中,杆塔基础需长期承受复杂的地质作用力、环境荷载及极端气候的叠加影响,基础失稳易引发杆塔倾斜、倒塔等连锁反应,导致大面积停电和巨额经济损失。传统设计方法多基于经验公式和静态分析,难以精准捕捉山地地形的动态变化特征,如地形坡度对地震波的放大效应、季节性冻融循环对地基强度的衰减作用等。因此,开展山地地形下杆塔基础稳定性设计研究,构建适应复杂环境的动态设计体系,对提升输电线路抗灾能力、保障能源供应安全具有紧迫的现实意义。

1 山地地形特征及其对杆塔基础稳定性的影响

1.1 山地地形分类与工程特性

山地地形涵盖丘陵、中山、高山等多种类型,其工程特性表现为显著的空间异质性。地形起伏方面,坡度变化范围通常为 $5^{\circ}\sim 60^{\circ}$,局部陡崖可达 80° 以上,导致杆塔基础高差显著,传统等高基础需通过大量填方或挖方实现平整,易引发水土流失和生态破坏。地质条件上,山地岩土体成因复杂,覆盖层厚度从数厘米至数十米不等,下伏基岩可能为沉积岩、变质岩或岩浆岩,其力学参数差异可达数个数量级;断层、软弱夹层、溶洞等不良地质体分布广泛,显著降低地基均匀性^[1]。水文地质方面,山区地下水位受季节性降水影响剧烈,雨季时水位骤升可能引发基础浮力效应,旱季则因蒸发强烈导致地基收缩开裂;山区河流比降大、流速快,冲刷作用强烈,易造成基础裸露和掏空。气候环境上,山地强风频发,风速沿高度呈指数增长,杆塔基础需承受更大的风振荷载;冻融循环使岩土体孔隙水压力周期性变化,导致结构破坏和强度衰减;暴雨引发的滑坡、泥石流等

地质灾害,对基础稳定性构成直接威胁。

1.2 基础稳定性影响机制

1.2.1 地基承载力与变形

山地地基承载力受岩土体强度、埋深及地形坡度共同控制。在陡坡地段,基础侧向土压力分布呈现显著非对称性,下坡侧土压力随坡度增加而减小,上坡侧则因临空面效应而增大,导致基础倾覆力矩增加。软弱土层或采空区分布区域,地基压缩模量低,在杆塔荷载作用下易产生不均匀沉降,引发杆塔结构内力重分布,甚至导致构件屈服或断裂。研究表明,当基础高差超过3m时,传统等高基础需增加20%~30%的混凝土用量方可满足稳定性要求,但填方区与原状土交界处仍为薄弱环节,需通过格构加固或土工格室技术增强整体性。

1.2.2 动力响应特性

地震、风振等动力荷载作用下,山地杆塔基础表现为复杂的非线性振动。地形坡度对地震波传播具有显著影响:在坡顶,地震波垂直分量被放大,导致基础竖向加速度响应增强;在坡脚,水平分量因波的反射和聚焦效应而增大,加剧基础水平位移。数值模拟显示,在坡度大于 30° 的山地,地震动峰值加速度可放大1.5~2.0倍,基础倾覆风险显著提升。风振方面,山地地形对气流具有加速和扰动作用,杆塔基础需承受更大的脉动风压,其动力放大系数较平原地区提高15%~25%,需通过增加基础质量或设置阻尼装置来抑制共振。

1.2.3 环境侵蚀作用

山区降水集中且强度大,地表径流冲刷易导致基础周边土体流失,降低侧向约束能力。冻融循环对基础稳定性的影响更为深远:在季节性冻土区,冬季土体冻结时体积膨胀,产生冻胀力作用于基础侧壁;春季融化时土体强度骤降,孔隙水压力消散导致沉降,反复作用使

基础与土体界面脱开,形成空腔。现场监测表明,冻胀变形可达5~10cm,引发杆塔倾斜或构件应力超限,需通过保温措施或换填非冻胀性材料加以防控。

2 山地杆塔基础稳定性设计原则与方法

2.1 设计原则

山地杆塔基础设计需遵循“地形适应、力学优化、动态调整、全周期管理”的核心原则^[2]。地形适应性原则要求根据地形坡度、高差及地质条件,优先选用不等高基础、原状土基础等结构形式,减少人工干预对自然环境的破坏;力学性能优化原则强调充分利用原状土的抗剪强度和压缩模量,通过结构创新降低材料消耗;动态设计原则需结合地质勘察数据和施工反馈,实时调整设计参数,确保基础与实际工况匹配;全生命周期管理原则要求建立设计-施工-运维一体化体系,强化基础耐久性和可维护性,延长服务年限。

2.2 关键设计方法

2.2.1 地形适应性基础选型

不等高基础(高低腿基础)通过调整主柱高度形成高差,完美契合山地地形起伏特征。其设计理念在于利用自然坡面作为基础侧向约束,减少土石方开挖量30%~50%,同时降低植被破坏和水土流失风险。在坡度 10° ~ 40° 的山地,高低腿基础高差范围通常为0.5~3.0m,设计时需精确计算各腿基础的上拔力、下压力及水平力,确保高差调整后结构受力均衡。主柱连接处是应力集中区域,需采用钢筋加强或预应力技术,通过有限元分析优化连接节点构造,防止局部屈曲或疲劳破坏。

原状土基础包括岩石嵌固基础、掏挖基础、锚杆基础等类型,其核心优势在于避免大开挖,保留原状土结构完整性。岩石嵌固基础适用于风化程度低(硬度 $f > 5$)的基岩区,通过机械钻孔或爆破成孔,将钢筋笼嵌入岩体并浇筑混凝土,利用岩石的高抗压强度传递荷载。掏挖基础适用于粘性土呈硬塑或坚硬状态(液性指数 $IL < 0.25$)的地段,通过人工或机械掏挖形成土模,直接浇筑混凝土,减少模板使用和回填土压实工序^[3]。锚杆基础通过高强锚杆将基础与深层稳定岩土体连接,适用于软弱土层或地震活跃区,其设计需通过拉拔试验确定锚杆长度和直径,确保锚固力满足抗拔要求。

深埋基础与桩基础是应对软弱土层或采空区的有效手段。深埋基础通过增加埋深(通常 $> 3\text{m}$)利用深层土体的侧向约束,提高抗倾覆能力,其设计需考虑地下水浮力影响,设置排水系统防止基础上浮。灌注桩基础通过桩端阻力和侧摩阻力传递荷载,适用于深厚覆盖层或地震烈度 > 8 度的区域,设计时需进行单桩竖向承载力试

验,确定桩长、桩径及配筋率,桩身混凝土强度等级不低于C30,主筋配筋率 $\geq 0.65\%$,以抵抗桩身弯曲和剪切破坏。

2.2.2 结构优化设计

基础尺寸优化需综合考虑地基承载力特征值 f_a 和杆塔荷载组合,建立“荷载-尺寸-稳定性”关联模型。对于不等高基础,高差调整会改变各腿基础受力状态,需通过迭代计算确定最优底面积和埋深,避免局部应力集中。例如,采用有限元软件进行迭代计算,根据计算结果调整基础尺寸,使基础在满足稳定性要求的同时,材料用量最小。

配筋率动态调整基于基础受力特性分区实施。上拔区主筋配筋率 $\geq 0.2\%$,箍筋间距 $\leq 200\text{mm}$,以抵抗混凝土开裂和钢筋锈蚀。上拔区主要承受上拔力,混凝土易出现开裂现象,增加主筋配筋率和减小箍筋间距可提高混凝土的抗裂性能。下压区主筋配筋率 $\geq 0.15\%$,增设构造钢筋网防止冲切破坏。下压区主要承受下压力,易发生冲切破坏,增设构造钢筋网可增强混凝土的抗冲切能力。斜插基础主角钢采用Q345钢材,锚固长度 $\geq 2.5\text{m}$,并通过防腐涂层延长使用寿命。Q345钢材具有较高的强度和韧性,能够满足斜插基础的受力要求;锚固长度不足易导致主角钢拔出,影响基础稳定性;防腐涂层可防止主角钢锈蚀,延长基础的使用寿命。

抗震设计是山地基础的关键环节。在地震活跃区,基础顶面需设置钢筋混凝土圈梁,宽度 \geq 基础底宽的 $1/3$,以增强整体刚度。圈梁可将各部分基础连接成一个整体,提高基础的抗变形能力。动力放大系数根据场地类别和设计地震分组取1.2~1.5,反映地震波对基础的放大效应^[4]。例如,在II类场地、设计地震分组为第一组的情况下,动力放大系数可取1.3。对饱和砂土或粉土,采用振冲碎石桩或强夯置换处理,消除液化隐患,确保地震时基础稳定性。振冲碎石桩通过振冲器将碎石振密成桩,提高土体的密实度和抗液化能力;强夯置换通过强夯设备将块石夯入软土中,形成置换桩,改善土体的力学性能。

3 施工工艺控制与质量保障

3.1 关键施工环节控制

基坑开挖与支护是施工的首要环节。不等高基础采用分层分段开挖,每层高度 $\leq 1.5\text{m}$,边坡坡度 $\leq 1:0.75$,防止坍塌。开挖过程中需设置排水沟,及时排除基坑内的积水,避免基坑浸泡导致边坡失稳。掏挖基础严格控制开挖半径(比设计尺寸大 $10\sim 20\text{cm}$),保留核心土体作为模板,减少对原状土的扰动。开挖过程中需

采用人工或小型机械进行,避免使用大型机械对周边土体造成过大扰动。岩石基础采用金刚石绳锯切割或控制爆破,避免对周边岩体造成裂隙,降低地基承载力。金刚石绳锯切割具有切割精度高、对周边岩体扰动小等优点;控制爆破通过合理布置炮孔和装药量,减少爆破对周边岩体的破坏。

混凝土浇筑与养护需关注防跑浆露筋问题。阶梯结合处先填充混凝土再浇筑上层,插入式振捣器间距 $\leq 300\text{mm}$,确保密实度。振捣过程中需避免振捣器碰撞钢筋和模板,防止钢筋移位和模板变形。斜插基础主角钢位置偏差 $\leq 5\text{mm}$,采用激光定位仪实时监测,保证安装精度。激光定位仪具有定位精度高、实时监测等优点,能够确保主角钢的安装位置准确。养护制度规定浇筑完成后12h内覆盖塑料薄膜,养护时间 $\geq 14\text{d}$,防止混凝土开裂。养护过程中需保持混凝土表面湿润,避免混凝土因失水而开裂。

土体加固技术中,压力注浆法通过套管向土体注入水泥浆,压力控制在 $0.5\sim 1.5\text{MPa}$,注浆量按土体孔隙率的1.2~1.5倍计算,提高土体强度。注浆过程中需控制注浆压力和注浆量,避免压力过大导致土体隆起或注浆量不足导致加固效果不佳。震动密实法采用振动沉管桩机,振动力 $\geq 50\text{kN}$,频率 $20\sim 30\text{Hz}$,密实深度 $\geq 3\text{m}$,消除土体孔隙。振动沉管桩机通过振动和沉管作用,使土体密实,提高土体的承载能力和稳定性。

3.2 施工质量检测与验收

地基承载力检测采用平板载荷试验或静力触探试验,验证地基承载力特征值是否满足设计要求(偏差 $\leq 10\%$),确保基础安全储备。基础尺寸偏差控制严格:底板断面尺寸偏差 $-1\%\sim +3\%$,立柱高度偏差 $\pm 10\text{mm}$,预埋件位置水平偏差 $\leq 5\text{mm}$ 、垂直偏差 $\leq 3\text{mm}$,保证基础与杆塔连接可靠性。混凝土强度检测每批次留置试块不少于3组,28d抗压强度标准值 \geq 设计强度的1.15倍,确保结构耐久性。

4 杆塔基础稳定性监测与维护

4.1 智能监测系统构建

智能监测系统通过传感器布置实现基础状态实时感知。倾斜仪监测基础倾角变化(精度 $\pm 0.01^\circ$),沉降标测

量基础沉降量(精度 $\pm 1\text{mm}$),应变计监测主角钢应力状态(量程 $0\sim 500\text{MPa}$),全面捕捉基础变形和受力特征。数据传输采用LoRa无线通信技术,实现远程实时上传至云平台;通过机器学习算法建立基础状态评估模型,预警阈值设定为设计值的80%,提前识别潜在风险。

4.2 运维策略优化

定期巡检每季度开展一次,重点排查基础裂缝、露筋及周边水土流失情况,及时修复表面缺陷,防止病害扩展。应急抢修机制建立“监测-预警-处置”联动体系,对倾斜量 $> 0.5^\circ$ 或沉降量 $> 10\text{mm}$ 的基础,立即启动加固方案(如注浆加固或增设拉线),恢复基础稳定性。全生命周期管理结合BIM技术建立基础数字孪生模型,记录设计、施工及运维全过程数据,为后续工程提供参考,推动基础设计向智能化、精细化方向发展。

结束语

山地地形下高压输电线路杆塔基础稳定性设计需综合考虑地形、地质、荷载及环境等多因素耦合作用。通过采用不等高基础、原状土基础等适应性结构形式,结合动态施工控制和智能监测技术,可显著提升基础抗灾能力和长期稳定性。未来研究可进一步探索以下方向:基于数字孪生的基础全生命周期管理平台开发,实现设计、施工、运维数据深度融合;新型环保材料(如再生混凝土、纤维增强土)在基础工程中的应用,降低碳排放;极端气候条件下基础动力响应的精细化模拟与抗震设计优化,提升基础适应性。通过技术创新和工程实践,构建山地杆塔基础稳定性设计的完整技术体系,为复杂地形下输电线路安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]杨森林,马雄,康羽鹤,等.高压输电线路杆塔根键基础承载特性研究[J].电力勘测设计,2024,(12):50-55.
- [2]陈雅倩,赵国强.高压输电线路工程铁塔基础冲刷分析计算[J].水科学与工程技术,2024,(02):57-60.
- [3]廖高慧.高压输电线路杆塔基础稳定性分析[J].低碳世界,2017,(21):43-44.
- [4]楚永生.高压送电线路杆塔基础形式的特点分析[J].智能城市,2021,7(13):69-70.