

电力建构筑物抗震设计与验算分析

陆 彬

宁夏远川工程设计有限公司 宁夏 银川 750000

摘 要：电力建构筑物作为能源基础设施的核心组成部分，其抗震性能直接关系到地震灾害下电力供应的稳定性与安全性。基于此，本文从地震作用下的破坏机理入手，分析了电力建构筑物抗震设计与验算，涉及抗震设计基本原则、特殊结构抗震设计要点、验算分析流程、常用分析方法等方面，形成了一套覆盖设计、验算到不确定性量化的电力建构筑物抗震全流程解决方案，为提升能源基础设施的地震韧性提供了理论支撑与技术指导。

关键词：电力建构筑物；抗震设计；验算分析

引言

地震灾害具有突发性强、破坏力大的特点，电力建构筑物（如输电塔、变电站等）一旦受损，将直接导致区域电力中断，加剧次生灾害风险。传统抗震设计多以“小震不坏、中震可修、大震不倒”为目标，但电力设施的抗震需求不仅限于结构安全，还需保障设备在地震中的可运行性，这对设计方法提出了更高要求。近年来，随着结构非线性动力学、概率地震危险性分析及减震控制技术的发展，电力建构筑物抗震设计逐渐从“被动抗灾”转向“主动减灾”，通过精细化建模、多维度验算及不确定性量化，实现性能化设计目标。

1 地震作用下的破坏机理

地震作用对电力建筑结构的破坏机理是地震动特性、结构动力响应及设备与结构相互作用三者动态耦合的复杂过程。（1）地震动特性作为外部激励的核心要素，其频谱分布、能量集中程度及波形变化直接决定结构振动模式的形成机制。不同频段的地震动成分会激发结构不同阶次的振型，低频成分易引发整体平动与扭转，高频成分则导致局部构件的振动响应，当地震动卓越周期与结构自振周期吻合时，共振效应将使结构振动能量急剧累积，导致位移响应呈非线性增长，进而引发关键构件的强度失效或稳定破坏。（2）结构的动力响应过程呈现明显的阶段性特征，地震初期结构处于弹性阶段，应力应变关系符合胡克定律，随着地震输入能量的持续增加，材料进入弹塑性阶段，塑性铰逐步形成并扩展，结构刚度与承载力显著退化，最终在累积损伤达到临界值时发生整体倒塌或局部失稳^[1]。在此过程中，位移响应的过度发展可能造成非结构构件的脱落、设备间的碰撞或管道连接部位的断裂，应力集中区域则因材料屈服形成不可逆的塑性变形，变形超限会破坏结构体系的几何稳定性，尤其在双向地震动共同作用下，结构

可能因空间受力状态复杂而进入强非线性阶段，导致分析模型与实际响应产生显著偏差。（3）设备与结构的相互作用通过多重机制影响整体抗震性能，设备自重及运行荷载会改变结构的质量分布与刚度中心，进而影响其动力特性与地震反应，设备与连接构件的刚度差异导致振动能量传递路径发生改变，当设备支架与主体结构的连接刚度不足时，设备振动可能脱离原设计轨迹，引发设备倾覆、管道断裂或电气连接失效等次生灾害。土-结构相互作用进一步加剧了这种复杂性，土壤与结构的动力耦合效应会改变地震动的输入机制，软土地面因剪切波速较低会延长地震动持续时间并放大长周期成分，对高耸结构或大跨度结构产生不利影响，而坚硬场地则因高频成分丰富易导致设备局部振动超限，这种场地-结构-设备的动态交互作用使得抗震设计需综合考虑多因素耦合效应。

2 电力建构筑物抗震设计方法

2.1 抗震设计基本原则

电力建筑结构的抗震设计需遵循多层次防御、性能可控及构造强化的基本原则，以实现地震中结构安全与设备功能可恢复性的双重目标。（1）三水准设防是抗震设计的核心框架，通过设立分级目标，构建覆盖不同强度地震的防御体系。小震阶段要求结构在多遇地震作用下保持弹性状态，所有构件的应力与变形均处于设计允许范围内，确保地震后无需修复即可继续使用；中震阶段允许结构进入弹塑性状态，通过局部塑性变形耗散地震能量，但需保证主体结构完整，修复后恢复原有功能；大震阶段则要求结构具备极限承载能力，即使部分构件失效，仍能通过整体冗余度避免倒塌，为人员逃生与灾后救援提供时间。（2）结构延性与耗能机制设计是实现分级目标的关键技术路径，延性设计通过优化构件截面形式与配筋方式，使结构在屈服后仍能保持稳定的

承载能力与变形能力,避免脆性破坏导致的突然失效,重点控制梁柱节点、设备支架等关键部位的变形模式,确保塑性铰在预设区域形成并有序发展;耗能机制设计则利用材料本构关系的非线性特性,通过金属材料的应变硬化或摩擦界面的能量耗散,将地震输入能量转化为热能或其他形式,降低结构动力响应的峰值,尤其对高耸构架或大跨度电力建构筑物等动力敏感结构,合理的耗能分布可有效控制位移与加速度响应,保护精密设备免受惯性力破坏^[2]。(3)概念设计与构造措施通过强化结构薄弱环节提升整体抗震性能,强柱弱梁设计通过增大柱端截面或提高配筋率,确保梁端先于柱端形成塑性铰,避免柱失稳导致整体倒塌。此外,构造措施还包括控制结构竖向与平面不规则性,避免应力集中,合理设置防震缝以减小相邻结构的地震碰撞风险,以及通过设备隔震基座或柔性连接降低设备与结构的动力耦合效应,确保地震中设备运行稳定性。

2.2 特殊结构抗震设计要点

电力建构筑物中特殊结构的抗震设计需针对其结构特性与功能需求制定专项方案。(1)变电构架作为支撑高压电气设备的关键结构,其抗震设计需兼顾结构刚度与设备安全。构架体系宜采用空间桁架或格构式结构,通过合理布置斜撑与水平支撑形成多道抗侧力防线,避免单榀框架受力集中。节点连接应采用高强螺栓或焊接工艺,确保地震作用下连接部位不发生脆性破坏。构架平面布置需保持规则性,避免局部突出或凹进导致应力集中,纵向跨度较大时应设置防震缝分割结构单元。

(2)对于大跨度构架,需考虑竖向地震作用与风振效应的组合影响,通过有限元分析验证结构在复杂荷载下的动力响应。(3)独立避雷针的抗震设计需重点解决高耸结构的风振控制与雷电流泄放安全。塔身结构宜采用三角桁架或四角锥体系,通过空间受力平衡降低风荷载与地震作用的耦合效应;接闪器与塔顶的连接需采用柔性导通方式,避免雷电流传输时产生附加应力;引下线应沿塔身对称布置,与接地装置的连接点需保持足够间距以防止地电位反击。接地装置需根据土壤电阻率采用复合接地网,通过垂直接地极与水平接地带的组合降低接地电阻,同时避免接地体与建筑物基础的最小安全距离不满足规范要求。(4)对于高度超过三十米的避雷针,需在塔身中部设置横向支撑或阻尼装置,通过增加结构阻尼比抑制风振响应。变电构架与独立避雷针的抗震设计均需遵循三级设防原则,通过结构选型优化、动力特性调整与构造措施强化实现抗震性能与经济性的平衡。设计过程中应结合场地类别、地震分组与设备重要性系

数确定抗震计算参数,采用振型分解反应谱法或时程分析法验证结构在多遇地震与罕遇地震下的内力分布与变形能力,确保关键构件的应力水平不超过材料强度设计值,非结构构件的连接节点不发生脱落或失效。

3 抗震验算分析方法与模型

3.1 验算分析流程

(1)结构建模是分析的基础,需根据实际工程构建包含几何尺寸、材料属性及边界条件的精细化模型。几何模型需准确反映结构空间布局,包括构件尺寸、连接方式及质量分布,避免因简化导致动力特性失真;材料参数需依据试验数据或规范取值,明确弹性模量、屈服强度及阻尼比等关键指标,尤其需关注非线性材料在弹塑性阶段的应力-应变关系^[3]。边界条件需模拟结构与基础的相互作用,对土-结构相互作用敏感的结构,需采用弹簧-阻尼单元或有限元土体模型反映土壤刚度与能量耗散特性。(2)地震动输入是验算的核心环节,需根据场地类别、设防烈度及结构特性选择合适的地震波或反应谱。地震波选择应覆盖不同频谱特征,兼顾近场脉冲型与远场持续型地震动,确保输入能量的代表性。时程分析通过直接积分法求解结构动力方程,可捕捉地震全过程响应,但需保证地震波持续时间与结构自振周期匹配。对复杂结构或重要设备,需联合采用时程与反应谱方法,通过对比验证结果可靠性。(3)响应计算需结合结构模型与地震动输入,采用非线性动力分析技术获取位移、应力及变形等关键指标。分析中需考虑材料非线性(如混凝土开裂、钢材屈服)与几何非线性(如大变形、P-Δ效应)的耦合影响,确保响应结果的准确性;对设备支架等非结构构件,需单独建模并考虑与主体结构的动力相互作用,避免因局部振动导致设备失效。结果评估需依据抗震设计规范,对比计算得到的层间位移角、构件应力比及塑性铰分布等参数,判断结构是否满足性能目标。

3.2 常用分析方法

电力建构筑物抗震验算中,常用分析方法通过不同机理揭示结构在地震作用下的响应特征,为设计提供多层次验证手段。(1)静力弹塑性分析通过逐步施加水平荷载模拟地震作用,追踪结构从弹性到弹塑性的全过程变形与内力变化。该方法基于能力谱与需求谱的对比,评估结构在目标位移下的性能状态,尤其适用于中低层规则结构或以第一振型为主的高耸结构。分析中需预设侧向力分布模式(如均匀分布、倒三角分布),考虑高阶振型影响时需采用多模态推覆技术,同时结合材料非线性本构模型,准确捕捉塑性铰形成位置与构件损伤程

度,为结构延性设计与薄弱层定位提供依据。(2)动力时程分析作为非线性动力分析的核心方法,通过直接积分结构运动微分方程,获取地震全过程中位移、速度与加速度的时变响应^[4]。该方法可全面考虑地震动的频谱特性、持续时间及非平稳性,精确模拟结构在强震下的弹塑性行为、几何非线性效应及土-结构相互作用。分析中需选用与场地条件匹配的实际地震记录或人工合成地震波,确保输入能量的代表性;采用显式或隐式积分算法时,需平衡计算效率与数值稳定性,对复杂结构或长周期结构,需采用子结构技术或并行计算缩短分析周期。

(3)反应谱法通过规范化的地震反应谱与结构模态参数的组合,快速估算结构在多遇地震与罕遇地震下的最大响应。该方法基于线性振动理论,适用于规则结构或初步设计阶段,通过CQC(完全二次项组合)或SRSS(平方和开方)模态组合规则,考虑多振型对响应的贡献。多遇地震下,反应谱法用于验证结构弹性变形与构件应力是否满足规范限值;罕遇地震下,通过弹塑性反应谱或能力谱修正,评估结构弹塑性位移需求,判断是否满足要求。

3.3 模型验证与不确定性分析

电力建构筑物抗震分析中,模型验证与不确定性分析是确保计算结果可靠性的关键环节,需系统评估模型简化、非线性效应及地震动输入对响应预测的影响。

(1)模型简化虽能提升计算效率,但可能引入误差。质量集中假设会改变结构动力特性,尤其对高阶振型影响显著,需通过调整集中质量位置或增设附加质量单元修正惯性力分布。刚度修正需基于试验数据或经验公式,对复杂连接节点或异形构件,过度简化可能导致局部应力失真,需采用子结构法或等效刚度模型平衡精度与效率。(2)材料非线性与几何非线性是结构进入弹塑性阶段的核心影响因素,材料非线性需通过定义混凝土开裂、钢材屈服后的应力-应变关系曲线实现,对钢筋混凝土结构,需考虑箍筋约束效应对核心混凝土强度的

提升。(3)地震动输入的不确定性是影响抗震预测可靠性的主要因素,其来源包括地震震级、断层机制、传播路径及场地条件的多变性,即使同一场地,不同地震记录的频谱特性、峰值加速度与持续时间也可能差异显著^[5]。为量化这一不确定性,需采用概率地震危险性分析(PSHA)确定场地设计地震动参数,并通过敏感性分析评估不同地震波对结构响应的离散性。对重要结构,可建立地震动参数(如PGA、反应谱平台值)的概率分布模型,结合蒙特卡洛模拟生成大量随机地震动样本,统计结构响应的均值、方差及超越概率,为基于性能的抗震设计提供风险决策依据。另外,模型验证需通过对比分析结果与振动台试验或现场实测数据,修正材料参数、阻尼比及边界条件等关键输入,确保模型在弹性与弹塑性阶段的响应预测均与实际相符。

结语

综上所述,电力建构筑物抗震设计与验算分析是保障地震下电力供应安全的关键技术领域。模型简化误差、材料非线性及地震动不确定性是影响计算精度的核心因素,需通过多尺度建模、试验验证及概率分析加以控制。未来,随着人工智能与数字孪生技术的融入,电力建构筑物抗震设计将向智能化、实时化方向发展,实现地震风险动态评估与结构性能主动调控。

参考文献

- [1]高瑞.电力机柜抗震特性分析及优化设计探究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(10):576-577.
- [2]刘娜.办公楼超限高层结构抗震设计分析[J].新材料·新装饰,2025,7(24):1-4.
- [3]路桂娟.超限高层建筑结构抗震性能分析[J].福建建材,2026,(1):56-59.
- [4]邵有明.电力铁塔结构设计分析[J].消费电子,2025(11):98-100.
- [5]柴忠敏,石新磊.电力行业变电站建构筑物结构设计探究[J].中华传奇(上旬),2022,(10):0199-0201.