

通信基站杆塔承载能力验算与安全评价体系构建

葛 幻

中国铁塔股份有限公司广西壮族自治区分公司 广西 南宁 530000

摘要: 通信基站杆塔作为通信网络的基础设施,其结构安全直接关系到通信系统的稳定运行。随着5G网络大规模建设,杆塔挂载设备增多、老旧杆塔超期服役等问题日益突出,承载能力验算与安全评价成为保障杆塔安全的关键环节。本文系统分析通信基站杆塔的结构特点与受力特性,提出承载能力验算方法,构建涵盖承载性能、变形控制、材料状态、基础安全的多层次安全评价指标体系,并建立基于层次分析法的综合评价模型。研究成果为杆塔安全管理提供技术支持。

关键词: 通信基站杆塔; 承载能力验算; 安全评价体系

引言: 通信基站杆塔是移动通信网络的重要基础设施,承载着天线、馈线、基站设备等关键通信设施。随着5G网络大规模部署,杆塔挂载设备数量显著增加,同时大量既有杆塔已进入超期服役阶段,结构安全隐患日益突出。近年来,因杆塔承载能力不足导致的结构倒塌、倾斜等事故时有发生,造成通信中断甚至人员伤亡。因此,建立科学的杆塔承载能力验算方法与安全评价体系,对保障通信网络安全运行具有重要的工程价值与现实意义。

1 通信基站杆塔结构特点与受力分析

1.1 通信基站杆塔的类型与结构形式

通信基站杆塔根据结构形式和材料可分为多种类型。单管塔是最常见的结构形式,采用圆锥形钢管制造,具有占地面积小、外形美观、安装方便等优点,适用于城区和景观要求较高的区域,高度通常为20至50米。角钢塔采用格构式结构,由角钢通过螺栓连接而成,刚度大、承载能力强,适用于负荷较大或高度超过50米的场景,但占地面积较大。桅杆塔依靠拉线维持稳定,自重轻、造价低,适用于临时基站或负荷较小的场景,但抗风能力相对较弱。屋顶抱杆安装在建筑物顶部,适用于城区信号补盲,受建筑结构承载能力限制。不同类型杆塔的受力特点和破坏模式存在差异,需针对性地开展承载能力验算。

1.2 杆塔的荷载类型与作用

通信基站杆塔承受的荷载可分为永久荷载和可变荷载两大类。永久荷载包括杆塔自重、天线及其支架重量、馈线及走线架重量、平台及爬梯重量等,这些荷载在结构使用期内基本不变。可变荷载主要包括风荷载、冰荷载、温度荷载、检修荷载和地震作用。风荷载是最主要的可变荷载,对杆塔的作用力与基本风压、高度变

化系数、体型系数、风振系数等因素相关,对于高度超过30米的杆塔,风振效应显著。冰荷载在寒冷地区较为突出,覆冰会增加杆塔自重和迎风面积,严重时导致杆塔过载。温度荷载在日照不均匀时会引起杆塔弯曲变形,检修荷载是人员登塔作业时的临时荷载。各类荷载应按规范进行组合,取最不利工况进行验算。

1.3 杆塔的受力分析与计算模型

通信基站杆塔的受力分析应根据结构形式选择合适的计算模型。单管塔可采用悬臂梁模型进行分析,将杆塔视为底部固定、顶部自由的变截面悬臂梁,塔顶位移和根部弯矩是验算的关键指标。角钢塔应采用空间桁架模型,所有杆件按铰接考虑,通过有限元方法计算各杆件的轴力,重点验算受压杆件的稳定性和受拉杆件的强度。桅杆塔的受力分析较为复杂,拉索与桅杆之间形成柔性结构体系,需考虑几何非线性效应,拉索的初始张力和刚度对结构性能影响显著。对于高度较大或外形复杂的杆塔,建议采用有限元软件建立三维模型进行分析,可同时考虑风荷载的脉动效应和结构的动力特性。计算模型的边界条件应准确模拟基础约束和连接节点的实际刚度。

2 通信基站杆塔承载能力验算方法

2.1 承载能力验算的基本原则

通信基站杆塔承载能力验算应遵循极限状态设计原则,包括承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。承载能力极限状态对应于结构达到最大承载能力或发生破坏,验算内容包括构件强度、整体稳定和锚固强度,荷载采用设计值并考虑分项系数。正常使用极限状态对应于结构变形或振动影响正常使用,验算内容主要为塔顶位移、倾斜度和振动幅度,荷载采用标准值。验算时需考虑荷载的最不利组合,如“自重+风荷载”“自重+

冰荷载+风荷载”等组合工况。对于既有杆塔的验算，还应根据现场检测结果对构件截面损耗、材料性能退化等进行折减。验算结果应明确给出各类荷载组合下的应力比、稳定系数和位移比，与规范限值对比后判定是否满足要求^[1]。

2.2 杆塔结构的稳定性验算

稳定性验算是杆塔承载能力验算的核心内容，包括整体稳定和局部稳定两个方面。整体稳定验算主要针对受压构件和高柔结构，对于单管塔，需验算在风荷载和自重共同作用下是否会发生弯扭失稳，通常按弹性稳定理论计算临界荷载。对于角钢塔，需验算各受压杆件的长细比和稳定性，主杆长细比不宜超过120，斜杆不宜超过150。杆件稳定性计算公式为： $N/(\varphi A) \leq f$ ，其中N为轴心压力， φ 为稳定系数，A为截面面积，f为钢材强度设计值。局部稳定验算主要针对薄壁构件，单管塔的壁厚比应满足规范要求，角钢的板件宽厚比不应超过容许值。对于存在腐蚀的老旧杆塔，应取剩余有效截面进行验算，腐蚀深度超过原壁厚25%时应考虑截面折减。

2.3 杆塔基础的承载能力验算

杆塔基础承载能力验算包括地基承载力、基础抗倾覆稳定性和地脚螺栓强度三个方面。地基承载力验算要求基础底面最大压应力不超过地基承载力特征值的1.2倍，对于软土地基还应验算沉降量。基础抗倾覆稳定性验算是保障杆塔安全的关键，抗倾覆安全系数不应小于1.5，倾覆力矩主要由风荷载产生，抗倾覆力矩由基础自重和上覆土重提供。对于岩石地基或混凝土基础，还应验算基础底面的拉应力是否超过混凝土抗拉强度。地脚螺栓验算包括抗拉强度和抗剪强度，螺栓直径、数量和埋深应满足设计要求。对于既有杆塔，基础周边土体开挖、沉降或不均匀沉降会显著降低基础承载能力，验算时应考虑这些不利因素。当基础验算不满足要求时，可采用加大基础底面积、增设锚杆等方式进行加固^[2]。

3 通信基站杆塔安全评价体系构建

3.1 安全评价指标体系的建立

安全评价指标体系是开展杆塔安全评估的基础，应遵循科学性、全面性、可操作性原则。本文构建涵盖四个准则层的多层次指标体系：承载性能准则层包括强度富余系数、稳定系数、锚固安全系数三个指标；变形控制准则层包括塔顶位移比、整体倾斜度、基础沉降差三个指标；材料状态准则层包括钢材腐蚀程度、焊缝质量评级、螺栓松动率三个指标；基础状态准则层包括混凝土碳化深度、钢筋锈蚀状况、基础开裂程度三个指标。各指标均设置明确的评价标准和评分方法。以钢材腐蚀

程度为例，可根据实测剩余壁厚与设计壁厚的比值划分为四级：比值大于0.95为轻微腐蚀，0.90至0.95为轻度腐蚀，0.85至0.90为中度腐蚀，小于0.85为严重腐蚀。指标体系的建立为后续安全评价提供了量化依据。

3.2 安全评价方法的选择

层次分析法是适用于多因素综合评价的有效方法，本文采用AHP法构建杆塔安全评价模型。首先建立层次结构模型，目标层为杆塔安全状况，准则层为承载性能、变形控制、材料状态、基础安全四个维度，指标层为各具体指标。其次构造判断矩阵，邀请5至7名具有杆塔设计、检测或维护经验的专家，对各层次指标进行两两比较，采用1至9标度法打分，计算各指标的权重系数。计算结果表明，承载性能权重最高（约0.40），变形控制次之（约0.25），材料状态（约0.20）和基础安全（约0.15）次之。再次进行一致性检验，确保判断矩阵的合理性。最后计算各指标的综合得分，根据得分确定安全等级。该方法将定性判断与定量计算相结合，能够客观反映杆塔的整体安全状况。

3.3 安全评价标准的制定

安全评价标准是将综合得分转化为安全等级的判据。本文建议将杆塔安全状况划分为四个等级。Ⅰ级（安全）：综合得分大于等于85分，杆塔结构完好，承载能力满足要求，可正常使用，按常规周期巡检即可。Ⅱ级（基本安全）：综合得分70至85分，杆塔存在轻微缺陷或性能略有退化，但整体承载能力满足现行要求，应加强监测并在1年内安排维护。Ⅲ级（隐患）：综合得分55至70分，杆塔存在明显缺陷或承载能力不足，需在3个月内采取限载、加固等措施，否则存在安全风险。Ⅳ级（危险）：综合得分小于55分，杆塔存在严重缺陷或承载能力严重不足，应立即停用并尽快拆除或更换。各等级对应的处置建议应明确具体，便于现场管理人员快速决策。

4 通信基站杆塔安全管理与维护建议

4.1 日常巡检与定期检测制度

建立健全的巡检检测制度是保障杆塔长期安全运行的基础。日常巡检每月至少开展一次，重点检查杆塔外观有无明显变形、倾斜，塔脚焊缝有无开裂，地脚螺栓有无松动，拉线有无松弛或损坏，天线及支架连接是否牢固。巡检中发现异常应及时记录并上报。定期检测每两年开展一次，检测内容包括：采用全站仪测量杆塔整体倾斜度，单管塔倾斜度不应超过塔高的1/750，角钢塔不应超过1/1000；采用超声波测厚仪检测关键部位的钢材剩余壁厚；采用磁粉或渗透检测方法抽查焊缝质量；检

测地脚螺栓的紧固力矩是否达到设计要求。遇有台风、强降雨、地震等极端天气后,应及时开展专项检测。所有检测数据应整理归档,建立杆塔健康档案,为后续安全评价和维修决策提供依据。

4.2 老旧杆塔的加固改造技术

对于安全评价等级为Ⅲ级的老旧杆塔,应及时采取加固改造措施。单管塔的加固可采用三种方法:增设内衬管,在原塔内部套入较小直径的钢管,通过焊接或螺栓连接形成组合截面,提高整体刚度;外包钢板加固,在塔身外部包裹钢板并灌注结构胶,适用于局部腐蚀严重的部位;增设阻尼器,在塔顶安装调频质量阻尼器或粘滞阻尼器,减小风振响应。角钢塔的加固包括:更换腐蚀严重的主杆或斜杆,采用同规格角钢替换;增设辅助支撑,在主杆间增加横向或斜向支撑,改变杆件长细比;节点板加固,对螺栓孔扩大或节点变形处增加补强板。基础加固可采用加大底面积法,在原基础周边浇筑混凝土扩大受力面积,或采用锚杆静压桩将荷载传递至深层稳定土层。加固后应重新进行承载能力验算,确认满足要求后方可继续使用^[3]。

4.3 新增设备挂载的管理流程

随着5G网络建设推进,既有杆塔新增设备挂载的需求日益增加,必须建立规范的管理流程。第一步是挂载需求评估,明确新增设备的类型、重量、迎风面积、安装高度等参数,评估对杆塔荷载的影响。第二步是承载能力复核,根据杆塔原始设计资料和当前状态检测结果,按现行规范重新验算挂载后的承载能力,验算内容应包括强度、稳定性、位移和基础安全。第三步是安装位置优化,在满足信号覆盖要求的前提下,应将新增设备安装在较低位置,减少风荷载产生的弯矩;多台设备应均匀对称布置,避免产生附加扭矩。第四步是施工监控,设备安装过程中应监测杆塔的倾斜和变形,安装完成后复测试验,确认各项指标满足要求。对于承载能力不足的杆塔,应先加固后挂载或选择其他杆塔承载。挂载完成后应更新杆塔台账信息,记录新增设备的参数和安装日期。

4.4 信息化管理平台建设

信息化管理平台是提升杆塔安全管理效率的重要手段。平台应包含资产管理、检测数据、安全评价、维修记录四个核心模块。资产管理模块记录每座杆塔的位置、类型、高度、建设年份、设计参数、挂载设备清单等基础信息,支持地图可视化展示。检测数据模块存储历次巡检检测结果,支持数据趋势分析,自动生成检测报告。安全评价模块集成承载能力验算工具和安全评价模型,输入检测数据后可自动计算安全等级,并给出维护建议。维修记录模块跟踪加固改造、设备挂载等维护活动,形成完整的运维档案。平台应支持移动终端现场操作,巡检人员可通过手机APP现场录入数据、拍照上传,系统自动比对历史数据并预警异常。大数据分析功能可识别杆塔安全状况的变化趋势,预测未来可能出现的风险,实现从被动响应向主动预防的转变^[4]。

结束语

通信基站杆塔承载能力验算与安全评价是保障通信网络基础设施安全运行的重要工作。本文系统分析了杆塔结构特点与受力特性,提出了涵盖结构稳定性与基础承载力的验算方法,构建了多层次的杆塔安全评价指标体系,并建立了基于层次分析法的综合评价模型。结合工程实践,从巡检检测、加固改造、挂载管理、信息化平台四个方面提出了安全管理建议。随着通信网络的持续演进和杆塔服役年限的增加,杆塔结构安全管理工作将面临更多挑战。未来应进一步探索基于物联网的结构健康监测技术,实现对杆塔安全状况的实时在线评估。

参考文献

- [1]杨召江.高山通信基站施工的雷击与措施分析[J].电子技术,2021,50(06):184-185.
- [2]尹炳承.移动通信工程铁塔桅结构建设与运行维护分析[J].城镇建设,2024(10):103-105.
- [3]方吴泽兵,吴丹.浅谈通信单管塔塔身无缝钢管加固装置[J].建筑与装饰,2021(19):157-158.
- [4]吴淳杰,马再生,傅俊磊,等.钢结构铁塔安全评估模型的建立与求解方法的研究[J].中国设备工程,2026(3):122-124.