

# 风电塔筒预埋锚栓的安装偏差对结构稳定性的影响分析

邓学深 王少杰

河南金通电气有限公司 河南 漯河 462000

**摘要:** 本文聚焦风电塔筒预埋锚栓安装偏差对结构稳定性的影响。首先对安装偏差进行分类并分析成因, 对比不同偏差允许值标准。接着阐述稳定性评价指标, 从单偏差和组合偏差角度分析其影响机制。基于有限元仿真量化不同偏差影响, 设计多类仿真工况获取受力、变形等指标。最后从施工、设计、运维阶段提出控制策略与工程建议, 旨在为风电塔筒预埋锚栓安装偏差防控提供理论依据与实践指导, 保障风电结构长期稳定运行。

**关键词:** 风电塔筒; 预埋锚栓; 安装偏差; 结构稳定性

引言: 风电作为清洁能源, 发展迅速, 风电塔筒是关键支撑结构, 预埋锚栓作为连接塔筒与基础的核心构件, 其安装质量至关重要。然而, 施工阶段受多种因素影响, 锚栓安装易出现偏差, 如轴线、标高、垂直度及间距偏差等。这些偏差会改变锚栓受力状态, 影响结构稳定性, 甚至引发安全事故。因此, 深入研究风电塔筒预埋锚栓安装偏差对结构稳定性的影响, 制定有效控制策略, 对保障风电设施安全运行、推动风电行业健康发展具有重要意义。

## 1 风电塔筒预埋锚栓安装偏差的分类与成因分析

### 1.1 典型安装偏差类型

风电塔筒预埋锚栓安装偏差是施工阶段常见质量问题, 按偏差表现形式可分为四类典型类型。一是轴线偏差, 指锚栓实际中心轴线与设计轴线存在水平偏移, 多表现为单根锚栓偏移或整组锚栓同步偏移, 是最易出现的偏差类型。二是标高偏差, 即锚栓顶部实际高程与设计高程不符, 包括偏高、偏低两种情况, 直接影响塔筒底座贴合度。三是垂直度偏差, 锚栓安装后未保持垂直状态, 出现倾斜, 倾斜方向可能朝向内侧、外侧或侧向, 破坏受力对称性<sup>[1]</sup>。四是间距偏差, 相邻锚栓中心距与设计值存在差异, 分为间距过大、过小, 导致锚栓受力分布不均。各类偏差并非孤立存在, 常相互伴随, 加剧安装质量问题, 需针对性识别分类。

### 1.2 偏差成因分析

预埋锚栓安装偏差的成因复杂, 涉及施工、材料、环境等多方面因素。施工工艺不规范是核心成因, 模板定位精度不足时, 锚栓固定支架焊接不牢固, 浇筑混凝土过程中模板移位带动锚栓偏移, 或振捣作业产生的冲击力导致锚栓松动倾斜。材料质量影响不可忽视, 锚栓本身直线度超标、固定支架钢材强度不足变形, 会直接引发安装偏差。测量放线误差也是重要原因, 测量仪器精

度不够、测量人员操作不规范, 或放线后未及时复核, 导致锚栓安装基准出现偏差。环境因素干扰显著, 施工现场地形不平整、浇筑时气温变化引发混凝土收缩变形, 或大风天气影响模板稳定性, 均会加剧偏差。此外, 施工管理不到位, 未落实分层复核制度、作业人员专业技能不足, 也会使偏差防控措施失效, 最终导致各类安装偏差产生。

### 1.3 偏差允许值标准对比

目前风电行业针对预埋锚栓安装偏差的允许值, 主要依据国家标准、行业规范及企业内控标准, 不同标准存在细微差异但核心要求一致。国家标准《风力发电塔架第1部分: 通用技术条件》(GB/T 19073.1) 规定, 单根锚栓轴线偏差允许值  $\leq 5\text{mm}$ , 整组锚栓轴线偏差  $\leq 3\text{mm}$ , 标高偏差允许范围为  $\pm 5\text{mm}$ , 垂直度偏差  $\leq L/1000$  ( $L$ 为锚栓有效长度), 相邻锚栓间距偏差  $\leq \pm 3\text{mm}$ 。行业规范《风力发电工程施工质量验收规程》(DL/T 5190.5) 在此基础上, 补充了锚栓外露长度偏差要求, 允许值为  $\pm 10\text{mm}$ 。不同企业内控标准更为严格, 部分企业将单根锚栓轴线偏差允许值收紧至  $\leq 3\text{mm}$ , 垂直度偏差  $\leq L/1500$ , 以提升结构安全性。对比来看, 行业规范更侧重施工过程控制, 企业标准基于工程经验强化偏差管控, 国家标准为最低达标要求, 实际工程中需结合项目设计要求, 优先遵循更严格的标准, 确保锚栓安装质量符合结构承载需求。

## 2 安装偏差对结构稳定性的影响机制与理论分析

### 2.1 稳定性评价指标定义

风电塔筒预埋锚栓作为连接塔筒与基础的核心构件, 其安装偏差对结构稳定性的影响不容小觑, 需借助明确且科学的评价指标展开量化分析。其中, 锚栓受力不均匀系数是重要指标之一, 它被定义为单根锚栓最大受力与平均受力的比值。当该系数越接近1时, 表明锚栓受力

分布越均匀,整个结构的稳定性也就越好;一旦系数超过1.5,就意味着局部锚栓可能出现受力过载的情况,存在较大安全隐患。基础顶面应力集中系数同样关键,它指的是在偏差状态下基础顶面最大应力与正常状态下应力的比值,能够直观反映偏差对基础结构的影响程度<sup>[2]</sup>。在实际工程中,该系数允许值需严格控制在1.2以内,以确保基础结构的安全可靠。塔筒整体倾斜度也不容忽视,它是由锚栓偏差引发的塔筒顶部水平位移与塔筒高度的比值,直接影响着风荷载作用下结构的平衡状态,其允许值应 $\leq 1/1000$ 。锚栓疲劳寿命衰减率也需重点关注,偏差会使锚栓承受附加弯矩,进而导致疲劳寿命较设计值缩短,当衰减率超过20%时,必须及时采取修正措施。这些指标从受力、变形、寿命等多个维度全面反映结构稳定性,为偏差影响分析提供了坚实依据。

## 2.2 单偏差类型的影响分析

不同单偏差类型对风电塔筒结构稳定性的影响机制存在差异,需针对性分析。轴线偏差会使锚栓承受附加水平拉力和弯矩,偏离设计受力状态,单根锚栓轴线偏移过大时,局部锚栓受力激增,易引发锚栓弯曲变形或基础混凝土开裂,降低结构抗拔、抗倾覆能力。标高偏差导致塔筒底座与基础接触面受力不均,偏高锚栓承担更多竖向荷载,长期运行易出现疲劳损伤,偏低锚栓则可能处于不受力状态,使荷载集中于少数锚栓。垂直度偏差使锚栓受力呈现偏心特性,倾斜角度越大,附加弯矩越大,不仅加剧锚栓自身损伤,还会导致塔筒整体受力失衡,增加风荷载下的结构振动。间距偏差破坏锚栓受力对称性,间距过小的锚栓相互挤压,间距过大的锚栓受力过载,整体降低基础对塔筒的约束能力,影响结构长期稳定性。

## 2.3 组合偏差的耦合效应

组合偏差的耦合效应较单偏差更为复杂,会产生 $1+1>2$ 的负面影响,显著降低结构稳定性。轴线偏差与垂直度偏差耦合时,锚栓同时承受水平偏移和倾斜带来的双重附加弯矩,受力状态极度复杂,易导致锚栓根部出现应力集中,加速疲劳破坏,同时使塔筒底座贴合间隙增大,振动响应增强。标高偏差与间距偏差耦合,会造成塔筒底座受力点分布紊乱,部分锚栓因标高偏高且间距过小而承受叠加荷载,部分锚栓因标高偏低且间距过大而受力不足,形成受力薄弱区域,在强风、地震等极端荷载作用下,易引发局部锚栓断裂,进而导致整体结构失稳。三类及以上偏差耦合时,结构受力体系严重偏离设计状态,基础顶面应力分布极不均匀,锚栓群协同工作能力丧失,不仅会缩短锚栓和基础的使用寿命,

还可能引发塔筒倾斜、倒塌等重大安全隐患,需重点防控组合偏差。

## 3 基于有限元仿真的偏差影响量化分析

### 3.1 有限元模型构建

基于有限元仿真技术开展偏差影响量化分析,精准构建三维有限元模型是保障仿真结果可靠性的关键前提。本模型以某1.5MW风电塔筒预埋锚栓系统为原型,运用功能强大的ANSYS软件进行建模,完整涵盖锚栓、固定支架、基础混凝土以及塔筒底座这四大核心部件。在部件建模细节上,锚栓采用实体单元Solid45进行精细建模,其材料选用Q345B钢材,并赋予准确的材料参数,弹性模量为 $2.06 \times 10^5$ MPa、泊松比0.3、抗拉强度345MPa;基础混凝土采用Solid65单元,该单元能很好地模拟其抗压、抗拉特性,材料参数严格依据C30混凝土标准设置。塔筒底座则采用壳单元Shell181,与锚栓通过绑定约束来模拟实际连接关系,确保模型与实际情况高度吻合<sup>[3]</sup>。建模过程中,严格遵循设计尺寸,精确还原锚栓间距、长度及布置方式。同时,充分考虑施工实际情况,预留偏差加载接口,能够精准模拟各类单偏差以及组合偏差状态。在模型网格划分方面,采用精细化策略,对锚栓及接触面等受力集中区域进行网格加密处理,以此确保在计算过程中这些关键部位的计算精度,为后续的偏差影响量化分析奠定坚实基础。

### 3.2 仿真工况设计

为全面量化不同偏差对结构稳定性的影响,设计单偏差工况、组合偏差工况及基准工况三类仿真工况,共计20组子工况。基准工况按无偏差设计状态设置,作为偏差工况的对比基准,模拟正常受力下的锚栓应力、基础变形及塔筒稳定性指标。单偏差工况针对四类典型偏差,各设置5个偏差梯度,轴线偏差梯度为1mm、3mm、5mm、7mm、9mm,标高偏差梯度为-9mm、-5mm、0mm、5mm、9mm,垂直度偏差梯度为L/2000、L/1500、L/1000、L/800、L/600,间距偏差梯度为-5mm、-3mm、0mm、3mm、5mm,分别模拟不同偏差程度的影响。组合偏差工况选取工程中常见的耦合形式,包括轴线+垂直度偏差、标高+间距偏差、轴线+标高+垂直度偏差三类,各设置3个偏差组合梯度,贴合实际施工偏差场景。所有工况均施加相同的竖向荷载、水平风荷载及地震荷载,确保对比条件一致,通过仿真获取各工况下的受力、变形及寿命指标。

## 4 安装偏差控制策略与工程建议

### 4.1 施工阶段控制措施

施工阶段作为锚栓安装偏差防控的重中之重,需从工艺、测量、管理三个维度全方位落实控制举措。工艺

控制方面,精心优化锚栓固定方案,采用双支架定位体系,确保支架与基础钢筋牢固焊接,为锚栓提供稳定支撑。在锚栓底部加装限位板,顶部采用可调式夹具固定,有效约束锚栓位置。浇筑前,对锚栓位置进行细致复核并加固,防止浇筑时移位。浇筑过程中,严禁振捣棒直接撞击支架,同时合理控制混凝土浇筑速度和振捣力度,避免因外力导致锚栓偏移。测量控制上,选用精度等级 $\geq 1\text{mm/km}$ 的全站仪进行放线,保证放线精度。放线后,安排双人进行复核,确保数据准确无误。浇筑过程中,每30分钟对锚栓位置监测一次,及时掌握其动态变化。浇筑完成后24小时内再次复核,一旦发现偏差,立即纠正。管理控制方面,建立分层复核制度,施工班组自检、技术部门复检、监理单位终检层层把关,只有合格后方可进入下一工序。加强作业人员培训,考核合格后才能上岗,明确各岗位职责,做好详细施工记录,确保偏差可追溯,从源头上严格控制安装偏差。

#### 4.2 设计阶段冗余设计

设计阶段通过科学合理的冗余设计,能显著提升结构对安装偏差的适应能力,有效降低偏差带来的风险。在锚栓布置冗余设计上,在满足受力要求的基础上,适当增加锚栓数量或扩大锚栓布置范围,优化锚栓间距,使锚栓群受力更加均匀。即便出现局部偏差,冗余锚栓也能分散荷载,避免单一锚栓因受力过大而超载损坏。材料选型冗余设计方面,选用抗拉强度、屈服强度高于设计要求的锚栓材料,锚栓直径可按设计值提高一个规格,固定支架采用高强度钢材,增强结构的抗变形能力,提高结构整体稳定性。受力计算冗余设计时,计算锚栓受力要考虑一定比例的偏差附加荷载,预留10%~15%的受力冗余。同时,验算不同偏差工况下的结构稳定性,确保偏差在允许范围内时,结构仍能满足设计使用年限要求。另外,设计文件中要明确偏差允许值及修正方案,为施工和运维提供清晰依据,全面提升整体结构的可靠性。

#### 4.3 运维阶段检测与修正

运维阶段定期开展锚栓偏差检测与修正工作至关重要,

能及时消除安全隐患,保障结构长期稳定运行。检测方面,建立完善的定期检测制度,塔筒安装完成后1个月内进行首次全面检测,之后每年检测一次。在遭遇极端天气,如强风、地震后,增加专项检测。采用无人机航拍结合全站仪测量的方式,精准检测锚栓位置、标高、垂直度及间距偏差<sup>[4]</sup>。通过超声波探伤检测锚栓受力状态和疲劳损伤情况,借助应力传感器实时监测锚栓受力变化,建立检测数据库,对比分析偏差变化趋势,为后续维护提供数据支持。修正方面,针对检测发现的偏差,根据偏差程度采取相应措施。偏差较小时,可通过打磨塔筒底座接触面、加装垫片等方式进行调整;偏差较大时,采用植筋技术增补锚栓,或对原有锚栓进行校正加固。修正后需重新检测,确保偏差符合标准。对于出现疲劳损伤的锚栓,及时更换并进行防腐处理,定期维护锚栓防腐层,延长锚栓使用寿命,全方位保障结构安全稳定。

#### 结束语

风电塔筒预埋锚栓安装偏差对结构稳定性影响显著,通过对其分类、成因、影响机制及量化分析,明确了不同偏差的危害。施工阶段从工艺、测量、管理控制,设计阶段采用冗余设计,运维阶段定期检测修正,多管齐下可有效防控偏差。未来,随着风电技术发展,需进一步优化控制策略,提高安装精度,加强监测技术,以适应更高要求,保障风电结构长期安全稳定,为清洁能源发展提供坚实支撑。

#### 参考文献

- [1]徐敏.风电混塔基础锚栓安装精度对结构受力的影响[J].建筑结构学报,2024,45(5):145-154.
- [2]崔晋.预埋构件精度偏差对混凝土基础耐久性的影响研究[J].土木工程学报,2023,56(8):109-118.
- [3]闻洋,王梓好,张军,等.球-板型节点钢管混凝土风电塔架受力性能研究[J].建筑结构学报,2021,42(S2):49-56.
- [4]王瑞斌,王清朋.全站仪三点前方交会测量风电塔架倾斜[J].城市勘测,2021,(03):169-172.