

某风电塔混凝土塔筒及基础开裂对其安全性影响的研究

宋 军, 李 洋

云南省建筑科学研究院有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2026年8月18日; 录用日期: 2026年9月10日; 发布日期: 2026年9月21日

摘 要

为分析某风电塔项目混凝土塔筒及基础裂缝状态与结构响应特征, 本研究采用现场实体检测、裂缝检测与监测、变形及频率测试、应变测试、加速度测试和沉降观测等方法, 研究该风电塔混凝土塔筒及基础开裂对其安全性的影响。结果表明: 基础局部混凝土抗压强度满足设计及相关规范要求; 部分塔筒塔筒及基础钢筋间距、保护层厚度存在不满足设计或规范要求的情况。塔筒裂缝平均宽度均未超限, 基础裂缝部分测点平均宽度超限; 塔筒及基础裂缝平均深度均小于保护层厚度设计值。变形及频率测试表明, 风机静止及运行工况下风电塔变形变化不大, 风电塔实测基频均大于设计基频。应变与加速度测试结果表明, 关键连接部位应变变化较小, 运行工况下竖向振动峰值加速度满足相关标准要求。沉降观测未见陡降或突降异常。综合现有检测与监测结果, 可认为该混凝土塔筒及基础裂缝在观测阶段变化不明显, 整体趋于稳定, 裂缝对该风电塔安全稳定运行的影响较小。

关键词

风电塔, 混凝土塔筒, 裂缝检测, 动力特性, 应变测试

Effect of Cracking in the Concrete Tower and Foundation of a Wind Turbine Tower on Its Structural Safety

Jun Song, Yang Li

Yunnan Institute of Building Research Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: August 18, 2026; accepted: September 10, 2026; published: September 21, 2026

Abstract

To analyze the cracking condition and structural response characteristics of the concrete tower and foundation of a wind turbine tower project, this study employed *in-situ* inspection of structural members, crack detection and monitoring, deformation and natural frequency measurements, strain measurements, acceleration measurements, and settlement observation to investigate the influence of cracking in the concrete tower and foundation on structural safety. The results indicate that the local compressive strength of the foundation concrete satisfies the design and relevant code requirements, whereas the reinforcement spacing and concrete cover thickness at certain tower segments and foundation locations fail to meet the design or code requirements. The average crack width of the inspected tower did not exceed the allowable limit, while the average crack width at some measuring points on the foundation exceeded the limit; the average crack depth in both the tower and the foundation was less than the design value of the concrete cover thickness. The deformation and frequency tests show that the deformation of the wind turbine tower varied only slightly between the shutdown and operating conditions, and the measured fundamental frequencies were all higher than the design fundamental frequency. The strain and acceleration results demonstrate that strain variation at the critical connection zones was minor, and the peak vertical vibration acceleration under operating conditions complied with the requirements of the relevant standards. No abrupt or sudden drops were observed in the settlement records. Based on the available inspection and monitoring results, the cracks in the concrete tower and foundation exhibited no significant development during the observation period and tended to remain stable overall, suggesting that the cracks exert only a limited influence on the safe and stable operation of the wind turbine tower.

Keywords

Wind Power Tower, Concrete Tower, Crack Detection, Dynamic Characteristics, Strain Measurements

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着风电机组单机容量和塔架高度不断增加, 塔筒结构在风电系统中的安全支撑作用更加突出。混凝土塔筒具有较高刚度和承载能力, 逐渐成为大容量陆上风电机组的重要塔架形式。受环境侵蚀、风荷载作用、机组运行荷载以及设计缺陷等因素的影响, 风电塔筒及基础可能产生开裂, 影响其安全性能。因此, 对开裂混凝土塔筒及基础的安全性进行评估具有重要意义。张后禅[1]等指出, 混凝土塔筒作为风电机组支撑结构, 其健康稳固关系到整个风电系统的整体安全, 对既有缺陷开展分析、计算、安全性评估与修复, 有助于保证塔筒结构满足风机安全运行要求。田伟辉[2]等针对装配式混凝土塔筒竖缝开展有限元分析, 认为竖缝对塔架整体固有频率影响较小, 但可能导致局部环向拉应力偏大, 合理连接构造和预应力体系有助于保证结构整体性能。罗锦华[3]等基于实际工程检测结果, 对风力发电机基础受力裂缝和非受力裂缝的成因、分布及性状特征进行了分析, 指出受力裂缝与非受力裂缝在分布特征、裂缝深度、裂缝出现时间及发展特点方面存在差异。除裂缝几何特征外, 结构动力响应也是评价风电塔运行状态的重要指标。风电机组运行时, 塔筒和基础可能受到低频振动及反复荷载作用。张新国[4]等从风电塔筒振动对基础混凝土强度影响角度出发, 讨论了基础环周边混凝土松动、开裂及泛浆等现象, 并指出长期

低频振动与水分进入可能加剧基础环周边混凝土损伤。

本研究以某风电塔项目中存在开裂的混凝土塔筒及基础为对象, 结合现场实体检测、裂缝检测及监测、变形及频率测试、应变测试、加速度测试和沉降观测结果, 对裂缝状态及结构响应进行检测分析, 研究该风电塔混凝土塔筒及基础开裂对其安全性的影响。

2. 工程概况

某风电项目位于西南地区(风电塔现场概况见图 1), 于 2023 年 11 月在叶片巡检工作时发现一处混凝土塔筒有裂缝, 裂缝位于第一段塔筒, 沿塔筒高度纵向贯通, 宽度较小。后续又发现其他风机也存在类似裂缝, 并于 2023 年 12 月组织相关人员对风场所有风机基础、塔筒开展全面检查。为分析裂缝对结构性能的影响, 选取裂缝相对较多的 4 座风电塔作为重点研究对象, 通过对 4 座风电塔进行实体检测、裂缝检测及监测、变形及频率测试、应变测试、加速度测试和沉降观测等方法, 研究裂缝对塔筒和基础的安全是否有影响。



Figure 1. General view of the wind turbine tower site
图 1. 风电塔现场概况

3. 检测与监测结果

3.1. 混凝土强度检测

现场采用回弹法对某基础局部混凝土抗压强度进行检测, 结果见表 1。检测结果显示, 3 个测区混凝土强度推定值均为 >60 MPa, 满足设计及相关规范要求。

Table 1. Summary of compressive strength test results of foundation concrete
表 1. 基础混凝土抗压强度检测结果汇总

序号	构件或测区	强度推定值(MPa)
1	基础牛腿测区	>60
2	基础测区	>60
3	基础测区	>60

3.2. 钢筋间距与保护层厚度检测

钢筋间距和保护层厚度检测结果见表 2。塔筒及基础局部钢筋间距、保护层厚度存在与设计值不一致的情况。部分塔筒塔筒纵向钢筋间距大于设计值, 部分保护层厚度也存在偏差。检测结果显示, 裂缝宽度与钢筋间距存在一定相关关系, 基本呈现水平钢筋间距越大、裂缝宽度越大的趋势。因此不排除该裂缝深度仅局限于保护层范围的可能。

Table 2. Summary of reinforcement spacing and concrete cover thickness

表 2. 钢筋间距与保护层厚度检测结果汇总

检测项目	构件类别	实测平均值(mm)	设计值(mm)	说明
T1 钢筋间距	塔筒纵向	173.3~196.0	150	部分大于设计值
T1 钢筋间距	塔筒横向	138.7~158.3	150	部分偏离设计值
T1 钢筋间距	基础牛腿纵向	105.3	100	接近设计值
T1 钢筋间距	基础牛腿横向	133.7	150	小于设计值
T1 保护层厚度	塔筒	30.4~42.7	20	多数大于设计值
T1 保护层厚度	基础或牛腿	26.6~>70	40	部分不满足设计值

3.3. 裂缝宽度与深度检测

3.3.1. 塔筒裂缝宽度与深度检测

对 T1~T4 塔筒裂缝宽度与深度进行检测, 将 T1~T4 塔筒裂缝最宽、最深处的检测结果进行汇总, 汇总结果见表 3。T1 塔筒裂缝最宽处为 0.23 mm, 平均宽度最大处为 0.136 mm; T2 塔筒裂缝最宽处为 0.20 mm, 平均宽度最大处为 0.120 mm; T3 塔筒裂缝最宽处为 0.26 mm, 平均宽度最大处为 0.190 mm; T4 塔筒裂缝最宽处为 0.18 mm, 平均宽度最大处为 0.100 mm。4 座风电塔塔筒裂缝所有测点平均宽度均未超过 0.20 mm。塔筒裂缝深度方面, T1~T4 裂缝最深处分别为 121.8 mm、129.7 mm、117.1 mm 和 130.6 mm, 平均深度最大处分别为 87.2 mm、86.1 mm、88.3 mm 和 99.3 mm。检测结果显示, 所有测点平均深度均小于保护层厚度设计值 200 mm。

Table 3. Summary of crack width and depth of concrete tower segments

表 3. 混凝土塔筒裂缝宽度与深度检测结果汇总

风电塔编号	裂缝最宽处(mm)	平均宽度最大处 (mm)	裂缝最深处(mm)	平均深度最大处 (mm)	说明
T1	0.23	0.136	121.8	87.2	平均宽度未超过 0.20 mm
T2	0.20	0.120	129.7	86.1	平均宽度未超过 0.20 mm
T3	0.26	0.190	117.1	88.3	平均宽度未超过 0.20 mm
T4	0.18	0.100	130.6	99.3	平均宽度未超过 0.20 mm

3.3.2. 基础裂缝宽度与深度检测

对 T1~T4 基础裂缝宽度与深度进行检测, 将 T1~T4 基础裂缝最宽、最深处的检测结果进行汇总, 汇总结果见表 4。T1 基础裂缝最宽处为 0.251 mm, 平均宽度最大处为 0.289 mm, 存在 2 个测点平均宽度超过 0.20 mm; T2 基础裂缝最宽处为 0.218 mm, 平均宽度最大处为 0.163 mm, 所有测点平均宽度均未超过 0.20 mm; T3 基础裂缝最宽处为 0.250 mm, 平均宽度最大处为 0.217 mm, 存在 1 个测点平均宽度

超过 0.20 mm; T4 基础裂缝最宽处为 0.330 mm, 平均宽度最大处为 0.289 mm, 存在 4 个测点平均宽度超过 0.20 mm。基础裂缝深度方面, T1~T4 基础裂缝最深处分别为 260.9 mm、194.5 mm、203.8 mm 和 183.4 mm, 平均深度最大处分别为 145.2 mm、116.1 mm、137.7 mm 和 145.2 mm。检测结果显示, 所有测点平均深度均小于保护层厚度设计值 400 mm。

Table 4. Summary of crack width and depth of foundations
表 4. 基础裂缝宽度与深度检测结果汇总

风电塔编号	裂缝最宽处 (mm)	平均宽度最大处 (mm)	裂缝最深处 (mm)	平均深度最大处 (mm)	说明
T1	0.251	0.289	260.9	145.2	2 个测点平均宽度超过 0.20 mm
T2	0.218	0.163	194.5	116.1	平均宽度未超过 0.20 mm
T3	0.250	0.217	203.8	137.7	1 个测点平均宽度超过 0.20 mm
T4	0.330	0.289	183.4	145.2	4 个测点平均宽度超过 0.20 mm

3.4. 裂缝监测及功率变化后的裂缝发展

采用选取 T1~T4 塔筒、基础最宽、最深处进行监测, 监测频率为 6~8 天一次, 监测周期为两个月, 功率放开后裂缝宽度、深度及风速的变化规律见图 2~4。裂缝监测结果显示: 在风机静止状态下, 塔筒和基础裂缝变化不明显, 整体基本稳定; 在风机运行状态下, 传感器接收的裂缝变化数据存在波动, 但波动较小, 变化幅度均在 0.20 mm 以内。由此可认为, 在观测阶段内, 塔筒及基础裂缝未见明显扩展迹象。在风机功率逐步放开至满负荷运行后, T1~T4 塔筒及基础裂缝宽度、深度变化幅度较小, 未见明显扩张迹象, 裂缝发展趋势趋于稳定。该结果表明, 在已观测工况下, 运行功率变化未导致裂缝出现明显持续发展。

裂缝与风速变化规律分析显示, T1~T4 塔筒及基础裂缝宽度、深度变化趋势基本与风速变化规律相符, 说明风速可能是影响裂缝变化的因素之一。与此同时, 应变测试显示风机静止与运行状态下关键部位应变变化较小, 裂缝对外力变化不敏感。因此, 可认为风速对裂缝变化存在一定影响, 但不足以成为裂缝产生的根本原因。

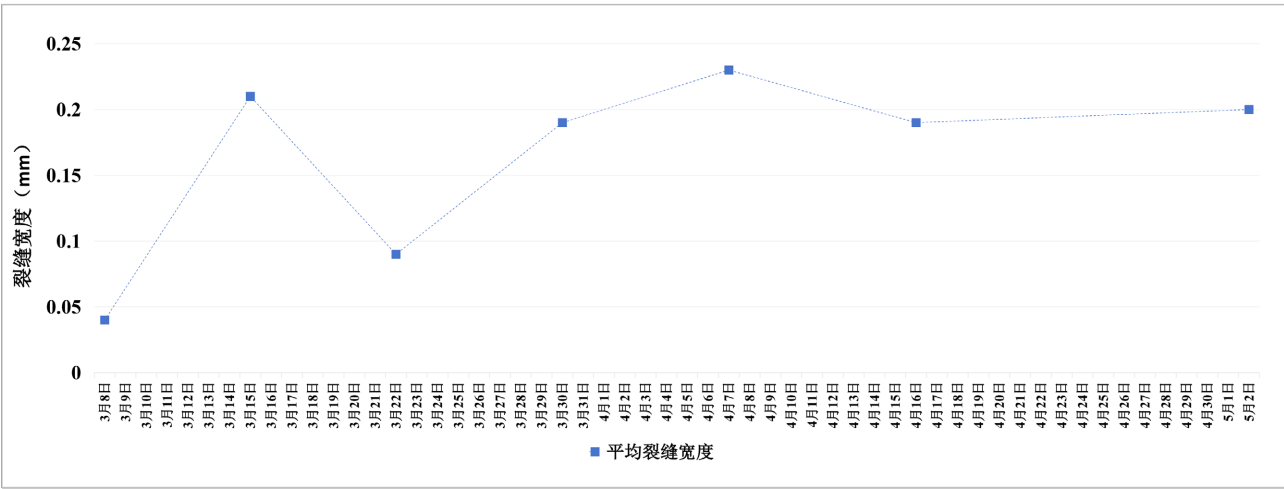


Figure 2. Variation trend of the tower crack width at T1 after power restriction removal
图 2. T1 功率放开后塔筒裂缝宽度变化趋势

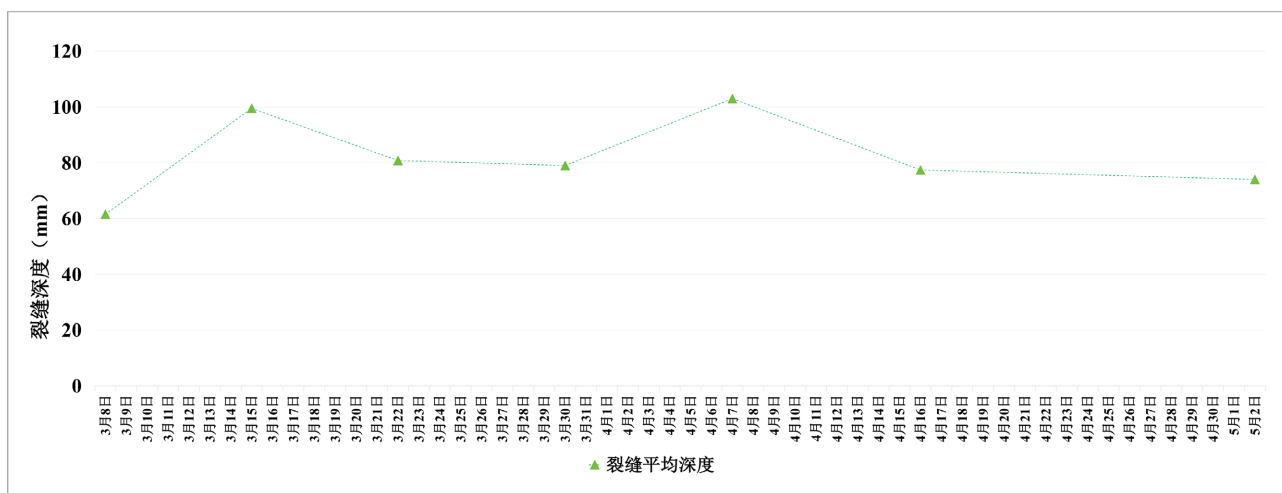


Figure 3. Variation trend of the tower crack depth at T1 after power restriction removal

图 3. T1 功率放开后塔筒裂缝深度变化趋势

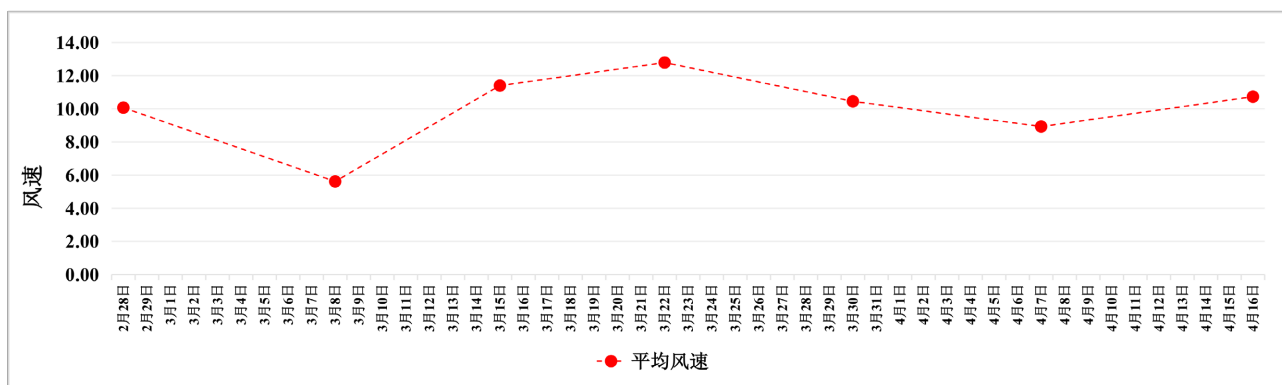


Figure 4. Variation of wind speed

图 4. 风速变化规律

3.5. 频率测试

采用挠度非接触测量仪对 T1~T3 的基频进行测试, 根据现场测试条件及风电塔的灰度显示, 在风电塔身上选择 5 个测点, 测点布置见图 5。测试结果表明: 3 座风电塔的实测基频均大于设计基频 0.27 Hz, 可基本认为裂缝对风电塔整体刚度影响较小, 频率测试结果见表 5。

3.6. 应变测试

采用应变传感器(见图 6)在风机停用和运行工况下, 对 T1、T2 混凝土塔筒与上部拼缝连接处、塔筒与基础连接处开展应变测试, 采样频率为 1 Hz, 测试时间为一个月, 测试结果见表 6。测试结果表明: 风机停用工况下, 混凝土塔筒与上部拼缝连接处最大应变为 $-3.5 \mu\epsilon$, 塔筒与基础连接处最大应变为 $-12.6 \mu\epsilon$; 运行工况下, 混凝土塔筒与上部拼缝连接处最大应变为 $-6.8 \mu\epsilon$, 塔筒与基础连接处最大应变为 $-12.9 \mu\epsilon$ 。风机工作与否, 上述部位应变变化均较小。

3.7. 加速度测试

采用测针传感器(见图 7)对 T1 和 T2 开展竖向加速度测试, 采样频率为 50 Hz, 测试结果见表 7。

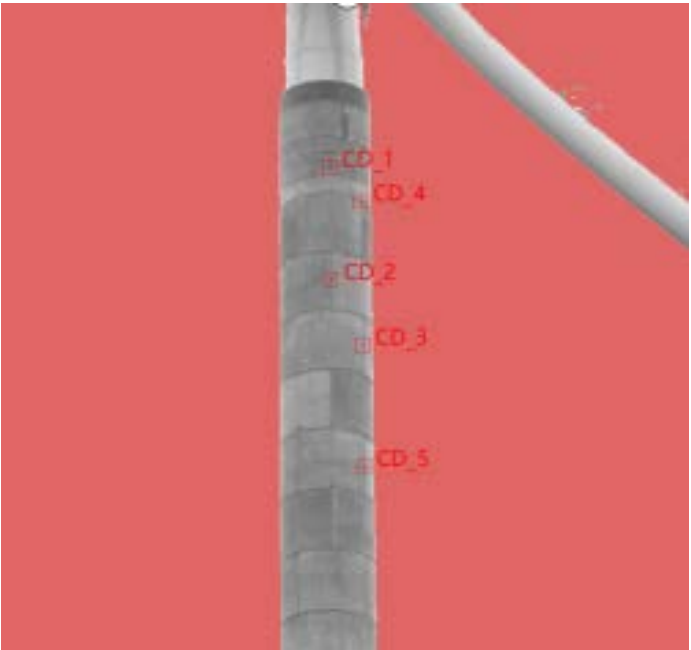


Figure 5. Schematic diagram of the measurement point layout
图 5. 测点布置示意图

Table 5. Measured fundamental frequencies of selected wind turbine towers
表 5. 风电塔基频测试结果

风电塔编号	实测基频(Hz)	设计基频(Hz)	判断
T1	0.375	0.27	大于设计基频
T2	0.342	0.27	大于设计基频
T3	0.357	0.27	大于设计基频

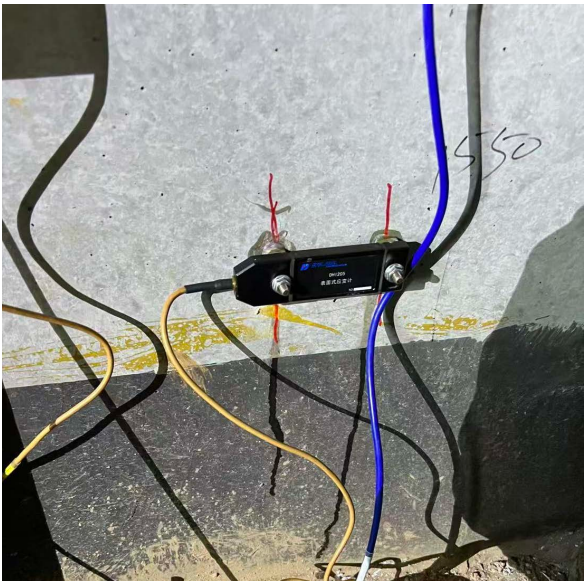


Figure 6. Strain measurement sensors
图 6. 应变测试传感器

Table 6. Summary of strain test results
表 6. 应变测试结果汇总

工况	测试部位	最大应变($\mu\epsilon$)	说明
停用工况	塔筒与上部拼缝连接处	-3.5	应变变化较小
停用工况	塔筒与基础连接处	-12.6	应变变化较小
运行工况	塔筒与上部拼缝连接处	-6.8	应变变化较小
运行工况	塔筒与基础连接处	-12.9	应变变化较小



Figure 7. Vibration measurement sensors
图 7. 振动测试传感器

Table 7. Summary of vertical acceleration test results
表 7. 竖向振动峰值加速度测试结果汇总

风电塔编号	静止工况峰值加速度(m/s^2)	运行工况峰值加速度(m/s^2)	评价
T1	0.003	0.020	满足相关要求
T2	0.008	0.061	满足相关要求

测试结果表明：静止工况下，T1 竖向振动峰值加速度为 0.003 m/s^2 ，T2 为 0.008 m/s^2 ；运行工况下，T1 竖向振动峰值加速度为 0.020 m/s^2 ，T2 为 0.061 m/s^2 。检测结果满足《风力发电机组及其组件机械振动测量与评估》[5]第 6.2.2 条对加速度的要求。

3.8. 沉降观测

对 T1~T4 风电塔进行三个月的沉降观测，观测频率为 7 天一次。沉降观测结果显示：风机基础未出现陡降和突降异常情况，沉降过程正常。受观测对象累计沉降最大值绝对值未超过 2.41 mm 。根据现有沉降观测结果，可基本排除明显异常沉降导致塔筒塔筒及基础混凝土开裂的可能。

3.9. 检测与监测结论

本研究围绕材料性能、构造做法、裂缝几何特征、结构动力响应及地基变形等五个方面，对 4 座风电塔开展了检测与监测，得出以下结论：材料与构造方面，基础混凝土推定强度均大于 60 MPa ，满足设

计要求, 塔筒纵向钢筋间距大于设计值, 保护层厚度大于设计值; 裂缝方面, 塔筒平均宽度均未超过 0.20 mm, 基础有 7 个测点超限、最大 0.289 mm, 两者平均深度均小于相应保护层厚度设计值; 动态响应方面, 实测基频均高于设计基频 0.27 Hz, 关键部位最大应变仅 $-12.9 \mu\epsilon$, 竖向峰值加速度满足现行标准; 地基变形方面, 累计沉降未超过 2.41 mm, 未见陡降突降。综上, 可基本认为混凝土塔筒、基础的裂缝对风机安全稳定运行的影响较小, 但需考虑风机局部耐久性的问题。

4. 讨论

4.1. 裂缝成因分析

基础混凝土强度明显高于设计要求, 可基本排除强度不足造成开裂的可能; 沉降量很小且无陡降突降, 可基本排除异常沉降造成开裂的可能。裂缝变化趋势虽与风速规律相符, 但功率放开后未见扩张, 停用与运行工况间的应变增量不超过约 $3.3 \mu\epsilon$, 说明裂缝对荷载变化不敏感, 风荷载导致塔筒、基础开裂的可能性较小。本研究发现裂缝宽度与钢筋间距存在一定相关关系, 基本呈现水平钢筋间距越大、裂缝宽度越大的趋势, 已有研究[6]指出, 保护层厚度过大可能导致表层混凝土抗裂能力不足, 也可能在风机运行引起的周期性作用或环境作用下产生裂缝, 因此, 不排除保护层过厚导致塔筒、基础开裂的可能。综上, 可认为塔筒、基础裂缝更接近因收缩、温度作用及构造偏差产生的非受力型裂缝。

本研究结论与罗锦华等[3]的研究结论相似: 罗锦华等将风力发电机基础裂缝区分为受力裂缝与非受力裂缝, 指出非受力裂缝通常出现较早、深度较浅、分布较分散, 与收缩和温度作用关系更为密切。本研究所检测裂缝平均深度均小于保护层厚度设计值, 且裂缝宽度对荷载变化不敏感, 与非受力裂缝的特征相吻合。不同之处在于, 罗锦华等研究的对象以扩展基础为主, 而本研究涉及混凝土塔筒与圆形承台基础, 裂缝形态以纵向贯通缝为主, 这与塔筒圆筒壳体结构的受力特点及混凝土收缩方向性有关。田伟辉等[2]针对装配式混凝土塔筒竖缝的有限元分析表明, 竖缝对塔架整体固有频率影响较小, 但可能导致局部环向拉应力偏大; 这与本研究观察到的竖向(纵向)裂缝形态及较小的应变增量对研究结果相似, 说明此类纵向裂缝在正常运行工况下对整体受力状态影响有限。

4.2. 裂缝特征与耐久性影响

裂缝宽度直接关系钢筋锈蚀风险与结构耐久性。塔筒各测点平均宽度均未超限, 基础有 7 个测点超过 0.20 mm; 平均深度均小于相应保护层厚度设计值, 说明裂缝对承载能力的直接影响有限, 但超限位置可能存在锈蚀风险。本研究与陈加兴等[7]的研究相似, 陈加兴等通过数值模拟分析认为, 风机基础柱柱表面径向及环向裂缝(深度不大于 20 cm)基本不影响结构整体安全, 但可能造成内部钢筋锈蚀进而导致结构整体刚度降低; 本文与该研究均采用了“裂缝深度与保护层厚度之比”作为参考依据, 判断逻辑一致, 差异在于, 本研究为现场实测, 直接反映了实际工程状态, 而陈加兴等的数值分析针对假定工况, 在具体工程应用中, 本研究可与其形成相互印证。

张后禅等[1]在总结混凝土塔筒结构缺陷及加固修复技术时指出, 修复方案的选择应与裂缝成因、深度和宽度相匹配: 对于宽度较小的非受力表面裂缝, 表面封闭处理通常可满足耐久性要求; 对于宽度超限或深度较大的裂缝, 则宜采用低压注浆修补。本研究检测结果支持上述分级处置原则: 塔筒裂缝宽度普遍未超限, 可优先考虑表面封闭; 基础超限测点数量较多、部分深度较大, 应重点采取灌浆修补措施, 并辅以宽度分级管理。

4.3. 运行工况下的裂缝发展与结构整体性能

功率由限制状态放开至满负荷, 是本次监测中荷载变化最显著的过程。该过程中 T1~T4 塔筒及基础

裂缝的宽度与深度变化幅度均较小, 未出现持续扩展; 塔筒变形变化不大, 关键连接部位应变量值很小, 竖向峰值加速度满足现行标准, 表明功率提高并非裂缝发展的主要因素。整体性能方面, 3 座风电塔实测基频较设计基频高出约 27%~39%且离散性不大, 说明现有裂缝尚未对风电塔整体刚度产生明显影响。这一结论与肖进、梁瑞利[8]的研究结果相似, 但也进一步揭示了频率测试的局限性。肖进等指出, 混塔缺陷模式与机组频率变化之间缺乏单一对应关系, 不同类型缺陷对基频的影响方向和幅度各不相同, 频率测试仅能反映结构整体刚度变化, 难以定位缺陷类型与位置。本研究中实测基频均高于设计值, 这一现象除与裂缝尚未明显削弱整体刚度有关外, 也可能受到实际基础约束条件、施工质量等因素的影响, 不能据此得出结构安全性满足要求的结论。贾行建等[9]对存在基础裂缝的风机塔开展振动测试分析, 同样发现频率指标对局部裂缝损伤的敏感性较低, 这与本研究的研究结论相似, 说明在裂缝损伤识别中, 应将频率测试与裂缝直接检测、应变监测等手段结合使用, 而非单独依赖频率指标判断结构状态。

4.4. 不足与展望

受现场条件影响, 本研究对象仅限于同一风场内裂缝较多的 4 座风电塔, 且观测周期较短, “裂缝趋于稳定”的结论仅反映观测阶段状态, 无法评估长期环境作用(持续风荷载、季节温差、冻融循环)下的裂缝发展情况; 超声法测量裂缝深度受骨料粒径、钢筋位置等因素影响, 存在一定误差。对深度较大的裂缝, 因项目的特殊性, 无法采用钻芯检测对裂缝深度进行复核; 受现场检测条件限制, 应变及加速度测试仅覆盖 T1、T2 的关键部位, 未能全面反映 4 座风电塔的空间动力响应差异; 温湿度等环境因素对裂缝变化的量化影响未系统分析。

基于本研究的发现与研究的局限性, 在将来对研究中, 可对超限测点建立自动化监测系统, 结合气象数据开展多因素相关性分析, 为裂缝发展预测提供数据支撑; 可结合有限元模拟与实测数据, 研究多裂缝并存工况下对结构整体刚度和耐久性的综合影响, 探索更显著的损伤识别指标。

5. 结论

1) 本研究针对 4 座混凝土塔筒及基础的开裂情况, 综合采用回弹法强度检测、裂缝宽度与深度测量、动态裂缝监测、变形与频率测试、应变测试、加速度测试及沉降观测等多种检测手段, 从材料性能、裂缝状态、结构动力响应及基础稳定性等方面开展系统性调查。研究采用多种检测手段相互验证的方法, 避免了单一检测带来的不确定性, 保证了检测结果及结论的可靠性。

2) 该风电塔工程病害的主要表现为混凝土塔筒及基础的裂缝问题。检测结果表明, 塔筒各测点裂缝平均宽度均未超过规范限值 0.20 mm, 但部分基础测点裂缝平均宽度存在超限情况, 施工阶段钢筋间距偏差可能是裂缝发展的诱因之一。综合动力响应、变形、应变及沉降等多项检测数据, 现阶段裂缝在观测期内整体趋于稳定, 对结构安全稳定运行的影响较小, 具备逐步恢复至额定功率正常使用的条件。对于裂缝超限测点, 宜采取表面封闭或注浆修补措施以降低耐久性风险, 并在后续运维中重点关注。本研究成果基于混凝土塔筒风电结构开裂情况的系统分析, 对于同类型风电塔裂缝检测与安全评估具有一定的参考和借鉴意义。

参考文献

- [1] 张后禅, 董淑慧, 江守恒. 风电混凝土塔筒结构缺陷及加固修复技术研究[J]. 混凝土, 2024(2): 168-172.
- [2] 田伟辉, 刘静, 陆希. 竖缝对风力发电机组装配式混凝土塔筒结构特性的影响分析[J]. 西北水电, 2019(6): 108-112.
- [3] 罗锦华, 吕伟荣, 卢倍嵘, 徐伟, 姚帅. 风力发电机基础裂缝成因及性状分析[J]. 科学技术创新, 2022(1): 17-20.
- [4] 张新国, 徐彬. 基于风电机塔筒振动对基础混凝土强度影响的探讨[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(S1): 498-

503.

- [5] GB/T 35854-2018 风力发电机组及其组件机械振动测量与评估[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [6] 张发, 刘庆阳, 张振利, 王文明. 风机基础裂缝检测及处理方法[J]. 工程建设, 2022, 54(4): 73-78.
- [7] 陈加兴, 何吉, 谭争光. 风机基础混凝土裂缝数值分析及加固方案研究[J]. 河南科技, 2021, 40(23): 98-102.
- [8] 肖进, 梁瑞利. 混塔缺陷模式与机组频率变化关系研究[J]. 风能, 2024(1): 90-93.
- [9] 贾行建, 杨学山, 何先龙, 余天莉. 基础存在裂缝的风机塔振动测试与分析[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(6): 163-167+205.