

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.089



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



风电机组岩石锚杆式加固基础受力性能 现场监测研究

魏焕卫^{1a,1b,1c}, 雷树立^{1a,1b}, 宋志鑫^{1a,1b}, 陈朝伟², 惠俊梅³, 宋鹏², 郑晓^{1a,1b,1c}

(1. 山东建筑大学 a. 土木工程学院; b. 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室; c. 地铁保护研究所, 济南 250101; 2. 山东建和土木工程咨询有限公司, 济南 250013; 3. 山东大卫国际建筑设计有限公司, 济南 250100)

摘要: 针对风机运行期间所受荷载的复杂性, 依托威海某风电机组基础加固项目, 提出一种系统监测方法, 结合现场环境, 评估加固基础的性能提升效果。从施工阶段到运行阶段, 采集加固基础的塔筒应变、焊钉应变及锚索轴力等数据, 研究风机加固基础在不同工况下的受力响应, 并开展相关性分析, 探讨基础加固后的性能提升效果及荷载传递机理。结果表明: 加固区中各构件受力响应具有趋势相似性与幅值差异性, 受力改善效果明显且均具有较大的安全度; 该加固方法利用外包混凝土和焊接焊钉改变了结构受力边界, 增加了底层塔筒的约束刚度, 使上部传递荷载重新分配, 实现剪力的分担与传递, 保证塔筒与混凝土共同变形。基于此加固方案提出的系统监测评估方法可以有效、及时地掌握加固系统各构件的受力状态, 保证后续风电机组运行安全。该加固方案改善了基础、岩石锚杆及法兰的受力状态, 基础整体受力性能得到保证。

关键词: 风电机组; 焊接焊钉; 基础加固; 现场监测; 受力响应

中图分类号: TU476 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)05-0177-09

Field monitoring on mechanical performance of rock bolt reinforced foundation of wind turbine

WEI Huanwei^{1a,1b,1c}, LEI Shuli^{1a,1b}, SONG Zhixin^{1a,1b}, CHEN Chaowei²,
HUI Junmei³, SONG Peng², ZHENG Xiao^{1a,1b,1c}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering; 1c. Subway Protection Research Institute, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China; 2. Shandong Jianhe Civil Engineering Consulting Co., Ltd., Jinan 250013, P. R. China; 3. Shandong Dawei International Architecture Design Co., Ltd., Jinan 250100, P. R. China)

Abstract: The loading condition on the wind turbine during operation is complex. Therefore, based on a wind turbine foundation reinforcement project in Weihai, a systematic monitoring method is proposed to evaluate the

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2019MEE021)

作者简介: 魏焕卫(1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事基础加固研究, E-mail: 13181718169@163.com。

郑晓(通信作者), 男, 博士, E-mail: zhengxiao_sdu@126.com。

Received: 2023-04-17

Foundation item: Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2019MEE021)

Author brief: WEI Huanwei (1974-), PhD, professor, main research interest: foundation reinforcement, E-mail: 13181718169@163.com.

ZHENG Xiao (corresponding author), PhD, E-mail: zhengxiao_sdu@126.com.

performance improvement effect of the reinforced foundation in combination with the field environment. From the construction stage to the operation stage, the tower strain, welding stud strain, and anchor cable axial force of the reinforced foundation are collected to study the stress response of the wind turbine reinforced foundation under different working conditions, conduct correlation analysis, and to explore the performance improvement effect and load transfer mechanism after foundation reinforcement. The results show that the stress response of each component in the reinforcement area has trend similarity and amplitude difference, and the stress improvement effect is obvious with a large safety margin. The reinforcement method changes the stress boundary of the structure by using outsourcing concrete and welding studs, increases the restraint stiffness of the bottom tower, redistributes the upper transferred load, shares the transferred shear force, and ensures the common deformation of the tower and concrete. The systematic monitoring and evaluation method based on this reinforcement scheme can effectively and timely assess the stress state of each component of the reinforcement system and ensure the safety of the subsequent wind turbine operation. The reinforcement scheme improves the stress state of the foundation, rock bolt and flange, and the overall mechanical performance of the foundation is guaranteed.

Keywords: wind turbines; welding stud; foundation reinforcement; field monitoring; mechanical response

随着风力发电产业在世界新能源领域地位的逐步提升^[1],风电行业取得了跨越式发展,风机装机容量越来越大,基础形式多种多样^[2-3]。风力发电机的重要运行保障是下部基础的安全,其不仅要承担风机自重,还要承受风机运行时产生的随机动荷载^[4]。因此,风机基础必须具有足够的强度及稳定性,其稳定性直接关系到风电场的安全运行^[5]。

许多风电场在运行一定时期后经历了极端荷载,基础可靠性降低^[6],无法再满足安全运行标准,必须进行加固补强,以恢复或提高其承载能力^[7-9]。风机基础优化补强措施起初主要是灌浆加固^[10-12],该方法通常针对基础环式风电机组基础常见的开裂、冒浆等现象,利用高强灌浆料修补基础环法兰附近区域裂缝并填补磨空区。但灌浆加固仅暂时缓解了基础环与混凝土之间的应力集中现象,其传力机制并未改变,短时间内可能再面临基础开裂的情况,且无法利用灌浆技术进行二次加固。

基于此,较多学者开始研究在风机基础环上进行加固补强的措施^[13-14],用以分担下法兰与混凝土接触应力,延长基础环式风机的使用寿命。Chen等^[15]在露出基础环顶面外侧焊接焊钉,以加强基础环与混凝土台柱之间的连接,并基于该加固方法提出了相应的计算算法和开展了数值建模分析。吕伟荣等^[16]利用缩尺模型试验研究了新型焊钉抗剪连接键的荷载-滑移曲线、破坏形态及极限承载能力。肖亚萌^[17]通过有限元模拟方法分析了基础环抗剪连接件构造优化处理措施的有效性,并采用参数分析的办法模拟不同焊钉布置方式下基础的受力性能,确定最优的焊钉布置形式。

综上所述,学者们对于风机基础优化的研究主要集中在数值模拟和理论分析方面,普遍缺少关于现场实测的评估手段;但现实中由于风机基础所受到上部荷载的复杂性与随机性^[18],数值模拟无法反映现场加固风机基础的荷载环境,也无法掌握现场加固基础各构件的实际受力状况以及加固效果。为了弥补风机加固基础现场监测方面的空缺,笔者以山东省威海市某风电场内的风机升级改造项目为例,介绍了一种关于岩石锚杆式基础的加固方法,并根据现场加固方案提出一种系统监测评估方法,采集了该型风力发电机组优化基础各位置的塔筒内壁应变、焊钉应变以及锚索轴力,分析其加固性能提升效果。

1 工程项目概况

威海某风电场 A1 风机基础改造施工项目位于山东省乳山市崖子镇西北部的大脚顶、南场禾顶、钟鼓山一带低山山脊上(如图 1 所示),地势北高南低,建设场区地面高程一般为 203~205 m。场区外

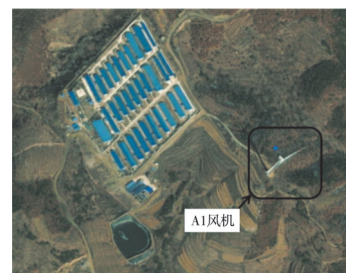


图 1 A1 风机场地位置

Fig. 1 Site location of A1 wind turbine

部山坡地形坡度一般为 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。建设场区外部多为低矮树木或杂草,山坡及沟谷多为林地或苹果地。有简易的道路与场址南部的省道S208相连,交通较为便利。

根据工程地质勘察报告可知,构成该建设场区的地质层主要为元古代昆崙山超单元瓦善亚超单元鹊山单元侵入体和第四系。场地自上而下划分为4层,土层力学参数见表1。场区内地下水贫乏,在勘探钻孔深度范围内未见地下水,因此忽略地下水对风机基础的影响。

表1 岩土体的物理力学性质指标

Table 1 Indicators of physical and mechanical properties of geotechnical bodies

土层名称	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$\varphi/(^{\circ})$	E_0/MPa
残坡积碎土	18	27	15
强风化花岗岩	22	40	3 500
中风化花岗岩	25	46	6 000

2 加固背景及方案

2.1 升级改造背景现状

乳山某风电场A1风机为TZ2000/93型风电机组,装机容量为2 MW,额定功率为2 000 kW,轮毂高度为80 m,扇叶直径为93 m,于2013年11月并网发电,主要结构技术参数见表2。

表2 风机主要结构技术参数

Table 2 Main structural technical parameters of wind turbine

额定功率/kW	叶轮半径/m	扫风面积/ m^2
2 000	93	6 793
轮毂中心高度/m	叶轮转速/(r/min)	总重量/t
80	8~17.3	293

由于前期施工中基础悬挑板环向配筋严重不足,整个径向断面环向抗弯承载力无法满足受力要求,上表面径向裂缝宽度严重超标;径向钢筋配置略有不足,径向抗弯承载力能满足受力要求,但迎风侧上表面根部环向裂缝宽度超标,导致在运行期间内风机基础表面出现深浅不一、宽度不同的径向和环向裂缝,如图2所示。

内锚栓与岩石锚杆材料缺失严重,且在施工前未进行疲劳试验,运行期间风机受交变荷载与扇叶转动的反复影响,在疲劳工况下,与基础相连的岩石锚杆和与法兰相连的内锚栓等效应力幅均呈增大趋势(内锚栓20.8 MPa,岩石锚杆18.5 MPa),导致内锚栓与岩石锚杆发生疲劳脆性断裂,如图3所示。

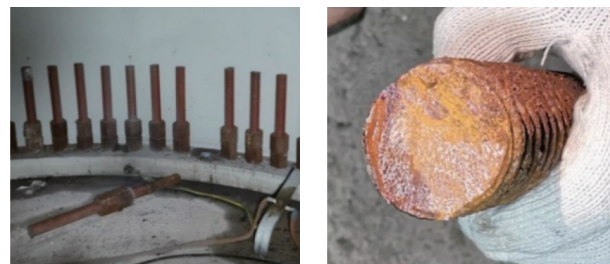


(a) 径向裂缝

(b) 环向裂缝

图2 基础表面裂缝

Fig. 2 Cracks on the surface of the foundation



(a) 内锚栓整体

(b) 内锚栓断口

图3 风机内锚栓断裂

Fig. 3 Broken internal anchor bolts for wind turbines

底部法兰与灌浆界面局部受压承载力、灌浆与混凝土界面局部受压承载力、下锚板与混凝土界面局部受压承载力均不满足受力要求,导致灌浆层及下方的混凝土、下锚板上方混凝土压溃。压溃从主风向开始发展,从而导致锚栓预应力损失,继而锚栓拉力向邻近锚栓转移,造成应力幅增加,最终导致疲劳断裂^[19-20]。

2.2 加固优化方案

由于基础悬挑板、岩石锚杆、法兰连接锚栓均出现不同程度损伤,为了改善塔筒底部基础受力情况,考虑场区工程地质及基础的自身条件,依据相关技术标准,采用包括焊钉焊接、外包混凝土以及锚索安装与张拉等措施改造该基础。

具体加固方法:在塔筒外壁底部3.4 m范围内焊接20排 25×200 的焊钉,焊钉避开塔筒焊缝且留出门洞范围,在门洞两侧进行加密布置。塔筒的外包混凝土厚1.2 m,留出门洞。基础加高1.3 m,总高2.8 m(到门洞下沿0.14 m),整个基础加宽到直径11 m。新旧基础之间通过植筋连接,水平结合面靠近塔筒位置布置2圈(各40根)植筋,侧面靠近底面位置布置1圈(60根)植筋。不考虑原内锚栓和外岩石锚杆的作用,仅作为安全储备继续保留,预拉力水平维持不变。基础通过2圈共24束压力分散型锚索和地基相连,每束锚索6根 $\Phi 15.2$ 的绞线。

风机加固前后示意图如图 4 所示,施工的具体工况如表 3 所示。

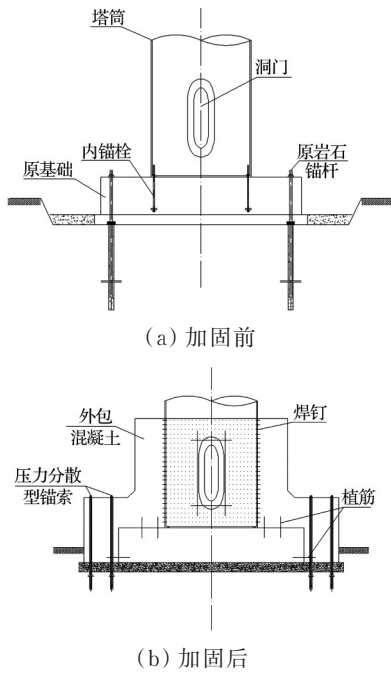


图 4 风机基础示意

Fig. 4 Wind turbine foundation

表 3 风机基础加固施工情况

Table 3 The construction of wind turbine foundation reinforcement

工况	日期	施工运行工况
工况 1	2021-05-27	焊钉施工完成
工况 2	2021-06-04	植筋施工完成
工况 3	2021-06-09	风机停载
工况 4	2021-06-11—2021-06-15	混凝土浇筑
工况 5	2021-06-23—2021-06-27	锚索张拉

3 加固系统监测评估试验

为了掌握加固升级后风机运行过程中结构所处的安全状态与性能提升效果,确定风机基础加固后的受力形式及荷载分配情况,根据风机基础优化可行性研究报告,结合现场实际情况,提出一种岩石锚杆式风机加固系统监测评估方法。具体结构监测内容包括:塔筒应变、新增焊钉受力以及锚索轴力监测。通过对比塔筒加固前后的受力响应,以及分析各结构构件的受力安全状态,实现对风机基础的加固效果评估,准确及时地记录和掌握风机基础的安全状况。

3.1 塔筒及焊钉应变测点布置

通过塔筒以及外侧焊钉的荷载监测可以确定

加固区中风机基础加固后的受力形式及荷载分配情况,塔筒应变监测点位如图 5 所示。

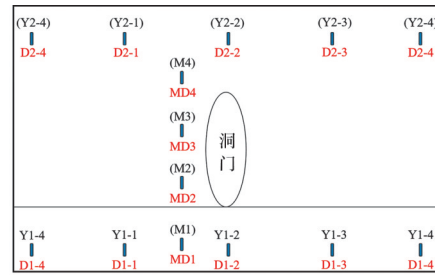


图 5 塔筒内壁应变和焊钉应变布置图

Fig. 5 Layout of strain on inner wall of tower drum and strain on welding nail

在焊钉未加密区域对应的塔筒内壁布置 2 层应变片(Y1 与 Y2),监测塔筒竖向应变。Y1 层应变片布置在高于塔筒底部 0.2 m 的位置,以监测塔筒底部受力变化情况;Y2 层应变片布置在加固基础顶部,监测上部抗剪连接件的响应变化。在洞门一侧焊钉加密区内侧塔筒上增加一列应变片(编号 M1~M4),现场监测传感器布置方式如图 6 所示。



(a) 塔筒内壁应变片 (b) 焊钉应变传感器

图 6 传感器现场布置

Fig. 6 Field arrangement of sensor

在正对塔筒内壁应变监测点外侧的焊钉下表面焊接振弦式应变计,监测焊钉的应变响应;在塔筒环向位置布置应变计,监测平面 D1 与 D2 层,共计 8 个监测点位;同样,在加密区布置一列焊钉应变计,共计 4 个监测点位。

其中,因受外部诸多因素影响,振弦式传感器在监测过程中某些时间段内监测数据严重偏离实际情况。对存在较大误差的测值进行预处理,后续锚索轴力的监测数据同样进行预处理。

3.2 锚索轴力监测点布置

通过锚索轴力监测可有效掌握风机补强后基础结构的动态变化。锚索的轴力变化监测采用振弦式锚索计进行不间断监测,共布置 4 个监测点,分别位于 4 个方位,随锚索张拉施工进行安装。风机锚索监测点位布设如图 7 所示。

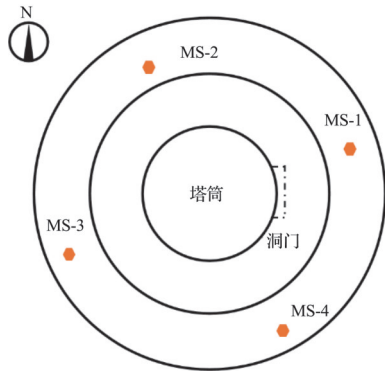


图 7 锚索轴力计布置示意

Fig.7 Arrangement of anchor cable axial force meter

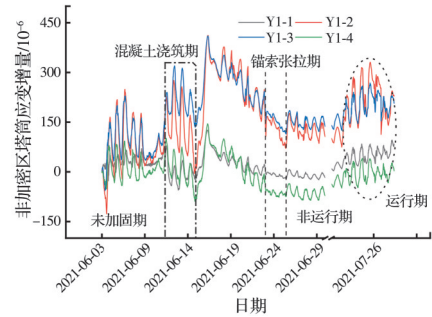
4 监测结果分析

监测施工期间,无法保证停止运行的风机绝对不受外荷载影响,且部分焊钉应变计在施工期间会因焊接工艺的不同而产生预应力。为减小误差,将监测数据统一减去初始值,然后分析其受力响应变化量。

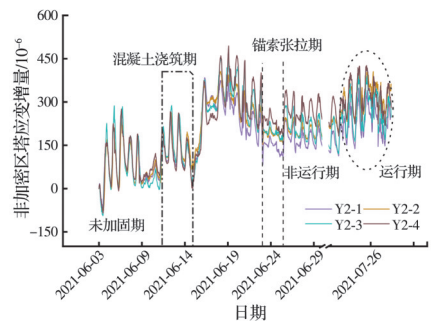
4.1 塔筒受力特性分析

从图 8 的塔筒内壁应变变化曲线可以看出,风机塔筒的受力表现出一系列振幅随机的循环,底部塔身整体刚度较均匀,应变时程具有相似波形变化特征而幅值有差异。应变波形变化趋势的相似性说明下部塔筒内壁受力特征相同,风机基础整体表现为受抬升或挤压;幅值的差异性表明,受风机自振振型与外部横向激励的影响,上部荷载传递至下部基础各构件时呈非均匀传递。

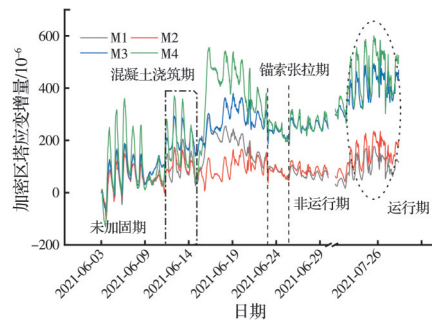
各工况下风机塔筒受力差异性显著。在未运行阶段,加固前应变波幅明显;施工后,加固区对下部塔筒形成环向约束,上层荷载通过加固区时,焊钉以及外包基础的约束分担传递了部分荷载,同时锚索的约束减弱了下部塔筒的振动,使加固区塔筒应变得到明显改善。加固前 Y1、Y2 层塔筒平均应变波幅约为 123×10^{-6} 、 199×10^{-6} ,而加固后约为 33×10^{-6} 、 63×10^{-6} ,循环应变波幅显著降低,每个监测点位波幅较加固前降低了 60%~80%。施工完成后,随着混凝土的凝结硬化,其会产生胀缩,作用于塔筒,使其应变短时间内大幅增长;凝结后,随着塔筒的摆动,加固构件应力逐步释放,产生不同程度回落;锚索的张拉使应变在波动中下降,基础与上部结构得到约束。运行期间叶轮旋转,开始并网发电,应变波动量增大并维持在 230×10^{-6} 以内的相对稳定的动态变化范围,累计变化量最大保持在 600×10^{-6} 以内,小于弹性容许应变量的 40%,具有较大安全余量^[21]。



(a) 非加密区 Y1 层



(b) 非加密区 Y2 层



(c) 加密区

图 8 塔筒内壁应变增量

Fig. 8 Strain increment of tower inner wall

塔筒加固后波幅与监测高度整体呈正相关趋势。对比分析加密区及非加密区应变变化曲线可知,加固完成后,加密区 M1~M4 层应变变化量随着高度的增加逐步增大,非加密区上部 Y2 层波幅同样大于 Y1 层;风机运行期间, M1 层:M2 层:M3 层:M4 层的应变波幅为 1:1.16:1.53:2.47,可见,加固范围内,高度越高,筒身受力越明显,焊钉连接件的侧向约束使得上部荷载传递至加固基础过程中得到分担^[22],且由于焊钉根部设置了自上而下逐层减小的套管来延长焊钉剪切长度,减小了剪切刚度,自上而下多排焊钉共同分担了上部荷载。

外界荷载从上部塔筒向下传递,至加固区时,加固构件的环向约束使传递荷载逐步被分担。为了量化加固区对下部锚栓受力的改善情况,将加固区分担的荷载视为下部锚栓改善的力,因此,下部锚栓受力改善近似为荷载传递至最顶层与最底层

焊钉位置处时塔筒的竖向受力差。加固后下部锚栓的受力改善情况如式(1)所示。

$$\Delta N = \sum_{i=1}^n (N_i^V + Q_{ski}) = E \Delta \epsilon b_i d_i \quad (1)$$

式中: ΔN 为底部锚栓竖向改善力; N_i^V 为第*i*层焊钉根部产生的竖向剪力; Q_{ski} 为第*i*层外包混凝土与塔筒的侧阻力; E 为塔筒弹性模量; $\Delta \epsilon$ 为加固区域顶部与底部焊钉对应位置的塔筒应变差; b_i 为第*i*层焊钉的塔筒影响范围,取为水平相邻两焊钉的距离; d_i 为第*i*层焊钉位置塔筒体的厚度。

分别取风机运行期与非运行期塔筒应变一个循环段进行计算分析,下部锚栓受力改善情况如图9所示。

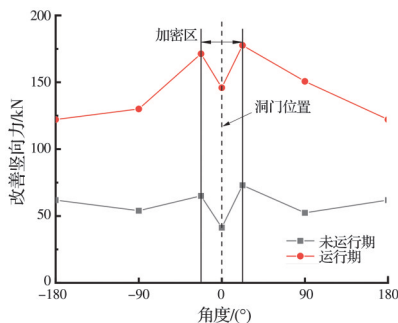


图9 下部锚栓改善

Fig. 9 Improvement of lower anchor bolt

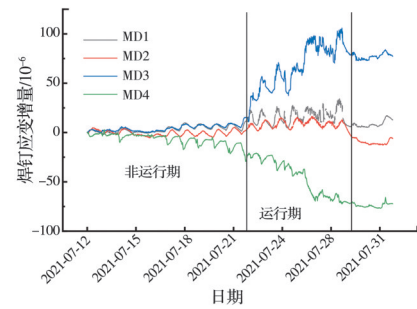
分析图9可知,加固区可明显缓解底部锚栓的竖向力:非运行状态下,加固区平均分担了58.5 kN的竖向力;运行状态下,平均分担了145.7 kN的竖向力。其中加密区焊钉分担传递作用更明显;由于材料缺失,洞门位置分担荷载偏低,加固区刚度均匀。

4.2 焊钉的受力特性分析

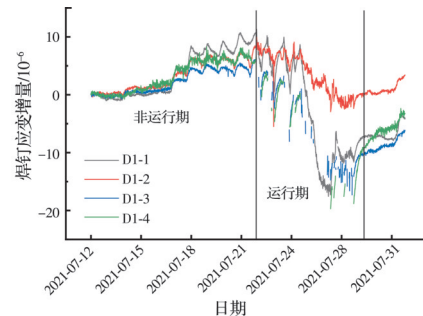
焊钉应变量监测数据如图10所示,对照风机运行情况,塔筒焊钉的受力存在以下特点:

1)每层监测平面内焊钉应变波形特征基本类似,但幅值差异明显。对比塔筒相同位置内、外侧应变可知,D1与D2监测平面内焊钉应变增量曲线的响应趋势相似,在未运行期间离散程度均较低,应变最大波幅小于 25×10^{-6} 。当风机开始运行时,随着塔筒振动幅度的增加,受塔筒扩张趋势影响,D1与D2监测平面内焊钉压缩约束作用增强,应变增量曲线产生显著下降趋势。加固区与塔筒得到有效连接,荷载开始重分布传递,上层焊钉最大应变动态变化量为 114×10^{-6} ,远小于焊钉弹性容许应变 1553×10^{-6} 。

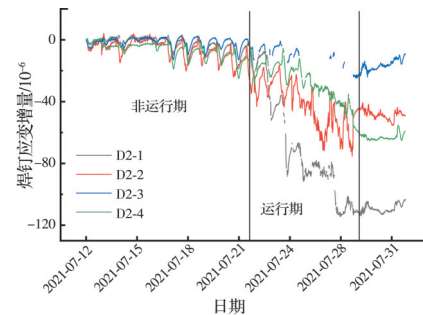
2)不同高度位置焊钉持力状态存在显著差异性。观察加密区焊钉应变曲线可知,上部焊钉率先分担上层荷载,且逐层递减;曲线MD1与MD2整体



(a) 加密区



(b) 非加密区 D1 层



(c) 非加密区 D2 层

图10 焊钉应变增量

Fig. 10 Strain increment of welding nail

波幅较小,变化平稳,相较初始状态,表现为轻微受拉状态;MD3与MD4所处的外包基础位置较上侧,风机运行时波动更为显著,说明上侧焊钉较下侧焊钉受力更加直接明显^[23]。塔筒上下振动过程中,由于各高度位置的焊钉提供拉伸或压缩约束,使得塔筒在不同高度处环向受力状态存在差异性,如MD4焊钉出现收缩应力约束塔筒的扩张趋势,并通过焊钉分担上层荷载,而MD3焊钉则产生拉伸应力约束塔筒的收缩。风机的运行使每层焊钉所受荷载不断传递、分配,应力状态重分布,且全部处于安全的持力状态。在后续类似施工中应重点加密顶部焊钉,防止运行导致抗剪应力疲劳幅超过安全限值。

塔筒底部焊接焊钉加强了与外包混凝土的连接、传递荷载并保证二者协同变形。结构在受力后,充分利用焊钉的抗拉、抗压能力^[24],增大抗弯刚度,改变受力边界和上部荷载传递方式,承受并传递塔筒与混凝土交界面的纵向剪力,并通过外包混

凝土分担塔筒荷载,进而改善底部锚栓受拉断裂的情况。

4.3 锚索受力特性分析

施工期间锚索预张力为 900 kN,为突出显示锚索轴力的波动情况,所有数据减去锚索拉力初值后进行数据处理,锚索轴力监测数据变化如图 11 所示。从锚索轴力数据变化中可以看出,锚索轴力波动受上部荷载的影响较大,但整体趋于稳定,最大波幅约为 10 kN,远小于极限拉力 2 775 kN,具有较大安全余量。监测的 4 根锚索轴力增量离散化程度较低,无明显相位差,表明锚索张拉力在基础周边分布较均匀^[25]。锚索增量随上部荷载的波动而产生循环往复的数据变化,且曲线趋于平稳,并无明显锚索拉力损失现象发生,持力性较好。

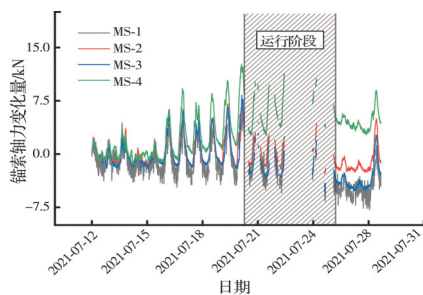


图 11 锚索轴力变化示意

Fig. 11 Axial force variation of anchor cable

4.4 加固区关联分析

选取上部塔筒 Y2 层、焊钉 D2 层以及锚索位置处的监测数据,根据 Spearman 相关系数^[26]绘制加固区构件热力图,如图 12 所示。

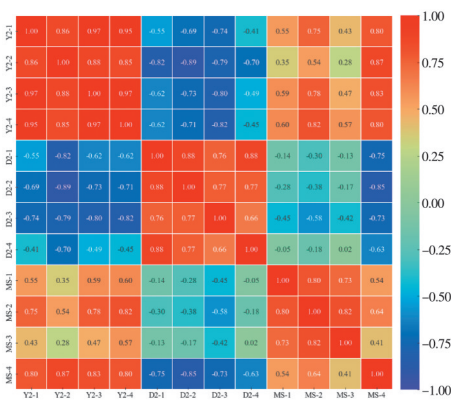


图 12 特征相关性分析

Fig. 12 Correlation analysis of characteristics

从加固区的特征相关性分析结果可知,加固区中相同构件之间具有较强的相关性。上层荷载从塔筒开始传递,加固区中塔筒首先接触荷载,因此,塔筒内壁应变变化数据相关性最强,相关系数在 0.85~0.97 范围内。其次,荷载通过加固区开始逐步向下部塔筒、外包基础以及焊钉传递;相较于塔

筒,D2 层焊钉荷载传递路径较长,因此,构件间荷载传递差异性增大,焊钉间相关性较塔筒内壁普遍降低,相关系数在 0.66~0.88 范围内。最后,荷载通过外层岩石锚杆、新旧基础以及锚索传递至岩石地基,加固区构件各方位荷载传递的差异性逐步增大,因此,作为荷载传递后段的表现形式,锚索轴力相关系数平均约 0.66,相关性低于其他监测构件。

加固区中不同构件之间的相关性存在显著差异。由于 D2 层焊钉受力状态不同,该层焊钉应变与塔筒内壁应变以及锚索轴力呈负相关性;其中塔筒应变与焊钉应变相关性普遍较高,在 D2-2 与 Y2-2 位置,相关性最高,相关系数达到 -0.89,说明此位置塔筒与焊钉受力传递性较好。锚索轴力与焊钉应变之间相关系数离散性较高,焊钉 D2-4 与相近位置锚索 MS-3 之间相关系数仅为 0.02,说明 D2-4 所分担的荷载对锚索轴力影响较小。观察塔筒内壁与锚索轴力相关系数可知,塔筒内壁应变与锚索轴力的相关系数普遍高于焊钉应变与锚索轴力的相关系数,说明在由塔筒传递至锚索的荷载中,D2 层焊钉仅分担了小部分荷载,主要荷载由下层焊钉、塔筒以及外包混凝土分担并传递。

综上,上层荷载在加固区各构件中得到有效传递与分担,改善了原构件的受力状态,且加固区构件具有较大安全性,保证了下部基础的稳定性,使加固基础在后续运行中能保持良好状态。

5 结论

介绍了某风电场的基础优化工程实例,采用焊钉焊接、外包混凝土以及锚索安装与张拉等基础优化方案,并基于该加固方案提出系统监测评估方法,对不同位置的塔筒内壁应变、焊钉应变以及基础的锚索轴力进行监测与关联分析,得出以下结论:

1) 基于加固方案提出的系统监测评估方法可以有效且及时了解加固区各构件的受力状态,保障后续风机运行的安全。

2) 加固区中各构件受力响应具有趋势相似性与幅值差异性,且均有较大安全裕量,加固后塔筒内壁应变波幅明显小于加固前;预应力锚索对底部塔筒振动具有很好的约束效果。

3) 塔筒底部外包混凝土和焊接焊钉改变了结构受力边界,增加了对塔筒的约束刚度,分担了上部荷载传递的剪力,保证了塔筒与外包混凝土的协同变形。

4) 在不损伤原基础结构的前提下,该基础优化方案使塔筒和外包混凝土变形协调,改善了基础

板、岩石锚杆和L法兰的受力状态,对抵抗循环荷载作用下的变形具有良好效果,基础整体受力性能得到保障。

参考文献

- [1] PIOTROWSKA K, PIASECKA I, KLOS Z, et al. Assessment of the life cycle of a wind and photovoltaic power plant in the context of sustainable development of energy systems [J]. *Materials*, 2022, 15(21): 7778.
- [2] 白久林, 王瑞毅, 王宇航, 等. 陆上风电装配式基础结构研究综述[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(3): 80-93.
BAI J L, WANG R Y, WANG Y H, et al. A review of onshore wind turbine prefabricated foundation structures [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(3): 80-93. (in Chinese)
- [3] DING H Y, PENG Y J, ZHANG P Y, et al. Numerical simulation of vacuum preloading for reinforcing soil inside composite bucket foundation for offshore wind turbines [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(8): 273.
- [4] 范庆来, 郑静. 复合加载模式下海上风机圆形浅基础亚塑性宏单元模型[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(3): 59-63.
FAN Q L, ZHENG J. A hypoplastic macro-element model for circular shallow foundations of offshore wind turbines under combined loading [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014, 36(3): 59-63. (in Chinese)
- [5] ZHAO Y, PAN J N, HUANG Z Y, et al. Analysis of vibration monitoring data of an onshore wind turbine under different operational conditions [J]. *Engineering Structures*, 2020, 205: 110071.
- [6] 邓宗伟, 邓沛宇, 高乾丰, 等. 大型风力机圆形扩展基础倾覆破坏机理分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(3): 15-20.
DENG Z W, DENG P Y, GAO Q F, et al. Mechanism analysis of overturning failure of circular expansion foundation of large wind turbine [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(3): 15-20. (in Chinese)
- [7] HE M J, BAI X E, MA R L, et al. Field experimental study on the retrofit of cracked onshore wind turbine foundations using externally prestressed anchor bolts [J]. *Structural Concrete*, 2018, 19(3): 864-875.
- [8] GUNER S. Analysis methodology and design verification for strengthening moment-resisting caisson foundations [J]. *Engineering Structures*, 2023, 279: 115582.
- [9] 陈俊岭, 段建平, 冯又全, 等. 环氧树脂灌浆料在风电机组基础环式基础加固中的应用研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 259-265.
CHEN J L, DUAN J P, FENG Y Q, et al. Study on application of epoxy resin grouting material in ring foundation reinforcement of wind turbine foundation [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(10): 259-265. (in Chinese)
- [10] 李进平, 王振扬, 陈加兴, 等. 陆上风机基础缺陷分析与灌浆加固研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(11): 107-112.
LI J P, WANG Z Y, CHEN J X, et al. Study on defect analysis and grouting reinforcement of onshore wind turbine foundation [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(11): 107-112. (in Chinese)
- [11] DAI G L, OUYANG H R, GAO L C, et al. Experimental study on monotonic and cyclic lateral behavior enhancing mechanism of semi-rigid pile under different foundation reinforced methods in clay [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 273: 113955.
- [12] ZHOU L Q, SUN W Y, CAO Y, et al. Optimization of shear bonds of the grouted joints of offshore wind turbine tower based on plastic damage model [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(12): 1853.
- [13] 陈俊岭, 张佑臣, 冯又全. 风电机组基础环基础低强问题的加固措施研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(10): 119-124.
CHEN J L, ZHANG Y C, FENG Y Q. Research on strengthening measure of low-strength concrete for embedded-ring foundation of wind turbine tower [J]. *Building Structure*, 2019, 49(10): 119-124. (in Chinese)
- [14] CHEN J L, XU Y Q, LI J W. Numerical investigation of the strengthening method by circumferential prestressing to improve the fatigue life of embedded-ring concrete foundation for onshore wind turbine tower [J]. *Energies*, 2020, 13(3): 533.
- [15] CHEN J L, LI J W, LI Q Z, et al. Strengthening mechanism of studs for embedded-ring foundation of wind turbine tower [J]. *Energies*, 2021, 14(3): 710.
- [16] 吕伟荣, 马慧心, 卢倍嵘, 等. 含UHPC薄层的新型栓钉组合剪力键抗拔性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2023, 53(5): 141-147.
LV W R, MA H X, LU B R, et al. Experimental study on the pull-out performance of a new stud combined shear connector with UHPC thin layer [J]. *Building Structure*, 2023, 53(5): 141-147. (in Chinese)
- [17] 肖亚萌. 陆上风力发电机组基础受力性能分析及构造优化处理[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
XIAO Y M. Mechanical performance analysis and structural optimization treatment of wind turbine foundation on land [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [18] 彭文春, 邓宗伟, 高乾丰, 等. 风机塔筒流固耦合分析

- 与受力监测研究[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 136-142.
PENG W C, DENG Z W, GAO Q F, et al. Fluid-solid interaction analysis and stress monitoring research of wind turbine tower [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 136-142. (in Chinese)
- [19] 申海洋, 宁小美, 冯若强. 预应力锚栓对风机混凝土基础抗裂和耐久性影响[J]. 混凝土, 2021(11): 155-160.
SHEN H Y, NING X M, FENG R Q. Effect of prestressed anchor bolted on crack and durability of concert foundation of wind turbine [J]. Concrete, 2021 (11): 155-160. (in Chinese)
- [20] 樊轲, 戴靠山, 衡俊霖, 等. 风电塔筒环法兰连接结构型高强铆钉的疲劳特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(2): 151-161.
FAN K, DAI K S, HENG J L, et al. Fatigue feature of structural high-strength rivets in ring flange connections of wind turbine towers [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(2): 151-161. (in Chinese)
- [21] 吕伟荣, 钟传旗, 彭柱, 等. 风力机塔筒顶升纠偏机理研究与应用[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 272-279.
LV W R, ZHONG C Q, PENG Z, et al. Research and application of rectification mechanism of wind turbine tower [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(6): 272-279. (in Chinese)
- [22] 马天宇, 刘永健, 孙泽坤, 等. 集簇式栓钉抗剪承载力折减系数计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(5): 160-171.
MA T Y, LIU Y J, SUN Z K, et al. Calculation method of shear bearing capacity reduction coefficient of clustered studs [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 160-171. (in Chinese)
- [23] 徐伟, 吕伟荣, 龙万里, 等. 抗拔栓钉剪力连接件上覆混凝土厚度研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊 2): 981-986.
XU W, LV W R, LONG W L, et al. Study on the thickness of concrete covering shear connectors with uplift studs [J]. Building Structure, 2022, 52(Sup 2): 981-986. (in Chinese)
- [24] 薛东焱, 宛青云, 潘志宏, 等. 剪力与拉拔力共同作用下焊钉受力性能分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2020, 34(2): 97-102.
XUE D Y, WAN Q Y, PAN Z H, et al. Mechanical behavior analysis of headed studs under shear and tension loads [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 34(2): 97-102. (in Chinese)
- [25] HU J J, LI M, LIAO J H, et al. Research on Application of Self-locking Anchor Rods in the Improvement of wind turbine generator tower foundation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 634(1): 012050.
- [26] 高明裕, 蔡林辉, 孙长城, 等. 一种基于斯皮尔曼秩相关结合神经网络的电池组内部短路故障检测算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(11): 3734-3747.
GAO M Y, CAI L H, SUN C C, et al. An algorithm for detecting internal short circuit fault of battery pack based on Spearman rank correlation combined with neural network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(11): 3734-3747. (in Chinese)

(编辑 朱备)