

文章编号: 1002-6673 (2023) 05-079-04

## 螺栓在线监测在风电领域的应用及前景

冯 标<sup>1</sup>, 高 跃<sup>1</sup>, 曹云栋<sup>1</sup>, 石海瑞<sup>1</sup>, 张文康<sup>1</sup>, 席传让<sup>2</sup>

(1. 华能大理风力发电有限公司, 云南 大理 671000; 2. 长沙飚能信息科技有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘 要:** 螺栓是连接风机各部件重要的元件, 其连接的稳定性将直接影响风机的正常运行, 目前对螺栓的运维以人工检查为主, 智能化监测还处于行业空白状态。本文针对螺栓的安全监测, 介绍了最具有发展潜力的超声监测技术, 该技术可以无损、快速测量螺栓的受力, 并能通过网络实现在线监测。通过案例阐述了螺栓在线监测在风机上的初步运用情况, 由监测结果可知, 螺栓在线监测对分析风机螺栓受力、预防螺栓松断具有良好的应用前景。

**关键词:** 风机; 螺栓; 监测; 超声波; 预紧力

**中图分类号:** TP39 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1002-6673.2023.05.021

### Application and Prospect of Bolt On-line Monitoring in Wind Power Field

FENG Biao<sup>1</sup>, GAO Yue<sup>1</sup>, CAO Yun-Dong<sup>1</sup>, SHI Hai-Rui<sup>1</sup>, ZHANG Wen-Kang<sup>1</sup>, XI Chuan-Rang<sup>2</sup>

(1. Huaneng Dali Wind Power Co., Ltd., Dali Yunnan 671000, China;

2. Changsha Buiand Information Technology Co., Ltd., Changsha Hubei 410000, China)

**Abstract:** Bolt is an important component for connecting various parts of wind turbine, and the stability of its connection will directly affect the normal operation of wind turbine. At present, the operation and maintenance of bolt is mainly manual inspection, and the intelligent monitoring is still in a blank state in the industry. Aiming at the safety monitoring of bolts, this paper introduces the most promising ultrasonic monitoring technology, which can measure the stress of bolts nondestructive and quickly, and realize online monitoring through the network. Through some cases, the preliminary application of on-line monitoring of bolts in wind turbines is expounded. From the monitoring results, it can be seen that on-line monitoring of bolts has a good application prospect for analyzing the stress of bolts in wind turbines and preventing bolts from loosening.

**Keywords:** Wind turbine; Bolt; Monitoring; Ultrasonic wave; Bolt preload

## 0 引言

近年来,随着国家新能源战略的实施,风力发电机装机容量快速增加,潜在的施工、安装及设计制造问题比较突出,导致了叶片脱落、倒塌等事故频发。同时,在风电建设降本驱动下,风机向着更高、单机容量更大的方向发展,也加大了事故发生的风险。2022年4月12日,河南安阳某30MW分散式风电项目发生一起风机倒塌事故,塔筒折断。2022年6月10日,河南省新乡市某型4MW风力发电机倒塌,150余米直径叶片掉落,主体结构一分为二,海上风机也出现多起类似事故。

究其原因,在于风机常年工作在恶劣的气候条件下,除地基沉降、结构缺陷等因素外,高强度螺栓连接失效也极容易导致最后事故的发生。风电机组主要零部件包括

叶片、机架、塔筒、主轴、轮毂等,其中高强度螺栓是连接这些关键零部件的主要元件之一<sup>[1]</sup>,承担着传递载荷、保持结构稳定的重要作用。这些螺栓长期工作在振动、交变载荷的工况中,极易发生松动、疲劳损伤、断裂等失效问题,如果不能及时发现和解决,整个法兰面连接状况将急剧恶化,进而导致接触面分离、异常振动、叶片掉落等现象。断裂的螺栓部件也容易损坏风机设备,导致风机停机、甚至损毁,产生较大的发电量及财产损失。

目前对螺栓的失效检查主要以人工为主,陆地风机一般半年巡检一次,海上风机间隔时间更长。人工检查的手段单一,主要靠划线、敲击等方式,缺乏可靠的数据支撑,很大程度上要凭经验分析,判断结果准确率较低。例如,在螺母没有明显松动的情况下,仍会出现预紧力下降或断裂,这时人工难以判别,导致漏检。此外,在某些特殊部位,运维人员平时很难到达,也不能及时发现和处理潜在的螺栓问题。

综上所述,风电机组中高强度螺栓连接的可靠性将直接影响整机的运行安全和稳定性,但目前尚无有效手

修稿日期:2023-07-20

作者简介:冯标(1992-),男,云南大理人,本科,工程师。研究方向:无损检测。

段即时发现螺栓的失效问题,也缺乏对螺栓连接状况进行健康监测与安全预警的相关技术。因此,对螺栓进行在线监测,有着实际的需求,对保证机组安全运行意义重大。

## 1 技术路线

螺栓连接有多种失效形式,例如螺栓在承受过大拉力之后引起的螺杆伸长失效;螺纹副承受过大压力引起的压溃失效;铰制孔用螺栓因剪切力引起的挤压失效;循环荷载作用下,交变应力引起的螺栓疲劳断裂失效<sup>[2]</sup>。市场上针对螺栓失效监测的技术主要有反旋法、位移法、应力法等。

**反旋法:**通过测量螺母与螺杆的相对转动角度来判断螺母是否松动,技术成熟,但监测效果有限,识别不了螺母未转动条件下的预紧力衰减,判断不了螺栓是否断裂。

**位移法:**通过监测法兰面之间的间隙大小来判断螺栓是否松动,属于间接测量,只能识别接触面已经开口等极端情况,不能起到事先预防作用。

**应力法:**主要有预埋法和超声法;预埋法通过在螺栓中心打一小孔,将光纤或应变材料预埋进去,通过预埋材料的应变来计算螺栓受力大小,测量螺栓预紧力精度高,技术成熟,缺点是需要对螺栓进行金加工,操作复杂;超声法应用最新的超声检测技术,在螺栓端面安装超声探头,利用超声波轴向传播速度与应力大小呈线性变化的关系来测量螺栓预紧力的大小,结构小巧,抗干扰强,适合大批量螺栓的监测。

风机上铰制孔螺栓应用较少,主要失效形式为松动和断裂,不恰当的轴力会导致螺母松脱或者螺栓断裂,而使得螺栓连接提前失效。因此准确测量螺栓轴力,能够有效提高螺栓连接可靠性和结构安全性<sup>[3]</sup>。超声应力法通过实时测量螺栓预紧力(轴力),用以判断螺栓是否失效,应用于风机高强螺栓监测,具有如下优点:不会对螺栓产生任何损伤;不影响螺栓连接结构;也无需对螺栓上的字样进行打磨,操作方便;精度较高,监测精度较高,误差能控制在 $\pm 3\%$ 以内。应用超声应力法监测螺栓的预紧力,结合后台大数据分析,能有效对螺栓的松动和断裂提供预警,降低风机运行损失,提高风机运行的效率和安全,是比较理想的螺栓在线监测技术,近几年发展迅速,已有众多的风场投入使用。

## 2 螺栓在线监测系统介绍

螺栓在线监测系统一般由传感器和采集计算系统构成,以长沙飏能信息科技有限公司生产的产品为例,该系统由超声探头、通道采集器、通讯控制器、传输线路、服务器和终端控制软件构成,通道采集器与通讯控制器构成数据采集单元,一般采用分布式设计(见图1),监测通道

可根据实际监测点数量进行灵活配置,系统结构如图2所示。

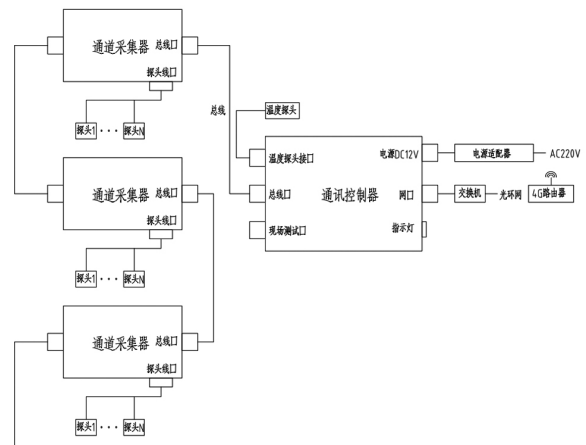


图1 螺栓在线监测系统原理图

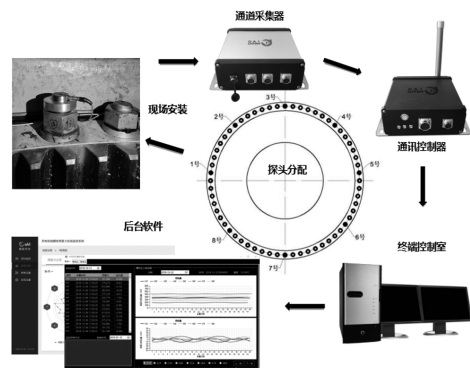


图2 螺栓在线监测系统

超声波探头是螺栓预紧力监测的重要传感器,使用的是脉冲反射法。该法是将超声波探头用耦合剂放在螺栓的一端,探头首先产生一个声脉冲穿过螺栓的整个长度,在另一侧被反射回超声波探头,测量声脉冲信号的传播时间。将螺栓规格参数事先输入仪器,便可得出声脉冲传播时间、螺栓伸长量、载荷和轴向应力<sup>[4]</sup>。超声波探头安装于螺栓露头端部,一般采用磁吸和耦合胶安装,具有防水防尘、抗干扰能力。

通道采集器采用继电器进行通道切换,根据命令轮番开启测量通道,同时还具有前置放大和滤波功能,超声波探头信号通过通道采集器转发到通讯控制器,一套系统可根据监测点的个数由多个通道采集器串联或并联而成。通讯控制器为整个系统的电源和通讯控制中心,负责整个系统的指令上传下达以及数据报文的上传,具有高滤波、高精度采样、实时计算、实时通讯等功能,每台风机根据需要可配有一台或多台通讯控制器。通讯控制器具有有线、4G、WIFI等多种通讯方式,方便接入风场内网或独立传输数据。通道采集器与通讯控制器一般采用压铸铝一体成型外壳,具有较好的密封性和防护等级,能满足高温、高湿、盐雾、振动等特殊环境要求。

后台监测软件(图3)一般采用B/S或C/S架构,方便以风场为单位进行部署。能实时显示所有监测点的螺栓预紧力和预警信息(图4),及时提醒运维人员处理异常情形。螺栓预紧力以曲线或图表方式直观地呈现,方便查看历史数据和变动趋势,为了解螺栓在各种工况下的受力情况提供详细的数据支持。为了与运维工作相结合,后台软件还具备自动报表生成、自主分析数据等功能,能有效配合业主、主机厂和运维人员分析故障类型、制定运维方案、改进设计、优化施工等。



图3 螺栓在线监测后台软件



图4 预警信息显示

### 3 案例分析

案例一:湖南省永州市某风场运营超过40台2.5MW风机,由于风机型号较早,技术不完善,叶根及塔筒螺栓经常发生断裂。特别是叶根螺栓断裂后难以及时发现,严重影响风机安全,同时断裂的埋入端需要人工取出,操作非常困难,需要长时间停机,影响高峰期的发电量。鉴于此,主机厂遂决定对叶根及塔基螺栓进行在线监测(图5)。该项目于2019年底启动,项目主要监测三个叶根及塔基连接螺栓,共计32个监测点,数据实时上传至物联网平台,后台软件可随时查看预紧力值及报警信息。单台



图5 永州市某风场螺栓监测系统通讯控制器现场安装图

风机每年总预紧力数据可达10万条,很好地监控到不同工况下叶根及塔筒螺栓预紧力变化的数值。2021年底,成功监测到叶根螺栓断裂,及时给予报警信息,避免了风机安全事故的发生。

案例二:内蒙古风资源丰富,风机林立,通辽某风场新装机组叶根螺栓松动和断裂频繁,超出正常频率,业主

与主机厂协商对两台风机叶根螺栓进行在线监测研究(图6)。每个叶根监测8颗螺栓,两台机组共监测48颗,监测点重点选取受力较大的合模缝部位,采用非均布方式。整个项目于2021年底实施完,已不间断获取螺栓预紧力数据达50万条,成功监测到了停机、变桨、大风等工况条件下预紧力的变动情况,为业主调整螺栓运维方式和时间提供了宝贵的数据,增加了风机叶片连接安全性,到目前为止,尚未有叶片因螺栓问题发生断裂或脱落。

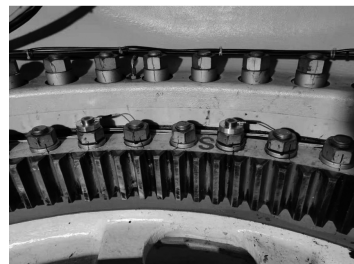


图6 通辽某风场螺栓监测系统探头现场安装图

案例三:位于云南省某风场共装机50余台2.2MW双馈型风机,2018年投入运行以来,故障率偏高,除电气、传动等常规故障外,高强螺栓问题比较突出,螺栓断裂达到每月10次以上。其中叶根连接部位为主要螺栓断裂点,2022年上半年有4台风机出现叶根螺栓断裂,每台断裂2-3根。螺栓断裂后,需停机检修,造成了较大的发电损失。而且由于只能人工排查,运维人员不能实时上机,往往事后才能发现,有时甚至找不到断裂的螺栓残留部件,给风机电气设备及附近环境和人员造成极大的安全隐患。

根据现场需求,项目对风机三个叶根及四级塔筒螺栓进行在线监测(图7,图8),每个法兰面选取四个关键点,为方便运维人员随时查看,采用4G方式通讯。项目于2022年10月份实施完,经过两个月的监测,成功采集到螺栓预紧力长期变动情况。根据监测得到的数据,按风场的经验标准(偏差10%以内正常,10-30%偏小,30%以上为松动)判断,预紧力合格率为58.3%(表1),不到六成,其余都存在预紧力偏小情况,有少量已经出现松动。预紧力偏小则会导致叶片连接松弛,叶片振动幅度增大,反映

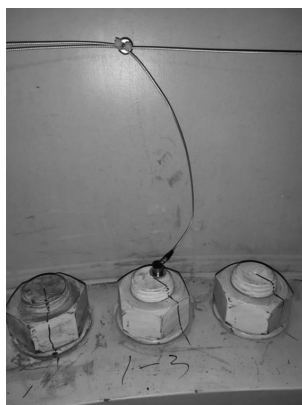


图7 云南省某风场塔筒螺栓监测



图8 云南省某风场叶根螺栓监测

在连接螺栓上就是瞬间冲击增大,容易导致螺栓疲劳断裂或者过载断裂。从监测结果可知,预紧力偏小是导致叶根螺栓频繁断裂的原因之一,风场可根据长期监测结果,对运维时间及参数进行调整,以减少螺栓断裂风险。

表 1 云南省某风场叶根螺栓监测数据统计表

产品名称	风力发电机	监测部位	叶根螺栓	统计开始时间	2022-10-25	
预紧力监测结果					统计结束时间	2022-12-25
监测点序号	平均预紧力 kN	设计预紧力 kN	预紧力偏差	是否断裂	是否有裂纹	预紧力评价结果
1	248.97	300	-17%	否	否	偏小
2	271.38	300	-10%	否	否	合格
3	202.92	300	-32%	否	否	松动
4	286.07	300	-5%	否	否	合格
5	296.44	300	-1%	否	否	合格
6	305.98	300	2%	否	否	合格
7	337.93	300	13%	否	否	合格
8	338.30	300	13%	否	否	合格
9	274.43	300	-9%	否	否	偏小
10	242.67	300	-19%	否	否	偏小
11	222.17	300	-26%	否	否	偏小
12	291.00	300	-3%	否	否	合格
平均值	276.52		-8%			合格率: 58.3%; 偏小: 33.3%; 松动: 8.4%

#### 4 应用前景展望

风电行业随着补贴的取消,人力成本和安全性已成

为制约风电企业盈利的关键因素之一,提高风机安全、技术替代人工已成为行业共识。作为辅助监控系统新兴的技术之一,螺栓在线监测已过了初步市场培育阶段,其作用和意义已被行业所认可。特别是海上风机,单台造价高,体积大,螺栓数量庞大,运维人员登塔作业时间非常有限,对智能化运维需求更加迫切。而螺栓在线监测系统采用先进的超声技术,能无损、快速、准确地监测螺栓的实时预紧力,对风机螺栓的连接情况、健康状况作出分析判断,及时发现、处理螺栓的异常状况,可为业主及运维方提供有效的运维保养判断与建议,避免风机因螺栓问题引发安全事故的发生。通过监测螺栓的受力情况,还可以预估螺栓的松断变化过程和疲劳寿命,有效制定运维的时间,减少不必要的浪费,避免少打、多打、盲打力矩,降低误打力矩或拉拔对螺栓的损坏,起到降本增效的目的。因此螺栓在线监测近年发展速度明显加快,2022年已有少量陆地和海上风场进行批量化尝试,未来前景光明。

#### 参考文献:

- [1] 李森,杨轶,李路兵.风电机组螺栓状态监测系统研究[J].科学技术创新,2021(2):26-28.
- [2] 王洪博.复合材料构件的超声无损检测关键技术研究[D].北京:北京理工大学,2014.
- [3] 丁旭,武新军.在役螺栓轴力电磁超声测量系统的研制[J].无损检测,2016,38(6):48-64.
- [4] 杜刚民,李东风,曹树林,等.螺栓轴向应力超声测量技术[J].无损检测,2006,28(1):20-25.