

叶根法兰螺栓松动位移变化仿真分析与 监测方案优化

邬伟骏¹,林家敏¹,魏东苑¹,程庆阳²,王东利²,李洪任²

(1. 国家电投集团福建建宁电力有限公司,福建 建宁 354500;

2. 陕西中科启航科技有限公司,陕西 咸阳 712023)

摘要:为确保风力发电机安全的运行,叶根法兰螺栓发挥着至关重要的作用。文中结合实际工程,建立了风力发电机组叶根法兰螺栓连接模型,提出一种基于螺栓松动位移变化的仿真分析方法,以优化螺栓在松动状态下的法兰位移监测方式。结合现场某机组叶根法兰位移变化进行了测试与仿真对比,显示结果相一致。所做研究可指导螺栓松动监测的传感器方案布置与优化,为实时监测和远程预警风力发电机法兰螺栓运行状态提供参考。

关键词:风力发电机;叶根法兰;螺栓松动;传感器方案布置与优化

中图分类号:TK 83 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)02-0089-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230215

Simulation Analysis on Displacement by Bolt Looseness of Blade Root Flange and Its Monitoring Scheme Optimization

WU Weijun¹, LIN Jiamin¹, WEI Dongyuan¹, CHENG Qingyang², WANG Dongli², LI Hongren²

(1. Fujian Jianning Electric Power Co., Ltd. of China Power Investment Corporation, Jianning 354500, Fujian, China; 2. Shaanxi Zhongke Qihang Technology Co., Ltd., Xianyang 712023, Shaanxi, China)

Abstract: Bolts of blade root flange play a vital role in ensuring safe operation of wind turbines. Combined with the actual project, based on the basic theory of bolt connection and the traditional simulation analysis method, the bolt connection model of blade root flange is established, and a simulation analysis method based on displacement change of bolt looseness is presented to optimize the monitoring mode of flange displacement under bolt looseness. The displacement change of blade root flange of a wind turbine is tested and compared with the simulation, and the results come to the same thing. This research can provide a direct guidance for sensor layout and optimization of bolt looseness monitoring, and provide a reference for real-time monitoring and remote warning of bolt looseness state of wind turbines.

Key words: wind turbine; blade root flange; bolt looseness; layout and optimization of sensors

0 引言

近年来,全球风电产业高速发展,中国已经成为全球风力发电规模最大、增长最快的市场^[1]。随着风电领域的不断发展,风电装机容量逐年上升,单台风力发电机的发电功率越来越高,造成了目前风力发电机塔架高度逐渐升高,风力发电机叶片逐渐增大,这对整个风机的安全运行提出了挑战。螺栓作为风电机组的主要连接方式之一,应用在叶轮、轮

毂、齿轮箱等诸多关键部位,关系到整个风电机组的安全可靠运行^[2]。其中,高强螺栓具有承受载荷大、抗疲劳性能好的优势,被广泛应用于风电机组主要连接构件中,通常会安装在兆瓦级风机的塔筒法兰之间、叶根和轮毂的主轴之间、主机架主要的部件之间等重要部位^[3]。叶根处的高强度螺栓承受的载荷很复杂,因此该部位经常发生螺栓断裂的问题,给企业带来极大的经济损失,对运行维护人员造成了一定的安全风险。

通过对现有风电塔事故研究分析表明,风机叶

根法兰螺栓松动是导致风机倒塌的主要因素^[4-6]。经资料调研,导致法兰螺栓松动的因素主要有以下方面^[5,7-9]:1) 风机主要运行部件安装存在偏差;2) 螺栓未紧固到位;3) 螺栓材料特性不合格。因此,及早发现螺栓的松动情况有利于预防风机倒塌事故。常规的预防方法是通过离线方法对螺栓松动情况进行人工定时抽检,判断法兰盘里是否出现单个或多个螺栓松动的情况^[5,10-12]。离线监测方法主要有扭矩法和声弹性法两大类,尽管该方法可详细检查到螺栓松动情况,但由于每座风机塔的螺栓数量颇多,常规方法费时费力,不具有时效性。因此对风力发电机组开展螺栓运行状态在线实时监测的研究具有十分重要的意义。

当前,螺栓松动在线监测方法主要包括压电主动传感法^[3-14]、压电阻抗法^[15-18]、图像处理法^[19-21]、光栅光纤法^[22]、基于声弹性原理的超声波检测法^[23-24]等。在线螺栓松动监测方法由于可以实现对螺栓运行状态在线监测,近几年得到了快速的发展并在实际工程中得到大量应用。但大多数螺栓松动监测方法仅针对单一螺栓松动情况,风机发电机结构复杂、螺栓数量众多,使用目前的螺栓松动在线监测方法实现整个风力发电机组的监测需要耗费大量的资源,成本高。为此,亟待发展叶根法兰螺栓松动情况仿真分析与监测方案优化方法,以降本增效。

经现场调研,风电机组叶片螺栓存在疲劳断裂现象,通过对叶片连接系统进行有限元分析,发现叶片金属法兰是影响螺栓疲劳寿命的重要因素之一^[25]。文献[26]将虚拟仿真技术应用于风机机械松动故障仿真分析,建立了可再现风机系统故障机理的定量模型,为基于虚拟样机的旋转机械故障振动可行性提供了依据。文献[27]利用有限元分析的方法对结构中全部螺栓进行了分析,建立了有限元分析模型,对整个螺栓组强度进行了分析研究。文献[28]选取了两个高强度螺栓作为试验对象,分析出了螺栓的受力情况。但上述仿真分析并未与实际工程进行紧密结合,并未将仿真分析结果应用于具体实际工程,也未对叶根法兰螺栓监测布置方案提供优化设计指导。下面针对叶根法兰螺栓松动的位移变化情况进行有限元仿真,提出一种基于叶根法兰螺栓松动位移变化的仿真分析方法,通过监测

法兰位移与法兰连接螺栓松动状态监测方法相结合,实现对螺栓运行状态的实时监测,为螺栓群松动监测传感器方案布置与优化提供指导。

1 仿真模型建立

有限元建模采用通用有限元软件 ANSYS Mechanical 完成。基于当前风电行业常用的内圈变桨结构,建立某机型叶根法兰位移螺栓松动位移变化的有限元仿真模型。叶根法兰区域为多个部件的装配件,其中部件结构复杂、连接关系繁多,建立的有限元仿真模型包括以下关键内容。

1.1 结构部件

结构部件包含与法兰位移仿真结果有关的部件,如轮毂、变桨轴承、螺栓、螺帽、叶根法兰、叶根等。为了提高计算效率及实现模型参数化,简化轮毂、变桨轴承等部件中对法兰位移仿真结果无影响的局部细节,如轮毂用球壳、变桨轴承滚道形状用圆形等来近似。建立的仿真实体模型如图 1 所示。当图 1 的坐标系为柱面坐标系时, x 轴代表径向方向, z 轴代表轴向方向;当图 1 的坐标系为直角坐标系, y 轴方向按照右手螺旋定则方式规定其方向。

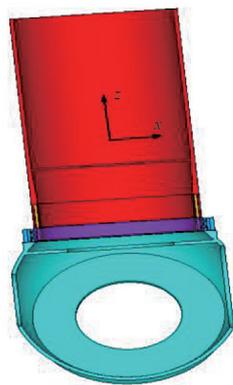


图 1 叶根法兰位移仿真的实体模型

1.2 有限元模型

为兼顾计算精度与效率,轮毂、变桨轴承、叶根、螺帽、螺栓头等均采用带增强应变的 SOLID185 单元、全六面体方式进行网格划分;内圈螺栓与外圈螺栓的杆身采用 BEAM188 单元模拟;变桨轴承滚珠采用 LINK180 单元模拟;各部件的连接或部件各部分的连接则采用 170、174 单元,且根据连接部分在实际工作中的连接状态,建立合适的接触关系(如绑定接触、

标准接触);另外,采用 170、174 单元在叶根中心与叶根法兰外端建立加载点,施加叶根载荷。建立的用于叶根法兰位移仿真的有限元模型如图 2 所示。

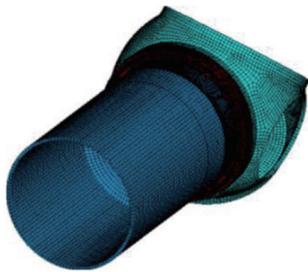


图 2 叶根法兰位移仿真的有限元模型

1.3 材料参数

各部件采用的弹性模量 E 、泊松比 μ 、剪切模量 G 等分别为:

1) 轮毂球墨铸铁件

$$E = 1.69 \times 10^5 \text{ MPa}; \mu = 0.275$$

2) 变桨轴承、螺栓、螺帽、叶根等钢件

$$E = 1.69 \times 10^5 \text{ MPa}; \mu = 0.275$$

3) 叶根(玻璃钢件)

$$E_x = 8400 \text{ MPa}, E_y = 10\ 200 \text{ MPa}, E_z = 28\ 500 \text{ MPa}$$

$$\mu_x = 0.38, \mu_y = 0.30, \mu_z = 0.30$$

$$G_{xy} = 3500 \text{ MPa}, G_{yz} = 5580 \text{ MPa}, G_{zx} = 5580 \text{ MPa}$$

x, y, z 方向参照图 1 所示的柱坐标系。

1.4 模型参数化

仿真模型的建模(含实体建模、网格划分、连接关系建立)、螺栓组件(螺栓规格、螺栓数量、螺栓预紧力)选取、加载求解、法兰位移提取等,采用 ANSYS Mechanical 的 APDL(ANSYS 参数化设计语言)实现,适用于不同机组、不同法兰位移传感器测距等。

1.5 结果提取

一般地,在叶根四周均匀布置 4 个传感器,通过每个传感器上两测点的位移变化,反映该传感器对应区域叶根法兰连接螺栓的松动状态,如图 3 所示。

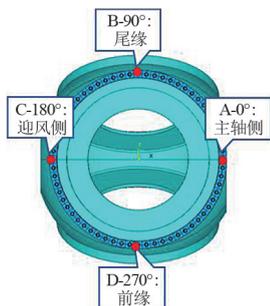


图 3 叶根法兰位移提取的典型位置

有限元模型中法兰位移的提取位置间距,与传感器测点的间距(约 6 mm)对应。法兰位移实际上包含了叶根变形,去除叶根变形后可以得到叶根法兰间隙。在有限元模型中,提取间距为 0 的位移,即为叶根法兰间隙。

2 仿真分析

2.1 约束及载荷施加

有限元仿真模型中,将轮毂与主轴的连接面全约束,以模拟主轴对轮毂的支承作用。为便于分析比较,仿真计算与分析采用叶根中心载荷,只考虑对叶根法兰位移有较大影响的载荷 M_x, M_y ,忽略其他次要载荷如 M_z, F_x, F_y, F_z 。仿真计算的载荷工况如表 1 所示,其中叶根载荷坐标系参照图 1 所示直角坐标系。

内圈螺栓(叶根-内圈变桨轴承连接螺栓)的数量为 72,规格为 M36;外圈螺栓(外圈变桨轴承-轮毂连接螺栓)的数量为 64,规格为 M36。螺栓的正常预紧力为 515 kN。

表 1 仿真计算与分析的载荷工况

工况	叶根载荷/(kN·m)		内圈螺栓 预紧力	外圈螺栓 预紧力
	M_x	M_y		
1	4356	0	$1.0F_y$	F_y
2	4356	0	$0.5F_y$	F_y
3	4356	0	$0.1F_y$	F_y
4	0	4356	$1.0F_y$	F_y
5	0	4356	$0.5F_y$	F_y
6	0	4356	$0.1F_y$	F_y

2.2 螺栓预紧力下的法兰位移

图 4 为在螺栓预紧力单独作用下的叶根法兰位移(位移提取间距为 6 mm)。在螺栓预紧力作用下,叶根法兰已经产生了压缩位移。在正常螺栓预紧力下,法兰压缩位移为 12~14 μm 。

不同螺栓预紧力产生的叶根法兰位移不同。当有螺栓松动时,叶根法兰的位移会增加。传感器通常是在停机状态下安装的,测量到的叶根法兰位移是测量状态对于安装状态的相对值。因此,在叶片某些简单卸载条件(如叶片静止向下),当传感器测量的法兰位移增加,则可判断传感器所在区域发生了螺栓松动。正常预紧力作用下的叶根法兰位移、法兰间隙情况如图 5 所示,两者相差约 3 μm 。仅受螺栓预紧力作用情况下,传感器测距越小,叶根法兰

位移值包含的叶根变形越小,叶根法兰的位移越接近间隙。

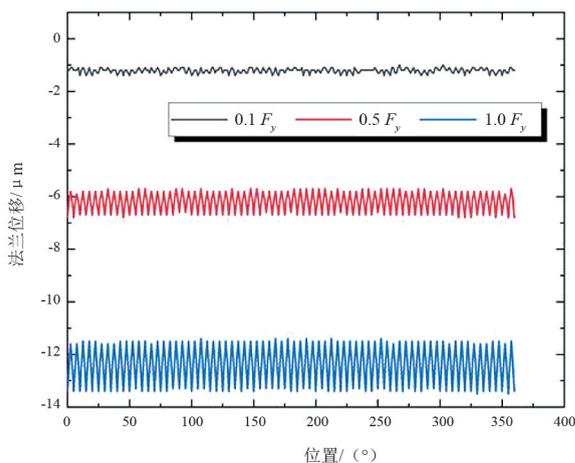


图 4 螺栓预紧力作用下的叶根法兰位移

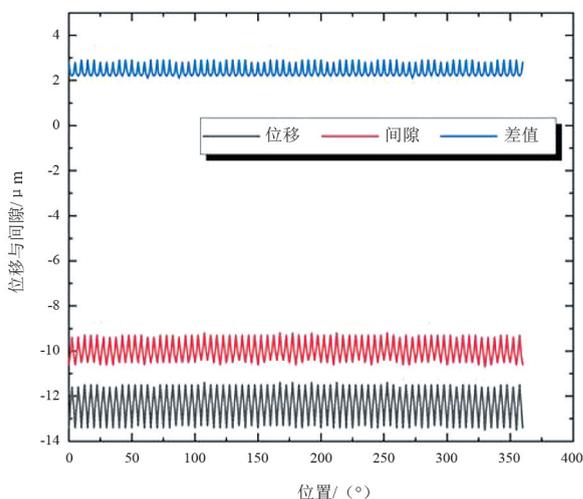


图 5 正常螺栓预紧力作用下叶根法兰位移及间隙

2.3 各工况下的法兰位移

图 6—图 7 为各工况下的叶根法兰位移图。

各工况下的传感器位移测量值是测量状态对于安装状态的叶根法兰位移相对值。与此对应,计算提取的各工况下叶根法兰位移,是“预紧力+叶根载荷状态”对于预紧力状态的位移变化。各工况下的叶根法兰受拉侧,有螺栓松弛(如预紧力很小或完全丢失)时会产生很大的压缩位移。另外,叶根载荷 M_x 、 M_y 的方向交变,叶根法兰有螺栓松弛时,会产生很大的位移变化。在机组运行中,传感器测量的法兰位移若出现很大压缩值或位移变化,表明传感器所在区域有螺栓松弛。受叶片重力、叶轮旋转等影响,叶根载荷 M_x 的方向及大小交变剧烈,使叶根前缘、后缘交替地受拉或受压;另外叶根载荷 M_y 使叶根迎风侧、主轴侧受拉或受压。因此叶根前缘、尾

缘、迎风侧、主轴侧等位置,适宜布置传感器测量法兰位移。

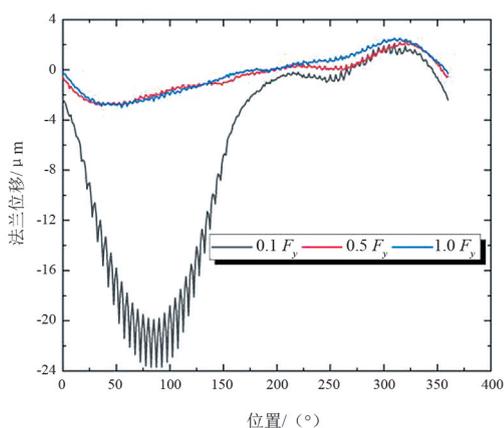


图 6 工况 1~3 下的叶根法兰位移

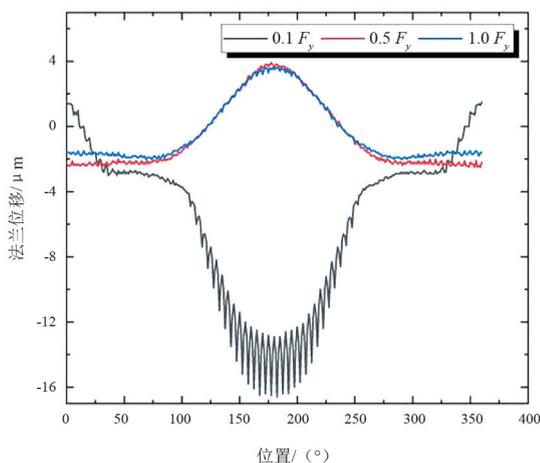


图 7 工况 4~6 下的叶根法兰位移

叶根法兰的位移、间隙的差异仍然很小。以工况 3 为例,差异不超过 $2 \mu\text{m}$,如图 8 所示。

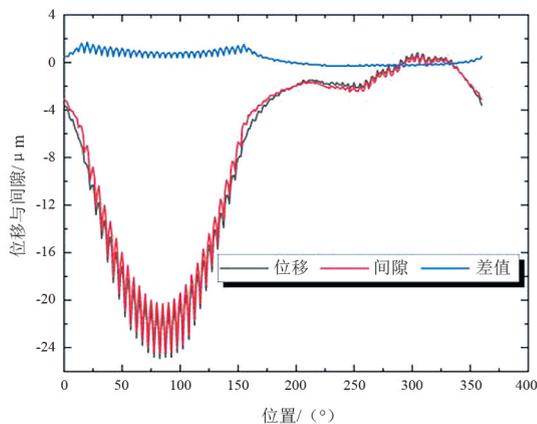


图 8 工况 3 下的叶根法兰位移及间隙

3 仿真与实测对比分析

针对现场某机组进行叶根法兰螺栓松动情况的

法兰位移仿真分析与测试试验。螺栓编号及传感器布置方式如图 9 所示。位移传感器布置位置:13102 在螺栓 2 号、3 号间;13402 在螺栓 7 号、8 号间;13302 在螺栓 32 号处;13202 在螺栓 35 号、36 号间。

该叶根法兰的主要信息为:叶片重量为 12.19 t;连接螺栓的内圈螺栓(叶根-内圈变桨轴承连接螺栓)的数量为 56,规格为 M36;外圈螺栓(外圈变桨轴承-轮毂连接螺栓)的数量为 92,规格为 M36;叶片朝下,叶根载荷为叶片自重。因无法获取详细的设计参数,此次仿真模型采用的螺栓预紧力、材料参数、模型尺寸等,与前述仿真模型描述的相同。

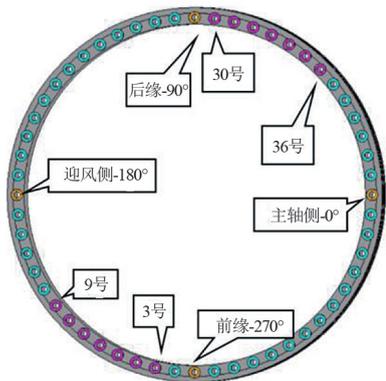


图 9 现场某机组的叶根法兰螺栓编号

图 10 和图 11 分别为螺栓松动情况下的法兰位移仿真值、测试值。图 10 中不同曲线表示在对应编号螺栓释放预紧力后对应的法兰位移,图 11 表示在逐步释放螺栓预紧力过程中,两个测点位置的法兰位移输出。

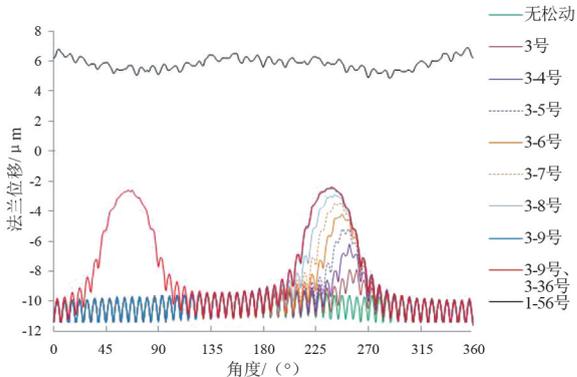


图 10 某机组叶根法兰松螺栓的位移仿真曲线

螺栓松动情况下,叶根法兰典型位置的位移仿真值、测试值如表 2 所示。

从表 2 仿真与测试结果对比可以看出:在叶片自重载荷不变情况下,螺栓松动后,松动区域的法兰位移随之增加;松动数量越多,法兰位移增加越大,

且仿真与测试的位移变化基本接近。

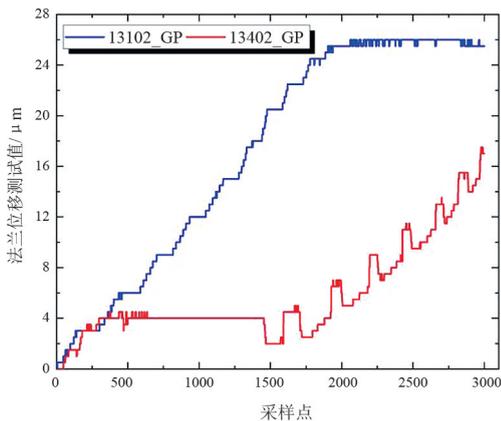


图 11 某机组叶根法兰松螺栓的位移测试曲线

表 2 某机组叶根法兰松螺栓的位移值

松动螺栓	传感器位置	位移变化值/ μm	
		测量值	仿真值
3~7 号	13102	8.0	7.1
3~8 号	13402	7.0	7.1
全部	13402	19.5	18.4

注:其他测试数据,受现场因素所致误差影响未采用。

4 结 论

上面利用所提仿真分析方法对螺栓松动情况下叶根法兰位移变化情况进行了研究,提出了螺栓松动状态下法兰位移监测优化方式,如传感器布置、螺栓在预紧力或外载荷等不同状态的松动状态判断;并对现场某机组叶根法兰位移变化进行了实测与仿真比对。结果显示,所建立的叶根法兰位移变化仿真模型的分析结果与现场实测相一致,为以后的应用研究提供了重要参考依据。主要结论如下:

- 1) 仅受螺栓预紧力作用下,传感器测距越小,叶根法兰位移值包含的叶根变形越小,叶根法兰的位移越接近间隙。
- 2) 在机组运行中,传感器测量的法兰位移若出现很大压缩值或位移变化,表明传感器所在区域有螺栓松动。
- 3) 叶根前缘、尾缘、迎风侧、主轴侧等位置,适宜布置传感器测量法兰位移。
- 4) 对比结果显示,螺栓松动后,在叶片自重作用下,松动区域的法兰位移增加;松动数量越多,法兰位移增加越大。

下一步,将继续进行现场机组叶根法兰位移监测应用基础研究,收集有效测试数据,持续验证和改

进。

进所提出的仿真分析与监测方案优化方法,为法兰位移法监测螺栓松动状态的现场应用提供理论与方法支撑。

参考文献

- [1] 赵斌,殷聪,张闯,等.基于RFID技术的风电塔筒螺栓松动智能检测系统[J].电测与仪表,2020,57(14):113-118.
- [2] 祝其高,张先鸣.我国紧固件行业技术发展[J].金属制品,2010(1):15-17.
- [3] 陈真.风力发电机组高强度螺栓连接技术研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [4] 何先龙,余天莉,徐兵,等.基于塔筒振动特性识别风机塔螺栓松动的研究[J].振动与冲击,2016,35(14):112-118.
- [5] 魏泰,吴坤,黄军威.风机塔筒螺栓放松检测技术[J].机械与电子,2013(8):78-80.
- [6] 龚元明,吴长水.高强度螺栓试验与测试系统的开发[J].上海工程技术大学学报,2011,25(1):27-30.
- [7] 猴百勇,陆秋海,王波,等.利用固有频率异常值分析法检测螺栓拧紧力[J].振动与冲击,2015,34(23):77-82.
- [8] 余坚,谢寿生,任立通,等.拉杆转子装配振动检测分形研究[J].振动与冲击,2014,33(14):84-88.
- [9] 李允公,孔祥娜,高玉勇.基于两被联件振动信号概率密度和PCA的螺栓松动识别方法研究[J].振动与冲击,2015,34(1):63-67.
- [10] 李源,曾宇,陈昌林.不同单元类型风机塔筒振动特性比较研究[J].东方电机,2012(5):43-46.
- [11] RACHID Y, ISMAIL E B, TRITSCH J B, et al. Dynamic study of a wind turbine blade with horizontal axis[J].European Journal of Mechanics-A/Solids,2011,20(2):216-225.
- [12] MURTAGH P J, BASU B, BRODERICK B M. Mode acceleration approach for rotating wind turbine blades[J].Journal of Multi-Body Dynamics,2001,21(8):241-252.
- [13] WANG F, CHEN Z, SONG G. Smart Crawfish: A concept of underwater multi-bolt looseness identification using entropy-enhanced active sensing and ensemble learning[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2021,149:107186.
- [14] WANG C, WANG N, HO S C, et al. Design of a novel wearable sensor device for real-time bolted joints health monitoring[J].IEEE Internet of Things Journal,2018,5(6):5307-5316.
- [15] 杜飞,张子涵,徐超.法兰螺栓松动的超声导波监测方法[J].压电与声光,2019,41(5):679-684.
- [16] XU J, DONG J, LI H, et al. Looseness monitoring of bolted spherical joint connection using electro-mechanical impedance technique and BP neural networks[J].Sensors,2019,19(8):1906.
- [17] Park G, Daniel J I. Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements[J].The Royal Society,2007,10(1098):373-392.
- [18] 王丹生.基于反共振频率和压电阻抗的结构损伤检测[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [19] 蔡红梅,张转芳,张光利.基于图像处理的螺栓松动智能监测方法研究[J].计算机仿真,2015,32(10):94-97.
- [20] 沈浩,江臣,陈宇文,等.基于深度学习的桁架螺栓病害智能识别方法[J].南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(5):608-619.
- [21] 叶宏鹏.基于图像处理的动车轴端螺栓检测方法的研究[J].北京:北京交通大学,2018.
- [22] KHOMENKO A, KORICHO E G, HAQ M, et al. Bolt tension monitoring with reusable fiber Bragg-grating sensors[J].The Journal of Strain Analysis for Engineering Design,2016,51(2):101-108.
- [23] 冉启芳,费如星,邓朝栋,等.用超声波方法测量螺栓应力[J].固体力学学报,1982(1):64-69.
- [24] 孙国峰.基于超声波技术的螺栓紧固轴力测量应用研究[D].杭州:浙江工业大学,2012.
- [25] 刘作辉,田凤帅,庄恒东.叶根金属法兰对风电机组叶片螺栓疲劳性能的影响分析[J].风机技术,2020,62(4):80-84.
- [26] 彭连兵,刘荣娥,胡树山.虚拟样机仿真技术用于风机机械松动故障的仿真分析[J].风机技术,2012,54(2):82-85.
- [27] KIM J, YOON J C, KANG B S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted Joints[J].Applied Mathematic Modelling,2007,5(31):895-911.
- [28] SARAJ M, BURGESS I W, DAVISON J B. Finite element modelling of steel fin plate connections infire[J].Fire Safety Journal,2007,42(6):408-415.

作者简介:

鄢伟骏(1991),男,工程师,研究方向为新能源发电;
林家敏(1996),男,助理工程师,研究方向为新能源发电;
魏东苑(1996),女,助理工程师,研究方向为新能源发电。

(收稿日期:2022-08-31)