

风电机组叶根螺栓超声波预紧力监测技术研究

文|蒋靖, 郭涛, 杨轶, 刘楚达

风电机组叶片、轮毂、主轴、机舱、塔筒和基础环等各大部件都是通过高强度螺栓进行连接的。高强度螺栓主要起连接、传递力和力矩的作用。因此,风电机组中高强度螺栓的工作安全性和可靠性将直接影响整机运行的可靠性及安全性。

螺栓预紧力是检验螺栓连接可靠性的关键性能指标。目前,测量螺栓预紧力的方法主要有应变片法、测力环法、光纤法等,但受到使用条件的限制,这些方法都难以在风电机组上得到实际应用。超声波测应力技术,利用超声波灵敏地反映试验件内部的各种信息,用超声波参数来表征应力。其与高效的信号处理系统联合使用能快速地进行测量,具有无损、对人体无害等优点,适合对大批量同类型产品的检测,超声波应力测试技术正得到迅速发展和应用。

本文以叶根螺栓为例,介绍了一种超声波测量螺栓轴力(预紧力)的方法,并通过对比试验验证了其精度,利用该方法可以对螺栓的受力状况进行实时监测。通过有限元计算和试验验证,找到了风电机组叶根法兰面关键受力监控点,在实际应用中,可以通过有限点数来对整个风电机组叶根法兰面连接螺栓进行实时受力监控。相比监测所有螺栓,这种方法更加经济和高效,具有广阔的应用前景。

超声波轴力监测原理及验证

一、超声波轴力监测原理

本文将超声应力测量技术应用于风电机组高强螺栓检测,该技术不会对螺栓产生任何损伤,不影响螺栓连接结构,无需对螺栓上的字样进行打磨,操作方便,且预紧力精度能控制在3%以内,可有效对螺栓的松动和断裂提供预警。其基本原理包括:(1)超声波临界反射特征,即超声波在

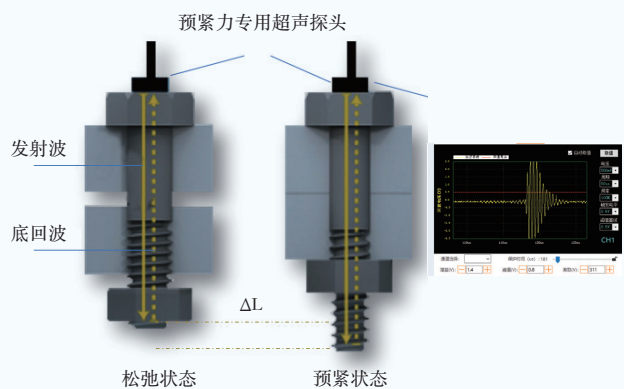


图1 超声螺栓轴力检测原理

螺栓体中传播,当遇到临界面时,超声波大部分会沿界面垂直反射回来;(2)超声弹性原理,即超声波在金属中的传播速度与金属所受应力大小成反比;(3)胡克定律,即金属受力(在屈服强度内)时会沿受力方向弹性变形。

如图1所示,当超声探头发出的超声波由螺栓一端进入并传递到另一端时,在螺栓的端面会发生反射,再回传给探头。根据声弹性原理,超声波传播的速度会受到材料应力的影响,二者的关系如下式所示:

$$C = (1 - k\sigma)C_0 \quad (1)$$

式中, k 为与螺栓材料有关的声弹性系数, σ 为螺栓的轴向应力, C_0 为无应力时的声速, C 为有应力时的声速。螺栓受力前后超声波在螺栓中传播的时间差为:

$$\Delta t = t - t_0 = \frac{(k + \frac{1}{E})L_0\sigma}{(1 - k\sigma)C_0} \quad (2)$$

式中, L_0 为螺栓有效夹持长度, E 为螺栓材料的杨氏弹性模量。两者在固定材质情况下均为已知常量, 由此可近似地将螺栓轴向应力与超声关系列为:

$$\sigma = \frac{\Delta t}{AL_0} \quad (3)$$

式中, A 为螺栓的超声应力系数, 此系数可以通过试验标定得出。

根据应力与轴力之间的关系, 可得:

$$F = \sigma \cdot S = \frac{\Delta t \cdot S}{A \cdot L_0} \quad (4)$$

式中, F 为螺栓所受轴力, S 为螺栓中间段有效面积。

在实际应用中, 在测量出螺栓受力前后超声波的声时差 Δt 后, 通过试验标定应力系数 A , 就可计算出螺栓所受的轴力。

二、螺栓超声应力系数标定

标定螺栓应力系数所用设备主要包括超声预紧力测量仪(图2, 长沙飏能信息科技有限公司生产)和标定试验台(图3, 长沙飏能信息科技有限公司生产)。

试验时, 将螺栓用螺母和垫片固定在试验台上, 测力环用于测量加载在螺栓上的预紧力(图4)。对叶根螺栓(M36)进行应力系数标定的具体方法为: 通过标定试验台以10kN步长施加预紧力, 最大加载到300kN左右, 用便携式螺栓预紧力测量仪测量并记录每次加载后的超声波回波时间(超声声时 t , 单位 μs), 然后采用线性回归方法计算预紧力(F , 单位 kN)与声时之间的线性常数(AL_0/S), 再通过式(4)计算得到应力系数 A 。其中, 螺栓的夹持长度 L_0 为455mm, 有效直径为33mm, 有效面积 S 为854.8mm²。试验数据如表1所示, 按式(4)计算得出该螺栓的平均应力系数 A 为0.00658。

本文通过将超声波所测得的轴力与应变片和测力计测得的轴力进行对比, 验证超声波所测轴力的准确性。

具体方法为: 在试验台上将螺栓与环形测力计组装好, 同时将4个应变片贴在螺栓被夹持部分(中间段)的四周(图5), 加载后求得4个应变片应变值的平均值即为螺栓中心处的应变值, 通过该值即可求得螺栓轴向力。

由测力计、应变片和超声波测量的轴力数据(表2)可知, 超声测量的轴力与测力计、应变片测量的轴力偏差小于1%, 该结果验证了超声测量轴力的准确性。



图2 便携式螺栓预紧力测量仪



图3 标定试验台



图4 螺栓固定及测力装置

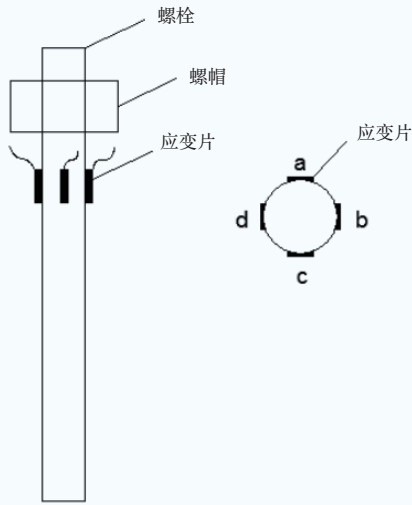


图5 应变片分布位置

表1 标定试验数据记录

叶根螺栓 M36×570	
预紧力 (kN)	超声声时 (μs)
89.99	193.241333
115.58	193.326820
141.51	193.415306
158.51	193.474075
198.90	193.616959
219.08	193.687889
238.23	193.752121
262.57	193.836975
284.14	193.911575
应力系数	0.00658

表2 测力计、应变片和超声波测量的轴力值

叶根螺栓 M36×570				
第一次加载				
读值项目	应变片 1	应变片 2	应变片 3	应变片 4
应变值	1245	1160	688	751
测力计 (kN)	123.059			
超声测量 (kN)	123.043			
应变片测量 (kN)	123.019			
第二次加载				
读值项目	应变片 1	应变片 2	应变片 3	应变片 4
应变值	1664	1603	1070	1164
测力计 (kN)	176.03			
超声测量 (kN)	176.105			
应变片测量 (kN)	176.047			

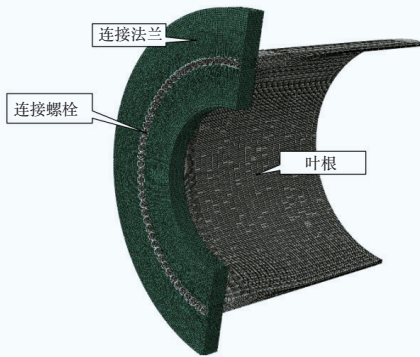


图6 叶根及法兰有限元模型

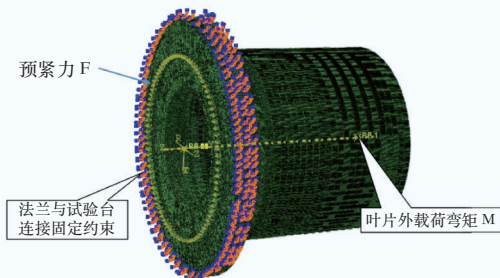


图7 有限元计算边界条件及载荷

螺栓传感器布置

根据选定风电机组的结构尺寸，建立叶根部位 Hypermesh 有限元模型（图 6），主要包含三个部分：叶根、螺栓和法兰，叶根与法兰通过螺栓单元连接。

如图 7 所示，运用 ABAQUS 6.11 进行有限元计算：对法兰底施加固定约束，对螺栓施加 400kN 额定预紧力 F，对叶根施加叶片自重及 200kNm 外载荷弯矩 M。

风电机组叶根螺栓数量为 92，对螺栓进行如图 8 所示

的编号。

通过计算，得到 92 颗螺栓轴力的变化幅值，其中，最大幅值出现在 1#、46# 螺栓上。这是因为叶片内部的加强筋固定在该两颗螺栓处，导致其受力明显大于其他螺栓，92 颗螺栓轴向力数据呈如图 9 所示的余弦函数图形分布。

由于试验中采用的超声数据采集器模块（图 10）通道数为 8，因此，布置超声传感器数量最多为 8 个。根据仿真结果，将 4 个传感器安装在承受最恶劣工况的螺栓 1# 和 46# 以及相邻的 92# 和 47# 上，其余 4 个均布在其余的螺栓中，分别为 15#、30#、60#、80#。通过 8 个监测点测量数据，依据余弦函数关系即可拟合叶根 92 颗螺栓的全部受力。

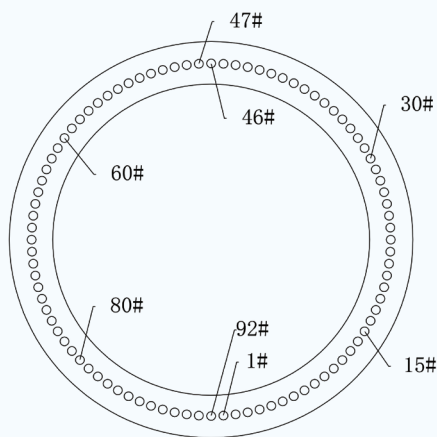


图8 叶根螺栓编号

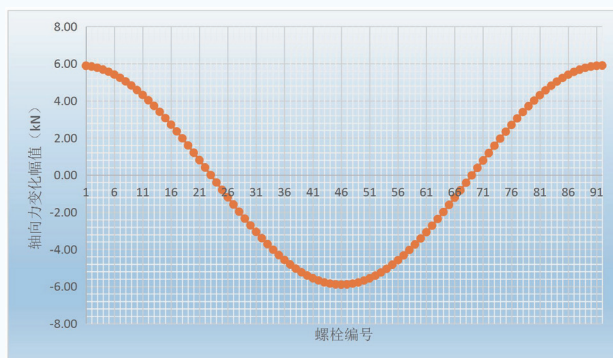


图9 92根螺栓在弯矩作用下的轴力幅值

试验在挥摆试验台（图 10、图 11）上进行，对叶根螺栓按 1525Nm 的额定拧紧力矩进行拧紧，使螺栓的预紧力（400kN）保持一致。

加载方式如图 11 所示，叶片水平放置并悬空，在叶片中间位置施加一定的载荷，载荷和叶片自重换算到叶根法兰的弯矩为 200kNm，测量得出 8 颗螺栓加载前后轴力变化幅值如表 3 所示。

由表 3 可知，超声测量试验结果与有限元计算结果平均偏差在 4% 左右，最大偏差小于 8%，精度较高。由试验与计算结果较为吻合可知，采用这种布置，既经济又能很好反映外载荷对螺栓预紧力产生的影响，可以达到通过有限点数据拟合整个法兰面受力的目的，在实际工程中有比较



图10 超声数据采集模块及试验台



图11 叶根加载实验

表3 叶根加载试验结果

螺栓序号	有限元计算值 (kN)	超声测量幅值 (kN)	偏差绝对值
1#	5.91	5.85	1.02%
15#	3.12	2.98	4.49%
30#	-3.20	-3.24	1.25%
46#	-5.88	-6.12	4.08%
47#	-5.76	-6.18	7.29%
60#	-3.42	-3.57	4.39%
80#	3.35	3.12	6.87%
92#	5.76	5.95	3.30%
平均偏差			4.08%

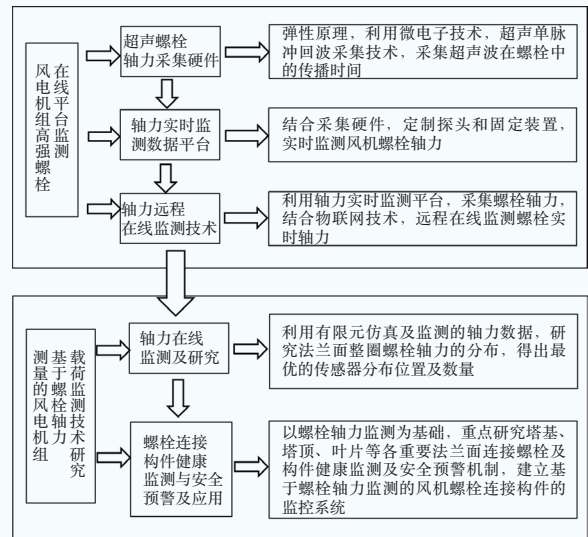


图12 螺栓预紧力监测技术路线

大的应用价值。

螺栓轴力实时监测的应用

通过本文所述的螺栓轴力超声波测量技术，可以建立螺栓预紧力实时监测数据平台，利用物联网技术建立远程在线监测系统。其技术路线如图 12 所示。

其应用主要包含以下几个方面：

(1) 基于在线监测所得到的螺栓实时轴力，通过变桨或调节转速等方式，将螺栓轴向受力控制在材料屈服极限以内，使螺栓处于安全连接范围，避免过载导致断裂的情况发生。

(2) 根据场内叶片连接测试和叶片连接设计规范，计算得出叶根螺栓预紧力松动阈值。通过有限监测点数据拟合出所有螺栓轴力值，将总轴力减去叶片自重、分配载荷，得出叶根连接螺栓的实际预紧力，结合叶根螺栓预紧力松动阈值，给出连接螺栓的松动预警机制。

(3) 根据试验和有限元计算得出轴力值分布规律，寻找叶根截面的弯曲中心面，确定叶片弯曲方向，建立螺栓轴力变化量的动载荷与弯矩关系的数学模型。进而研究叶根载荷数据与叶片动不平衡、叶片覆冰程度、变桨异常、叶片异常振动现象之间的内在联系，为叶片故障的判断提供数据支持。

总结

本文将超声波应力测量技术应用于风电高强螺栓的轴力监测，利用有限元计算，寻找出最佳的布点方式。实际运用时，通过有限监测点就可很好地判断叶根的受力状况，为风电机组高强螺栓的运维和叶片状态监测提供实时的数据支持。通过本文研究得出的主要结论包括：

(1) 标定了螺栓超声应力系数，并将超声波测得的螺栓轴力与测力计和应变片测得的数据进行了对比，其偏差在 1% 以内，验证了超声波轴力监测的准确性。

(2) 通过有限元分析，得到了叶根螺栓在弯矩作用下轴力变化幅值呈余弦函数分布，并确定了关键受力点，为通过有限监测点拟合全部螺栓受力提供了依据。同时将有限元分析所得轴力与超声监测所得到的 8 颗螺栓轴力进行了对比，其结果基本吻合，验证了有限元分析所得结果的准确性，采用优化的布点可以满足实际工程需求。

(3) 在实际应用时，监测所得到的螺栓轴力可以用来判别螺栓是否松动或破坏。通过有限监测点的数据拟合整个法兰面的受力情况，可以为研究叶片动不平衡、叶片覆冰程度、变桨异常、叶片异常振动等问题提供数据支持。☑

(作者单位：蒋靖，郭涛，杨轶：中电投东北新能源发展有限公司；刘楚达：长沙隰能信息科技有限公司)