

数字螺栓在风电领域的应用研究

文 | 席传让, 刘楚达, 秦文林

风电机组的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。由于风电机组螺栓部件特别是叶片处轮毂的螺栓长期工作在振动、交变负荷的工况下, 极易发生松动、断裂等故障, 是导致叶片掉落的主要原因¹。由此可知, 螺栓的连接状态将直接影响风电机组的安全运行, 对螺栓连接状态进行研究至关重要。

螺栓通过拧紧获得预紧力, 预紧力是判定螺栓连接是否正常的最重要参数。目前, 螺栓常用的拧紧方法主要有扭矩法和拉伸法, 扭矩法靠旋转螺母获得预紧力, 拉伸法靠预拉伸螺栓后旋转螺母获得预紧力。扭矩法受摩擦系数分散性和应力集中的影响存在高达 $\pm 40\%$ 的误差²; 拉伸法因为有回弹, 预紧力误差在 $10\% \sim 20\%$, 两种方法都无法确知初始预紧力。在拧紧螺栓时若预紧力过大, 易导致螺栓产生应力腐蚀裂纹和疲劳破坏; 若预紧力不足, 则会引起振动松弛和滑移, 影响结构整体性能或造成密封泄漏, 两种情况都将导致设备损坏和严重事故的发生³。

此外, 在风电机组运行过程中, 对螺栓的运维一般只做到目视划线检查、抽检扭矩或拉伸, 没有系统性地对螺栓预紧力进行测量和记录, 属于粗放式管理。当螺栓出现断裂事故时, 原因常常不明。一台风电机组螺栓的数量通常可达数千根, 采用人工抽检扭矩或拉伸时设备沉重、工作量巨大, 且费用较高。同时, 抽检的覆盖面较小, 如出现漏检的情况, 将给风电设备带来安全风险。

在超声波测量预紧力的技术出现后, 螺栓的预紧力获取状况有所改善。其中, 双波法可以测量已经拧紧的

螺栓的预紧力, 但对螺栓要求较高, 操作难度较大, 对于直径太小、太大或中间有孔的螺栓测量效果较差, 甚至不能测。单波法使用范围大, 操作简单, 但必须要测量未受力状态下的零声时(初始声时), 这样就不能测量已拧紧螺栓的预紧力, 导致使用场景受限。因此, 超声波预紧力测量技术虽然在螺栓安装运维中有很大的应用潜力, 但缺乏一定便捷性, 在螺栓全生命周期管理中的应用存在困难。鉴于这种情况, 本文介绍了一种能简便快捷测量螺栓预紧力的方法和管理系统, 弥补了单波和双波测量的缺陷, 同时能有效对测量的数据进行集中管理。

数字螺栓概念

随着国家智能化、数字化产业政策的推进, 为传统产业赋能成为电子信息技术的一项使命, 基于最新超声波测量技术以及信息技术的数字螺栓应运而生。所谓数字螺栓, 是指给每颗螺栓一个唯一数字身份, 通过物联网和云平台技术, 将螺栓的初始信息和工作状态下的在役信息纳入统一管理, 依靠超声波预紧力测量这一核心手段, 使螺栓的松紧状态和预期寿命得到精确地评估, 从而将螺栓由原来的粗放式管理提升到精确数字化管理水平, 极大地推动螺栓的产业升级。

为精确可靠、快捷地测量螺栓预紧力, 数字螺栓优先采用成本低廉的贴片式压电晶片技术。

考虑到螺栓的运输和安装可能对晶片造成损伤, 晶片采用沉孔式粘贴固定, 晶片表面略低于螺栓端面, 从

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: JOHNSON Q C, HOLT A C, CUNNINGHAM B. An ultrasonic method for determining axial stress in bolts[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1986, 14 (5): 253-259.

3: 马楠, 刘峰, 蔡桂喜, 等. 超声法测量高强螺栓应力试验研究 [J]. 石油机械, 2018, 46 (7): 22 - 26.

而保证了核心元件晶片的长期可靠性。当然，随着电磁超声技术的发展，也可采用电磁横波技术对螺栓初始声时进行采集和测量。此项技术要求被测螺栓端面有一定平整度，同时测量时要保证探头与螺栓对中，避免信号失真。本文将贴片式数字螺栓为例，讲解数字螺栓的具体实施方法和应用。

数字螺栓的制备

螺栓正常生产出来后，在其端面中心加工直径10~15 mm、深度1~1.5 mm的沉孔（底部平整，粗糙度最好在25 μm以内）。考虑到安装特性，叶根螺栓沉孔加工在内六角孔底，其他螺栓加工在六角头或露头端。螺栓防腐层做好后，在沉孔端靠近贴片位置用激光或油墨打印二维码标识和对应的编号（图1），由二维码生成的编号作为该螺栓的唯一身份编码。打印的编号用作备份，防止二维码损伤后螺栓识别困难。接着将与孔适配的压电晶片用耐候胶粘贴在沉孔底部，保证晶片上表面低于螺栓表面，以免晶片被磨损（图2）。晶片的上表面（非粘贴面）采用镀银或镀金的办法增加导电性和耐腐蚀性。

数字螺栓管理系统及实施流程

数字螺栓实施主要依靠三大硬件系统和一个云端数据管理平台实现。

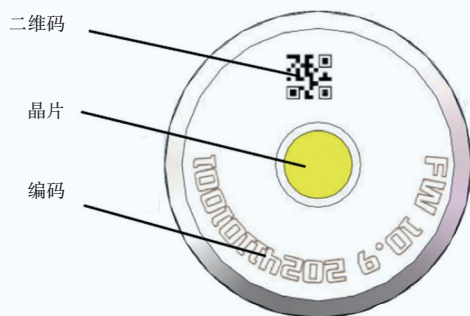


图1 数字螺栓端面

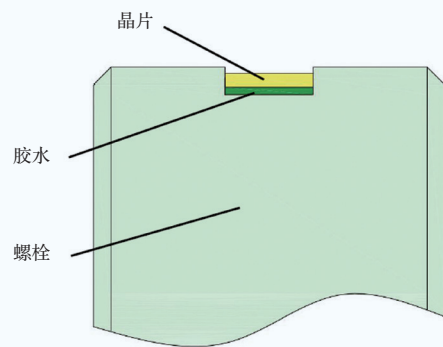


图2 数字螺栓结构

一、硬件系统

1. 超声波螺栓预紧力测量仪

该设备主要用于螺栓预紧力的现场测量，包含预紧力测量功能，数据保存上传功能，二维码扫描功能。通过扫描螺栓二维码或输入螺栓编号，加载该螺栓规格参数、历史测量任务和数据。测量完成后，将数据保存到本地，联网时同步上传到云端数据管理平台。

2. 螺栓标定系统

该系统包含拉力设备和超声波预紧力标定仪器，通过对螺栓进行轴向拉力加载，同时测量超声波声时，计算出螺栓超声应力系数（通过将该系数与现场测量的声时差结合就可以计算出螺栓的预紧力）。标定时，能通过扫描螺栓二维码或输入编号，加载该螺栓的规格参数，同时将标定系数保存到该规格螺栓下，并同步上传到云端数据管理平台。

3. 出厂采集系统

该系统能在螺栓出厂时，对螺栓进行编号和二维码喷涂，并关联该螺栓的规格型号。此外，其能测量并记录螺栓的初始声时和回波波形，并将数据同步上传到云端数据管理平台。

二、云端数据管理平台

数字螺栓智能管理平台，采用云服务器的方式，将数字螺栓数据纳入全生命周期管理。主要功能有：

- (1) 用户账号管理：包含用户账号设置、权限设置、密码设置等。
- (2) 螺栓规格参数管理：包含螺栓名称、螺栓规格参数、生产厂家、材料等。
- (3) 标定数据管理：包含螺栓名称、超声应力系数、

标定波形等。

(4) 初始信息管理：包含螺栓编号、初始声时、初始波形等。

(5) 项目任务管理：包含项目名称、测量任务名称、预紧力测量时间和结果、抽检扭矩的时间和扭矩值、拉伸时间和拉伸值、螺栓预紧力分析报告等。

三、数字螺栓实施流程

螺栓生产制造完成后，来到编码喷涂工位，智能管理平台自动生成一个唯一的编号和对应的二维码，并喷涂或激光打印到螺栓端面，作为永久的身份标识。接着将压电晶片粘贴到沉孔内，待胶水凝固稳定后，将每颗螺栓移至出厂超声采集工位，由超声采集装置自动对螺栓的初始声时和波形进行采集，并上传到云端智能管理平台。通过标定系统对一个规格的螺栓进行抽样标定，并将标定数据同步到智能管理平台。

在螺栓安装时，操作人员用便携式超声波螺栓预紧力测量仪（下称“测量仪”）建立测量项目，扫描螺栓头部二维码或输入螺栓编号将螺栓添加进测量任务，测量仪自动下载该颗螺栓的规格参数、标定系数、初始数据。再用测量仪对螺栓安装预紧力进行精确测量，保证螺栓安装预紧力的合格，预紧力测量值和该颗螺栓的扭矩或拉伸值都将上传到智能管理平台。

在螺栓工作过程中，运维人员在巡检时，同样用便携式设备扫描二维码或输入螺栓编号，可以下载该颗螺栓历史数据和参数，导出测量任务，测量完成后，对照额定预紧力判断螺栓连接是否合格，不合格则补打扭矩或拉伸，如有断裂则更换。巡检预紧力测量结果及巡检扭矩值、拉伸值或更换数据可以同步上传到智能管理平台，平台可自动生成巡检报告、螺栓连接安全分析报告（图3）。

数字螺栓也有助于提高在线监测准确度，这是因为在线监测的传感器只能在风电机组安装完成后再进行安装，此时螺栓已经拧紧，无法获取每根螺栓未受力时的初始声时，因此，只能监测螺栓预紧力的相对变化量。而数字螺栓出厂前都采集有初始声时等信息，因此，能测量每颗螺栓的绝对预紧力，在线监测的准确性更高。在线监测的数据也可汇集到云端智能管理平台，与巡检数据进行互补分析，有助于及时发现螺栓失效，增强螺栓连接的可靠性。

数字螺栓测量演示

一、测量设备

本文测试的数字螺栓测量设备（图4）包含测量仪、温度探头、超声探头和扫码枪。测量仪用于读取扫码枪数据生成螺栓编号、通过超声波测量螺栓预紧力、数据保存和上传；扫码枪与测量仪连接，能读取螺栓端面二维码信息，将二维码信息传入测量仪，通过测量仪内置的编码生成软件自动生成螺栓唯一的编号；超声探头为磁吸式，拥有可伸缩的探针和导电环，用于传导激励信号并接收压电晶片的回波信号，输出超声回波电压信号；温度探头用于读取环境或螺栓温度，对测量结果进行温度补偿，以及记录测量时温度。

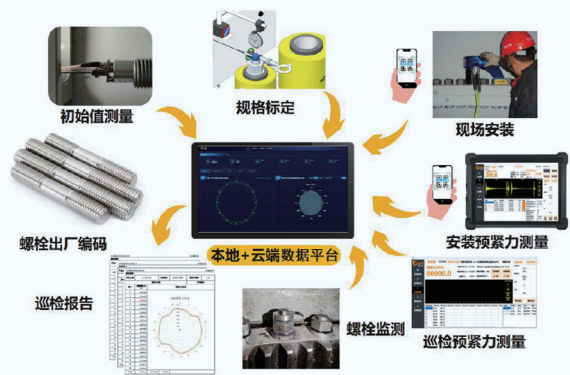


图3 数字螺栓实施流程



图4 测量设备



图5 叶根内六角数字螺栓

二、被测对象

本文要测量的数字螺栓为某机型叶根连接螺栓，如图5所示，其为内六角端面，型号为 M36×780-10.9，超声晶片外径 8 mm、厚 1 mm，沉孔直径 10 mm、深 1.5 mm。内六角端面粘贴有二维码，用于螺栓识别。

三、测试过程

螺栓的实际预紧力由测力计读取，该值用于与测量值对比。测力计选用触达科技应变式称重传感器，其为空心设计，量程 100 t，国标精度 $\pm 0.5\%F.S.$ 。将被测螺栓穿过空心测力计和油缸，两端用螺母固定，用油缸给螺栓施加轴向拉力，模拟螺栓拉紧情况，测力计的值即为螺栓预紧力值。由于本文主要探讨数字螺栓的使用，标定过程为常规操作，因此省略。

(一) 初始信息采集：将扫码枪、超声探头、温度探头与测量仪连接，启动测量软件，建立初始信息采集任务，准备工作完成。接着启动测量，默认测量的螺栓序号为 1，启动扫码枪对着螺栓端面扫码（图 6），测量仪自动生成螺栓编号 ID（本文螺栓编号为 BN00001）。再放置探头，探针接触晶片，磁吸固定（图 7）。点击“测量”，出现该螺栓回波波形和初始声时，接着点击“记录测量”，螺栓温度、初始声时、波形数据自动保存（图 8），这样便建立了该螺栓的初始信息档案。

(二) 数字螺栓预紧力测量：用油缸对装夹的螺栓进行加载，启动测量仪，建立测量任务。默认的测量序号为 1，也可手动选择测量序号。将扫码枪对准螺栓端面进行扫码，自动生成该螺栓唯一的编号，同时该螺栓与测量任务和序号进行了绑定。再放置探头，探针接触晶片，磁吸固定。点击“测量”，此时会有螺栓预紧力测量结果，接着点击“记录测量”，将该螺栓的测量结果记录到该螺栓对应的序号下，

并显示记录的次数（图 9，图 10），测量完成。

由于螺栓编号与测量任务和序号进行了绑定，下次测量时，直接扫码即可自动跳转到该螺栓的任务组，并定位到该螺栓的序号，同时链接到该螺栓的所有信息。

四、测试结果分析

测试时，记录下测力计标准力值与测量仪测量值（图 11），对比结果如表 1 所示。由表可知，数字螺栓测量误差



图6 扫描二维码



图7 放置超声探头

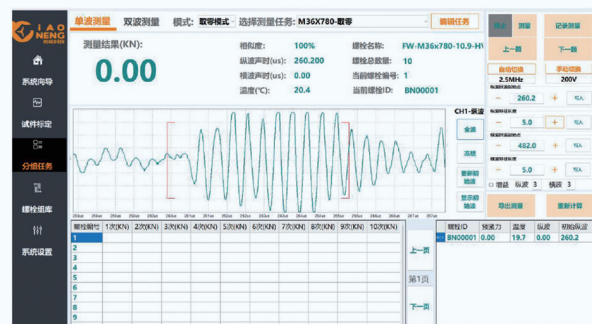


图8 初始信息采集

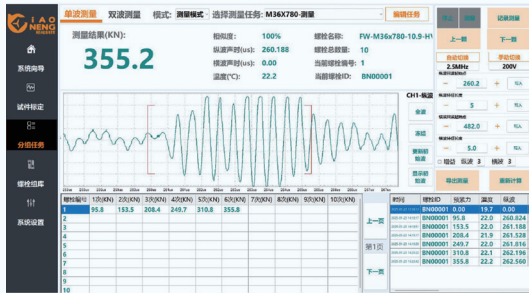


图9 测量界面

时间	螺栓ID	预紧力	温度	纵波
2025-01-23 13:38:13	BN0001	0.00	19.7	0.00
2025-01-23 14:18:17	BN0001	95.8	22.0	260.824
2025-01-23 14:18:51	BN0001	153.5	22.0	261.188
2025-01-23 14:19:17	BN0001	208.4	21.9	261.528
2025-01-23 14:19:59	BN0001	249.7	22.0	261.816
2025-01-23 14:20:22	BN0001	310.8	22.1	262.196
2025-01-23 14:20:42	BN0001	355.8	22.2	262.560

图10 测量结果



图11 测量结果对比

表1 测试结果分析

序号	测力计值 /kN	测量值 /kN	误差 /%
1	98.4	95.8	-2.64
2	153.4	153.5	0.07
3	204.2	208.4	2.06
4	247.8	249.7	0.77
5	310.8	302.5	-2.67
6	360.2	355.8	-1.22

在 ±3% 以内，优于国标《紧固件 轴向应力超声测量方法》(GB/T 43232—2023) 推荐的 ±5% 标准，因此，数字螺栓测量精度较高，结果可靠。

数字螺栓优势分析

本测试以风电机组关键部位螺栓——叶根内六角螺栓为测试对象，使用数字螺栓系统测量，结果准确可靠。同时，内六角螺栓由于带有较大中心孔，探头接触面积较小，使用压电或电磁探头进行双波测量时，都难以获得准确在役预紧力。而数字螺栓由于出厂标配了初始声时，可以直接使用单波测量螺栓在役预紧力，避免了双波测量，因此测量更加方便和可靠。

对数字螺栓而言，磁吸探头方便快捷，不存在信号调试和失真问题，单颗测量时间基本不超过 20 s。以陆上主流风电机型 5 MW 一个叶根 120 颗螺栓为例，测量完 3 个叶根大致需要 3 h，如果以整台风电机组主要螺栓 2000 颗计算，测量完一台大致需要 12 h，采用两人制，一天可测量完一台。传统螺栓运维采用扭矩或拉伸方式，一天一台需要 6~8 人，每年费用 10~20 万元。采用数字螺栓后的成本为：测量仪 15 万元以内，人工费 3~5 万元。相比传统运维，第一年费用基本相同，但以后每年将节约 2/3~3/4 人工成本，除了能够大大节省人力物力，还可实现全检，覆盖面更广，巡检效果更好。

结语

本文介绍了数字螺栓的概念，以及具体的实施方法和步骤，通过数字螺栓智能管理系统及管理方法，将螺栓的预紧力测量纳入到螺栓出厂-工作-报废全生命周期管理中。数字螺栓的主要意义在于：一是通过出厂采集超声初始信息，从而方便后续单波测量，大大降低超声预紧力测量的难度，提高超声测量的普及性。二是可以做到以预紧力检测代替扭矩或拉伸检测，减少人工、降低劳动强度，提高了检测的精确性和针对性。三是通过以检代维可以减少扭矩扳手或拉伸器对螺栓的损伤，提高螺栓连接寿命，降低失效率。总之，数字螺栓的推广将使螺栓进入到数字化时代，符合社会降能降耗、绿色、智能化发展方向。

(作者单位：长沙隼能信息科技有限公司)