

# Exploration and Application of Digital Method for Axial Force of High Strength Bolt

Xinyue Bai

Beijing Tianrun New Energy Investment Co., Ltd., Beijing, 100000, China

## Abstract

Fracture of bolt is a common problem in wind turbine accidents. The axial force of bolts was measured on a wind turbine that had been in operation for 10 years, and the results showed the low value on the flange surface of the tower, close to 0kN, indicating that the omissions in the bolt torque re-tightening scheme. Analyzed the axial force values, the axial force values of the bolts were all within 534kN of the design preload, whether some bolt axial force values distributed below the design preload of 322kN, therefore the detection of the value is more practical for the overhaul and maintenance of the unit. This paper discussed the digital method of the axial force of bolt tightening principle with ultrasonic measurement which could avoid over-repairs and underreporting of failures, and minimize unplanned downtime due to bolt repair and replacement. Meanwhile, it provided an original solution for high-strength bolt operation and maintenance of wind turbines.

## Keywords

bolt tightening; pre tightening force; ultrasonic measurement

## 高强度螺栓轴力数字化方法探讨与应用

白欣越

北京天润新能投资有限公司, 中国·北京 100000

## 摘要

风力发电机组螺栓的疲劳断裂是风机事故中常见问题。对运行10年的某风电机组进行螺栓轴力测量,发现多颗塔筒连接法兰面螺栓测量轴力值低,接近0kN,说明螺栓力矩复拧方案可能存在疏漏。对螺栓组轴力值进行分析,螺栓轴力值都在设计预紧力上偏值534kN以内,但是部分螺栓轴力值却分布在设计预紧力下偏值322kN以下,所以螺栓预紧力值的检测对机组检修和维护工作更有实际意义。论文通过利用数字化检测手段,使用超声波测量螺栓预紧力的方法来测量塔筒法兰螺栓、叶片螺栓的轴力状态,定时监测和跟踪螺栓轴力的变化趋势,最大程度减少塔筒螺栓维修和更换导致的非计划停机时间,为风电机组高强度螺栓维护提出一种新的运维思路。

## 关键词

螺栓紧固; 预紧力; 超声波测量

## 1 引言

风力发电机组中的螺栓联接对机组的可靠运行和安全有着至关重要的影响。当前螺栓紧固以扭矩法为主,其中扭矩系数和螺栓联接组中螺栓残余预紧力(螺栓轴力)有关,可能会威胁机组安全运行。螺栓的疲劳断裂一般都与螺栓预紧力大小或螺栓松动有关。导致螺栓松动的原因较多,如机组运行过程中的振动、高低载荷变化、冲击,以及安装时预紧力偏低、未采取合适的防松措施、装配方法不当、结构设计因素等。倒塔事故的发生往往是由于基础联接螺栓发生了疲劳断裂,而应力过于集中及螺栓承受的交变载荷过高<sup>[1]</sup>。因此,在役机组螺栓轴力大小对于机组安全运行有着重大意义。

论文从螺栓紧固原理、超声波测量轴力原理及测量方式、轴力数据分析等多方面探讨高强度螺栓轴力数字化的工艺及方法,为风电机组高强度螺栓维护提出一种新的运维思路。

## 2 螺栓紧固原理

高强度螺栓紧固一般是通过拧紧螺母实现的,最常用的方法是扭矩法和拉伸法。

### 2.1 扭矩法

扭矩法是风电现场最常见、最经济的紧固方法,螺栓的材料类型、表面处理、制造精度、润滑条件、紧固速度、环境温湿度等因素都会影响紧固过程的摩擦力大小,进而影响螺栓的预紧力。

扭矩法是根据施加扭矩大小和螺栓产生的轴力之间存在一定关系所制定的紧固方法。拧紧力矩的实验公式<sup>[2]</sup>:

【作者简介】白欣越(1997-),女,中国山西太原人,硕士,助理工程师,从事可再生能源研究。

$$T = T_1 + T_2 = \frac{d_2 F \tan(\varphi + \rho)}{2} + \frac{\mu_n F (D_1^3 - D_0^3)}{3(D_1^2 - D_0^2)}$$

$$= \left( \frac{d_2 F \tan(\varphi + \rho)}{2d} + \frac{\mu_n (D_1^3 - D_0^3)}{3d(D_1^2 - D_0^2)} \right) Fd$$

$$= kFd$$

式中：T——施加的扭矩；

$T_1$ ——螺旋副间螺纹的摩擦力矩；

$T_2$ ——螺母支承面上的摩擦力矩；

F——螺栓中产生的预紧力；

$d_2$ ——螺纹中径；

d——螺纹大径；

$\varphi$ ——螺纹升角；

$\rho$ ——螺纹牙距；

$\mu_n$ ——支承面的摩擦系数；

$D_1$ ——六角螺母支承面外径；

$D_0$ ——六角螺母支承面内径；

K——扭矩系数。

其中，K 可以从理论方程和试验方法求得。风力发电机组中螺栓联接的节点，都能通过大量的试验得到。因此可以计算拧紧力矩从而获得最大和最小预紧力的值。当采用扭矩法获得螺栓联接中螺栓的预紧力时，施加扭矩为定值，则预紧力为：

$$F = \frac{T}{Kd}$$

由上述公式可知，在理想情况下，施加的扭矩与螺栓获得的预紧力成正比，通过控制扭矩值大小得到螺栓联接设计的预紧力值。然而在风机实施紧固过程中所受影响的因素比理论公式测试扭矩系数要更加复杂。拧紧螺母的过程实际上是对整个螺栓联接体做功，一部分输入功转变成螺栓的拉长或摩擦损失，另外一些输入功则转化为螺栓扭曲变形、螺栓杆的弯曲、螺母的变形或被联接件的变形等。

风电现场采用扭矩系数 K 的方法进行扭矩值的计算。一般而言，螺纹的精度、材质、表面状况及润滑等条件的不同，会导致 K 值在 0.1~0.5 甚至更宽的范围变化<sup>[3,4]</sup>。德国工程师协会 (VDI) 在 VDI2230 标准中，以拧紧系数  $\alpha_A$  来评定不同紧固方法所获得的预紧力分散度。对于扭矩控制法紧固工艺，VDI2230 描述其拧紧系数  $\alpha_A=1.4\sim 1.6$ ，载荷分散度为  $\pm 17\% \sim \pm 23\%$ <sup>[5]</sup>。

## 2.2 拉伸法

液压拉伸法主要利用液压拉伸器的高压油泵产生的液压力经过高压油管传送到油缸活塞的表面上，通过拉伸器上的拉伸头与被拉伸螺栓螺纹联接而使联接螺栓伸长，直到压力到达设定值后，用扭矩扳手定扭拧紧螺母，使螺母与被紧固件接合面贴合，释放压力完成拉伸<sup>[6]</sup>。多次反复作用，使得螺栓联接组中螺栓残余预紧力分布区间变小。

液压拉伸法在拉伸的过程中只需考虑轴向力，因此螺栓预紧工艺容易控制、实施更可靠，并且可以同时给螺栓组

施加轴向力，均匀压紧被联接件，能够达到预紧力的精确控制。采用液压拉伸法施工，螺栓轴向力的精度主要和液压拉伸器精度、拧紧螺母精度、联接体的回弹量有关。因此，对于使用液压拉伸法安装施工的螺栓，无扭矩系数 K 的要求<sup>[7]</sup>。受回弹的影响，液压拉伸法较适合应用于长径比较大的工况。在 VDI2230 标准中，对于拉伸控制法紧固工艺，没有给出拧紧系数  $\alpha_A$  数值。

## 3 螺栓轴力测量原理

风电场螺栓轴力测量主要依据声弹性，超声波的速度会因材料中的应力而产生微小的变化从而测量螺栓轴向应力和超声波传播速度可以得到螺栓中的应力。超声波在材料中的传播方向会影响声的传播速度，压缩应力的加快和减慢会导致超声波传播速度增加和降低。以已知应力且与被测构件材质与形状相同的构件为应力基准，在现场工况中通常将残余应力纵波和横波检测结合得知构件内部应力的拉压状态和数值，应力拉压状态通常用“+”表示拉伸应力、“-”表示压缩应力。

已知构件材料的零应力状态，被检测材料中纵波和横波传播方向上的应力  $\sigma$  如公式所示<sup>[8]</sup>：

$$\sigma = \frac{T_L^2 T_{S0}^2 - T_S^2 T_{L0}^2}{\epsilon_S T_S^2 T_{L0}^2 - \epsilon_L T_L^2 T_{S0}^2}$$

式中： $\sigma$ ——纵波和横波传播方向上的应力，单位为兆帕；

$T_{L0}$ ——零应力纵波的声时，单位为纳秒；

$T_{S0}$ ——零应力横波的声时，单位为纳秒；

$T_L$ ——有应力纵波的声时，单位为纳秒；

$T_S$ ——有应力横波的声时，单位为纳秒；

$\epsilon_L$ ——纵波声弹性系数，单位为每兆帕；

$\epsilon_S$ ——横波声弹性系数，单位为每兆帕。

## 4 螺栓组轴力数据分析

### 4.1 螺栓组轴力数据分析

对运行 10 年的风电机组进行螺栓轴力进行超声波测量后发现塔筒法兰面部分螺栓测量轴力低，接近 0kN，经检查确认各项设置无异常，推测螺栓实际轴力低，同时其余几颗螺栓情况类似。螺栓轴力如图 1、图 2 所示。为验证测量结果，对其中某颗螺栓的螺母进行敲击，螺母松动可用手拆卸，如图 3 所示。

### 4.2 螺栓组轴力值分布特性

查阅相关数据可知，该 M36 螺栓批次的 K 系数取值为 0.121，标准差为 0.01，根据  $3\sigma$  质量控制原则，可以计算出上偏差拉力值为 534kN（图 4 黄色线）；下偏差拉力值为 322kN（灰色线）；设计预紧力为 402kN（红色线）。

结合图 4、图 5、表 1 可知，该塔筒联接螺栓组总数为 140 颗，其中测量轴力 117 颗，占比 84%。测量的最大轴力值为 511kN，最小轴力值为 161kN。螺栓组轴力都在设计预紧力上偏值 534kN 以内，但是部分螺栓轴力分布在设计预紧力下偏值 322kN 以下。

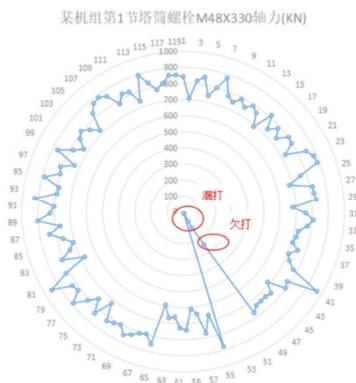


图 1 测量某机组第 1 节塔筒螺栓轴力分布



图 2 现场测量某颗螺栓轴力值低



图 3 用手轻松将螺母松开 (轴力值低的螺栓连接)

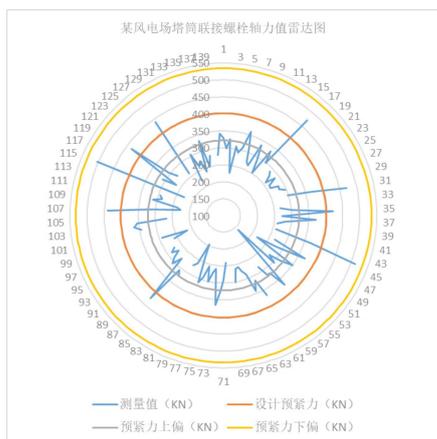


图 4 某风电场塔筒联接螺栓轴力雷达图

表 1 某风电场塔筒联接螺栓组轴力分布特性

测量总数量	140
无效数据量	23
有效数据量	117
有效数据量占比	0.84
轴力最大值 (kN)	511
轴力最小值 (kN)	161
轴力平均值 (kN)	305
设计预紧力 (kN)	402
预紧力下偏 (kN)	322
预紧力上偏 (kN)	534

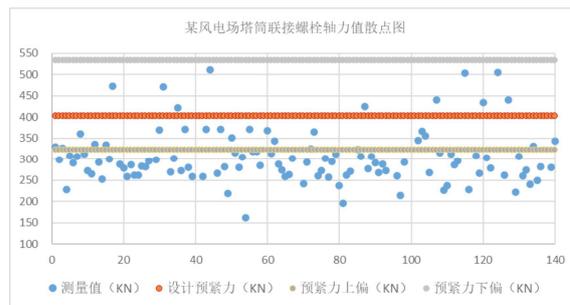


图 5 某风电场塔筒联接螺栓轴力散点图

## 5 螺栓组轴力数据分析

目前风机维护工作主要是对螺栓抽检复拧。需要专业人员使用液压站和液压扳手定期对风机各部位螺栓抽检。例如，按照规定的时间间隔，对法兰面的螺栓按照 90% 或者规定力矩进行校验，一般通过人眼观察螺栓是否有松动。人工定检方式无法了解在役机组螺栓的轴力和轴力变化规律，无法实现螺栓轴力数字化。

通过超声波测量塔筒法兰螺栓、叶片螺栓的轴力状态，能够定时监测和跟踪螺栓轴力的变化趋势，优化塔筒螺栓寿命管理，合理定制螺栓维修和更换计划，避免过度维修和故障漏报，最大程度减少塔筒螺栓维修和更换导致的非计划停机时间。能够实现螺栓维护策略从事后维护或预防性维护升级为预知性维护，进一步优化维护工作的计划和实施，使机组可靠性及经济性达到优化平衡。

## 6 结论和建议

论文通过介绍螺栓紧固的扭矩法和拉伸法，分析了两种方法对螺栓预紧力的实现形式和结果，得知拉伸法对螺栓组中各螺栓获得的预紧力离散更小。同时，通过超声波测量螺栓轴力，可以实现螺栓轴力的数字化，也可实现使用超声波拧紧螺栓，使得拧紧系数  $\alpha_A$  达到 1.05 的最小值。

因此，在役机组的螺栓安全性连接的提高，可以通过超声波更精准的测量螺栓轴力实现，从而实现预知性的维护管理，降低和消除机组潜在安全隐患。

### 参考文献

- [1] 赵海,胡冰.风电机组高强螺栓断裂原因分析[J].风能,2018(3):5.
- [2] 卜炎.螺纹联接设计与计算[M].北京:高等教育出版社,1995.
- [3] 林湖,朱正德,陈强.基于螺栓装配技术中扭矩法与扭矩/转角法比较与应用研究[J].轻型汽车技术,2003(11):14-17.
- [4] 张亮亮,王玉林.扭矩法与扭矩/转角法预紧力的计算与对比研究[J].内燃机与配件,2016(1):7-8.
- [5] Ingenieure V D.Systematic calculation of high duty bolted joints joints with one cylindrical bolt[J]. 2003.
- [6] 吴风和大直径螺栓的液压拉伸预紧[J].重型机械,2001(5):30-31.
- [7] 刘洪海,蔡伟.基于液压拉伸法的风力发电机螺栓紧固技术研究[J].特种结构,2012,29(4):53-55.
- [8] GB/T38952—2020 无损检测残余应力超声体波检测方法[S].