

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.01.015

基于超声波法的风电机组螺栓 预紧力测量与控制研究^{*}

吴 晨

(浙江机电职业技术学院 机械技术系, 浙江 杭州 310053)

摘要:针对风电机组高强螺栓拆卸后,二次使用时螺栓预紧力是否满足设计要求的问题,基于超声波法测量螺栓预紧力技术,采用了一款高精度的小型便携式超声波螺栓预紧力测试仪,对基于扭矩法安装的轮毂与变桨轴承连接位置高强螺栓初次使用和二次使用时的预紧力分布进行了实验测试与分析。比较了实际现场装配中螺栓获取的预紧力与理论计算预紧力的偏差,以及二次使用对螺栓预紧力的影响,提出了用超声波法测量和控制风电机组高强螺栓预紧力的新工艺。研究结果表明:高强螺栓初次使用时,预紧力与理论计算值吻合较好;高强螺栓二次使用时,预紧力平均下降 13% 左右,分散度变化不大,预紧力分布范围仍符合设计要求;在保持施拧扭矩不变或适当提高施拧扭矩的情况下,高强螺栓可二次使用。

关键词:风电机组螺栓;预紧力;扭矩系数;初次使用;二次使用;超声波螺栓预紧力测试仪

中图分类号:TH131;TK83

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)01-0078-05

Measurement and control for pre-tightening force of bolts in wind turbine based on the method of ultrasound

WU Chen

(Department of Mechanical Technology, Zhejiang Institute of Mechanical &
Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China)

Abstract: Aiming at the problem that the pre-tightening force of high-strength bolts in wind turbine whether to meet the design requirements when they are reused for the second time, based on the ultrasonic measuring technique of the bolts' pre-tightening force, a high-precision and portable ultrasonic bolt pre-tightening force tester was used to test the distribution of pre-tightening force between hub and pitch bearing installed by torque method when the bolts were used for the first and second time. The deviation between the pre-tightening force obtained in actual field assembly and by theoretical calculation were compared, and the influence of bolts reused on the pre-tightening force was discussed. A new technique for measuring and controlling the pre-tightening force of high strength bolts in wind turbines by ultrasonic method was proposed. The results indicated that the pre-tightening force obtained from high strength bolts used for the first time is in good agreement with the target value. The pre-tightening force obtained from reused high strength bolts is 13% lower than the target value in average, the distribution range still meet design requirement, and the high-strength bolt can be reused while keeping the twisting torque unchanged or increasing the twisting torque in an appropriate proportion.

Key words: bolts in wind turbine; pre-tightening force; torque coefficient; first use; secondary use; ultrasonic bolt pre-tightening force tester

0 引 言

风力发电机组装配过程中,桨叶螺栓连接、塔筒螺

栓连接、变桨轴承与轮毂螺栓连接等关键位置的零部件均需要通过大六角高强螺栓进行连接,单台机组 M30 规格及以上高强螺栓的使用量高达上千颗。在机

收稿日期:2019-04-29

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2019C01050)

作者简介:吴晨(1982-),女,浙江杭州人,硕士,助理研究员,主要从事风力发电技术、高等职业教育方面的研究。E-mail:88095561@qq.com

组的吊装和运行维护过程中,螺栓拆卸易出现问题^[1-2]。根据 GB/T33628 - 2017 相关规定:基于扭矩法安装高强螺栓,需要保证扭矩系数的平均值和标准差在规定范围内,才能保证扭矩转化为螺栓预紧力的精度满足设计要求^[3-5]。扭矩系数与螺栓螺纹表面处理直接相关,若掌握高强螺栓重复使用时扭矩系数的变化,保证其重复使用时螺栓获得预紧力的精度,高强螺栓的重复使用将成为可能。

随着螺栓预紧力测量技术的发展,超声波测螺栓预紧力技术已经开始运用到实际工程中^[6-7]。

本文将选用 2.0 MW 风电机组的变桨轴承与轮毂的连接位置进行测试,基于超声波测螺栓预紧力技术,研究高强螺栓初次使用和二次使用时螺栓预紧力和扭矩系数的分布情况。

1 高强螺栓扭矩拧紧法

目前,对于大六角高强螺栓预紧的方法主要有扭矩拧紧法、扭矩转角法和液压拉伸法。

其中,扭矩拧紧法在风电行业中广泛使用,该方法在拧紧时,只对一个确定的紧固扭矩进行控制,其原理如图 1 所示。

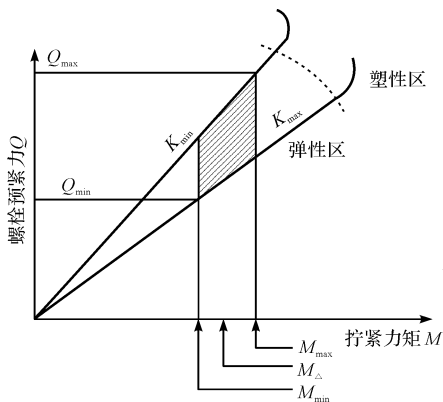


图 1 扭矩拧紧法原理图

扭矩法的基本原理是利用拧紧扭矩与螺栓预紧力的线性关系,在弹性区进行拧紧控制。为了获得较高的安装预紧力精度,需要控制扭矩系数的范围,采用合适的液压扭矩扳手。

采用扭矩拧紧法拧紧螺栓时,拧紧力矩计算公式为:

M = K · Q · d (1)

式中:M— 拧紧力矩,N · m;Q— 预紧力,kN;K— 扭矩系数;d— 螺栓公称直径,mm。

目前,风电行业高强螺栓预紧扭矩拧紧法的安装精度在 ± 15% 左右,一般要求机组关键连接部位高强

螺栓的预紧力分布介于 50% ~ 85% 屈服强度之间;低于 50% 为欠拧,高于 85% 为超拧。使用扭矩拧紧法,风电机组高强螺栓的目标预紧力一般设定在 70% 的屈服强度,结合高强螺栓出厂抽检的平均扭矩系数,计算扭矩扳手的额定施拧扭矩。

2 超声波测螺栓预紧力技术

超声波测螺栓预紧力是一种依据声弹性原理的间接测量方法^[8],通过获得螺栓轴向预紧力与超声波在螺栓中传递时间的变化关系,实现螺栓预紧力的测量。

超声波法测螺栓预紧力有以下优点:(1) 可以检测螺栓上的绝对应力;(2) 可对已经使用的螺栓进行应力检测;(3) 扭矩对应力检测不造成影响。国内外研究者针对超声波法检测螺栓预紧力做了大量的研究,并开发了多款高精度的小型便携式螺栓预紧力测试仪,并在实际工程中得到运用^[9-10],其测试精度在 ± 2% 左右。

螺栓预紧力 Q 与伸长量 ΔL 的关系为:

Q = ΔL / L · E · A_s (2)

式中:Q— 预紧力,kN;L— 螺栓夹持长度,mm;ΔL— 螺栓变形伸长量,mm;E— 弹性模量,MPa;A_s— 螺栓应力截面积,mm²。

3 螺栓预紧力测量与分析

3.1 实验对象

本文选用 2 MW 风电机组轮毂与变桨轴承连接螺栓进行高强螺栓预紧力测量与分析,选用 90 颗同一批次号的螺栓 M36X335 - 10.9 - dc71 (GB/T 5782 - 2000)。

该批次螺栓连接副扭矩系数实验出厂检验数据如表 1 所示。

表 1 螺栓连接副扭矩系数出厂检验

螺栓序号	抽样检测扭矩系数		
	实测值	平均值	标准偏差
1	0.132 1	0.130	0.002 5
2	0.129 8		
3	0.126 8		
4	0.134 5		
5	0.130 2		
6	0.128 9		
7	0.133 5		
8	0.131 6		

如表 1 所示:按相关标准要求抽检的 8 颗螺栓扭矩系数均在 0.12 ~ 0.14 之间,扭矩系数符合设计要

求;平均扭矩系数为 0.130,标准偏差 0.002 5,小于标准要求值 0.01,扭矩系数标准偏差符合要求。

该连接位置设计预紧力为螺栓材料屈服强度的 70%,即:

$$Q_m = 0.7 A_s \cdot \sigma_s \quad (3)$$

式中: Q_m —目标预紧力,kN; A_s —螺栓应力截面积, mm^2 ; σ_s —螺栓材料屈服强度,MPa。

已知本实验螺栓应力截面积 $A_s = 816.7 \text{ mm}^2$,螺栓材料屈服强度 $\sigma_s = 940 \text{ MPa}$,计算可得目标预紧力 $Q_m = 538 \text{ kN}$ 。再由式(1)可计算得到该位置高强螺栓拧紧扭矩为 $2\,520 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

3.2 实验步骤

本研究选用的连接螺栓位于轮毂与变桨轴承处,共计 90 颗(编号为 1~90)。

连接螺栓位置及安装测量如图 2 所示。

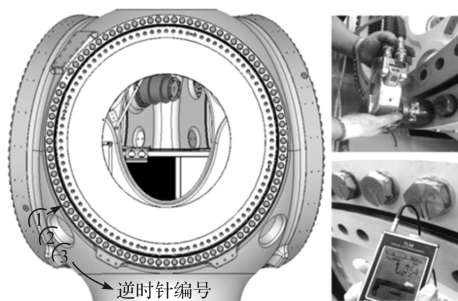


图 2 连接螺栓位置及安装测量

螺栓采用全涂抹的方式,使用型号为 LPS04110 的二硫化钼。先用手动扭矩扳手依次拧紧 90 颗螺栓,再用 2 个液压扭矩扳手(仪器精度 $\pm 3\%$)依次按照 1/3 额定扭矩、2/3 额定扭矩和 100% 额定扭矩分 3 次对角拧紧;完成 100% 额定扭矩拧紧后,立即用超声波测试仪(仪器精度 $\pm 2\%$)依次测量 90 颗螺栓预紧力。测试完成后,将 90 颗螺栓拆下,并清洗螺栓螺纹和垫片上的二硫化钼,晾干后重复以上实验步骤,进行该组螺栓二次安装和预紧力测试。

3.3 实验结果及分析

本文分别对首次使用和二次使用后的螺栓进行了预紧力测试。

首次使用后 90 颗螺栓预紧力统计直方图如图 3 所示。

二次使用后 90 颗螺栓预紧力统计直方图如图 4 所示。

由图(3,4)可知:两组测量数据均服从正太分布,说明 90 颗螺栓预紧力的测量样本具有随机性。

(1)首次使用时,90 颗螺栓预紧力平均值 553 kN,

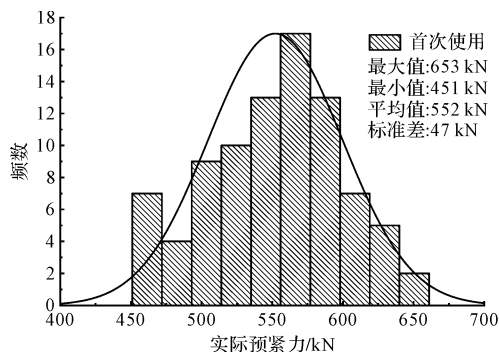


图 3 首次使用螺栓预紧力分布统计直方图

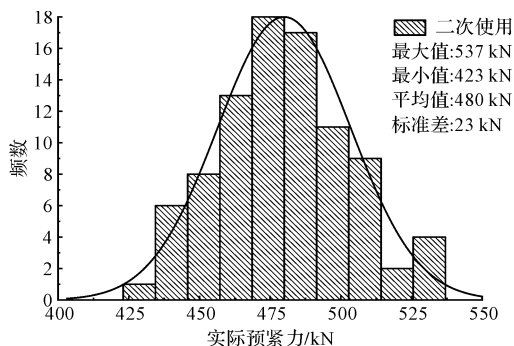


图 4 二次使用实验螺栓预紧力分布统计直方图

稍高于目标预紧力 538 kN,最小值和最大值分别为 451 kN 和 653 kN,介于螺栓材料屈服强度的 60% ~ 85% 之间,符合设计要求;

(2)二次使用时,90 颗螺栓预紧力平均值 480 kN,低于目标预紧力 538 kN 约 10%,最小值和最大值分别为 423 kN 和 537 kN,介于螺栓材料屈服强度的 55% ~ 70% 之间,也符合设计要求。

90 颗螺栓首次和二次使用螺栓扭矩系数分布的比较如图 5 所示。

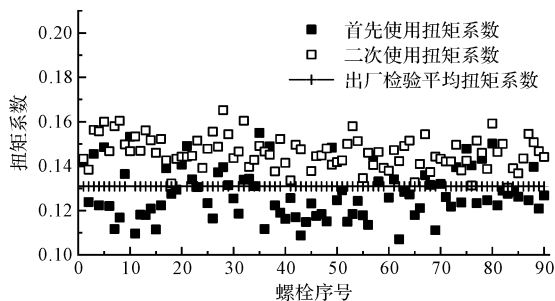


图 5 首次和二次使用螺栓扭矩系数分布的比较

由图 5 可以看出:二次使用时,用相同大小的扭矩对螺栓进行预紧时,螺栓所获得的预紧力呈整体下降趋势,计算得到的螺栓扭矩系数呈整体增大趋势。根据螺栓预紧力和扭矩系数的分布离散性可知,本次实验条件下,二次使用时未导致螺栓扭矩系数的离散性

增大。

由于螺栓初次使用前扭矩系数的检验是随机抽检同一批次螺栓中的 8 颗,为了比较实际安装时螺栓扭矩系数与出厂检验扭矩系数的差异,笔者在轮毂与变桨轴承连接螺栓中选取 9 组螺栓(每组 8 颗),每组 8 颗螺栓在螺栓安装圆周面呈米字形布置。

实验螺栓编号如表 2 所示。

表 2 实验螺栓分组

分组	螺栓编号							
组 1	1	12	23	34	45	56	67	78
组 2	2	13	24	35	46	57	68	79
组 3	3	14	25	36	47	58	69	80
组 4	4	15	26	37	48	59	70	81
组 5	5	16	27	38	49	60	71	82
组 6	6	17	28	39	50	61	72	83
组 7	7	18	29	40	51	62	73	84
组 8	8	19	30	41	52	63	74	85
组 9	9	20	31	42	53	64	75	86

本研究分别测量圆周内每颗螺栓首次使用和二次使用后的扭矩系数,按组别分仓计算平均扭矩系数。

首次使用和二次使用后各分组螺栓平均扭矩系数如图 6 所示。

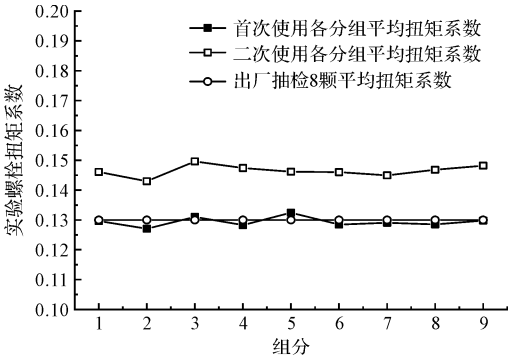


图 6 首次使用和二次使用各分组平均扭矩系数

图 6 中,首次使用时,各分组螺栓平均扭矩系数介于 0.127 ~ 0.131 之间,满足扭矩系数介于 0.12 ~ 0.14 之间的要求,与出厂抽检 8 颗螺栓扭矩系数 0.130 偏差较小;各组螺栓扭矩系数标准差介于 0.008 ~ 0.010 之间,高于出厂抽检 8 颗螺栓扭矩系数标准差 0.002 5,但满足 ≤ 0.010 的要求。

实际安装时,螺栓扭矩系数与出厂抽检螺栓扭矩系数存在偏差,主要原因为:(1) 出厂抽检螺栓扭矩系数是在实验室条件下进行,测试的环境温度、扭矩的加载方式等与现场实际安装时存在差别;(2) 施拧工具和测量仪器的精度误差。总体而言,首次使用时,厂内安装时测试的螺栓扭矩系数与出厂抽检扭矩系数相差不大。

螺栓二次使用时,各分组螺栓平均扭矩系数介于 0.142 ~ 0.149 之间,较首次使用时扭矩系数平均增大 13% 左右;二次使用后各组螺栓扭矩系数标准差介于 0.005 ~ 0.008 之间,螺栓二次使用后扭矩系数超出出厂检验要求扭矩系数 0.12 ~ 0.14 的范围,但超出不大,扭矩系数标准差仍满足 ≤ 0.010 的要求。

根据上文计算得到的二次使用螺栓预紧力测试数据可知,90 颗螺栓二次使用后,预紧力仍介于螺栓材料屈服强度的 55% ~ 70% 之间,满足设计要求。

4 结束语

本文将超声波法测螺栓预紧力技术应用到风电机组关键连接部位高强螺栓的预紧力测量中,利用高精度便携式超声波螺栓预紧力测试仪,完成了风电机组轮毂与变桨轴承连接螺栓在安装过程中螺栓预紧力的精确测量与控制;基于实际装配中的螺栓预紧力和扭矩系数的实验结果,得出以下结论:

- (1) 高强螺栓首次使用时,螺栓扭矩系数较为稳定,与出厂抽检扭矩系数相近,螺栓获得的预紧力基本以目标预紧力(70% 屈服强度)为对称轴,呈正态分布,预紧力分布范围符合设计要求;
- (2) 高强螺栓二次使用时,螺栓扭矩系数整体增大 13% 左右,扭矩系数分散度受二次使用影响不大,螺栓获得的预紧力仍呈正态分布趋势,预紧力整体低于目标预紧力,预紧力分布范围仍符合设计要求,但预紧力测试最小值已接近设计要求下限值;
- (3) 根据相关要求,在保持施拧扭矩不变或适当提高施拧扭矩的情况下,高强螺栓可进行 1 次重复使用。

若要对高强螺栓进行多次重复使用,首先要对螺栓进行扭矩系数抽检,根据实测的扭矩系数及其标准差,衡量调整施拧扭矩后螺栓获得的预紧力是否满足设计要求。

参考文献 (References):

[1] 王忠锋,余 泉. 风电机组高强螺栓试验与安装技术总结[J]. 风能,2018(1):76-79.

[2] 谷小辉,徐 帆,赵少伟,等. 风电机组螺栓拧紧方法及预紧力控制分析[J]. 风能,2012(10):92-96.

[3] 何贺松. 风力发电机组螺栓选用及预紧力控制浅析[J]. 机械制造,2015,53(2):48-51.

[4] 魏 军. 高强度螺栓失效研究与扭矩系数测定[D]. 保定:华北电力大学机械工程学院,2014.

[5] ZOU Q, SUN T S, NASSAR S A, et al. Effect of lubrica-

- tion on friction and torque-tension relationship in threaded fasteners[J]. **Tribology Transactions**, 2007,50(1):127-136.
- [6] 李 光,莫亚梅,吴 努. 螺栓轴向应力测量技术的研究概况及展望[J]. 南通大学学报:自然科学版,2009,8(3):67-71.
- [7] JHANG K Y, QUAN H H, HA J, et al. Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement[J]. **Ultrasonics**, 2006,44(8):1339-1342.
- [8] 贾 雪,王雪梅,甘文成,等. 声弹性效应螺栓轴向应力标定试验研究[J]. 中国测试,2018,44(3):23-27.
- [9] 张 俊,顾临怡,钱筱林,等. 钢结构工程中高强度螺栓轴向应力的超声测量技术[J]. 机械工程学报,2006,42(2):216-220.
- [10] 苏凤宇,王大为,寇春荣. 浅析一种螺栓预紧力检测的新方法在风力发电机组中的应用[J]. 农村牧区机械化,2011(2):39-40.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

吴 晨. 基于超声波法的风电机组螺栓预紧力测量与控制研究[J]. 机电工程,2020,37(1):78-82.

WU CHen. Measurement and control for pre-tightening force of bolts in wind turbine based on the method of ultrasound[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020,37(1):78-82.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 72 页)

(3)溢流阀开启压力增大,液压缸位移增大,液压缸速度平滑性不变;降幅增大,液压缸无杆腔压力波动程度有所增加。

参考文献(References):

- [1] 张旭辉. 一种新型电液控制型断带抓捕器的研制[J]. 机床与液压,2012,40(16):1-3.
- [2] 庞晓旭,寇子明,李军霞. 断带抓捕液压压射回路数值分析与试验研究[J]. 矿山机械,2015,43(5):65-70.
- [3] 赵志强,刘同冈,徐昌盛,等. 带式输送机全断面断带抓捕器设计[J]. 煤矿安全,2015,46(8):96-98.
- [4] LEI H M, TIAN G Y. Broken wire detection in coated steel belts using the magnetic flux leakage method[J]. **Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**, 2013,55(3):126-131.
- [5] MA H W, LI D S, ZHANG X H, et al. Dynamic simulation analysis of belt rupture for belt conveyor[J]. **Applied Mechanics & Materials**, 2013, 313-314(76):1120-1124.
- [6] 曹亚光,尹文军. 液压马达驱动断带抓捕系统仿真研究[J]. 煤矿安全,2017,48(9):130-133.
- [7] 郭 峰,李树强. 一种上运带式输送机及其断带抓捕器[J]. 煤矿现代化,2018(3):9-10.
- [8] 杨会伟,陶云芳,路国运. 输送带全断面断带抓捕器抓捕过程研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(10):136-140.
- [9] 刘晓瑞,马 利,马晓华. 新型断带抓捕液压系统研究[J]. 液压与气动,2016(7):67-71.
- [10] 葛雨霞. 带式输送机柔性断带抓捕装置的设计[J]. 煤矿机械,2014,35(7):13-14.
- [11] 中国矿业大学. 一种下运带式输送机断带抓紧吸能装置及其吸能方法[P]. 中国:201410224274.9,2014-10-22.
- [12] YIN Wen-jun, YANG Yin-wei, WANG Zhan-yu, et al. Parameters optimization of a hydraulic buffer system for belt arrester in downward belt conveyors[J]. **Mathematical and Computational Applications**, 2016,21(42):1-13.
- [13] 曹亚光. 断带抓捕液压系统的液压冲击研究[J]. 机床与液压,2018,46(4):101-103.
- [14] 王利锋. 基于 AMESim 断带抓捕缓冲系统仿真研究[J]. 液压与气动,2018(4):101-104.
- [15] 成志锋. 下运带式输送机断带抓捕液压缓冲系统研究[J]. 工矿自动化,2019,45(3):1-10.
- [16] 李 博. 带式输送机断带捕捉过程的动态仿真[D]. 西安:西安科技大学机械工程学院,2015.
- [17] 张 钺. 新型带式输送机设计手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
- [18] 陈伟林. 电液控制型带式输送机断带抓捕器研制[D]. 西安:西安科技大学机械工程学院,2011.

[编辑:周昱晨]