

复合材料结构中螺栓拧紧的有限元仿真研究

黄稳¹,杜伟¹,凡志磊¹,葛恩德¹,安鲁陵²,王楚凡²

(1. 中国商飞上海飞机制造有限公司,上海 201324; 2. 南京航空航天大学,江苏 南京 210016)

摘 要:目前在飞机复材结构的装配过程中,主要通过转矩法来拧紧螺栓。转矩法易受到施工现场工艺因素的影响造成预紧力的偏差。碳纤维/环氧树脂复合材料为各向异性材料,当预紧力偏大时容易产生应力集中现象。针对复合材料结构中螺栓拧紧过程中的问题,研究有限元建模与分析的思路。通过参数化手段实现了对螺纹紧固件六面体网格有限元模型的建立,仿真结果与试验对比误差在4%以内。通过极坐标处理复材表面的应力分布,孔周区域呈现拉伸与压缩两个部分,交界区容易诱发损伤的产生。

关键词:螺栓拧紧;预紧力;复合材料;有限元

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)06-0127-05

Finite Element Simulation Research on Bolt Tightening of CFRP

HUANG Wen¹, DU Wei¹, FAN Zhilei¹, GE Ende¹, AN Luling², WANG Chufan²

(1. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In the assembly process of aircraft CFRP structure, the present bolts tightening is done mainly by torque method, which is easily influenced by the process factors, leading to preload deviation, while CFRP, being anisotropic material, is apt to cause stress concentration when the preload is too large. This paper probes the clues to finite element modeling and analysis for the bolts tightening process of CFRP structures. Parametric methods are applied to establish a hexahedral mesh finite element model for threaded fasteners, whose comparison error between the simulation results and the test is within 4%. The stress distribution on the surface of the composite laminate was processed by polar coordinates, and it is found that the area around the hole shows two parts of tension and compression, and the junction area may induce damage.

Keywords: bolt tightening; preload; CFRP; FEA

0 引言

碳纤维/环氧树脂基复合材料结构在飞机设计中已经获得了大量运用,并且螺栓连接作为主要的机械连接形式,在飞机复合材料的连接中起到关键承力作用^[1]。目前有限元仿真手段被广泛地应用于复合材料连接强度、疲劳方向的研究中,而相关研究表明螺栓在拧紧过程中受拧紧工艺因素影响,预紧力存在一定的偏差^[2]。复合材料为各向异性材料,预紧力较大时表面容易出现应力集中现象。因此控制预紧力的数值十分重要。

当前对螺栓装配过程的有限元仿真大多忽略了螺栓的螺纹结构,以降低建模难度,减少计算量^[3]。然而在螺栓拧紧过程中,螺纹结构对最终预紧力的形成至关重要,螺纹间的摩擦效应则是影响最终拧紧完成后预紧力偏差大小的主要因素之一^[4]。因此针对拧紧过程的有限元仿真十分必要,需要对螺栓结构进行细致的建模,考虑螺纹结构及螺纹间摩擦效应对预紧力的影响。

本文通过24组螺栓拧紧试验获得预紧力结果,然后将有限元模型的结果与试验结果进行对照,以验证有限元

计算模型的可靠性。

1 仿真方法

首先对转矩法原理进行分析,分析导致预紧力产生偏差的主要变量。目前在飞机复材结构的装配过程中,主要依赖于转矩法所建立的转矩-预紧力对应关系,即

$$T = KFD \quad (1)$$

式中: T 为拧紧转矩; K 为转矩系数; F 为目标预紧力; D 为螺栓的公称直径。

文献[4]认为转矩 T 在驱动紧固件转动拧紧时,一部分转矩需要克服紧固件支撑端面与被连接件端面的摩擦,一部分转矩需要克服螺纹之间的摩擦,剩余的转矩则为连接结构提供了预紧力,如式(2)所示。

$$T = T_p + T_l + T_b \quad (2)$$

式中: T_p 为作用于螺纹牙的转矩; T_l 为螺纹间摩擦转矩; T_b 为支撑端面摩擦转矩。

在德国标准VDI 2230^[5]中该公式可以具体表达为

$$T = F(0.16p + 0.58\mu_l d_2 + 0.5\mu_b d_u) \quad (3)$$

式中: p 为螺距; d_2 为螺纹中径; d_u 为支撑端面摩擦转矩的等效直径; μ_l 为螺纹摩擦系数; μ_b 为支撑面摩擦系数。

在 ISO 16047^[6]中提出了摩擦系数的简化公式,假定螺纹摩擦系数 μ_t 与支撑面摩擦系数 μ_b 一致,用总摩擦系数 μ_m 来评估螺栓螺母在拧紧时总体的摩擦行为^[2]。拧紧转矩与总摩擦系数可以表示为

$$T=F(0.16p+0.58\mu_md_2+0.5\mu_md_u) \tag{4}$$

$$\mu_m=\frac{\frac{T}{F}-0.16p}{0.58d_2+0.5d_u} \tag{5}$$

由此可见,根本上是摩擦决定了转矩-预紧力之间的对应关系。

根据式(4),变量 T 与 μ_m 共同影响了最终输出 F 的大小。因此后文将从 T 与 μ_m 两个角度,分析不同拧紧工况对 T 与 μ_m 的影响,从而进一步揭示拧紧工况对预紧力值的影响规律。

2 螺栓拧紧试验

2.1 试验设计

试验件如图 1 所示,拧紧试验平台如图 2 所示,组成单元测量精度如表 1 所示。试验对象为 NAS6705 与 NASM1805。

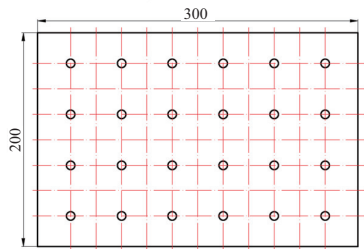


图 1 200×300 mm 复材材料层压板试样

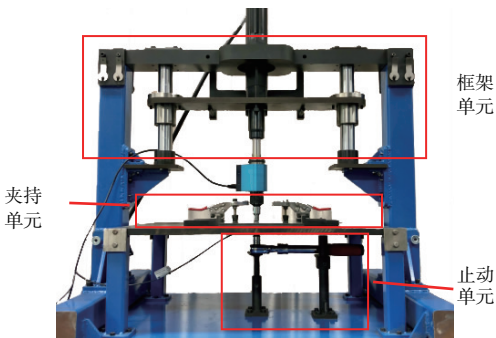


图 2 立式螺栓拧紧试验平台

表 1 组成单元测量精度

序号	名称	型号	精度等级/%
1	拧紧轴	QST62-350CT-T50-L152-H19	±2.5
2	转矩传感器	0301 型	0.1
3	压力传感器	K-180	±1

DOE 试验设计是一门由科学试验和数据分析方法相结合的理论^[7]。本文结合飞机装配现场工况选取了拧紧转速(A)、螺纹表面保持原样(B)、拧紧部位(C)、贴合面密封(D)4种工艺因素来建立试验矩阵。拧紧转速主要考虑 20 r/min 与 200 r/min 两种情况;螺纹表面考虑保持原样(Y)与经擦拭(N)两种情况;复材试样贴合面考虑涂覆密封胶(Y)与不涂覆密封胶(N)两种情况;拧紧部位考虑拧紧螺母与螺栓两种情况。

建立 4 因素 2 水平的试验矩阵,共计 24 组。试验的目标拧紧转矩为 18.6 N·m,拧紧后的预紧力结果如表 2 所示。

表 2 拧紧试验与有限元仿真结果对比

序号	A/(r/min)	B	C	D	T/(N·m)	T _r /(N·m)	F/N			μ_m
							试验结果	仿真结果	误差/%	
1	20	Y	螺母	Y	18.1	15.1	22 264.5	21 382.3	3.96	0.055
2	20	N	螺栓	Y	18.4	14.4	15 861.8	15 477.6	2.42	0.081
3	20	N	螺栓	Y	18.4	14.4	14 186.1	13 878.0	2.17	0.093
4	20	N	螺母	N	17.8	14.8	13 772.3	13 351.2	3.06	0.097
5	20	N	螺母	N	18.1	15.1	14 301.8	13 810.6	3.43	0.095
6	200	Y	螺栓	Y	17.8	13.8	17 740.5	17 343.2	2.24	0.067
7	200	N	螺栓	N	18.9	14.9	15 940.5	15 567.9	2.34	0.084
8	200	N	螺栓	N	18.6	14.6	17 131.5	16 701.0	2.51	0.075
9	20	N	螺栓	Y	18.1	14.1	14 394.0	13 860.3	3.71	0.089
10	20	Y	螺栓	N	18.2	14.2	11 032.0	10 611.9	3.81	0.123
11	20	Y	螺母	Y	18.4	15.4	21 933.8	21 162.6	3.52	0.057
12	200	N	螺栓	N	18.3	14.3	20 946.8	20 828.3	0.57	0.056
13	200	Y	螺栓	Y	18.6	14.6	18 036.8	17 745.8	1.61	0.070
14	20	N	螺母	N	17.9	14.9	17 769.8	17 228.8	3.04	0.072

续表2

序号	A/(r/min)	B	C	D	T/(N·m)	T _r /(N·m)	F/N			μ_m
							试验结果	仿真结果	误差/%	
15	200	Y	螺母	N	18.6	15.6	21 589.5	20 898.3	3.20	0.059
16	20	Y	螺栓	N	18.1	14.1	14 215.5	14 155.8	0.42	0.090
17	200	N	螺母	Y	19.3	16.3	23 820.8	23 138.3	2.87	0.055
18	200	Y	螺母	N	18.0	15.0	18 658.5	17 986.7	3.60	0.068
19	200	Y	螺母	N	18.3	15.3	21 350.3	20 510.1	3.94	0.059
20	200	N	螺母	Y	18.6	15.6	23 532.8	22 768.5	3.25	0.053
21	20	Y	螺栓	N	17.9	13.9	14 027.3	13 669.5	2.55	0.090
22	20	Y	螺母	Y	17.7	14.7	22 575.0	21 715.3	3.81	0.052
23	200	Y	螺栓	Y	18.7	14.7	14 667.0	14 462.3	1.40	0.091
24	200	N	螺母	Y	19.1	16.1	23 653.5	22 788.1	3.66	0.055

为了避免实验中自锁螺母拧紧过程产生的自锁转矩 T_{lock} 对转矩法计算结果的影响,使用式(6)进行处理^[8], T_r 为参与计算的转矩。

$$T_r = T - T_{lock} = KFD \quad (6)$$

2.2 预紧力的偏差情况

根据试验结果,在 $18.6\text{ N}\cdot\text{m}$ 目标转矩下,预紧力的范围为 $[11\ 032\text{ N}, 23\ 820.8\text{ N}]$ 。在设计试验矩阵时,4、5、14组为正常拧紧工况。因此将4、5、14试验组视为正常拧紧工况下3组重复试验,测得其平均预紧力 F 为 $15\ 281.3\text{ N}$ 。

由于拧紧试验是基于转矩法,因此直接将 $15\ 281.3\text{ N}$ 近似为目标预紧力。试验中的最大预紧力为 $23\ 820.8\text{ N}$,相比目标预紧力存在55.8%的偏差。

示;将一个螺距内的螺纹进行多次复制,便可以获得整段螺纹结构模型,螺母处内螺纹同理,最终模型如图4所示。

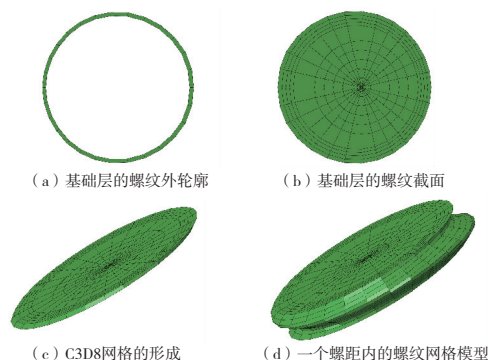


图3 螺纹网格模型建立的过程

3 拧紧过程的有限元仿真

3.1 参数化紧固件模型的建立

在以往一些带螺纹升角的螺栓有限元模型中,通常采用Hypemesh软件来进行网格的划分。由于螺纹紧固件中螺纹升角的存在,导致螺纹有限元模型较为复杂,网格划分较为困难,且多为C3D4四面体网格^[4]。C3D4型的线性四面体网格计算精度不高,并不适用于模拟螺栓拧紧的过程以及预紧力的计算,相对而言C3D8型的六面体网格计算精度更高,且结构较为简单,应当尽量通过六面体网格对螺纹结构进行划分。

本文参考FUKUOKA T的螺纹六面体网格划分方法^[9],进行简化处理,实现了对螺纹紧固件的参数化建模。首先根据机械设计中对于螺纹轮廓的定义,计算出螺纹外轮廓的节点坐标,如图3(a)所示;然后按比例将轮廓节点坐标向轴心缩小,如图3(b)所示;根据角度与螺纹节距的关系将截面进行旋转堆叠,然后按C3D8网格的节点排布方式为节点编号排序,获得一层C3D8网格模型,如图3(c)所示;将该层网格模型按照角度与螺纹节距关系继续旋转堆叠,获得一个节距内的螺纹模型,如图3(d)所

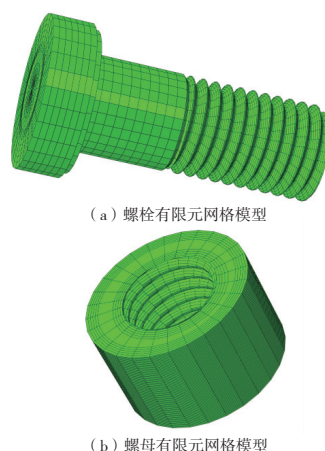


图4 螺栓螺母有限元网格模型

3.2 接触属性与边界条件设置

从计算精度以及节约计算资源的角度考虑,法向接触算法选择增广拉格朗日法,切向的接触算法选择罚函数。对于接触面间的相对运动,在螺纹间与端面间需要采用有

限滑移公式来描述接触面之间发生的大位移。而其余接触面之间在拧紧过程中基本不会发生较大的相对位移,相对滑动很小,从节省计算代价的角度考虑在其余接触面中选用小滑移公式进行设置。基于前文中对于总摩擦系数 μ_m 的假设,螺纹间摩擦系数与端面的摩擦系数相等,由此将 μ_m 的值分别带入二者的切向罚函数设置中,其余接触面的摩擦系数均设置为0.1^[10],总体接触设置如图5所示。

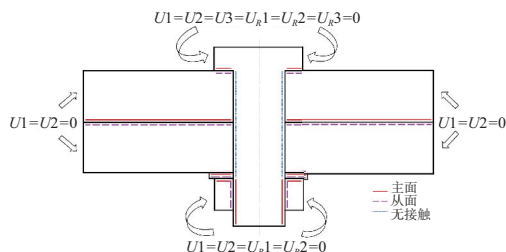


图5 连接件接触关系与边界条件设定示意图

为了模拟连接结构的实际拧紧过程,对于复合材料试样约束其在水平面内 $U1$ 与 $U2$ 向的自由度防止拧紧过程中旋转。对于螺栓螺母,旋转端在拧紧过程中会有轴向的移动,约束其在 $U1$ 、 $U2$ 、 U_R1 与 U_R2 的自由度,通过 U_R3 方向施加拧紧转矩进行拧紧;非旋转端在拧紧过程中几乎不产生运动,约束其6个方向的自由度。对于垫圈,不考虑其与复合材料之间的相对旋转运动,因此约束其在 $U1$ 、 $U2$ 、 U_R3 上的自由度。

3.3 计算结果对比

为了验证通过转矩与摩擦系数两个参量在有限元中模拟拧紧工艺因素对预紧力影响的可行性,在有限元中对24组拧紧试验依次进行仿真。根据表2中试验处理获得的数据,将有效转矩 T_r 、总摩擦系数 μ_m 作为有限元计算的输入参量,同时还需考虑拧紧时紧固件的尺寸结构影响,将拧紧部位作为边界条件变量一并纳入考量。24组仿真结果与试验结果对比如表2所示。

以预紧力的试验结果作为基准,计算仿真获得的预紧力误差。对比可以发现仿真获得的预紧力误差整体都控制在4%以内,当计算转矩 $T_r = 14.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、总摩擦系数 $\mu_m = 0.090$ 时,仿真误差最小为0.42%;当计算转矩 $T_r = 15.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、总摩擦系数 $\mu_m = 0.055$ 时,仿真误差最大为3.96%。由此可说明有限元模型总体可靠。

3.4 复材表面应力分析

对预紧力偏差最大的情况,即试验17中预紧力为23 820.8 N、有限元仿真中预紧力为23 138.3 N的情况展开分析,与试验结果相比有限元计算结果存在2.87%的误差。

对螺母端复材表面与螺栓头端复材表面的平面应力情况进行分析。沿复材板的孔边径向提取5段圆周路径上的64处节点的应力值,绘制角度-应力曲线。将螺母端复材板的孔边曲线即距孔圆心半径为3.97 mm、5.485 mm、7.00 mm、8.5 mm、10 mm的圆周路径分别记为Nut-1、Nut-2、Nut-3、Nut-4、Nut-5,螺栓端同理,如图6所示,并以虚线为起始顺时针提取应力值。为了更加直观

地对比拧紧时复材表面不同区域的应力变化趋势,将复材局部直角坐标系下的 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 应力分量转化到极坐标系之下,得到径向应力分量 σ_r 、周向应力分量 σ_θ 、径向与轴向的切向应力分量 $\tau_{r\theta}$,具体转化公式如下:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (8)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (9)$$

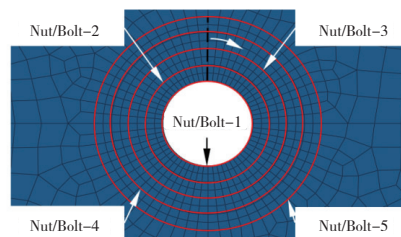


图6 复材表面应力提取路径

对于螺栓头端复材的表面径向应力 σ_r ,如图7(a)中1、2处的圆周路径整体为负值,呈受压状态;1处圆周路径的压应力峰值为488.26 MPa,要大于2处的圆周路径的压应力峰值457.21 MPa。3、4、5处的圆周路径整体为正值,呈受拉状态,3处的圆周路径拉应力峰值为326.16 MPa,大于4、5处的圆周路径拉应力峰值266.13 MPa与169.84 MPa。

对于螺栓头端复材的表面周向应力 σ_θ ,如图7(c)所示,其压应力与拉应力的分界情况与径向应力 σ_r 基本一致。1处圆周路径的压应力峰值为477.65 MPa,要大于2处的圆周路径的压应力峰值447.09 MPa,压应力峰值出现的角度并不一致;3处的圆周路径拉应力峰值为346.99 MPa大于4、5处的圆周路径拉应力峰值285.79 MPa与188.25 MPa。

对于螺母端复材表面的径向应力 σ_r ,如图7(b)中1、2处的圆周路径整体为负值,主要呈受压状态;4、5处的圆周路径整体为正值,呈受拉状态。相比螺栓端复材表面的径向应力,整体应力水平出现了显著降低;3处圆周路径的应力曲线整体处于0刻度线附近;孔边1处圆周路径的压应力水平相比2处整体所有降低。螺母端1、2处的径向压应力峰值相比螺栓端分别下降了57.1%与41.1%;3、4、5处的径向拉应力峰值相比螺栓端分别下降了92.8%、46.4%与49.5%。

对于螺母端复材表面的周向应力 σ_θ ,如图7(d)所示,其压应力与拉应力的分布情况与径向应力 σ_r 基本一致。螺母端1、2处的周向压应力峰值相比螺栓端分别下降了53.1%与53.2%;3、4、5处的周向拉应力峰值相比螺栓端分别下降了85.0%、41.5%与43.5%。

根据上述分析可以发现,从径向上看半径为3.97 mm到10 mm的圆周路径中,复材板表面应力变化趋势并不一致。总体来看,由于复材板孔周受到紧固件端面的挤压而易产生下陷趋势,而造成螺栓头凸台对复材压痕以外的圆周路径4、5整体呈受拉趋势;而靠近孔边区域的圆周路

径1,2上由于受到孔边外形的约束,材料在下陷过程中易呈现堆积状态,从而造成整体呈受压的趋势。对比螺栓头端与螺母端的平面应力情况,螺母端垫圈的存在极大程度

上减弱了圆周路径3上的拉应力峰值,并改善了复材表面整体的应力水平,减缓了应力集中的趋势。

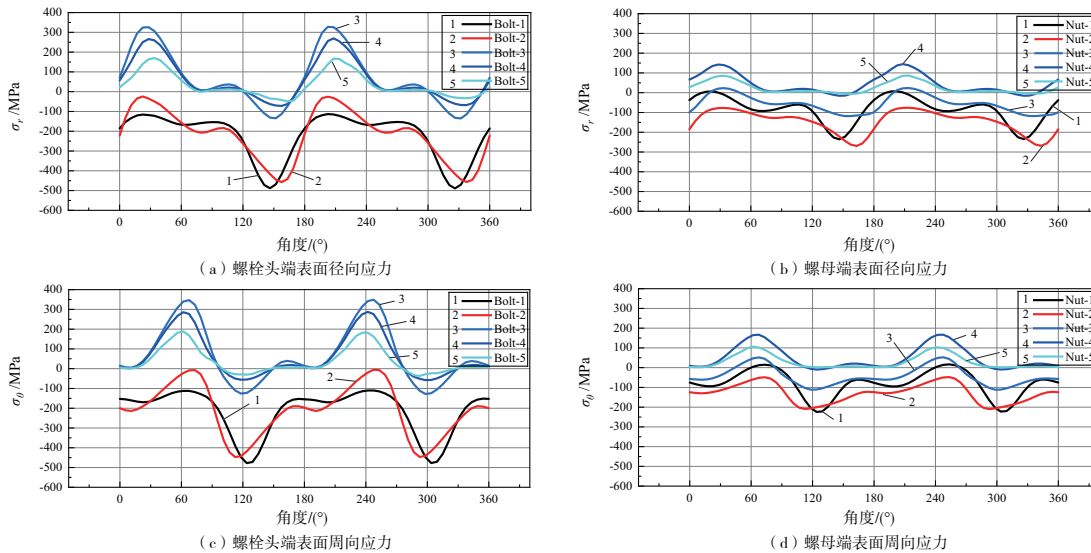


图7 复材板孔圆周路径上的径向与周向应力

4 结语

1)从理论角度进行分析,说明拧紧转矩与摩擦系数是影响转矩法拧紧后预紧力大小的主要参数。将拧紧转矩与摩擦系数作为变量输入有限元模型中,以此模拟螺栓的拧紧过程,计算预紧力的大小。

2)精简了FUKUOKA T所提出的螺纹六面体网格划分方法,将有限元计算得到的预紧力与试验所获得的预紧力比较,该有限元模型的计算误差在4%以内。

3)分析了复合材料表面的应力分布情况,复材表面的应力分布情况较为复杂,从极坐标的角度看孔周平面的应力情况,可以将其看作由拉伸区域与压缩区域两块组成,可能诱发损伤的产生。此外,垫圈有改善复材表面应力集中的作用。

参考文献:

- [1] BARAN I, CINAR K, ERSOY N, et al. A review on the mechanical modeling of composite manufacturing processes[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2017, 24(2):365-395.
- [2] CROCCOLO D, DE AGOSTINIS M, VINCENZI N. Failure analysis of bolted joints: effect of friction coefficients in torque-

preloading relationship[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(1):364-373.

- [3] 叶鑫,安鲁陵,岳烜德,等. 液体垫片对复材-铝单搭接接头拉伸性能的影响[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1):21-24, 28.
- [4] YU Q M, ZHOU H L, WANG L B. Finite element analysis of relationship between tightening torque and initial load of bolted connections[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(5):168781401558847.
- [5] VDI 2230. Systematic calculation of bolted joints[S].
- [6] ISO 16047. Fasteners-torque/clamp force testing[S].
- [7] KHAN R M. Design of experiment[M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Ltd., 2013.
- [8] 张和平,闫毓卿,莫易敏. 锁紧螺母转矩设计与重复使用特性研究[J]. 机械设计与制造, 2018(S1):114-116, 120.
- [9] FUKUOKA T, NOMURA M, MORIMOTO Y. Proposition of helical thread modeling with accurate geometry and finite element analysis[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, 2006, 72(723):1639-1645.
- [10] 侯世远. 螺纹联接松动机理研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.

收稿日期:2021-06-04

(上接第122页)

- [9] LIU W, CAO S Y, WANG Z M, et al. A novel approach for seismic time-frequency analysis based on high-order synchrosqueezing transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(8):1159-1163.
- [10] YU G, WANG Z H, ZHAO P. Multisynchrosqueezing transform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7):5441-5455.

- [11] RANDALL R B, ANTONI J, CHOBSAARD S. The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(5):945-962.

收稿日期:2021-07-01