

拧紧力矩作用下螺栓预紧力的高保真有限元仿真与实验验证^{*}

HIGH-FIDELITY FINITE ELEMENT SIMULATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF BOLT PRELOAD FORCE UNDER TIGHTENING TORQUE

钱进^{**1} 陈果² 寸文渊³ 赵旭升¹ 张旭¹ 赵正大³

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

(2. 南京航空航天大学 通用航空与飞行学院, 溧阳 213300)

(3. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

QIAN Jin¹ CHEN Guo² CUN WenYuan³ ZHAO XuSheng¹ ZHANG Xu¹ ZHAO ZhengDa³

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

(2. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics and

Astronautics, Liyang 213300, China)

(3. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

摘要 针对实际螺栓结构,研究螺栓在拧紧力矩作用下的有限元仿真方法,得出了拧紧力矩和螺栓预紧力之间的定量关系。首先,建立了带三维斜螺纹的螺栓几何模型,并且使用 Hypermesh 软件进行带螺纹的有限元网格划分,并定义相应的力学接触状态;然后,利用 Ansys Workbench 软件对螺母下表面施加不同大小拧紧力矩来得到对应的轴向力的大小,从而得出拧紧力矩与螺栓拉力之间的函数关系;最后,设计了螺栓预紧力实验,并将实验、仿真结果以及理论公式计算结果三者进行对比验证。结果表明,与扭拉关系理论计算式相比,有限元仿真模型的计算结果与实验更为接近,能准确反映螺栓预紧过程。螺栓预紧高保真有限元模型为进一步精确分析螺栓拧紧时的力学机制提供了一种可行方法。

关键词 拧紧力矩 螺栓预紧力 扭拉关系 高保真有限元仿真 螺栓预紧力实验

中图分类号 TB121

Abstract The finite element simulation method of bolt torsion under the tightening torque process was carried out, a quantitative relation between the tightening torque and the bolt preload was established for an actual structure. Firstly, the geometric model of the bolt with three-dimensional oblique thread was built, and the finite element mesh with thread was divided by using Hypermesh software, and the corresponding mechanical contact pairs were redefined. Then, Ansys Workbench software was used to apply the different sizes of tightening torque to the lower surface of the nut to obtain the magnitude of the corresponding axial force, so that the functional relation between the tightening torque and the bolt tension could be obtained. Finally, a bolt preload test was designed and the experimental, emulational and theoretical results were compared to verify the method. The results show that the results of the finite element simulation model are closer to the experimental results compared to the theoretical calculation results. The high-fidelity finite element model of bolt preload in this paper provides an important method for further accurate analysis of the bolt mechanics mechanism.

Key words Tightening torque; Bolt preload; Torsion-pull relation; High-fidelity finite element simulation; Bolt preload test

Corresponding author: QIAN Jin, E-mail: 1365850903@qq.com, Fax: +86-25-84896065

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52272436), and the Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd.

Manuscript received 20221001, in revised form 20221026.

^{*} 20221001 收到初稿, 20221026 收到修改稿。国家自然科学基金项目(52272436), 成都飞机工业(集团)有限责任公司项目资助。

^{**} 钱进, 男, 2000年生, 江西丰城人, 汉族, 南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为航空液压管道密封与疲劳性能。

0 引言

螺纹紧固件是一种有内螺纹或是外螺纹的机械零件,一般作为紧固件使用,方便多个组件的组合。最常见的螺纹紧固件是螺丝、螺帽及螺栓。螺栓连接结构广泛应用于各种机械产品设备中,是工业结构中主要的连接形式之一。在一些产品设备的使用中,振动等外部环境因素影响导致螺栓连接结构松动甚至脱落,而螺栓预紧力的大小是影响螺栓连接结构能否安全运行和可靠性保障的重要因素。对于许多螺栓连接结构,预紧力的大小必须控制在合理范围内,才能保证可靠的性能。螺栓大多数使用力矩扳手采用力矩控制法进行装配,因此必须得到扭拉关系,才能实现对螺栓预紧力大小的精准控制。

目前,国内外学者对螺栓扭拉关系进行了广泛的研究。徐卫秀等^[1]通过建立带螺纹细节的三维有限元螺栓模型,并进行扭拉关系仿真,仿真结果能较好地与理论计算数值一致,模型能精确地反映螺栓预紧过程。李小强等^[2]围绕表面粗糙度等参数进行了螺栓拧紧实验研究,结果表明,通过降低螺栓表面粗糙度可以提高控制螺栓拧紧力矩的稳定性。邓新建等^[3]建立并验证了楔形锁紧螺母拧紧过程的扭拉关系理论公式,并且从数值仿真角度验证了楔形螺纹连接扭拉关系理论公式的可靠性。熊影辉等^[4-5]建立了包含螺纹升角扩口式管接头的仿真模型并对螺纹部分进行了理论和仿真计算,结果表明,管套与螺母圆柱接触面为间隙配合时,扭拉关系理论公式计算结果与仿真结果相契合。王朋等^[6]分析了垫圈与润滑对转矩系数的影响,得出结论:无垫圈和有润滑的螺栓转矩系数相对较小,为设计和施工单位提供参考。侯博文^[7]通过研究螺栓转矩转角法拧紧工艺的影响,制定了更精确的螺栓转矩转角法拧紧方法,并针对影响最大的因素通过不同种类的螺栓进行了实验分析。NASSAR S 等^[8]研究了拧紧次数对表面粗糙度和转矩-张力关系的影响,结果表明拧紧次数越多,会增大螺纹接触表面粗糙度,从而影响螺栓的预紧力。陈岩^[9]建立了带有螺纹螺旋结构的全六面体有限元模型,利用软件模拟螺栓实际装配过程,通过扭拉关系理论公式与仿真结果对比,验证了有限元模型的准确性。

然而,目前关于螺栓拧紧力矩与所产生的预紧力之间的有限元数值仿真分析结果缺乏实验验证,并且没有详细比较有限元仿真结果、实验结果与理论公式计算结果之间的差别和联系。因此,对于整个螺栓使用螺栓预紧传感器进行扭拉关系实验,并利用实验结果对三维斜螺纹有限元仿真结果和理论公式计算结果进行对比的研究工作还需要进一步的开展。基于此,

本文针对 M15×1.5 螺栓,建立带斜螺纹三维高保真有限元模型并进行螺栓预紧力仿真,同时,使用螺栓预紧传感器进行螺栓扭拉关系实验,并利用扭拉关系转换理论公式进行计算,最后验证有限元仿真结果、理论公式计算结果,以及实验结果之间的误差关系,为进一步在工程上普遍使用的螺栓扭拉关系理论提供重要参考。

1 螺栓连接件有限元建模

1.1 三维实体模型

根据实际应用中的螺栓结构尺寸建立三维实体模型是进行后续有限元分析的先决条件。本文根据螺栓实际尺寸大小,建立 M15×1.5 螺栓、螺母以及螺栓预紧传感器模型如图 1 所示。

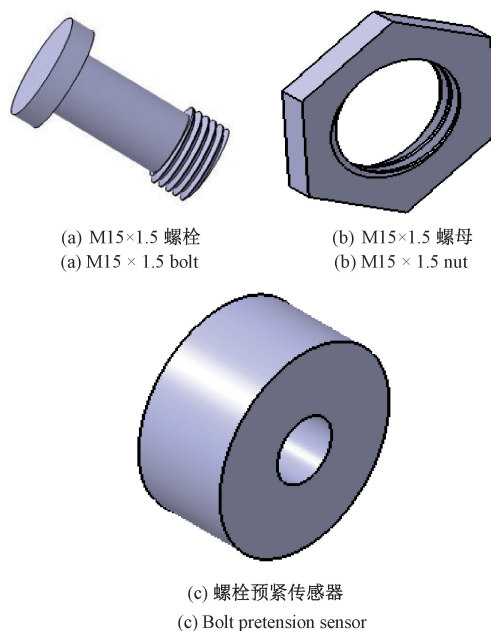


图 1 实验件以及传感器模型

Fig. 1 Test piece and sensor model

将三部分按照实际实验进行装配,装配图以及剖面图如图 2 所示。

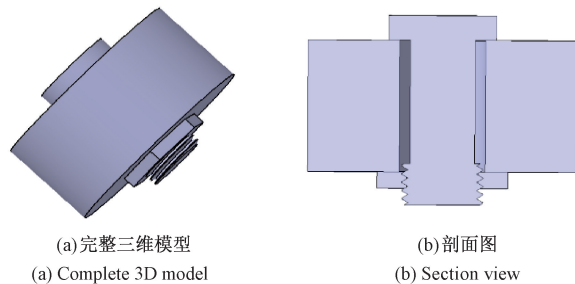


图 2 实验件装配图

Fig. 2 Assembly diagram of test parts

1.2 Hypermesh 有限元网格划分

对于螺栓螺母的斜螺纹部分,使用传统网格划分方法很难划分出规则六面体网格模型,这样会导致后

续有限元求解过程计算结果难以收敛,无法仿真得出螺栓轴向预紧力的大小。由于螺纹结构的复杂性,使用高质量六面体网格划分模型较为困难。为了对网格划分的步骤进行简化,王振兴等^[10]省略了螺纹的螺旋升角,这样改变了螺纹几何结构,无法进行扭拉关系的计算仿真。徐卫秀等^{[1]50-56}使用了粘接手段对六面体网格进行建模,用六面体网格单独划分螺纹部分,并构造了一个过渡段与螺杆再连接在一起,这种划分方法得到的几何模型也会与实际产生一些差异,对计算结果精度产生较大影响。FUKUOKA T 等^[11]提出了一种有效的三维有限元建模方法,可以精确地整体性地构造出带斜螺纹六面体网格模型。

基于此,本文使用了一种包含过渡网格及升角的螺纹六面体网格划分方法^[12],对于划分螺纹部分时,需要将此部分分为螺牙部分、螺杆轴向过渡区域、螺杆横向过渡区域进行精确划分,使得需要三部分网格能保证完全贴合上去。以螺栓为例,在 Hypermesh 软件中首先进行切分操作,切分为螺牙和螺杆两大部分;然后,对螺牙上表面部分划分出规则的二维四边形网格,对二维网格进行旋转、平移、映射等操作,形成三维螺牙网格;由于螺牙部分需要向螺杆圆柱部分平滑过渡,紧接着,分别对螺杆切分出轴向以及横向过渡区域,同样将二维网格旋转、平移、映射等操作形成三维网格;最后,对三部分网格进行粘连检查,并对剩余圆柱区域进行三维网格划分,最终得到完整螺栓有限元模型。同理,对螺母部分也是如此,并且将螺母六边形部分简化为圆柱状模型,以减少计算时间。螺栓的有限元模型如图 3 所示,螺母有限元模型如图 4 所示。



图 3 螺栓六面体三维网格模型

Fig. 3 Hexahedral 3D mesh model of the bolt



图 4 螺母六面体三维网格模型

Fig. 4 Hexahedral 3D mesh model of the nut

为了保证计算精度,将螺纹之间相互接触区域的网格进行密化;同时,为了提高计算效率,对非接触区域的网格进行疏化。装配完成的有限元模型如图 5 所示。

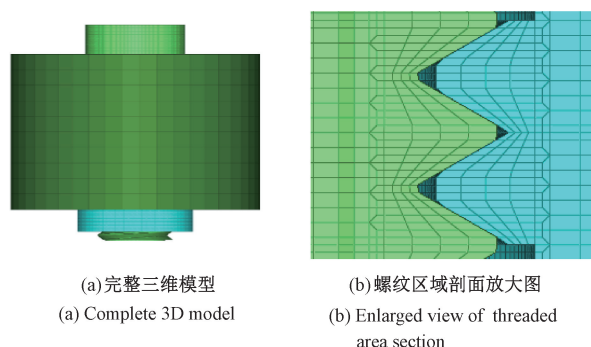


图 5 模型装配图

Fig. 5 Model assembly drawing

1.3 材料属性定义

实验件材料属性均为 45 钢,对模型赋予 45 钢材料密度、弹性模量、泊松比等材料参数以及应力-应变曲线。45 钢材料参数如表 1 所示,45 钢材料应力-应变曲线通过查阅材料手册获得。

1.4 Workbench 约束条件及载荷施加

为了模拟真实情况下使用力矩扳手施加拧紧力矩,将装配模型导入 Workbench 施加约束条件及载荷,为后续仿真求解计算做铺垫。

根据实际装配接触情况,分别设置三种类型接触对,分别是螺栓-螺母接触对、螺栓-传感器接触对、螺母-传感器接触对,如图 6 所示。其中螺栓-螺母接触对、螺母-传感器接触对需要考虑摩擦情况,设置为标准接触,摩擦因数分别设置为 0.13、0.15、0.18、0.20,后续讨论不同摩擦因数对仿真结果与理论计算的影响。螺栓-传感器接触对设置为绑定接触。

为模拟实际使用力矩扳手施加拧紧力矩情况,有限元边界条件设置为:在螺栓上表面施加固定约束,与传感器接触的螺母表面施加限制 X 、 Y 方向的位移约束。同时选择螺母下表面添加一个远端位移点,选择远端位移点施加 Z 方向的拧紧力矩大小,约束及载荷施加如图 7 所示。

表 1 材料参数
Tab. 1 Material parameter

材料 Material	密度 Density $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 Modulus of elasticity E/GPa	泊松比 Poisson's ratio ν	屈服强度 Yield strength R_e/MPa	抗拉强度 Tensile strength R_m/MPa	延伸率 Percentage extension $e/\%$	断面收缩率 Percentage reduction of area $Z/\%$
45 钢	7 810	200. 1	0. 269	355. 0	696. 6	≥ 16	≥ 40

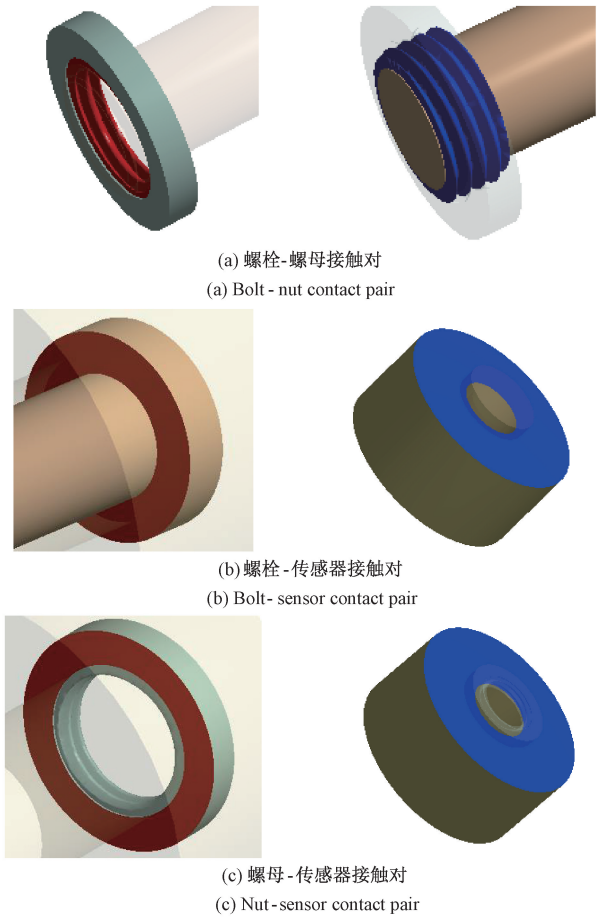


图 6 接触对设置
Fig. 6 Contact pair setup

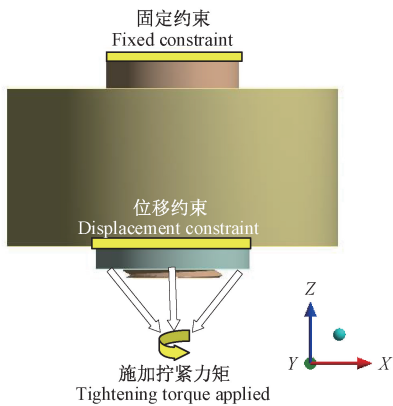


图 7 约束及载荷的施加
Fig. 7 Constraint and load application

2 拧紧过程理论与仿真分析

2.1 扭拉关系理论公式计算

螺栓预紧时由于拧紧力矩 T 的作用,使得螺栓与

螺母之间通过螺栓产生预紧力 F , 参考 GB/T 16823. 2—1997, T 与 F 的关系式为

$$T = K F d \tag{1}$$

式中, K 为转矩系数; d 为螺纹公称直径。转矩系数 K 的表达式为

$$K = \frac{1}{2d} \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \mu_w D_w \right) \tag{2}$$

并且当接触的支撑面为圆环状时

$$D_w = \frac{2}{3} \times \frac{d_w^3 - d_h^3}{d_w^2 - d_h^2} \tag{3}$$

式中, P 为螺距; μ_s 为螺纹摩擦因数; μ_w 为支撑面摩擦因数; d_2 为螺纹中径; α' 为螺纹牙侧角; D_w 为支撑面摩擦转矩的等效直径; d_w 为接触的支撑面内径; d_h 为接触的支撑面外径。

表 2 所示为 M15×1.5 螺栓尺寸以及螺母与预紧传感器接触支撑面相关参数值。

表 2 参数数据
Tab. 2 Parameter data

参数 Parameter	参数值 Parameter value
螺纹公称直径 Nominal diameter of thread d/mm	15. 00
螺距 Pitch P/mm	1. 50
螺纹中径 Middle diameter of thread d_2/mm	14. 03
螺纹牙侧角 Threaded tooth lateral angle $\alpha'/(^\circ)$	30
支撑面内径 Support surface inner diameter d_w/mm	16. 00
支撑面外径 Outside diameter of support surface d_h/mm	22. 00

2.2 理论计算与仿真结果

在拧紧过程中,螺母与传感器接触面以及螺母与螺栓之间发生相对滑动,螺栓与传感器表面不发生相对滑动,根据上述模型对螺母下表面施加不同大小的拧紧力矩时,仿真计算得到不同摩擦因数情况下与传感器接触的螺母表面轴向力大小关系,并通过式(1)~式(3)计算出拧紧力矩转化为轴向力的理论值大小。图 8 所示为不同摩擦因数的情况下理论与仿真计算结果。

由图 8 可知,当拧紧力矩相同的情况下,随着摩擦因数逐渐增大,轴向力大小逐渐减小。这是因为摩擦因数越大,拧紧过程中需要克服的扭转力矩越大,导致轴向预紧力相应减小。

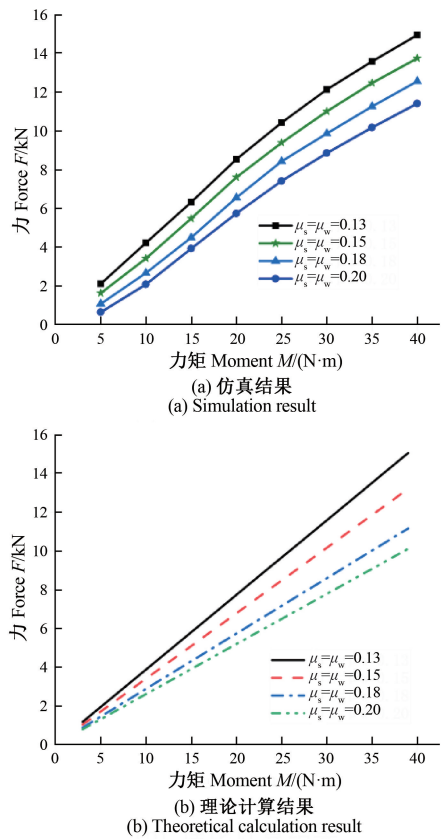


图 8 不同摩擦因数情况下轴向力与力矩关系
Fig. 8 Relation between axial force and torque under different friction coefficients

3 螺栓预紧力实验

为了测量外套螺母与螺栓拧紧时产生的实际预紧力大小,通过在螺栓与外套螺母之间使用螺栓预紧传感器来测量。

3.1 实验件及实验系统

实验件为 M15×1.5 螺栓及外套螺母,实验装置分别为 CFBLY 型轮辐式螺栓预紧传感器、电子力矩扳手、JM3860 型信号放大器、JM5936L 型数据采集器以及压力监测软件,如图 9 所示。其中,螺栓预紧传感器和电子力矩扳手主要技术参数分别如表 3 和表 4 所示。

将所有装置组装连接完成,实验装置连接如图 10 所示。

3.2 实验方法

根据 GB/T 16823.3—2010,并对其进行改进以适应本文的螺栓转矩-预紧力模型。

步骤 1:打开压力监测软件,连接实验仪器,包括螺栓预紧传感器、信号放大器、数据采集器。

步骤 2:校准压力传感器。首先将轮辐式压力传感器放置于平面,然后将标准砝码放置于压力传感器上标准,校准后的压力传感器灵敏度为 0.024 mV/N。



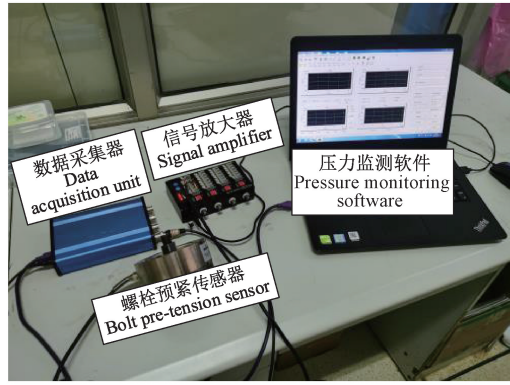
图 9 实验设备示意图
Fig. 9 Schematic diagram of test equipment

表 3 CFBLY 型压力传感器主要技术参数
Tab. 3 Main technical parameters of CFBLY pressure sensor

参数 Parameter	技术指标 Technical indicator
最大量程 Maximum range m_r/t	2
灵敏度 Sensitivity $S/(mV/N)$	0.024±0.005
输入电阻 Input resistance R_i/Ω	750±20
输出电阻 Output resistance R_o/Ω	700±5
推荐激励电压 Recommended excitation voltage U_R/V	10~15

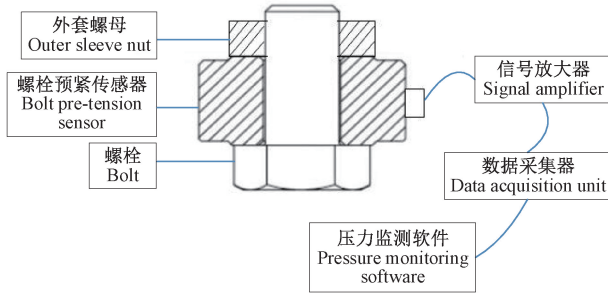
表 4 力矩扳手主要技术参数
Tab. 4 Main technical parameters of the torque wrench

参数 Parameter	量级 Magnitude
测量范围 Measuring range $M_R/(N \cdot m)$	100
超载能力 Overload capacity/%	120
工作电流 Operating current I/mA	≤8
工作环境 Operating environment	温度 Temperature 0~40 ℃ 相对湿度 Relative humidity ≤90%



(a) 实验现场图

(a) Test site diagram



(b) 实验装置示意图

(b) Schematic diagram of the experimental device

图 10 实验装置连接

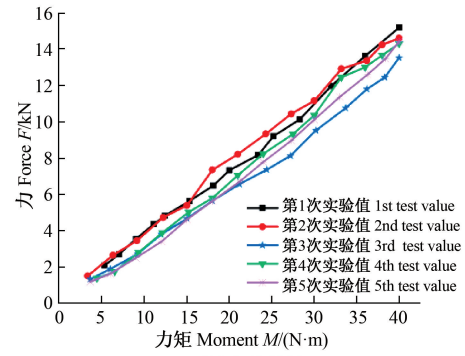
Fig. 10 Connection of the experimental device

步骤 3: 将 M15×1.5 螺栓和螺栓预紧传感器固定住, 将外套螺母拧至与螺栓预紧力压力传感器恰好接触, 随后使用电子力矩扳手拧紧外套螺母, 记录每次拧紧力矩数值与计算机显示出的相应的力的数值大小, 力矩从 0~40 N·m 每增大约 3 N·m 记录 1 次数据。重复实验 5 次取平均值, 得到压力随拧紧力矩变化关系。

3.3 结果分析

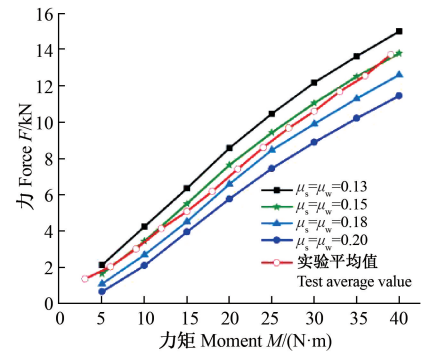
5 组实验结果以及取平均值后与仿真结果的对比如图 11 所示。由图 11 可知, 当螺纹摩擦因数 μ_s 与支撑面摩擦因数 μ_w 设置为 0.15 时, 仿真结果以及理论值能与实验结果很好匹配。

图 12 所示为取摩擦因数 $\mu_s = \mu_w = 0.15$ 时实验平均值、仿真值以及理论值三者结果对比。由图 12 可知, 当力矩数值大小在 15 N·m 以内时, 三者的结果吻合; 当力矩数值为 15~40 N·m 时仿真值略大于实验平均值, 理论值略小于实验平均值, 最大偏差分别为 2.99% 与 5.43%, 验证了仿真分析结果以及理论计算公式的有效性和可靠性, 并且仿真结果更加贴合实验结果。产生较小偏差的原因是实际实验过程中虽然螺母与传感器接触面状态一致, 但存在许多表面平整度、黏着磨损、挤压变形等微观因素的影响, 仿真与理论公式中只考虑了材料刚度、螺栓尺寸大小的因素, 故会存在一些微小偏差。



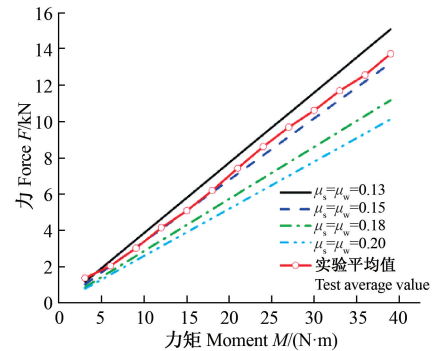
(a) 五次实验结果

(a) Results of five tests



(b) 实验结果平均与仿真结果比较

(b) Comparison of average test results and simulation results



(c) 实验结果平均值与理论值比较

(c) Comparison of average test results and theoretical values

图 11 实验与仿真、理论计算对比

Fig. 11 Comparison of experiments with simulations and theoretical calculations

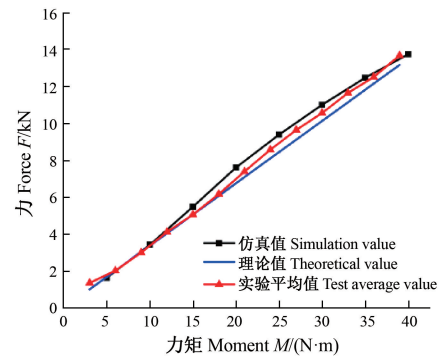


图 12 数据结果对比

Fig. 12 Comparison of data results

4 结论

本文针对考虑螺纹细节的螺栓预紧过程中拧紧力矩与螺栓预紧力之间的转换关系,建立了螺栓有限元模型并进行仿真计算以及设计扭拉关系实验,据此得到如下结论:

1)根据螺纹几何形状特点,建立了带三维斜螺纹六面体网格有限元仿真模型,能够准确地仿真螺栓与螺母之间的拧紧过程。

2)摩擦因数是影响轴向预紧力的一个关键因素,摩擦因数越大,相同拧紧力矩情况下对应的轴向预紧力越小。

3)通过设计螺栓扭拉关系实验,得到轴向预紧力随拧紧力矩变化关系曲线。并将实验、仿真和理论计算公式三者进行对比,结果吻合,并且有限元模型的仿真结果与实验更加贴合,能准确地反映螺栓预紧过程。

4)仿真分析与实验过程也存在一定局限性,利用某些方法,如测试接触表面摩擦因数、实验件表面平整度、黏着磨损程度等,可以显著提高有限元仿真的可靠性与准确性。

参考文献 (References)

- [1] 徐卫秀,王淑范,杨帆,等.考虑螺纹细节的螺栓预紧过程仿真分析研究[J].宇航总体技术,2018,2(5):50-56.
XU WeiXiu, WANG ShuFan, YANG Fan, et al. Study of bolt pre-tightening process based on simulation with thread details [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(5):50-56 (In Chinese).
- [2] 李小强,韩玉杰,陈飞宇,等.航空发动机螺栓拧紧力矩系数波动试验[J].航空动力学报,2023,38(8):1793-1804.
LI XiaoQiang, HAN YuJie, CHEN FeiYu, et al. Experiment on bolt tightening torque coefficient fluctuation of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2023,38(8):1793-1804 (In Chinese).
- [3] 邓新建,刘检华,张忠伟,等.楔形螺纹连接扭拉关系理论分析及拧紧特性[J].机械工程学报,2021,57(19):180-191.
DENG XinJian, LIU JianHua, ZHANG ZhongWei, et al. Theoretical analysis of torque-tension relationship and tightening characteristics of wedge threaded connection [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(19):180-191 (In Chinese).
- [4] 熊影辉,丁晓宇,刘检华,等.扩口式管接头拧紧过程扭拉关系研究[J].润滑与密封,2017,42(5):46-52.
XIONG YingHui, DING XiaoYu, LIU JianHua, et al. Study on relationship between preload and tightening torque of flared coupling in tightening process[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(5):46-52 (In Chinese).
- [5] 熊影辉.特种车辆扩口式管接头密封性能研究[D].北京:北京理工大学,2016:22-33.
XIONG YingHui. Research on the sealing performance of flared pipe joints for special vehicles [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016:22-33 (In Chinese).
- [6] 王朋,陈安生,张会武,等.螺栓扭矩系数影响因素的试验研究[J].实验力学,2013,28(3):307-313.
WANG Peng, CHEN AnSheng, ZHANG HuiWu, et al. Experimental study of the factors effecting on bolt torque coefficient[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3):307-313 (In Chinese).
- [7] 侯博文.真实接触表面形貌下螺栓连接结构的力学性能[D].大连:大连理工大学,2020:7-34.
HOU BoWen. Mechanical properties of bolted structures under real contact surface morphology [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020:7-34 (In Chinese).
- [8] NASSAR S, SUN T. Surface roughness effect on the torque-tension relationship in threaded fasteners [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2007, 221(2):95-103.
- [9] 陈岩.螺栓松动的失效机理以及对整体结构力学行为的影响研究[D].大连:大连理工大学,2019:20-33.
CHEN Yan. Study on the failure mechanism of bolt loosening and its effect on the mechanical behavior of the overall structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019:20-33 (In Chinese).
- [10] 王振兴,邱明星,王建军.拉伸载荷下管路连接副的密封性分析[J].航空动力学报,2011,26(8):1866-1870.
WANG ZhenXing, QIU MingXing, WANG JianJun. Sealing analysis of pipe connection subsets under tensile load [J]. Journal of Aerospace Power, 2011,26(8):1866-1870 (In Chinese).
- [11] FUKUOKA T, NOMURA M. Proposition of helical thread modeling with accurate geometry and finite element analysis [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2008, 130(1):135-140.
- [12] 刘志峰,王宝恩,郑铭坡,等.一种包含过度网格及升角的螺纹六面体网格划分方法:CN112347682A[P].2021-02-09.
LIU ZhiFeng, WANG BaoEn, ZHENG MingPo, et al. A threaded hexahedral meshing method including over meshing and lift angle: CN112347682A[P]. 2021-02-09(In Chinese).