

# 螺栓孔的位置度误差对短精密螺栓连接结构装配力学特性的影响

焦俊杰<sup>1,2</sup>, 莫蓉<sup>1,2</sup>, 徐广庆<sup>3</sup>, 付玄<sup>3</sup>, 孙惠斌<sup>1,2</sup>, 常智勇<sup>1,2</sup>

- (1. 西北工业大学 航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 西安 710072;  
2. 西北工业大学  
陕西省“四主体一联合”航空发动机智能装配技术校企联合研究中心, 西安 710072;  
3. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000)

**摘 要:** 为了研究螺栓孔的位置度误差对装配力学特性的影响,建立了考虑位置度误差的误差模型和有限元模型,研究了位置度误差对单个短精密螺栓连接结构的连接刚度和孔边应力的影响,建立了短精密螺栓组的位置度误差计算模型和有限元模型,分析了上、下被连接件的安装角度、第 1 颗螺栓的装入位置对短精密螺栓组结构的连接刚度的影响。研究发现:位置度误差对轴向刚度影响较小,对切向刚度影响显著,位置度误差在切向载荷方向的投影值是影响切向刚度的主要因素,螺栓孔的孔边应力在 180°处达到最大,通过计算和比较位置度偏差的投影值与模长的标准差,得到了 3 种较优的螺栓装配方案。

**关 键 词:** 短精密螺栓; 定位误差; 力学特性; 连接刚度; 装配工艺

**中图分类号:** V263.2      **文献标志码:** A

## Influence of position error of bolt hole on assembly mechanical characteristics of short precision bolted connection structure

JIAO Junjie<sup>1,2</sup>, MO Rong<sup>1,2</sup>, XU Guangqing<sup>3</sup>,  
FU Xuan<sup>3</sup>, SUN Huibin<sup>1,2</sup>, CHANG Zhiyong<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aeroengine,  
Ministry of Industry and Information Technology,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. Institute for Aero-engine Smart Assembly of Shaanxi Province,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
3. Sichuan Gas Turbine Establishment,  
Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621000, China)

**Abstract:** In order to study the influence of position error of bolt hole on assembly mechanical characteristics, the error model and finite element model considering the position error were built, and the influences of position error on the connection stiffness and stress of

收稿日期:2020-08-17

基金项目:国家科技重大专项(2017-Ⅶ-0010-0104); 基础科研计划(XXXX2018213A001);  
预研领域基金(61409230204); 陕西省重点研发计划(2018ZDXM-GY-068, 2016KTZDGY4-02)

作者简介:焦俊杰(1996—),男,硕士生,主要从事航空发动机装配工艺基础方面的研究。

通信作者:孙惠斌(1977—),男,副教授,博士,主要从事智能制造、精密装配等方面的研究。E-mail:sun\_huibin@nwpu.edu.cn

引用格式:焦俊杰,莫蓉,徐广庆,等.螺栓孔的位置度误差对短精密螺栓连接结构装配力学特性的影响[J].航空动力学报,2021,36(5):935-947. JIAO Junjie, MO Rong, XU Guangqing, et al. Influence of position error of bolt hole on assembly mechanical characteristics of short precision bolted connection structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(5):935-947.

bolt hole edge of single short precision bolted connection structure were studied. Computing model and finite model of position error of short precision bolt group were established, and the effects of assembly phases of two parts and assembly position of the 1st bolt on connection stiffness of short precision bolt group were analyzed. It was concluded that position error had a small influence on axial stiffness, and a significant effect on tangential stiffness. The projection of position error in the direction of tangential load was a major influencing factor to the tangential stiffness, and the stress of bolt hole edge reached the maximum at the position of 180°. By computing and comparing standard deviation of the projection and length of position error, three better assembly plans of bolts were obtained.

**Key words:** short precision bolted connection; positioning error; mechanical property; connection stiffness; assembly process

短精密螺栓连接能够定心、传扭,具有可拆卸、可重复安装等优点,是航空发动机转子的典型连接结构<sup>[1]</sup>。为了提高短精密螺栓的连接性能,装配工艺必须考虑零件的加工误差,优化装配工艺参数。

现有研究大多针对螺栓孔与螺栓之间存在较大间隙的普通螺栓连接,在螺栓连接预紧力方面,李小强等研究了拧紧策略对预紧力的影响<sup>[2]</sup>。陈英涛等采用有限元方法,获得了螺栓预紧力对动力涡轮盘应力分布的影响规律<sup>[3]</sup>。黄伟强研究了服役预紧力与工艺预紧力的影响因素及确定方法,最终得到装配预紧力<sup>[4]</sup>。

在螺栓连接刚度方面,杨国庆等结合有限元方法推导了被连接件刚度的计算公式<sup>[5]</sup>。黄信建立了考虑结合面刚度的螺栓连接刚度模型,并推导了计算公式<sup>[6]</sup>。张永杰等应用 ANSYS 得到了构件厚度与螺栓连接刚度间的关系曲线<sup>[7]</sup>。姚星宇等提出了航空发动机复杂螺栓连接结构的连接刚度理论表达式,并进一步研究了航空发动机螺栓连接载荷、结构参数对连接刚度的影响规律<sup>[8]</sup>。郭文新等研究了螺栓连接特性(如螺栓个数和预紧力大小)对航空发动机高压转子连接结构弯曲刚度的影响<sup>[9]</sup>。赵丹通过多目标驱动优化设计方法实现了螺栓连接结构弯曲刚度的优化设计<sup>[10]</sup>。熊志亮通过理论、仿真和实验手段建立螺栓连接结构中粗糙表面接触刚度模型,计算不同螺栓预紧力下,连接件和被连接件之间的粗糙表面接触刚度<sup>[11]</sup>。

在其他方面,王德友等通过有限元计算模拟了螺栓的数量、位置和预紧力大小对机匣同心度的影响<sup>[12]</sup>。刘卓乾结合有限元仿真,对螺栓连接的转子系统的振动特性进行了研究<sup>[13]</sup>。翟学等基于有限元,研究了螺栓连接不同刚度特性的参数化建模方法,形成了具有一定指导意义的参数

化建模理论<sup>[14]</sup>。孟春晓等分析了螺栓个数、螺栓松动、系统转速对螺栓连接鼓筒转子结构结合面的时变刚度和系统的响应特性的影响规律<sup>[15]</sup>。姜春云针对螺栓连接结构动力学进行了研究<sup>[16]</sup>。

与短精密螺栓连接结构相关的研究通常基于设计尺寸,几乎没有考虑结构参数对连接结构力学特性的影响,短精密螺栓与被连接件的制造误差使得连接结构在应力分布、连接刚度等方面与普通螺栓连接存在差异,在装配过程中,多个存在位置度误差的精密螺栓孔也会相互影响。然而,相关机理尚不明确,使得装配工艺优化缺乏可靠依据。

因此,本文以短精密螺栓连接结构为对象,研究螺栓孔位置度误差和预紧力对配合状态与力学特性的影响机理,为面向连接性能的装配工艺优化提供依据。

1 单个短精密螺栓连接的位置度误差分析

由于存在位置度误差,上、下被连接件的螺栓孔在实际工况下不能精确对齐。图 1 描述了上、下被连接件的螺栓孔存在位置度误差的一般情况。其中,图 1(a)的蓝、红点划线分别为上、下被

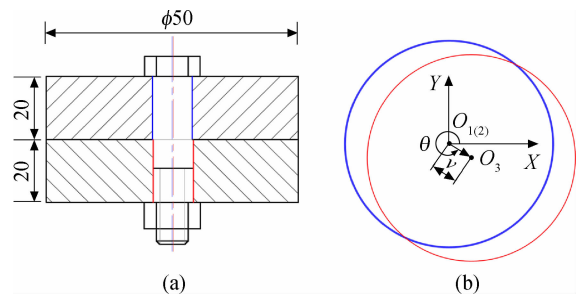


图 1 短精密螺栓连接位置度误差(单位:mm)  
Fig. 1 Position error of single short precision bolted connection (unit:mm)

连接件螺栓孔的中心线,图 1(b)为螺栓孔在结合面的截面。螺栓在装入时先通过上被连接件,其中心与上被连接件的中心  $O_2$  重合,而与下被连接件的中心  $O_3$  不重合。于是,螺栓与下被连接件的螺栓孔的一侧产生干涉,另一侧产生间隙。螺栓在装入后将受到剪切作用,在螺栓孔边产生应力。

以上被连接件的螺栓孔中心为坐标原点,下被连接件螺栓孔中心相对上被连接件螺栓孔中心的位置度误差向量定义为

$$\mathbf{V} = (\theta, v) \tag{1}$$

式中  $v$  为模长,  $\theta$  为相位,范围为  $[0^\circ, 360^\circ]$ 。

2 单个短精密螺栓连接配合状态与力学特性

2.1 单个短精密螺栓连接轴向刚度

定义单个短精密螺栓连接的轴向刚度为:固定下被连接件,上被连接件的上表面受到的轴向载荷与螺栓头位移量之比,如图 2 所示。

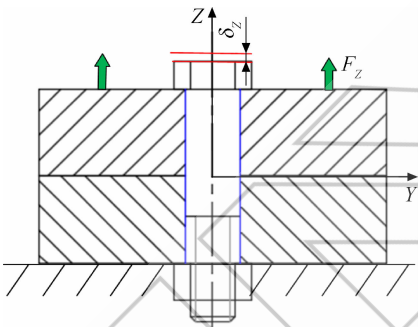


图 2 单个短精密螺栓连接轴向刚度定义

Fig. 2 Definition of axial stiffness for single short precision bolted connection

图 2 中  $F_Z$  为轴向载荷,  $\delta_Z$  为轴向载荷作用下螺栓头的位移量。

根据 VDI 2230<sup>[17]</sup>, 螺栓刚度的计算公式如下:

$$K_b = \left( \frac{l_b + l_h}{A_b E_b} + \frac{l_t + l_m}{A_s E_b} \right)^{-1} \tag{2}$$

式中  $A_b$  为螺栓光杆横截面积,  $A_s$  为螺纹部分螺栓杆的等效横截面积,  $l_h$ 、 $l_b$ 、 $l_t$ 、 $l_m$  分别为螺栓头、螺栓光杆、螺杆、旋合螺纹部分的等效长度。如果螺栓的公称直径为  $d$ , 螺距为  $P$ , 则螺栓横截面积为

$$A_b = \frac{\pi d^2}{4}$$
$$A_s = \frac{\pi (d - 0.9382P)^2}{4} \tag{3}$$

一般  $l_b$  与  $l_t$  根据螺栓连接的实际尺寸易于

获得, 考虑到螺栓头部与螺母的变形, 取  $l_h = 0.6d$ ,  $l_m = 0.7d$ 。

被连接件的刚度为

$$K_m = \frac{AE}{L} \tag{4}$$

式中  $A$  为被连接件横截面面积,  $E$  为被连接件弹性模量,  $L$  为被连接件轴向长度之和。

当轴向载荷  $F_Z$  小于预紧力  $F$  时, 连接结构的轴向刚度为短精密螺栓与被连接件刚度之和。当轴向载荷  $F_Z$  大于预紧力  $F$  时, 上、下被连接件结合面分离, 连接结构的刚度退化为螺栓的刚度, 即

$$K = \begin{cases} K_m + K_b & 0 \leq F_Z \leq F \\ K_b & F_Z > F \end{cases} \tag{5}$$

接下来研究位置度误差对轴向刚度的影响。在有限元软件 ABAQUS 中建立单个短精密螺栓连接的几何模型。其中, 短精密螺栓与螺栓孔直径为 8 mm, 上下被连接件尺寸均是边长为 50 mm、厚度为 20 mm。在建模过程中, 用柱面代替螺纹结合部, 并与螺母绑定。位置度误差被赋予到几何模型中。划分网格时, 全部采用六面体实体单元 C3D8R, 划分后单元数量为 17 022 个。设置各接触面类型为面面接触, 并设置摩擦属性为 tangential behavior。在加载预紧力时使用 Load 模块中的 bolt load 方法, 边界条件设置为固定下被连接件。求解器选用 ABAQUS/Standard。材料属性如表 1 所示。

表 1 材料物理属性

Table 1 Physical properties of the material

| 材料        | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 摩擦因数 |
|-----------|----------|-----|------|
| 40CrNiMoA | 210      | 0.3 | 0.1  |

图 3 为划分了网格的单个螺栓连接的有限元模型。在模型中, 轴向载荷在上被连接件表面均匀施加。取  $\theta = 0^\circ$ ,  $v = 0, 0.01, 0.02, 0.03$  mm 进行 4 组仿真, 预紧力  $F = 10$  kN。图 4 为计算得到的应力云图。

图 5 为提取的各仿真结果中的载荷-位移曲线。曲线在轴向载荷  $F_Z = 10$  kN 两侧分为 2 个阶段, 但不同位置度误差下的载荷-位移曲线基本重合。为了进一步比较, 图 6 显示了不同位置度误差下的位移相对  $v = 0$  时的位移百分比。

可见, 在位置度误差的影响下, 精密螺栓连接的轴向位移有最大 1.45% 的波动。当外载荷小

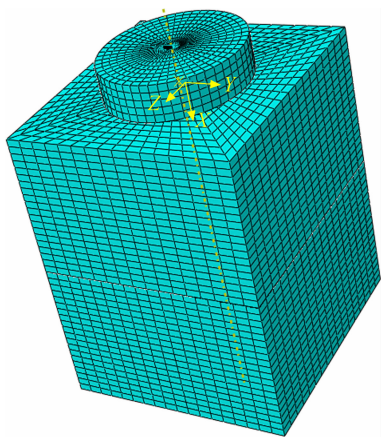


图 3 单个螺栓连接的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of single bolted connection

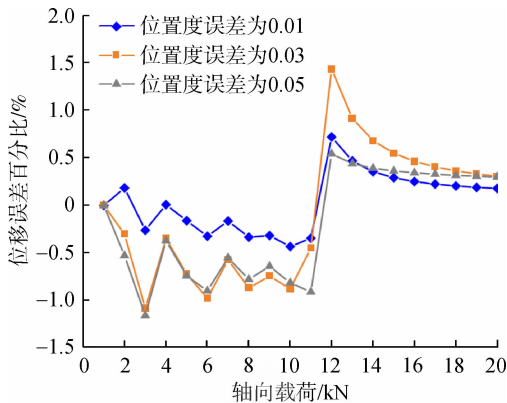


图 6 轴向载荷-位移误差百分比

Fig. 6 Axial load-displacement error percentage

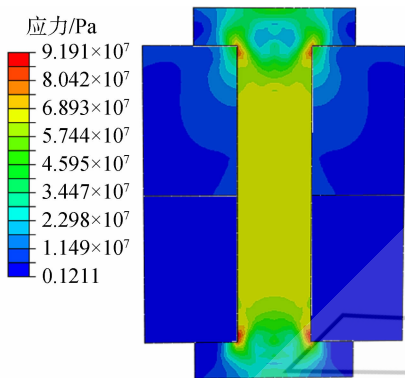


图 4 轴向载荷的 Mises 应力云图

Fig. 4 Mises stress contours of axial load

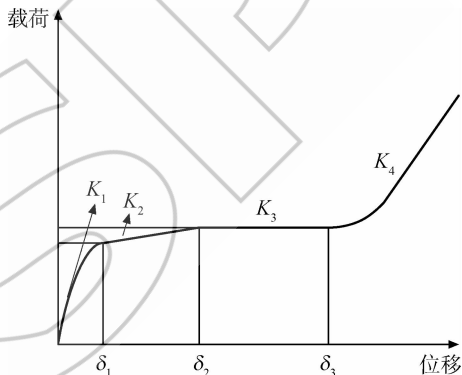


图 7 螺栓连接切向刚度阶段

Fig. 7 Stages of tangential stiffness of bolted connection

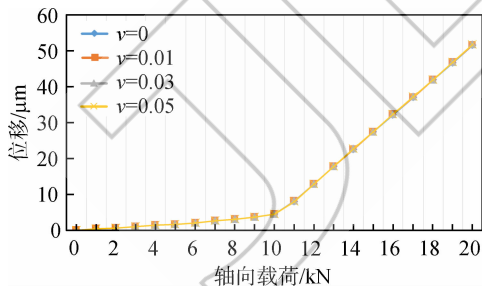


图 5 单个短精密螺栓连接的载荷位移

Fig. 5 Load and displacement of single short precision bolted connection

切向刚度。 $\delta_1$  与  $\delta_2$  分别是第 1、第 2 阶段结束时的位移。 $F_1$  与  $F_2$  为切向位移为  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  所对应的切向载荷。前 3 个阶段伴随着螺栓与被连接件之间的滑动,  $\delta_3$  为螺杆与螺栓孔的间隙。第 4 阶段中, 螺杆与螺栓孔接触, 螺栓受到剪切并传递切向载荷。理想状态的短精密螺栓连接中螺杆与螺栓孔间隙为 0 mm, 切向刚度演变不存在普通螺栓连接的前 3 个阶段, 直接进入第 4 阶段。

定义单个短精密螺栓的切向刚度为: 固定下被连接件, 上被连接件受到的切向载荷与螺杆中心线的偏移量  $\delta_x$  之比, 如图 8 所示。

接下来, 研究  $\theta$  值对切向刚度的影响。取  $v=0.01$ ,  $\theta$  每隔  $30^\circ$  取 1 个值。考虑到对称性, 只研究  $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$  的情况。如图 9 所示。

通过有限元仿真得到切向载荷下的应力云图如图 10 所示, 提取的载荷-位移曲线如图 11 所示。不同位置度误差下的切向位移与理想模型的相对偏差如图 12 所示。

可见, 切向刚度没有明显的阶段区分。无误差模型与  $\theta=90^\circ$  时的结果基本一致。 $\theta$  在  $0^\circ \sim$

于预紧力时, 位置度误差使轴向刚度略有增强。当外载荷大于预紧力时, 位置度误差使轴向刚度略有削弱。总体上, 单个短精密螺栓连接的轴向刚度受位置度误差的影响较小。

## 2.2 短精密螺栓连接切向刚度

普通螺栓连接的切向刚度演变过程分为如图 7 所示的 4 个阶段<sup>[18]</sup>。

图 7 中,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  分别为各个阶段的

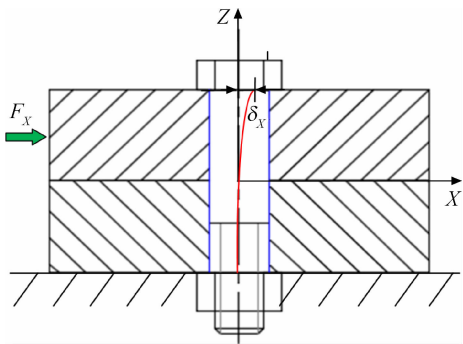


图 8 单个短精密螺栓连接切向刚度定义

Fig. 8 Definition of tangential stiffness for single precision bolted connection

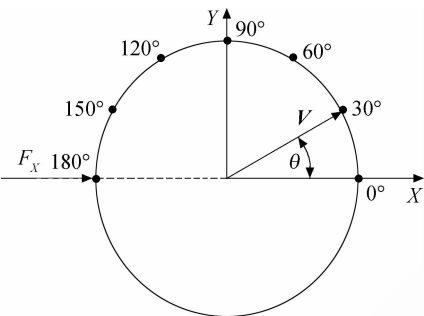


图 9 位置度误差参数  $\theta$  取值

Fig. 9 Value of position error parameter  $\theta$

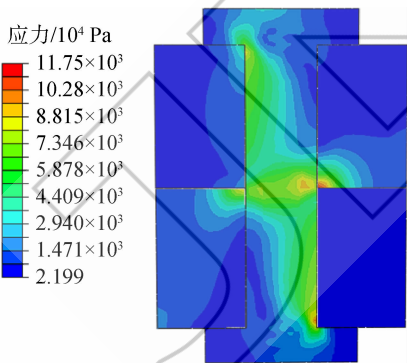


图 10 切向载荷的 Mises 应力云图

Fig. 10 Mises stress contours of tangential load

180°中变化时,切向刚度随着 $\theta$ 的增大而增大。当 $\theta<90^\circ$ 时,位置度误差使切向刚度有所削弱。当 $\theta>90^\circ$ 时位置度误差使切向刚度有所增强,但相对偏差随切向载荷的增大而减小。当切向载荷小于1kN时,不同 $\theta<90^\circ$ 值下的相对偏差分布于-95%~75%。随着切向载荷的增大,相对偏差收敛于-6%~6%。

切向刚度曲线的分布在 $\theta=90^\circ$ 两侧的分布有对称规律。当 $\theta<90^\circ$ 时, $v$ 在 $X$ 轴的投影为正;当

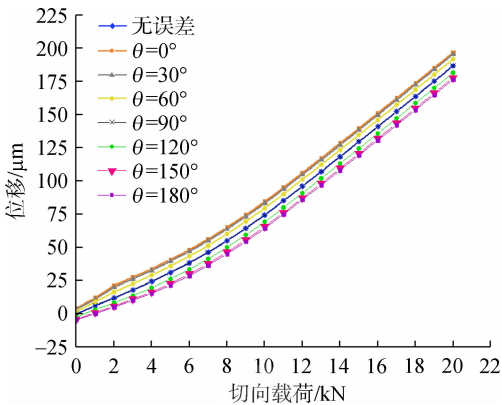


图 11 切向载荷-位移曲线

Fig. 11 Tangential load-displacement curve

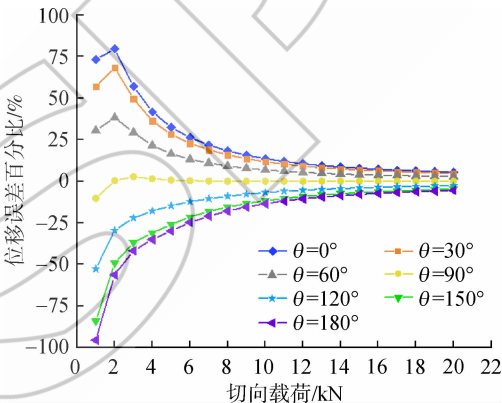


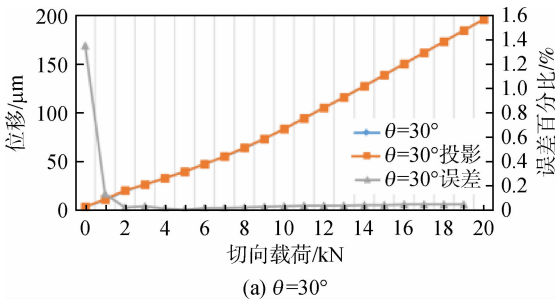
图 12 切向载荷位移误差百分比

Fig. 12 Tangential load-displacement error percentage

$\theta>90^\circ$ 时, $v$ 在 $X$ 轴的投影为负。为了进一步探究位置度误差的向量参数 $(\theta, v)$ 与其在 $X$ 轴上的投影长度对于切向刚度的影响规律,将位置度误差为 $(\theta, v)$ 的模型与 $\theta=0^\circ$ 的模型的切向刚度进行对比。对照组分别取 $\theta=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ ,各组仿真结果如图13所示。

图13采用了双坐标轴。左侧坐标轴为切向载荷作用下的位移,右侧坐标轴为同一切向载荷下各对照组中投影组模型与非投影组模型位移值差异的百分比。

可见,在切向载荷小于1kN时,各对照组中



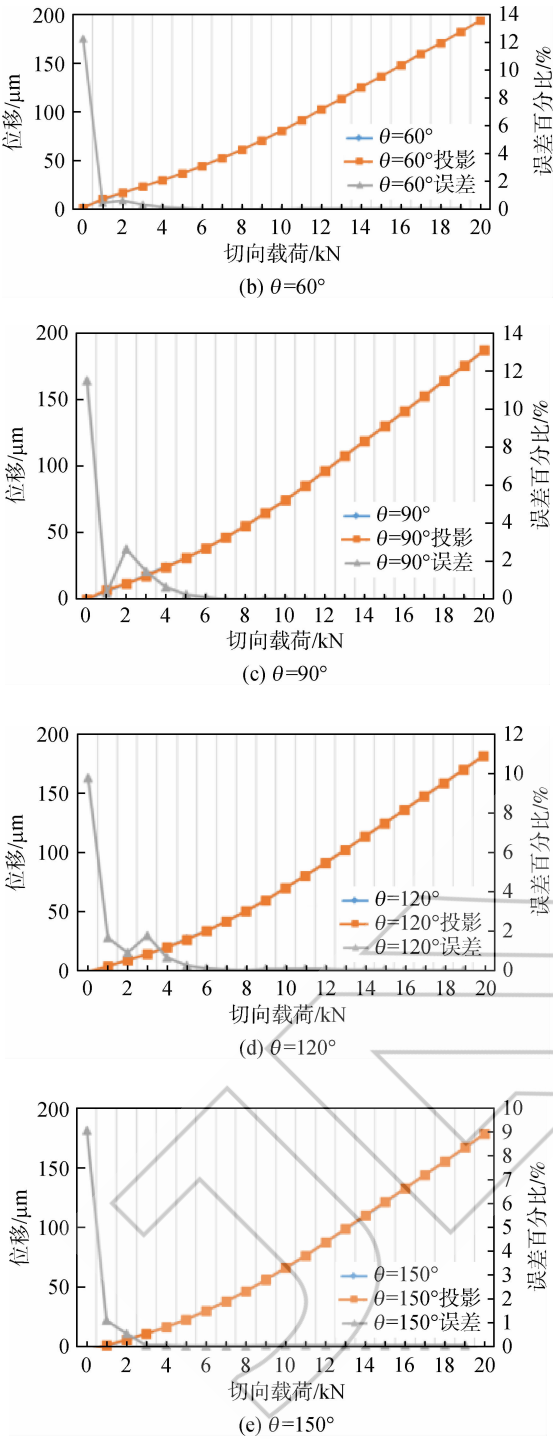


图 13 位置度误差曲线  
Fig. 13 Position error curve

切向位移相差较大,其偏差百分比为 9%~12%。当切向作用力为 1~5 kN 时,各对照组中切向位移偏差大幅度减小至 1%~2%。当切向作用力大于 5 kN 时,各对照组中切向位移误差小于 1%。总体上, $\theta$  对切向刚度的影响程度较小。

因此, $v$  在切向载荷方向的投影值是影响切向刚度的主要因素。当投影值为正时,切向刚度被削弱;当投影值为负时,切向刚度被增强。

2.3 位置度误差对孔边应力的影响

短精密螺栓在装入并施加预紧力后,在上下被连接件结合面处,螺栓孔周围会产生不均匀的初始应力。取  $\theta=0^\circ$ ,取  $v=0.01,0.02,0.03$ ,在预紧力  $F=10\text{ kN}$  时,提取被连接件在结合面处的孔边应力数据如图 14 所示。

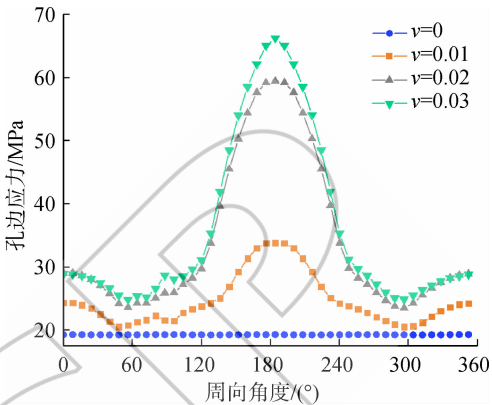


图 14 螺栓孔边应力变化  
Fig. 14 Stress change of the bolt hole edge

在没有位置度误差的情况下,螺栓孔边应力较小,且沿周向分布均匀。位置度误差导致上下螺栓孔错位,螺栓与下被连接件在  $180^\circ$  处的干涉值最大,孔边应力也达到最大值。

3 短精密螺栓组的配合状态与力学特性

3.1 短精密螺栓组几何模型与有限元模型

在图 15 中,在上下被连接件的 6 个螺栓孔处建立局部坐标系,以各螺栓孔中心的设计位置为

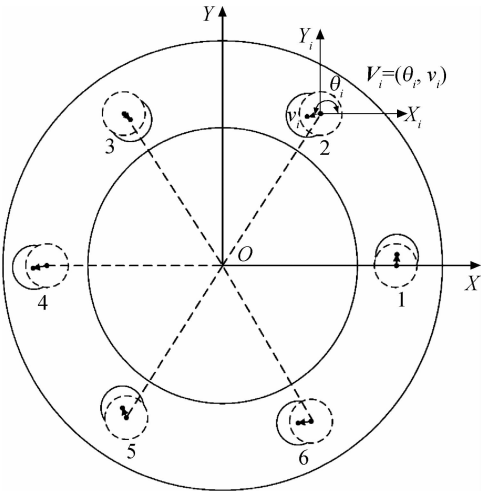


图 15 短精密螺栓组位置度误差  
Fig. 15 Position error of short precision bolt group

原点,坐标轴方向与被连接件坐标轴方向保持一致。各螺栓孔中心实际位置相对于设计位置度误差为 $(\theta_i, v_i)$ 。虚线小圆表示螺栓孔的设计位置,实线小圆为螺栓孔的实际位置。

在 ABAQUS 中建立几何模型。短精密螺栓的与螺栓孔直径为 8 mm,上下被连接件为厚度为 20 mm,6 个螺栓孔在直径为 105 mm 的圆周上均布,外圈直径为 130 mm,内圈直径为 80 mm。为了方便后续叙述,将螺栓孔按照逆时针顺序从 1~6 进行编号。在建模过程中用柱面代替螺纹结合部,并与螺母绑定。对于带有位置度误差的螺栓孔,将误差赋予到几何模型中。划分网格时,全部采用六面体实体单元 C3D8R,划分后单元数量为 92 960 个。设置各接触面类型为面面接触,摩擦属性为 tangential behavior。在加载预紧力时使用 Load 模块中的 bolt load 方法,边界条件设置为固定下被连接件。划分网格的有限元模型如图 16 所示,求解器选用 ABAQUS/Standard。材料属性如表 1 所示。

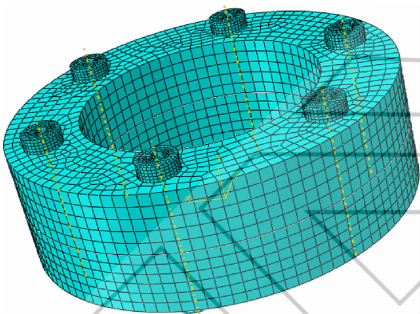


图 16 螺栓组有限元模型  
Fig. 16 Finite element model of bolt group

3.2 短精密螺栓组位置度误差计算

短精密螺栓从上至下装入。第 1 颗螺栓比较容易装入,后续装入的螺栓都会受到已经装入的螺栓的影响。上、下被连接件螺栓孔的对应关系不同,第 1 颗螺栓装入的位置不同,都会使得装配后的受力状态不同。在螺栓组装配过程中,被连接件在轴向受压缩,径向也会发生移动。

根据图 15,记上被连接件中螺栓孔  $i$  的位置度误差向量为 $(\theta_{up,i}, v_{up,i})$ ,下被连接件中各螺栓孔  $i$  的位置度误差向量为 $(\theta_{down,i}, v_{down,i})$ 。上、下被连接件 6 个孔的对应关系有 6 种,第 1 颗螺栓装入的位置有 6 种,共有 36 种装配方案,如表 2 所示。

在表 2 中,字母 a~f 分别表示与上被连接件的 1 号螺栓孔对齐的下被连接件的螺栓孔;数字

1~6 表示装入第 1 颗螺栓的被连接件上的对应的螺栓孔。例如,(d,3)表示上被连接件 1 号螺栓孔与下被连接件的 4 号螺栓孔对齐,第 1 颗螺栓从上被连接件的 3 号螺栓孔装入。

表 2 短精密螺栓组装配方案  
Table 2 Assembly plan of short precision bolt group

| 螺栓孔 | 螺栓编号  |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| a   | (a,1) | (a,2) | (a,3) | (a,4) | (a,5) | (a,6) |
| b   | (b,1) | (b,2) | (b,3) | (b,4) | (b,5) | (b,6) |
| c   | (c,1) | (c,2) | (c,3) | (c,4) | (c,5) | (c,6) |
| d   | (d,1) | (d,2) | (d,3) | (d,4) | (d,5) | (d,6) |
| e   | (e,1) | (e,2) | (e,3) | (e,4) | (e,5) | (e,6) |
| f   | (f,1) | (f,2) | (f,3) | (f,4) | (f,5) | (f,6) |

不失一般性,假设位置度误差向量  $\mathbf{V}=(\theta, v)$  中的相位  $\theta$  在 $[0^\circ\sim180^\circ]$ 内随机分布,模长  $v$  在设计公差内符合概率密度函数如下的正态分布:

$$f(v)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

(6)

式中  $\mu=0.03, \sigma=0.01$ 。在软件 MATLAB 中生成上、下被连接件螺栓孔的位置度误差数据如表 3 所示。

表 3 位置度误差数据  
Table 3 Position error data

| 螺栓孔<br>编号 | 上被连接件<br>位置度误差    | 下被连接件<br>位置度误差    |
|-----------|-------------------|-------------------|
| 1         | (145.4084,0.0100) | (21.5206,0.0402)  |
| 2         | (34.7236,0.0396)  | (84.5208,0.0287)  |
| 3         | (47.5104,0.0352)  | (127.1371,0.0229) |
| 4         | (339.1382,0.0298) | (295.6299,0.0435) |
| 5         | (334.2084,0.0297) | (5.5452,0.0278)   |
| 6         | (207.0751,0.0220) | (15.4886,0.0241)  |

为了研究在第 1 颗螺栓装入后引起的其余螺栓孔的位置度误差变化,基于装配工艺做出如下假设:

- 1) 螺栓装入前,下被连接件固定,上被连接件放置在下被连接件上,上、下被连接件的内环中心  $O_{up}$ 、 $O_{down}$  重合。
- 2) 第 1 颗螺栓装入时,上被连接件被螺栓拖拽后产生位移,位移量为上下两螺栓孔的位置度

偏差向量之差。

以螺栓组装组合(a,1)为例,图 17 中是短精密螺栓组模型的 1/4,展示了在第 1 颗螺栓装入前和装入后的对 2 号螺栓孔位置度误差的影响。其中  $O_1$  为上被连接件 1 号螺栓孔设计位置,  $O_{1,up}$  为上被连接件 1 号螺栓孔实际位置。第 1 颗螺栓从螺栓孔 1 装入后,上被连接件 1 号螺栓孔新位置为  $O_{1,up'}$ ,  $O_{2,up'}$ 。上、下被连接件的 1 号螺栓孔中心重合,而上下被连接件的 2 号螺栓孔发生错位。上、下被连接件 1 号、2 号螺栓孔中心的偏差分别为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_1 = \mathbf{0} \\ \mathbf{V}_2 = \overrightarrow{O_{2,down}O_{2,up'}} = \overrightarrow{O_{1'}O_{1,down}} - \overrightarrow{O_1O_{1,up}} - \\ \qquad \qquad \qquad \overrightarrow{O_2O_{2,down}} + \overrightarrow{O_2O_{2,up}} \end{cases} \quad (7)$$

为了便于计算,将所有位置度误差从极坐标表示转换为直角坐标表示

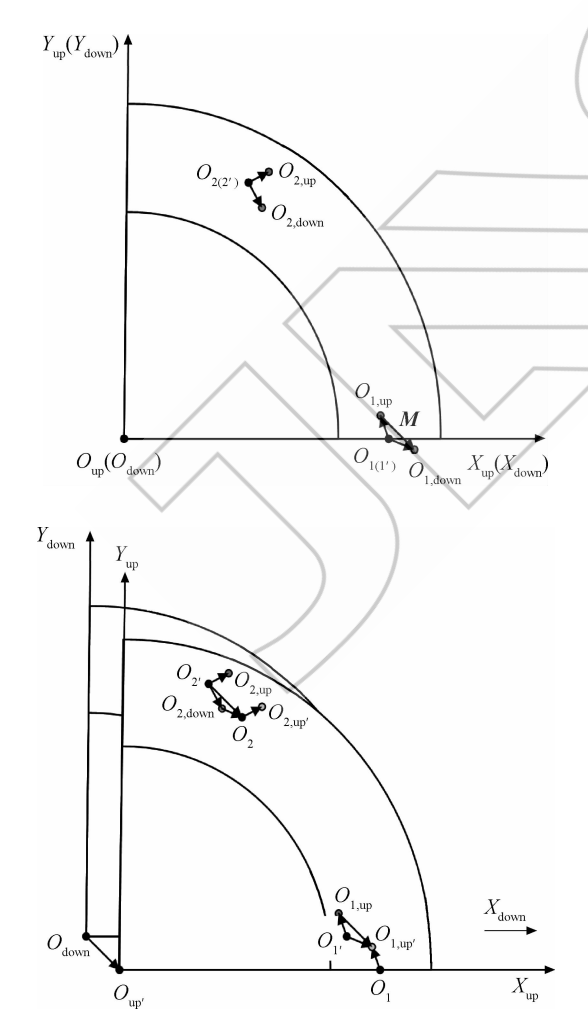


图 17 第 1 颗螺栓装入前、后的位置度误差  
Fig. 17 Position errors before and after the assembly of the first bolt

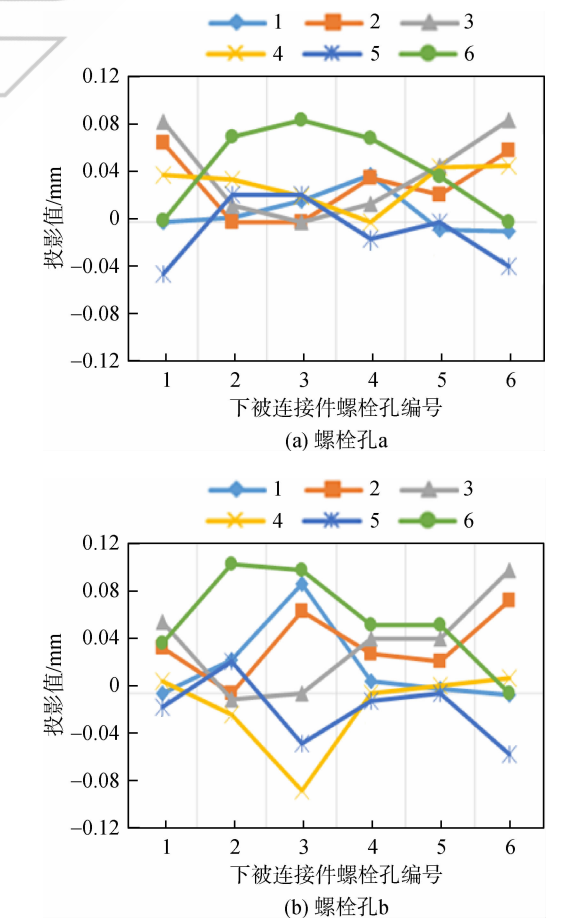
$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \cos \theta_i \\ v_i \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

在传递扭矩时,螺栓的受力沿螺栓孔所在圆周的切线方向,螺栓孔位置度误差在受力方向上的投影值反映了各个螺栓的相互约束作用。式 (9)计算了螺栓孔位置度偏差的模长及在圆周切向方向投影值。

$$\begin{aligned} |\mathbf{V}_i| &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \\ v_{p,i} &= -\sin[60(i-1)]x_i + \cos[60(i-1)]y_i \end{aligned} \quad (9)$$

对所有装配方案中上、下被连接件各配合螺栓孔的位置度偏差的投影值和模长进行计算。计算结果如图 18、图 19。图中横轴为下被连接件螺栓孔编号,纵轴分别为位置度偏差的投影值和模长。图例中的数字表示第 1 颗螺栓装入的螺栓孔的编号,图中的字母与表 2 中对应的字母的含义一致。

在不同的装配方案中,位置度偏差的范围和分散程度不同。当各装配方案的位置度偏差的投影值和模长都接近时,各螺栓的配合状态比较符合。计算各装配方案中位置度偏差的投影值和模长的标准差,得到图 20。



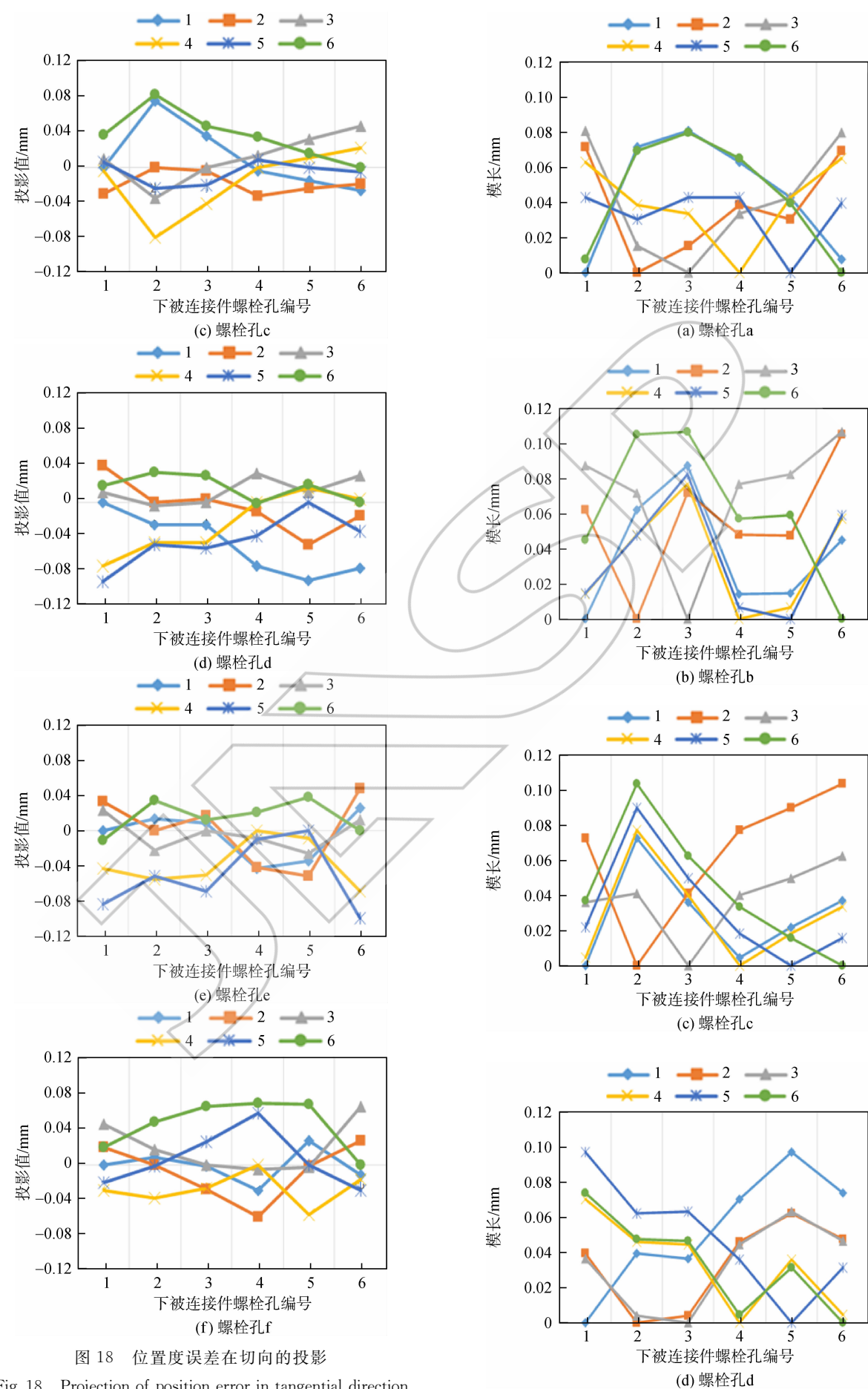


图 18 位置度误差在切向的投影

Fig. 18 Projection of position error in tangential direction

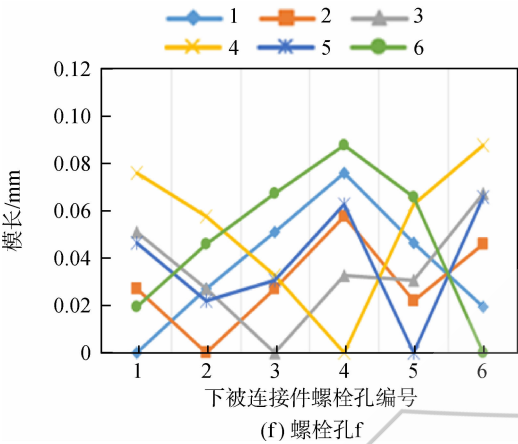
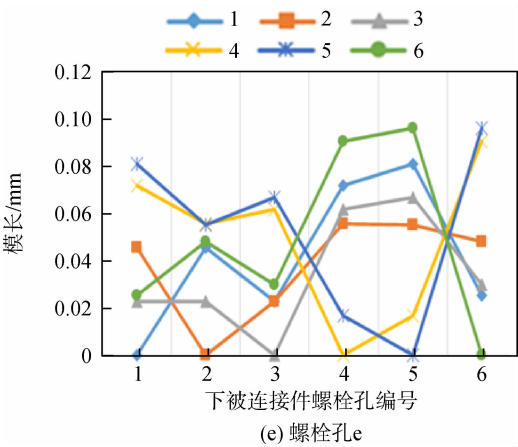


图 19 位置度误差模长

Fig. 19 Length of position errors

图 20 中,横轴 1~36 表示(a,1)~(a,6),…,(f,1)~(f,6)共 36 种组合,纵轴表示标准差数值。

可见,位置度偏差的投影值与模长的标准差不相关,且不能同时取到最小值。为了找出投影值与模长标准差都较小的装配组合,以所有装配组合中投影值平均值和模长平均值为界限,选出投影

值小于平均值的装配方案集合  $S_1$  和模长小于平均模长的装配方案集合  $S_2$ 。并对集合  $S_1$ 、 $S_2$  求得到两个量的标准差均小于平均值的装配方案集合  $S$ 。例如,在图 20 的算例中集合  $S_1$ 、 $S_2$  分别为

$$S_1 = \{1, 2, 4, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 21, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 36\}$$
$$S_2 = \{2, 4, 5, 13, 15, 16, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 31, 32, 33, 35\}$$
(10)

$S_1$ 、 $S_2$  的交集为

$$S = \{2, 4, 5, 20, 21, 24, 27, 31\}$$
(11)

进一步筛选,删除集合  $S$  中投影值和模长标准差都较大的装配方案。例如,在集合  $S$  中装配方案 2 的 2 个标准差均大于方案 4,方案 20,24,27,31 的两个标准差均大于方案 21。筛选后,集合  $S$  为

$$S = \{4, 5, 21\}$$
(12)

根据对装配后力学性能的不同要求,可以从集合  $S$  中选择不同的装配方案。方案 21 的投影值标准差最小,螺栓相互约束程度最低。方案 4 的投影值标准差稍大于方案 21,模长标准差小于方案 21,适用于对螺栓相互约束程度与孔边应力均匀性要求都相对较高的情况。方案 5 的模长标准差最小,孔边应力不均匀程度最低。

### 3.3 不同装配组合同心度

由于位置度误差的存在,螺栓之间相互影响。螺栓在拧紧时,被连接件在径向也存在位移,使被连接件的同心度发生变化。

表 2 中对应的(a,4),(a,5),(d,3)几种装配方案螺栓相互约束程度较低且孔边应力较小,在 ABAQUS 中对这 3 种装配组合进行仿真计算,螺栓组的预紧力施加顺序为星形,即各螺栓加载顺序为 1-3-5-2-4-6,从计算结果中提取上下被连接

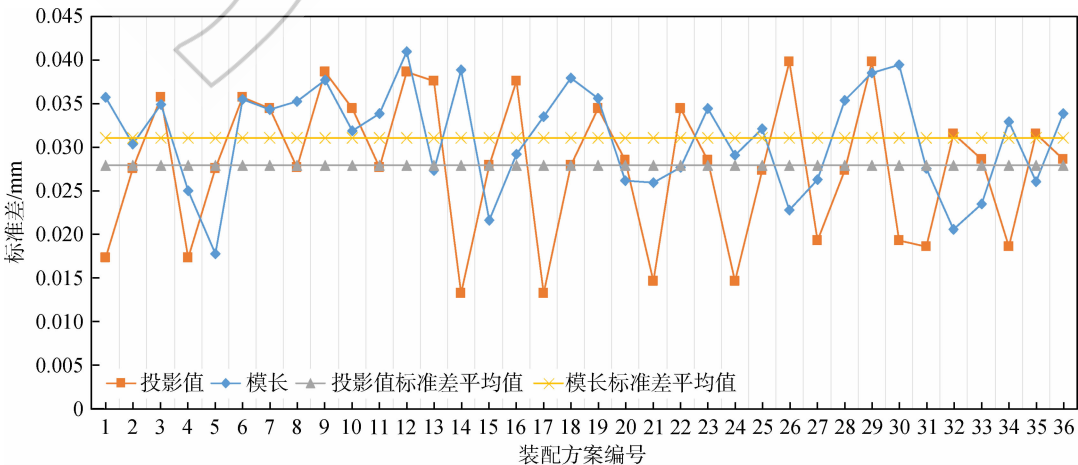


图 20 不同装配方案下投影值与模长

Fig. 20 Projection value and length of different assemblies

件内圈的位移值,并对变形后的内圈进行拟合,得到圆心位置。对上下被连接件在装配后的同心度进行评估。图 21 为上、下被连接件内圆在周向各角度的位移值。图 21(a)为各装配组合上被连接件内圈位移,图 21(b)为各装配组合下被连接件内圈位移。仿真过程中,由于下被连接件采用了固定约束,因此下被连接件的位移值明显小于上被连接件的位移值。结果表明,螺栓位置度误差的大小和方向不同、第 1 颗螺栓装配的位置不同,都会使得装配过程中被连接件变形产生差异。

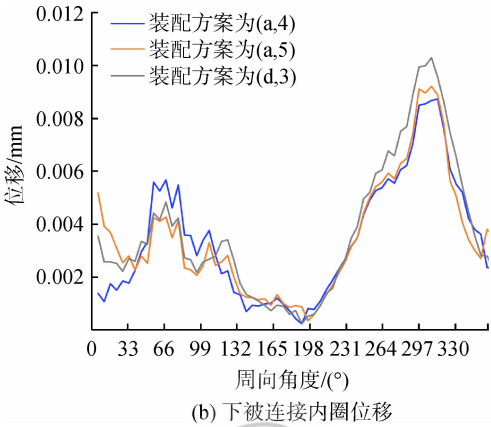
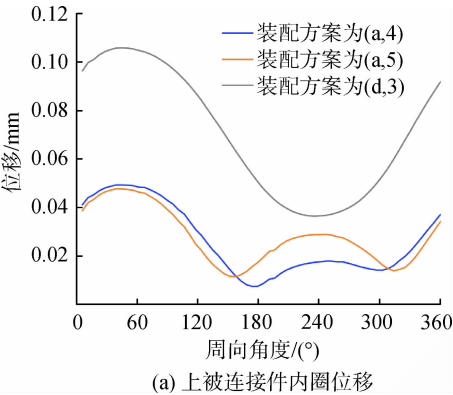


图 21 不同装配方案下内圈位移  
Fig. 21 Inner ring displacement of different assemblies

由于圆周各处变形情况不同,因此提取到的坐标并不在同一圆周上。因此,根据圆的通式和最小二乘法,求目标函数的最小值

$$F(\alpha,\beta,\gamma)=\sum_{i=1}^N(x_i^2+y_i^2+\alpha x_i+\beta y_i+\gamma)^2 \tag{13}$$

式中  $\alpha,\beta,\gamma$  为待求参数,令  $F(\alpha,\beta,\gamma)$  分别对  $\alpha,\beta,\gamma$  求偏导为 0,得到

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^3 + \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i + \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 + \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N y_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{14}$$

将坐标值代入式(14)求出  $\alpha,\beta,\gamma$  的值,即可根据圆的通式得出圆心坐标。各种装配组合中上、下被连接件的圆心坐标都可以求出。以下被连接件的圆心为基准,求出上被连接件内圈圆心的偏差向量。图 22 为不同装配方案的同心度。

图 22 中,左侧括号为装配组合,右侧括号对应圆心坐标。由图 22 可知,受螺栓之间的相互作用以及螺栓预紧力影响,上下被连接件的同心度偏差的大小和方向都不同,3 种装配组合中,装配组合(a,4)对应的上、下被连接件之间的偏心误差最小,同心度最高。

4 结 论

本文研究了螺栓孔位置度误差对单个短精密螺栓连接的轴向刚度、切向刚度和孔边应力的影响规律,研究了上下被连接件的对齐关系、第 1 颗螺栓装入位置对短精密螺栓组连接刚度的影响规律,得出以下结论。

1) 单个短精密螺栓连接中,被连接件螺栓孔的位置度误差对轴向刚度影响较小,对切向刚度的影响较为显著。位置度误差  $v$  在切向载荷方向的投影值是影响切向刚度的主要因素。

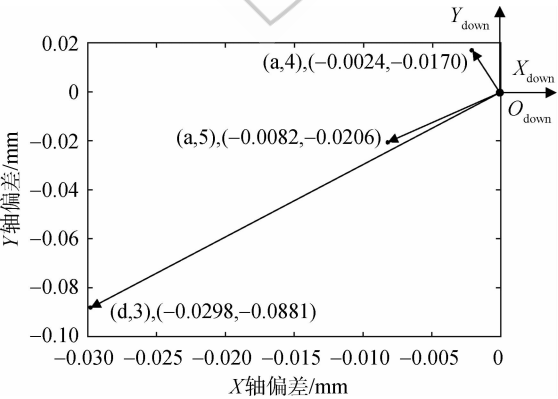


图 22 不同装配组合的同心度  
Fig. 22 Coaxiality under different assembly combinations

当投影值为正时,切向刚度被削弱;当投影值为负时,切向刚度被增强。螺栓孔在  $\theta+180^\circ$  处的孔边应力最大,孔边应力不均匀程度随  $v$  的增大而增大。

2) 由于螺栓孔位置度误差的存在,短精密螺栓组上、下被连接件螺栓孔的对应关系、第 1 颗螺栓装入的位置都会使配合状态与力学特性产生显著差异。位置度偏差的投影量与模长的标准差不相关,且不能同时取到最小值。通过仿真计算,装配组合(d,3)的螺栓相互约束程度最低、装配组合(a,5)的螺栓孔边应力不均匀程度最低、装配组合(a,4)的被连接件同心度最好,实际装配可根据需求选择合适的装配方案。

本研究主要考虑了螺栓孔的位置度误差。接下来,可将结合面的接触特性纳入研究,并将现场实测的数据引入模型,以获得更加精确的结果。

参考文献:

[1] 陈光,洪杰,马艳红. 航空燃气涡轮发动机结构[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010.

[2] 李小强,孟庆阔,杜一凡,等. 拧紧策略对航空发动机单螺栓连接预紧力的影响[J]. 机械工程学报,2020,56(13):231-241.

LI Xiaoqiang, MENG Qingkuo, DU Yifan, et al. Influence of tightening strategy on pre-tightening force of aero-engine single-bolt connection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13): 231-241. (in Chinese)

[3] 陈英涛,艾延廷,张云达. 螺栓连接预紧力对涡轮盘静力学特性影响的仿真分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,2019,32(1):26-29.

CHEN Yingtao, AI Yanting, ZHANG Yunda. Simulation analysis on the effect of bolt connection preload on static characteristics of turbine disk[J]. Gas Turbine Experiment and Research. 2019, 32(1): 26-29. (in Chinese)

[4] 黄伟强. 航发低压转子连接螺栓组螺栓装配预紧力研究[D]. 辽宁 大连:大连理工大学,2018.

HUANG Weiqiang. Study on pre tightening force for connecting bolts of aeroengine low pressure rotor[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)

[5] 杨国庆,王飞,洪军,等. 螺栓被连接件刚度理论的计算方法[J]. 西安交通大学学报,2012,46(7):50-56.

YANG Guoqing, WANG Fei, HONG Jun, et al. Theoretical analysis for bolted member stiffness[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7): 50-56. (in Chinese)

[6] 黄信. 考虑结合面接触的螺栓连接刚度研究[D]. 辽宁 大连:大连理工大学,2016.

HUANG Xin. Research on stiffness of bolted joints con-

sidering joint surfaces contact[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

[7] 张永杰,孙秦. 带预紧力受剪螺栓连接刚度分析[J]. 强度与环境,2007,34(4):22-25.

ZHANG Yongjie, SUN Qin. Sheared bolt joint stiffness analysis with pre-tightened force[J]. Structure and Environment Engineering, 2007, 34(4): 22-25. (in Chinese)

[8] 姚星宇,王建军. 航空发动机螺栓连接载荷与结构参数对连接刚度影响规律[J]. 推进技术,2017,38(2):424-433.

YAO Xingyu, WANG Jianjun. Effects of load and structure parameters of aero-engine bolted joints on joint stiffness[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(2): 424-433. (in Chinese)

[9] 郭文新,么宇辉,李韵,等. 螺栓连接对高压转子结合面弯曲刚度的影响[J]. 噪声与振动控制,2018,38(1):52-57.

GUO Wenxin, YAO Yuhui, LI Yun, et al. The influence of bolt joint characteristics on bending stiffness of rotor joint surface[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(1): 52-57. (in Chinese)

[10] 赵丹. 螺栓连接对转子动力特性影响的研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2013.

ZHAO Dan. Study on the influence of bolted joint on the dynamic characteristic of rotor structure[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013. (in Chinese)

[11] 熊志亮. 螺栓连接接触刚度及对转子动力学影响[D]. 辽宁 大连:大连理工大学,2019.

XIONG Zhiliang. Contact stiffness of bolted joint and its effect on rotor-dynamics[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)

[12] 王德友,辛明,艾延廷,等. 螺栓联接参数对静子机匣同心度影响的研究[J]. 机械设计与制造,2017(5):190-193,197.

WANG Deyou, XIN Ming, AI Yanting, et al. Research of the bolting parameters effect on stator casing concentricity[J]. Machinery Design and Manufacture, 2017(5): 190-193, 197. (in Chinese)

[13] 刘卓乾. 航空发动机螺栓连接转子的振动特性研究[D]. 天津:天津大学,2016.

LIU Zhuoqian. Study on vibration characteristic of aero-engine rotor with bolt joint[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)

[14] 翟学,翟庆刚,王建军,等. 基于有限元的螺栓连接参数化建模技术研究[J]. 推进技术,2016,37(7):1364-1371.

ZHAI Xue, ZHAI Qinggang, WANG Jianjun, et al. Parameterized modeling technology of bolted joints based on finite element[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(7): 1364-1371. (in Chinese)

[15] 孟春晓,张文胜,马辉,等. 螺栓连接鼓筒转子结构动力学特性分析[J]. 振动工程学报,2019,32(3):517-525.

MENG Chunxiao, ZHANG Wensheng, MA Hui, et al. Analysis of dynamic characteristics of a bolted drum rotor structure[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(3): 517-525. (in Chinese)

[16]

姜春云. 螺栓连接结构动力学仿真分析方法研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学,2019.  
JIANG Chunyun. Research on dynamic simulation analysis method of bolted joint structure [D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology,2019. (in Chinese)

[17]

Verein Deutscher Ingenieure. Richtlinien VDI 2230 Blatt 1:systematic calculation of high duty bolted joints[S]. Germany:VDI-Richtlinien,2003.

[18]

寇剑锋. 螺栓连接剪切本构模型及其在多钉连接结构中的应用[D]. 西安:西北工业大学,2017.  
KOU Jianfeng. Shear constitutive model for bolted-joint and its application to multi-bolt joints[D]. Xi'an: North-western Polytechnical University,2017. (in Chinese)

(编辑:张 雪)

