

轴线偏差下止口螺栓连接结构高精度装配技术

张 伟, 吴怀远, 刘博文, 胡 博, 王 鲁

(大连理工大学 机械工程学院, 大连 116023)

摘 要: 针对航空发动机止口螺栓连接结构安装边装配精度差的问题, 提出了轴线偏差下止口螺栓连接结构的装配机理和误差分析, 基于此进一步构建了可记录圆心偏移量的安装边装配模型, 并通过同心度比较了拧紧顺序、拧紧步数和工艺螺栓数量的装配精度。最后以缩尺模拟件进行试验验证, 以组件同心度和上下两级盘外伸端面变形变化量为表征获取了最优装配工艺。结果表明: ①止口螺栓连接结构的过盈止口对轴线偏差有补偿作用, 仿真中效果更明显, 可以使 $200\ \mu\text{m}$ 轴线偏差几乎减小到 $0\ \mu\text{m}$, 试验中也可使 $122\ \mu\text{m}$ 轴线偏差大幅降低; ②最优装配工艺为拧紧顺序应使用对角交叉拧紧、拧紧步数应使用三步拧紧、工艺螺栓数量应使用 4 颗; ③倾斜装配试验中同心度增大了 4.69 倍, 装配过程中一定要避免倾斜装配。

关 键 词: 止口螺栓连接; 轴线偏差; 装配精度; 同心度; 装配工艺

中图分类号: V232.7; TH131.3

文献标志码: A

High-precision assembly technology of bolt connection with spigot structure under axial deviation

Zhang Wei, Wu Huaiyuan, Liu Bowen, Hu Bo, Wang Lu

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor assembly accuracy of the mounting side of the aero-engine stop bolt connection structure, the assembly mechanism and error analysis of the stop bolt connection structure under the axial deviation are proposed, based on which the mounting side assembly model that can record the circular center offset is further constructed, and the assembly accuracy of the tightening sequence, the number of tightening steps, and the number of process bolts are compared by concentricity. Finally, the optimal assembly process was obtained by test validation with reduced-scale simulated parts, characterized by the concentricity of the assembly and the amount of deformation change of the upper and lower two-stage discs' outreach end surfaces. The results show that: 1) the surplus stop of the stop bolt connection structure has a compensating effect on the axial deviation, and the effect is more obvious in the simulation, which can make the $200\ \mu\text{m}$ axial deviation almost reduced to $0\ \mu\text{m}$, and the $122\ \mu\text{m}$ axial deviation can be greatly reduced in the test; 2) the optimal assembly process is that the tightening sequence should use diagonal cross-tightening, the number of steps of tightening should use three-step tightening, and the number of process bolts should use four; 3) the concentricity increased by 4.69 times in the tilted assembly test, and tilted assembly must be avoided in the assembly process.

Keywords: bolt connection with spigot; axial misalignment; assembly accuracy; concentricity; assembly process

收稿日期: 2025-04-16

作者简介: 张伟(1985—), 男, 副教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空航天智能装配技术研究。E-mail: weizhang@dlut.edu.cn

引用格式: 张伟, 吴怀远, 刘博文, 等. 轴线偏差下止口螺栓连接结构高精度装配技术[J]. 航空动力学报, 2027, 42(1): 20250183. Zhang Wei, Wu Huaiyuan, Liu Bowen, et al. High-precision assembly technology of bolt connection with spigot structure under axial deviation[J]. Journal of Aerospace Power, 2027, 42(1): 20250183.

作为衡量国家高端制造能力的重要标志,航空发动机的研制水平直接体现了一个国家的科技实力和综合国力^[1]。我国在该领域的研究起步相对滞后,迫切要实现高质量的自主突破,因此在“十四五”规划中将其纳入重大工程项目序列予以重点推进^[2]。近年来,随着精密、超精密加工技术的快速发展,零部件加工精度和一致性显著提升,装配环节在产品性能保障中的作用日益凸显^[3]。航空发动机装配是整个发动机制造过程的龙头,其工作量占全机生产工作的 50% 以上,是研制过程精度控制最后的保障环节^[4]。但部分发动机振动超标且发动机性能在工作 500 h 后退化高达 8%,仍是中国飞机制造过程中最薄弱的环节^[5]。

螺栓连接因其结构简单,连接可靠性高等特点在航空发动机的关键部件中大量使用,螺栓连接性能对产品的运行有着重要的影响^[6-8]。高压压气机属于典型的止口结构盘鼓类组件。由于其转速高、质量较大,高压压气机转子成为发动机的主要振动源之一。因此为降低整机振动水平,在装配工艺环节提高转子装配精度具有十分重要的意义^[9]。

止口螺栓连接转子零件在保证设计紧度的同时,应尽量降低应力水平,减少止口配合面接触应力的分散性,以提高转子的精度和稳定性。岳伟等^[10]优化了止口局部结构提高了转子的接触状态稳健性。李伦绪等^[11]研究了止口螺栓连接结构受拉时止口紧度对弯曲刚度影响较为明显。Li 等^[12]研究了过盈配合和扭矩的协同作用会导致不平衡的预紧力,过盈配合显著提高了接头的极限强度和最佳扭矩。Nizametdinov 和 Berne 等^[13-14]研究了弯曲刚度的值取决于螺栓的紧固力、轴向力、拉伸接头、法兰表面的接触应变。

在实际装配过程中,由于热缩装配工艺中的热量分布不均以及螺栓预紧力的波动,止口连接的应力分布和转子变形可能出现不均匀现象。汪振禹等^[15]通过计算给出高涡转子装配过程中机件冷却时间、压紧力、保持时间等装配参数。李小冬^[16]优化了止口过盈配合和螺栓组装配工艺,提出了均压预载装配方法,并通过仿真和试验验证了其有效性。组件在装配时受到止口约束和多颗螺栓预紧力的共同作用,由于制造误差和装配偏差的影响,组件受力变形复杂,配合面接触应力分布不均匀。Chen 等^[17]提出了一种基于接触-压力分布熵的改进装配精度稳定性预测方法,能

够有效区分实际接触区域与接触表面,从而更高效地预测装配精度。Shi、Sun 等^[18-20]研究提出了一种综合考虑位置误差、方向误差和粗糙表面形貌的航空发动机多级转子装配误差传播分析方法,可提高多级转子的装配精度。Li 等^[21]研究了 HPC/HTHP 转子安装相位的优化技术,证明该方法比常规相位决策方法具有更低的同心度期望值^[22]。

多颗螺栓预紧力的共同作用时受弹性相互作用影响,会导致局部结构出现应力集中,因此,需要控制螺栓的拧紧顺序和拧紧步数。Zhu 等^[23]重点分析了弹性相互作用对螺栓预紧过程中偏心度的影响,并分析了这些参数对同心度的影响。罗忠、张伟刚等^[24-25]基于 ANSYS 仿真分析了螺栓装配顺序对连接结构时变弯曲刚度的影响。

综上所述,现有研究多将装配变形因素纳入装配精度预测模型,但主要集中在零件加工误差和表面形貌对装配变形的影响。因此,为了实现装配的高精度要求,就还需要考虑装配偏差和热装配导致的不均匀变形和装配工艺中弹性相互作用对装配精度的影响。本文正是基于上述问题,针对某型号航空发动机高压压气机的三、四、五级盘安装边装配问题,研究装配精度误差的产生机理,优化装配工艺,提高装配精度,对提升高压压气机转子服役性能具有重要意义。

1 轴线偏差下止口螺栓连接结构装配机理

1.1 轴线偏差下过盈止口的定心作用

当两个圆柱形部件进行装配时,圆柱配合面的内表面和外表面分别存在压力,根据弹性力学基础模型,可将止口接触简化为薄壁圆筒的接触问题,如图 1 所示。

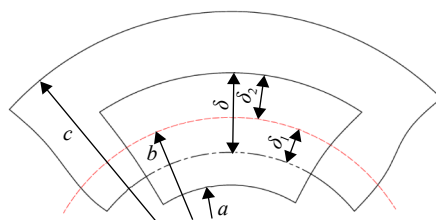


图 1 止口接触模型

Fig. 1 Spigot contact modeling

当内外圆柱面装在一起时,内圆柱会产生径向位移 δ_1 ,外圆柱会产生径向位移 δ_2 ,且满足关系^[26]:

$$\delta = |\delta_1| + |\delta_2| \quad (1)$$

假设内圆筒的内径为 a , 内外圆筒的实际接触面半径为 b , 外圆筒的外径为 c , 接触压力为 p , 则:

$$\delta_1 = \frac{-bp}{E_1} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \nu_1 \right) \quad (2)$$

$$\delta_2 = \frac{-bp}{E_2} \left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_2 \right) \quad (3)$$

式中 E_1 为内圆筒的弹性模量, E_2 为外圆筒的弹性模量, ν_1 为内圆筒的泊松比, ν_2 为外圆筒的泊松比, 负号表示压缩变形。

联立式(2)和式(3), 可得过盈止口圆柱面的接触压力为

$$p = \frac{\delta}{b} \left[\frac{\left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \nu_1 \right)}{E_1} + \frac{\left(\frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \nu_2 \right)}{E_2} \right]^{-1} \quad (4)$$

若 $E_1 = E_2 = E$, $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ 则上述关系可以简化为

$$p = \frac{\delta E}{b} \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} \right)^{-1} \quad (5)$$

在实际装配过程中, 由于装配偏差的存在, 组件会出现轴线对中性不良的现象。如图2所示, 凸止口轴线与凹止口轴线之间存在初始径向偏移量 e 。这种不对中导致配合面上的过盈量呈现非对称分布: 在 $+x$ 方向过盈量增大, 而在 $-x$ 方向则相应减小。过盈量的变化量 Δ 随周向位置不同而存在差异, 其分布规律可近似表述为

$$\Delta = e \cos \theta \quad (6)$$

因此, 将轴线初始偏移产生的过盈量变化量 Δ 代入式(6), 止口结合面的接触压力公式为

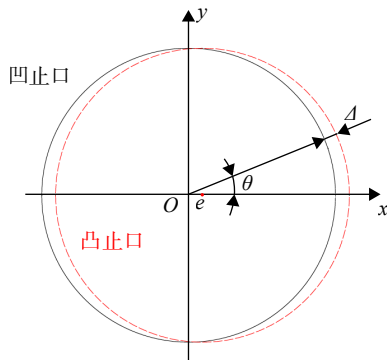


图2 径向偏移

Fig. 2 Caliber offset

$$P(\theta) = \frac{(\delta + e \cos \theta) E}{b \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} \right)} \quad (7)$$

当止口配合副存在初始对中偏差时, 由于非对称过盈量分布导致接触应力场在径向产生应力差值, 进而形成径向不平衡载荷。该载荷矢量促使凸止口和凹止口相对运动直至轴线重合, 最终实现自对中效应。此过程中产生的径向恢复力可定义为止口定心力 F_d 。则两侧的过盈量变化量差值为:

$$\delta_d = e \cos \theta - e \cos (\theta + \pi) = 2e \cos \theta \quad (8)$$

将式(8)代入式(5), 求得接触应力差值为:

$$p_d(\theta) = \frac{2Ee \cos \theta}{b \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} \right)} \quad (9)$$

轴线偏移方向两侧的定心力的 y 方向的分力相互抵消, 因此只需求 $+x$ 方向的定心力, 取一微小截面的定心力为:

$$dF_d = dF \cos \theta = p_d(\theta) l r_2 \cos \theta d\theta \quad (10)$$

式中 l 为止口长度, 对式(10)进行积分, 因轴线偏移所产生的定心力为:

$$F_d = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} dF_d = \frac{\pi e l E}{\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2}} \quad (11)$$

组件在装配过程中若存在轴线对中误差, 将导致止口配合副的接触压力呈现非对称分布特征, 具体表现为偏移侧接触压力显著增大, 而对应侧则相应减小。这种非均匀的过盈力分布会引发四级盘体的弹性弯曲变形。

如图3所示, 螺栓预紧力 F 沿轴向作用于三级盘和五级盘安装边与螺栓头部和螺母贴合的环形接触区域, 该载荷通过组件端面传递四级盘, 形成锥形分布载荷 q_1 和 q_2 。盘体具有双重过盈配合结构: 上部凹止口与三级盘凸止口形成接触应力 p_1 , 下部凹止口与五级盘凸止口产生接触应力 p_2 。可将上下止口过盈力等效为作用于悬臂梁(长度分别为 l_1 、 l_2)的均布载荷, 其对参考点 A 产生的弯矩分别为 M_1 和 M_2 。

如图4所示, 在周向非均匀弯矩载荷 M_1 、 M_n 、 M_{n+1} 、 M_m 、 M_{m+1} 等作用下, 四级盘产生非轴对称弯曲变形时, 四级盘上下两级转子的径向位移可能在不同方向上存在差异, 且上下止口直径并不相等, 这种变形模式的差异性会导致三四五级转

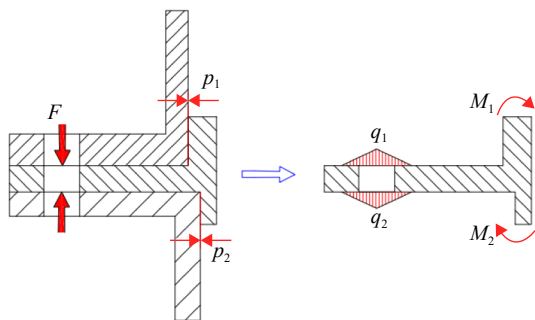


图 3 四级盘安装边受力情况

Fig. 3 Force on the mounting side of a four-stage disk

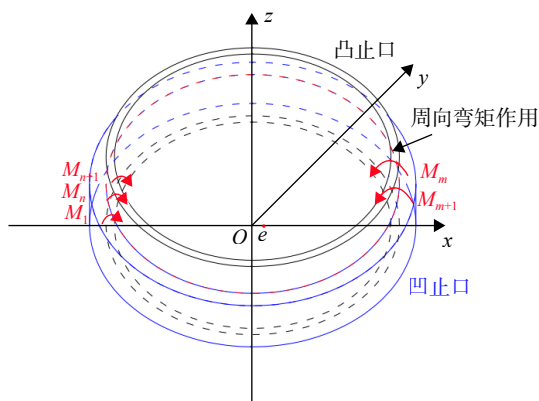


图 4 周向弯矩作用示意图

Fig. 4 Schematic diagram of circumferential bending moment action

子系统在三维空间内形成复杂的耦合变形形态。

基于转子系统变形协调条件,相邻盘体间的位移连续性要求导致上下相邻盘需产生相应的协调变形以满足界面处的位移连续性,这种变形模式会显著影响转子的装配精度。如图 5 所示,在高压压气机转子装配中,三级盘外伸端端面和五级盘外伸端端面作为与其他盘连接的精密止口配合面,其几何形位公差直接影响两级转子间的对中精

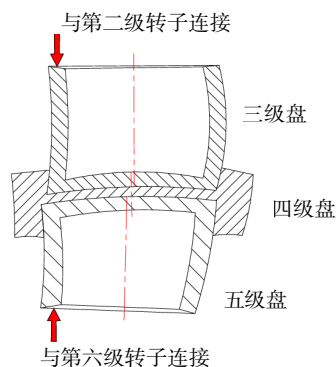


图 5 三、四、五级转子变形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of rotor deformation in three, four and five stages

度。当端面产生非均匀变形时,不仅会改变止口配合的接触状态,导致局部应力集中,更会通过盘体间的力学耦合作用,将形位误差传递至整个转子段。因此,这两个端面的弯曲变形量可有效表征三、四、五级转子系统的装配精度。

1.2 止口螺栓连接结构热装工艺

如图 6 所示,采用温差装配工艺时,原本过盈配合的止口部位会转变为间隙配合状态,此时依靠螺栓的轴向预紧力使结合端面紧密接触,而初始的轴线角度偏差会转化为轴向位置偏移。

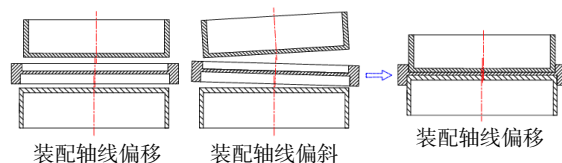


图 6 装配轴线偏差

Fig. 6 Assembly axis deviation

在航空发动机止口螺栓结构的热装工艺中,工艺螺栓是确保装配精度和安全性的关键辅助工具。如图 7 作用是在加热过程中维持孔位的同轴度,防止热变形导致错位,但是工艺螺栓通过预紧力施加局部机械约束,螺栓孔周围形成刚性区,抑制局部膨胀,诱发弯曲应力。

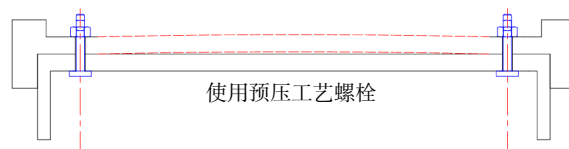


图 7 使用工艺螺栓变形示意图

Fig. 7 Schematic diagram of deformation of process bolts in use

因此,为了确保装配精度和不使弯曲应力过大,应该考量工艺螺栓的数量对装配精度的影响。

1.3 螺栓组弹性相互作用

在螺栓拧紧过程中,先拧紧螺栓的预紧力会因后续螺栓的拧紧作用而发生改变,通常表现为预紧力下降,这种现象被称为螺栓弹性相互作用。其作用强度主要取决于 3 个关键因素:螺栓间距、拧紧顺序和被连接件的刚度特性。这种相互作用会导致两个主要问题:一是造成螺栓群预紧力分布不均,形成离散现象;二是引起被连接件安装边产生不均匀的径向变形和弯曲变形。

如图 8 所示,首先拧紧螺栓 1 至预紧力 F_1 ,由 F_1 引起的螺栓节点 1 弹性位移,之后拧紧螺栓 2 至预紧力 F_2 ,由 F_2 引起的螺栓 2 节点弹性位移,

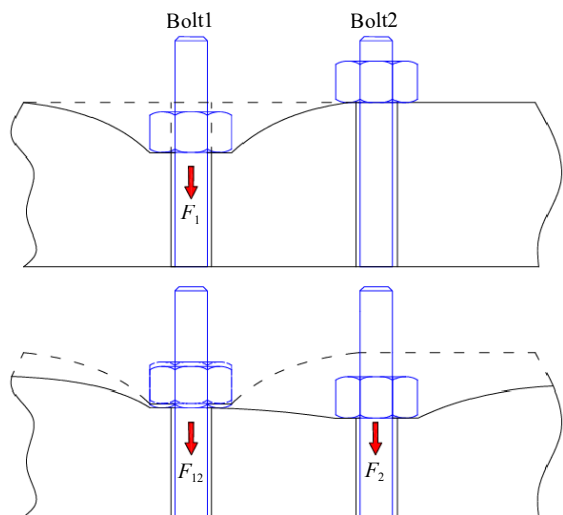


图8 弹性相互作用示意图

Fig. 8 Schematic diagram of elastic interactions

此时被连接件受螺栓2预紧力作用向下压缩, F_{12} 就是螺栓2拧紧时引起的螺栓1预紧力变化。

在高压压气机高精度装配中, 拧紧顺序和拧紧步数的优化对控制弹性相互作用和保证预紧力均匀分布具有关键作用。因此, 需要量化评估不同拧紧顺序和拧紧步数的影响, 从而优化安装边装配工艺。

2 止口螺栓连接结构仿真模型验证

2.1 有限元模型建立

本文使用 ANSYS Workbench 中的静力学模块对不同装配工艺下的安装边装配模型进行数值模拟和仿真分析。

如图9所示, 在 ANSYS Workbench 中构建了由三、四、五级盘和30颗简易螺栓组成的三维模型。模型中, 止口用于定心定位, 螺栓提供轴向压紧力, 这种简化方法有效反映了连接结构的主要力学特性建立组合结构安装边转子装配有限元模型网格, 其中模型网格划分为结构六面体网格, 单元类型为 Solid186, 网格数量为 59 424, 节点数量为 87 617。

模型约束加载设置, 使用载荷力中螺栓预紧力施加预紧力。在 DesignModeler 中设置三级盘的轴线沿 +x 轴方向位移为 0.2 mm, 三级盘的沿 x 轴方向倾斜 0.1°, 使模型产生轴线偏移和偏斜。

螺栓的加载采用模拟螺栓代替实体螺栓模型, 考虑到对单个螺栓进行加载, 因此每一颗螺栓的接触需要单独设置, 简化螺纹以及螺母, 在螺栓头与五级盘接触面设定为绑定接触, 在螺母与3

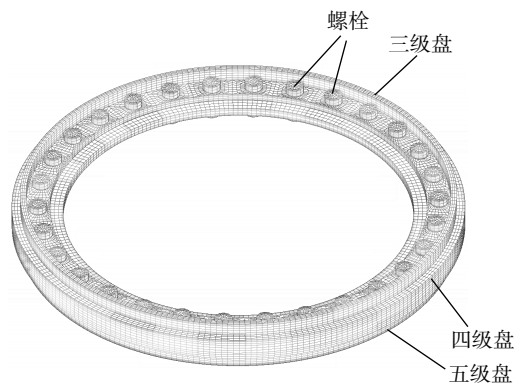


图9 安装边装配模型

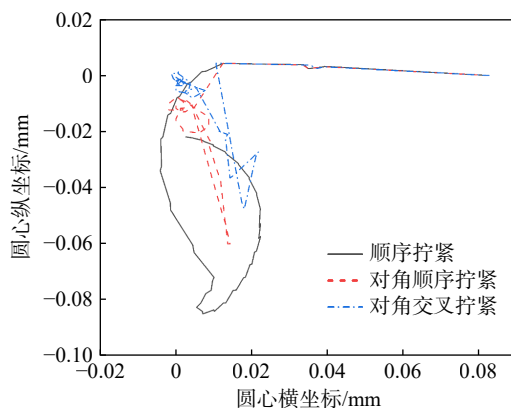
Fig. 9 Mounting side assembly model

级盘接触面设定为摩擦接触, 设定摩擦因数为 0.1。

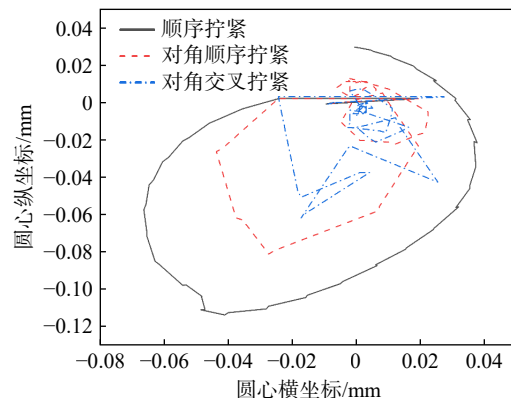
使用 APDL 命令流通过最小二乘法圆拟合, 计算并记录三级盘最上端和五级盘最下端轮廓线在变形后的几何参数(圆心坐标、半径、角度)。

2.2 不同装配工艺下同心度变化结果

由图10可得, 在止口定心力的作用下, 顺序拧紧、对角顺序拧紧、对角交叉拧紧的圆心轨迹



(a) 三级盘圆心偏移轨迹



(b) 五级盘圆心偏移轨迹

图10 不同拧紧顺序圆心偏移轨迹

Fig. 10 Circular center offset trajectories for different tightening sequences

均从相同的起点向(0, 0)点运动, 其中对角交叉拧紧的圆心偏移量最小, 装配精度最好。

由表 1 可得, 转子最终的圆心偏移量的大小依次为顺序拧紧、对角顺序拧紧、对角交叉拧紧, 其中对角交叉拧紧的圆心偏移量最小, 最接近于 0 μm。拧紧顺序应采用对角交叉拧紧。

表 1 不同拧紧顺序最终圆心偏移量
Table 1 Final center offset for different tightening sequences μm

部件编号	顺序拧紧	拧紧顺序对角顺序	对角交叉
三级盘	22.2	8.1	0.6
五级盘	29.8	11.2	0

由图 11 可得, 在止口定心力的作用下, 一步拧紧、二步拧紧、三步拧紧的圆心轨迹均从相同的起点向(0, 0)点运动。二步拧紧和三步拧紧由于对螺栓预紧力进行分步加载, 圆心轨迹从外圈逐渐向内圈靠拢。其中三步拧紧的圆心偏移量最小, 装配精度最好, 二步拧紧的圆心偏移量次之,

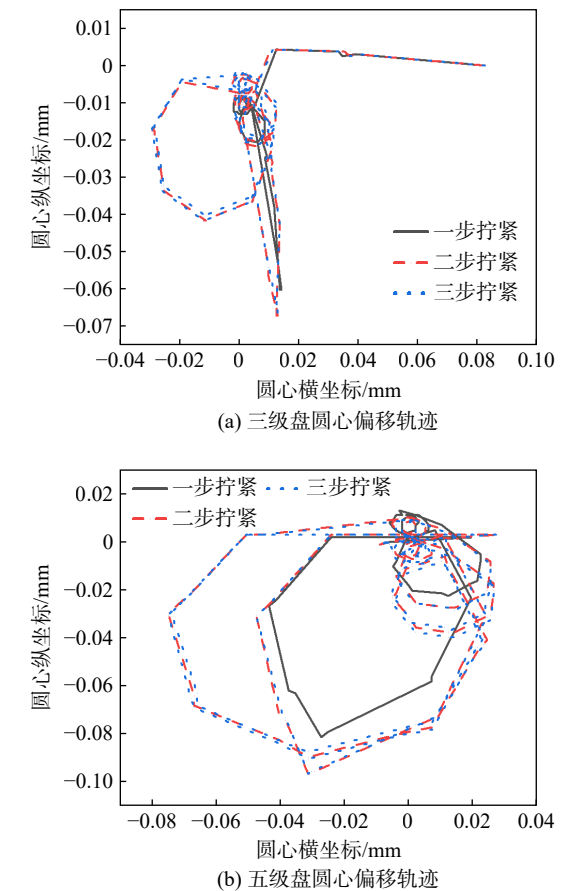


图 11 不同拧紧步数圆心偏移轨迹
Fig. 11 Circular center offset trajectories with different tightening steps

一步拧紧圆心偏移量最大, 装配精度最差。
由表 2 可得, 经过多步加载, 使得圆心越来越趋向坐标原点, 同心度越来越高。拧紧三次圆心偏移量最小, 最接近于 0 μm。考虑到装配效率, 拧紧步数应采用三步拧紧。

表 2 不同拧紧步数最终圆心偏移量
Table 2 Final center offset for different tightening steps μm

部件编号	拧紧步数		
	1	2	3
三级盘	8.1	2.6	1.4
五级盘	11.2	2	0

由图 12 可得, 在止口定心力的作用下, 使用 0 颗工艺螺栓、2 颗工艺螺栓和 4 颗工艺螺栓的圆心轨迹均从相同的起点向(0, 0)点运动。其中使用 4 颗工艺螺栓的初始阶段圆心偏移量较大, 但最终圆心偏移量最小, 装配精度最好, 使用 2 颗工艺螺栓的次之, 使用 0 颗工艺螺栓圆心偏移量最大, 装配精度最差。

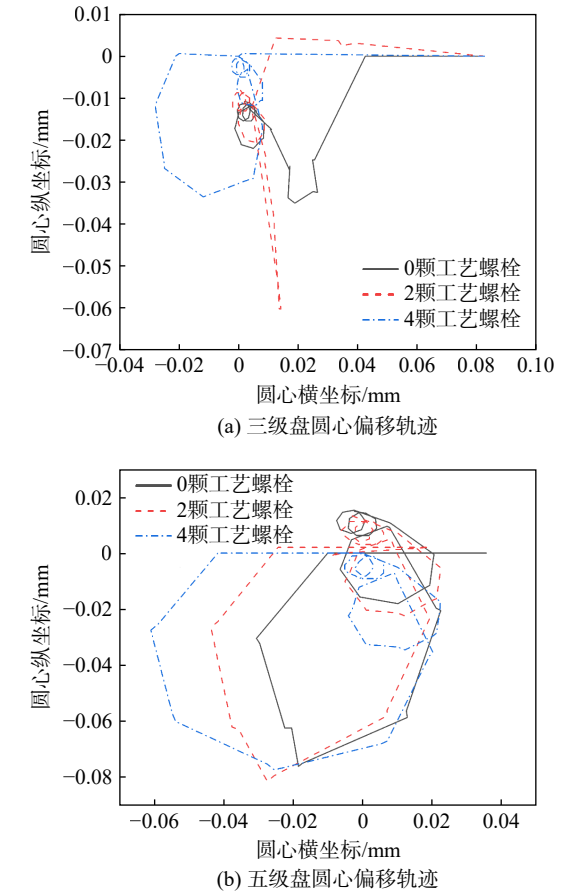


图 12 不同工艺螺栓数量圆心偏移轨迹
Fig. 12 Circular center offset trajectories for different numbers of process bolts

由表 3 可得, 转子最终的圆心偏移量随着工艺螺母数量的增加而减少, 当工艺螺母数量为 4 时, 圆心偏移量已经接近于 $0\text{ }\mu\text{m}$ 了。考虑到装配效率, 工艺螺栓数量应采用 4 颗。

表 3 不同工艺螺栓数量最终圆心偏移量

Table 3 Final center offset for different number of process bolts μm

部件编号	工艺螺母数量		
	0	2	4
三级盘	11.2	8.1	0
五级盘	15.2	11.2	0

由图 13 可得, 在止口定心力的作用下, 倾斜度 0° 、 0.1° 和 0.15° 的圆心轨迹均从不同的起点向 $(0, 0)$ 点运动。其中倾斜度为 0° 的圆心偏移量最小, 装配精度最好。当存在倾斜度时圆心向 $-y$ 方向大幅偏移, 且倾斜度越大, 偏移量越大。

由表 4 可得, 转子最终的圆心偏移量随倾斜角度的增加而增加, 当倾斜角度为 0° 时, 圆心偏移

表 4 不同倾斜度最终圆心偏移量

Table 4 Final center offset for different tilts μm

部件编号	倾斜角度/ $^\circ$		
	0	0.1	0.15
三级盘	0.2	8.1	8.7
五级盘	0.8	11.2	11.9

量接近于 $0\text{ }\mu\text{m}$ 。所以在转子热装的过程中, 若装配存在一定的倾斜角度, 会降低转子的装配精度。

3 试验验证

本章对上述的理论计算和仿真分析, 对轴线偏差下止口螺栓连接结构装配精度进行试验验证。首先需要对止口螺栓连接结构进行装配前测量, 然后设计温差法装配工艺并进行装配。根据高压压气机三、四、五级转子模拟缩尺件装配工艺在不同的预压螺栓数量下, 不同拧紧顺序和步数下和倾斜装配下的变形量和同心度, 验证仿真规律的正确性, 研究压气机止口安装边螺栓组的最优拧紧工艺。

3.1 试验设备和试验件

如图 14 所示, 本试验使用 RS2000 系列高精度圆柱度仪测量装配前后部件的圆跳动及装配后组件的同心度。



图 14 圆柱度仪

Fig. 14 Cylindricity gauge

试验件从真实止口螺栓结构简化而来, 通过分析实际连接结构的受力特点, 保留了影响载荷传递的关键要素: 安装端面结合面、定位止口和螺栓连接, 按照 1:2 比例缩尺并调整尺寸后, 设计得到试验件工程图如图 15 所示。

3 个试件通过止口过盈配合实现装配过程中的定心定位, 由 16 颗 10.9 级 M6 螺栓连接。使用扭矩扳手进行加载, 设定螺栓的加载扭矩为 $6\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

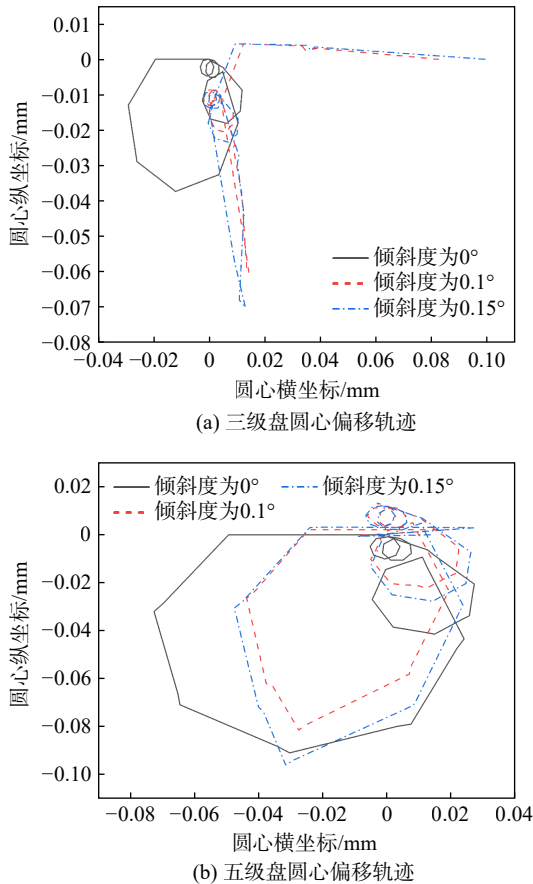


图 13 不同倾斜角度下的圆心偏移轨迹

Fig. 13 Circular center offset trajectories with different inclinations

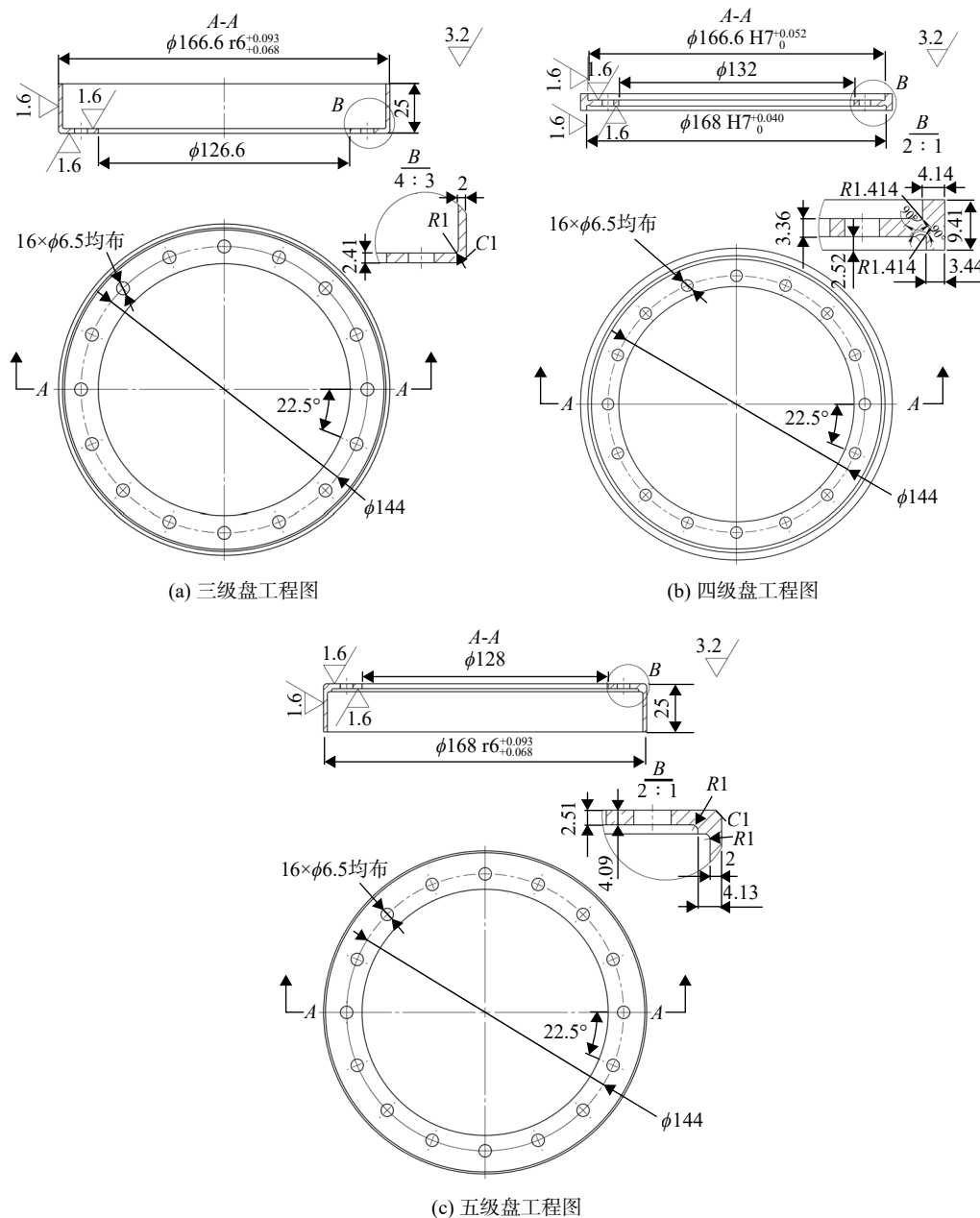


图 15 试验件工程图(单位: mm)

Fig. 15 Engineering drawing of test piece(unit:mm)

3.2 试验件的测量

3 个缩尺模拟件的测量基准与装配基准一致, 在使用圆柱度仪测量时, 首先需要将圆柱度仪转台调平, 调平后圆跳动为 $8.88 \mu\text{m}$, 平面跳动为 $3.89 \mu\text{m}$, 达到测量要求。加载完成的模拟试验件在圆柱度仪测量方式如图 16 所示。由于缩尺模拟件存在加工制造误差, 所以对各单件的止口安装边端面的端跳和止口圆柱面的径跳进行测量。测量得到三级盘和五级盘初始轴线偏差为 $122 \mu\text{m}$ 。

基于上述分析, 在评估组件装配精度时, 同心度和部件在装配过程中的变形情况是关键指标。

为探究装配工艺对部件装配精度的影响机制, 本研究采用高精度圆柱度仪对热装前后法兰端面的平面度进行测量, 并通过计算三、五级盘外伸端端面内侧与外侧变形的差值, 将其作为评估法兰弯曲变形的量化指标; 对前后三、五级盘的圆度进行测量, 并通过圆心拟合求得整个组件的同心度。

部件的制造误差均会对装配过程中的弯曲形变产生影响, 因此在分析试验数据时, 需要排除这些制造误差对四级盘弯曲形变的影响。以原始形变差异为基准, 后续试验中观察到的形变差异与原始形变的差值即为组装过程引起的形变量。

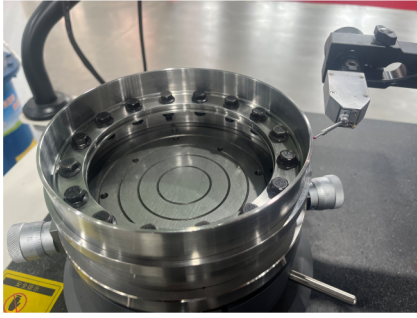


图 16 模拟试验件

Fig. 16 Simulated test pieces

3.3 试验结果分析

试验 1、试验 2 和试验 3 为拧紧顺序试验组, 试验 1 为对照组对角顺序拧紧, 试验 2 和试验 3 为顺序拧紧和对角交叉拧紧。

四级盘由装配过程产生的外伸端变形变化量如图 17 所示, 外伸端变形变化量为装配后外伸端的差值与初始外伸端的差值(正值为向上变形, 负值为向下变形)。可以得到三级盘上端面变形变化量在顺序拧紧时整体明显高于对角交叉拧紧和

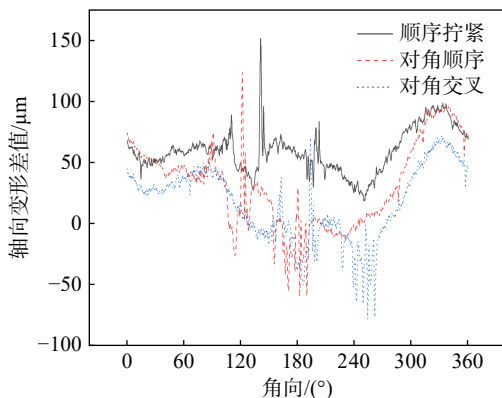
对角顺序拧紧, 其中对角交叉拧紧略优于对角顺序拧紧, 更贴近 0 值线。五级盘下端面变形变化量在顺序拧紧时呈现明显的一端高一端低, 极差大于 $300\ \mu\text{m}$, 是由于顺序拧紧使得一边产生向内弯, 一边产生向外翻; 对角交叉拧紧和对角顺序拧紧的变形变化量比顺序拧紧要均匀得多, 在整体上对角交叉拧紧优于对角顺序拧紧, 有更小的变形变化量。

试验 1 和试验 2、试验 3 测量数据拟合结果矢量计算的同心度试验数据见表 5。可以明显得到在止口定心力的作用下, 3 种拧紧顺序均对轴线偏差有一定补偿作用。顺序拧紧同心度最大, 应该极力避免使用顺序拧紧。对角交叉拧紧, 对角顺序拧紧效果较好, 其中对角交叉拧紧最优。并且验证了仿真结论, 对角交叉拧紧装配精度最好, 应使用对角交叉拧紧。

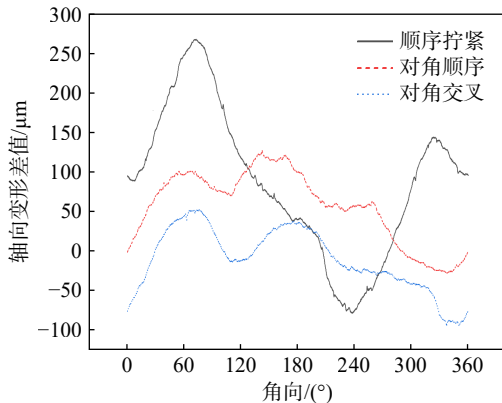
表 5 不同拧紧顺序同心度数据

Table 5 Concentricity data for different tightening sequences

序号	三级盘 拟合圆心/ μm	五级盘 拟合圆心/ μm	同心度/ μm
1	(-72.62, 114.66)	(-57.99, 69.63)	47.34
2	(-44.87, -73.66)	(-19.88, 28.79)	105.45
3	(133.85, 32.08)	(-146.94, 5.57)	29.57



(a) 三级盘外伸端变形变化量



(b) 五级盘外伸端变形变化量

图 17 不同拧紧顺序外伸端变形变化量对比

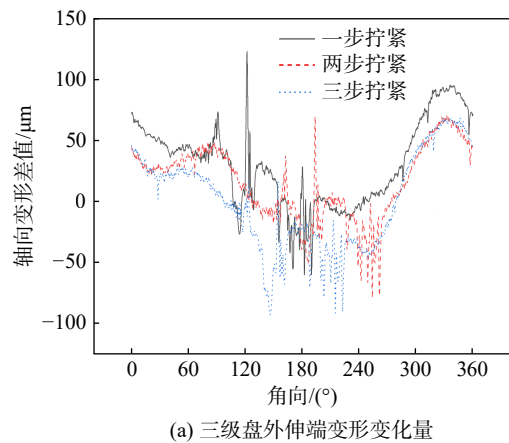
Fig. 17 Comparison of changes in deformation of elongated ends with different tightening sequences

试验 1、试验 4 和试验 5 为拧紧步数试验组, 试验 1 为对照组一步拧紧, 试验 2 和试验 3 为二步拧紧和三步拧紧。

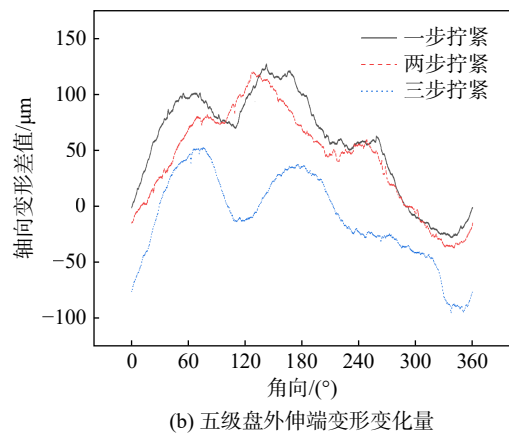
四级盘由装配过程产生的外伸端变形变化量如图 18 所示, 可以得到三级盘上端面变形变化量在一步拧紧时最大, 装配精度最差。三步拧紧整体上略优于两步拧紧, 更贴近 0 值线, 在 $130^\circ \sim 280^\circ$ 上比两步拧紧变化量更大。五级盘下端面变形变化量在两步拧紧整体上略优于一步拧紧, 三步拧紧效果最好, 变化量相较于两步拧紧和一步拧紧更小, 更贴近 0 值线。

试验 1 和试验 4、试验 5 测量数据拟合结果矢量计算的同心度试验数据见表 6。可以得到随着拧紧步数的增加, 在止口定心力的作用下, 均对轴线偏差有一定补偿作用, 并且同心度越来越小, 三步拧紧效果最好; 同时拧紧步数增加会降低装配效率, 因此拧紧步数不宜过多。验证了仿真结论, 三步拧紧装配精度最好, 应使用三步拧紧。

第 1、6、7 组试验为工艺螺栓数量试验组。



(a) 三级盘外伸端变形变化量

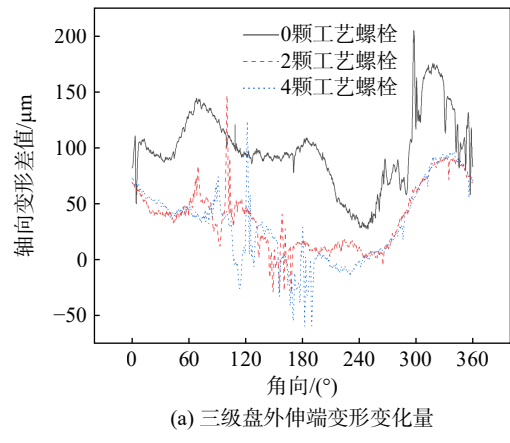


(b) 五级盘外伸端变形变化量

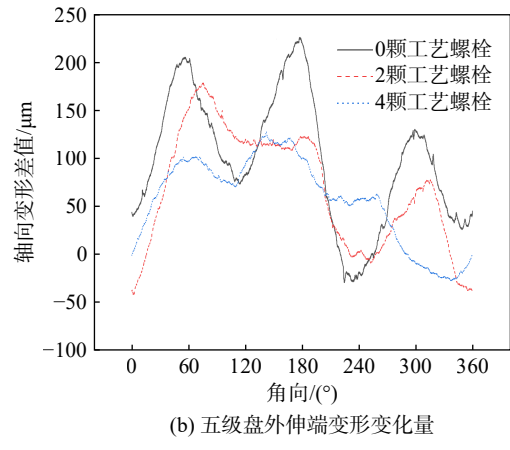
图 18 不同拧紧步数外伸端变形变化量对比
Fig. 18 Comparison of changes in deformation of elongated ends with different tightening steps

表 6 不同拧紧步数同心度数据			
Table 6 Concentricity data for different tightening steps μm			
序号	三级盘 拟合圆心	五级盘 拟合圆心	同心度
1	(-72.62, 114.66)	(-57.99, 69.63)	47.34
4	(58.74, 48.02)	(49.58, 20.72)	28.91
5	(39.53, 59.83)	(26.72, 39.77)	20.54

试验 1 为对照组使用 4 颗工艺螺栓, 试验 6 为不使用工艺螺栓试验, 试验 7 为使用 2 颗工艺螺栓试验。四级盘由装配过程产生的外伸端变形变化量如图 19 所示, 可以得到在不使用工艺螺栓时变形变化量最大, 远高于使用工艺螺栓的试验组, 装配精度最差。使用工艺螺栓时在止口定心力的作用下, 对轴线偏差有一定补偿作用, 三级盘上端面变形变化量在使用 4 颗工艺螺栓整体上优于使用 2 颗工艺螺栓, 更贴近 0 值线。五级盘下端面变形变化量在使用 4 颗工艺螺栓整体上略优于使用 2 颗工艺螺栓。因此, 使用 4 颗工艺螺栓装配精度最高; 同时考虑到工艺螺栓数量增加一定会降低装配效率, 工艺螺栓数量不宜过多, 因此



(a) 三级盘外伸端变形变化量



(b) 五级盘外伸端变形变化量

图 19 不同工艺螺栓数量变形变化量对比
Fig. 19 Comparison of the amount of deformation change in the number of bolts of different processes

使用 4 颗工艺螺栓数量进行装配效果最好。

试验 1 和试验 6、试验 7 测量数据拟合结果矢量计算的同心度试验数据见表 7。可以得到在不使用工艺螺栓的情况下, 同心度大幅度增大, 因此使用工艺螺栓进行预压可以有效地提高止口螺栓连接结构的装配精度。使用 2 颗工艺螺栓时同心度比使用 4 颗工艺螺栓时更大, 并且使用 2 颗工艺螺栓可能造成四级盘产生翘曲, 使装配精度降低。验证了第 3 章仿真结论, 使用 4 颗工艺螺栓装配精度最好, 在热装工艺中应使用 4 颗工艺螺栓进行预压。

第 1、8 组试验为倾斜装配试验组。试验 8 将

表 7 不同工艺螺栓数量同心度数据			
Table 7 Concentricity data for different number of process bolts μm			
序号	三级盘 拟合圆心	五级盘 拟合圆心	同心度
1	(-72.62, 114.66)	(-57.99, 69.63)	47.34
6	(-39.39, 164.58)	(-35.39, 42.02)	122.60
7	(36.48, -31.33)	(86.12, -78.37)	68.38

四级盘安装在五级盘上后, 倾斜一定角度安装上三级盘。可以明显看出产生了轴线偏斜, 此时外伸端变形变化量因超出圆度仪 600 μm 的量程, 已经无法测得。

试验 1 和试验 8 测量数据拟合结果矢量计算的同心度试验数据见表 8。可以得到当安装边组件倾斜安装时, 同心度大幅增大了 4.69 倍, 使得装配精度急剧下降, 危害极大, 应当拆卸下来重新安装。

表 8 倾斜装配同心度数据
Table 8 Tilt assembly concentricity data μm

序号	三级盘 拟合圆心	五级盘 拟合圆心	同心度
1	(-72.62, 114.66)	(-57.99, 69.63)	47.34
8	(-147.76, 25.26)	(35.83, -222.23)	269.27

4 结 论

1) 止口定心力的大小与止口过盈量和径向偏移量有关, 止口螺栓连接结构的过盈止口对轴线偏差有补偿作用, 仿真中 200 μm 的初始轴线偏差在装配后接近于 0 μm , 试验中 122 μm 的初始轴线偏差在装配后也大幅下降至 20.54 μm 。

2) 获得更高装配精度的最优装配工艺为拧紧顺序应使用对角交叉拧紧、拧紧步数应使用三步拧紧、工艺螺栓数量应使用 4 颗。

3) 当安装边组件倾斜安装时, 同心度随倾斜角度增大而增大, 试验中同心度增大了 4.69 倍, 使得装配精度大幅下降, 因此装配过程中一定要避免倾斜装配。

参考文献:

[1] 尹泽勇, 秦亚欣, 李建榕, 等. 新时期我国民用航空发动机自主发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 185-191.
Yin Zeyong, Qin Yaxin, Li Jianrong, et al. Independent development strategy of civil aero-engine in China in the new era[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 185-191. (in Chinese)

[2] 向巧, 黄劲东, 胡晓煜, 等. 航空动力强国发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 106-112.
Xiang Qiao, Huang Jindong, Hu Xiaoyu, et al. Research on aero engine empower development strategy[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 106-112. (in Chinese)

[3] 刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 2-28.
Liu Jianhua, Sun Qingchao, Cheng Hui, et al. The state-of-the-art, connotation and developing trends of the products assembly technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 2-28. (in Chinese)

[4] 张子豪, 郭俊康, 洪军, 等. 航空发动机高压转子装配偏心

预测和相位优化的智能算法应用研究[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2): 47-54.
Zhang Zihao, Guo Junkang, Hong Jun, et al. Application study of intelligent algorithms for prediction and phase optimization of assembly eccentricity of aero-engine high pressure rotor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2): 47-54. (in Chinese)

[5] 陈凯, 唐湘林, 叶飞, 等. 航空发动机转子装配工艺仿真与预测研究[J]. 风机技术, 2021, 63(1): 72-78.
Chen Kai, Tang Xianglin, Ye Fei, et al. Research on aero-engine rotor assembly process simulation and prediction[J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2021, 63(1): 72-78. (in Chinese)

[6] Beaudoin M A, Behdinan K. Analytical lump model for the nonlinear dynamic response of bolted flanges in aero-engine casings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115: 14-28.

[7] Qin Zhaoye, Han Qinkai, Chu Fulei. Bolt loosening at rotating joint interface and its influence on rotor dynamics[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59: 456-466.

[8] Babu K N, Naresh H, Srinivasa Gupta G. Design and analysis of bolted joint for rocket motor casing[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 5165-5174.

[9] 郭飞燕, 刘检华, 邹方, 等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 110-132.
Guo Feiyan, Liu Jianhua, Zou Fang, et al. Research on the state-of-art, connotation and key implementation technology of assembly process planning with digital twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 110-132. (in Chinese)

[10] 岳伟, 梅庆, 张大义, 等. 高速可拆卸转子止口连接结构稳健性设计方法[J]. 航空动力学报, 2017, 32(7): 1754-1761.
Yue Wei, Mei Qing, Zhang Dayi, et al. Robust design method of rabbet joint structure in high speed assemble rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(7): 1754-1761. (in Chinese)

[11] 李伦绪, 陈果, 于平超, 等. 止口螺栓连接结构非线性刚度机理分析及数值仿真[J]. 航空动力学报, 2021, 36(2): 358-368.
Li Lunxu, Chen Guo, Yu Pingchao, et al. Nonlinear stiffness mechanism analysis and numerical simulation of rabbet-bolted connection structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(2): 358-368. (in Chinese)

[12] Li Jian, Lai Xiaoxu, Zou Peng, et al. Effect of imbalanced interface pre-tightening force on the bearing behavior of carbon fiber reinforced polymer interference-fit lap joint[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(4): 16878140211012540.

[13] Nizametdinov F R, Romashin Y S, Berne A L, et al. Investigation of bending stiffness of gas turbine engine rotor flanged connection[J]. Journal of Mechanics, 2020, 36(6): 729-736.

[14] Berne A L, Leont'ev M K, Nizametdinov F R, et al. Investigation of bending stiffness for flange joint of GTE rotor[J]. Mechanics of Solids, 2019, 54(3): 435-439.

[15] 汪振禹, 陈世军, 李亚楠. 航空发动机高涡转子过盈止口装配研究[J]. 航空精密制造技术, 2024, 60(1): 44-46, 50.
Wang Zhenyu, Chen Shijun, Li Yanan. Research on Assembly of interference fit rabbet of Aero-engine High-pressure Turbine rotor[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2024, 60(1): 44-46, 50. (in Chinese)

[16] 李小冬. 航空发动机转子止口一螺栓装配工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Li Xiaodong. Research on assembly process of aeroengine rotor rabbet-bolt joint structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)

- [17] Chen Xiao, Jin Xin, Shang Ke, et al. Entropy-based method to evaluate contact-pressure distribution for assembly-accuracy stability prediction[J]. *Entropy*, 2019, 21(3): 322.
- [18] Shi Song, Liu Jianhua, Gong Hao, et al. Modeling of error transfer in multistage rotors assembly of aero engine considering rough surface contact[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(17): 208-219.
- [19] Shi Song, Liu Jianhua, Gong Hao, et al. Assembly accuracy analysis and phase optimization of aero-engine multistage rotors considering surface morphology and non-uniform contact deformation[J]. *Precision Engineering*, 2024, 88: 595-610.
- [20] Sun Yanhui, Guo Junkang, Hong Jun, et al. Modeling of rotation accuracy of multi-support rotating machinery considering geometric errors and part deformation[J]. *Assembly Automation*, 2020, 40(5): 665-673.
- [21] Li Lin, Liu Hao, Zhu Linbo, et al. Simulation analysis on crucial assembly parameter of high pressure rotor in aero-engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(12): 72-76.
- [22] Du Hailei, Sun Huibin, Huang Jian, et al. Optimizing aero-engine rotor part matching considering assembly accuracy[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(5): 1292-1299.
- [23] Zhu L B, Bouzid A H, Hong J, et al. Numerical simulation of the assembly process of bolted flange joints used in rotating machinery[C]//Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference (PVP). New York: ASME, 2020.
- [24] 罗忠, 石宝龙, 吴法勇, 等. 考虑装配工艺的螺栓连接转子系统振动特性研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(8): 396-406.
Luo Zhong, Shi Baolong, Wu Fayong, et al. Study on the vibration characteristics of bolted joint rotor system considering assembly technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(8): 396-406. (in Chinese)
- [25] 张伟刚. 航空发动机带止口转子结构装配工艺方法研究[J]. *机械管理开发*, 2024, 39(3): 7-9.
Zhang Weigang. Research on the assembly process method of aero-engine rotor structure with stopcock[J]. *Mechanical Management and Development*, 2024, 39(3): 7-9. (in Chinese)
- [26] 张明栋. 航空发动机盘鼓组合结构装配工艺稳定性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
Zhang Mingdong. Research on assembly process stability of aero-engine disc-drum composite structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)