

# 装配工艺参数对止口螺栓连接结构力学特性的影响分析

罗忠<sup>1,2,3</sup>, 罗永恒<sup>1,2</sup>, 熊鑫<sup>1,2,3</sup>, 吴法勇<sup>4</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学 佛山研究生创新学院, 广东 佛山 528312; 4. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

**摘要:** 以航空发动机转子系统中止口螺栓连接结构为研究对象, 基于单螺栓连接结构分析弯曲刚度的非线性特征, 利用ANSYS实体单元建模方法分析连接结构的弯曲刚度, 重点讨论了有无止口连接、预紧力、螺栓直径、止口过盈量等装配工艺参数对连接结构弯曲刚度的影响规律, 并分析了止口连接结构对转子系统固有特性的影响。研究表明: 止口连接结构的弯曲刚度呈现分段特性; 增大预紧力、螺栓直径以及止口过盈量能提高连接结构弯曲刚度; 有无止口连接结构的转子系统前三阶固有频率的相对误差小于2%, 止口连接结构能够降低转子系统的最大振动幅值。

**关键词:** 止口螺栓连接; 弯曲刚度; 接触界面; 装配工艺参数; 振动特性

中图分类号: V 232.7 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)09-1268-09

## Analysis of Influence of Assembly Process Parameters on Mechanical Properties of Bolted Joint with Spigots

LUO Zhong<sup>1,2,3</sup>, LUO Yong-heng<sup>1,2</sup>, XIONG Xin<sup>1,2,3</sup>, WU Fa-yong<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. School of Foshan Graduate Innovation, Northeastern University, Foshan 528312, China; 4. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China. Corresponding author: LUO Zhong, E-mail: zhluo@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The bolted joint with spigots of the aero-engine rotor system is taken as the research object, and the non-linear characteristics of the bending stiffness of the single bolted joint are analyzed. The bending stiffness of the bolted joint is analyzed by ANSYS, and the influence laws of such assembly process parameters as the bolted joint with or without a spigot, the initial preload of bolts, bolt diameter, and the interference of the spigot on the joint bending stiffness are discussed. The influence of the spigot on the inherent characteristics of the aero-engine rotor system is analyzed. The results show that the bending stiffness of the joint with the spigot presents piecemeal characteristics. Increasing preload of bolts, the bolt diameter and the interference of the spigot can improve the bending stiffness of the bolted joint. The relative error of the first three order natural frequency is less than 2% for rotor system with or without spigots. The bolted joint with spigots can reduce the maximum vibration amplitude of the rotor system.

**Key words:** bolted joint with spigots; bending stiffness; contact interface; assembly process parameter; vibration characteristics

螺栓连接结构具有结构简单、拆卸方便、连接性能好等优点, 成为了目前航空发动机转子系统中普遍采用的连接结构<sup>[1]</sup>。然而, 随着转子额定工作转速的一再突破, 为了进一步提高发动机稳

定性,设计者常常在螺栓连接的基础上增加了止口连接,也就使连接结构存在更多的连接界面,结构中非连续特征明显增强,改变连接结构固有特性的同时,负载冲击时会使连接结构的刚度特性更加复杂<sup>[2]</sup>。

建立精确的螺栓连接结构模型,是研究螺栓连接转子系统力学及动力学特性的关键,近年来已经有众多国内外学者在连接结构建模方面开展了大量工作. Montgomery<sup>[3]</sup>基于具有耦合节点的线单元和具有星型梁的线单元,提出了耦合节点、梁单元、刚体单元、实体单元4种螺栓连接的建模方法; Luan等<sup>[4]</sup>建立双线性弹簧动力学模型,分析了螺栓连接结构的静力学特性; Wang等<sup>[5]</sup>利用等效弯曲梁模型建立了螺栓连接结构的弯曲刚度模型,研究发现螺栓连接结构对转子系统的局部刚度有显著影响; Yu等<sup>[6]</sup>提出了一种含有 Jenkins单元的螺栓连接结构非线性解析模型,分析了连接结构的黏滞和滑动状态。

在螺栓连接结构刚度特性方面,一些学者也做了相关研究. Luo等<sup>[7]</sup>建立了螺栓连接结构的时变弯曲刚度模型,并分析了预紧力、盘心距对弯曲刚度的影响规律; Wu等<sup>[8]</sup>建立了螺栓连接结构模型,分析了不同载荷下连接结构的刚度影响因素; 姚星宇等<sup>[9]</sup>分析了螺栓预紧力下螺栓连接结构的压力分布规律,并提出了螺栓连接结构刚度的理论表达式; Shi等<sup>[10]</sup>考虑了微观尺度上接触颗粒的弹塑性行为和宏观尺度上连接界面的压力分布,提出了一种改进的接触刚度模型,通过固有频率试验验证了模型的正确性; Liu等<sup>[11]</sup>研究了结构参数和外载荷对转子系统中螺栓连接刚度和接触状态的动态影响; Niu等<sup>[12]</sup>建立了考虑螺栓预紧力时变不确定性的接触刚度模型,研究了螺栓连接的接触刚度衰减规律; Li等<sup>[13]</sup>提出了带有螺栓连接结构的半解析模型,分析了螺栓预紧力、螺栓个数等参数对连接结构的动力学响应. Qin等<sup>[14]</sup>研究了螺栓松动对连接界面的时变刚度的影响规律; Sun等<sup>[15]</sup>考虑螺栓连接界面的装配工艺参数,建立了鼓-盘-轴转子系统动力学模型,分析了转速、不平衡量、连接刚度对转子系统动态响应的影响。

在螺栓连接结构固有特性方面, Zhao等<sup>[16]</sup>在有限元模型中引入薄层单元来表示界面接触刚度,并研究了螺栓预紧力对前六阶固有频率的影响; Wall等<sup>[17]</sup>通过对螺栓连接模态耦合试验,发现在螺栓连接结构中引入刚度非线性将导致固

有频率的软化。

综上所述,目前国内外学者对螺栓连接力学特性、等效建模方法以及含螺栓连接的转子系统动力学特性的研究已经取得了一系列的成果. 目前部分学者也针对止口连接结构做了一定的研究,虽然在建模过程中考虑了止口连接,但对于止口连接结构弯曲刚度特征以及装配工艺参数对止口连接结构弯曲刚度影响规律的研究没有深入而详尽的探讨. 针对这一问题,本文以转子系统中止口螺栓连接结构为研究对象,分析了止口连接结构非线性刚度特征及产生机理,建立了止口连接结构的有限元模型,分析了有无止口连接、螺栓预紧力、螺栓直径、止口过盈量对连接结构弯曲刚度的影响规律,最后分析了有无止口连接对转子系统固有特性的影响。

## 1 止口连接结构刚度特性分析

### 1.1 连接结构

典型的航空发动机转子系统连接结构如图1所示. 基于材料和结构参数的要求,转子系统通常由不同的组件通过连接结构连接而成,螺栓提供轴向预紧力保证连接的可靠性,止口过盈配合使得装配定心更加可靠,同时也能进一步抑制连接结构在轴向和径向的相对运动。

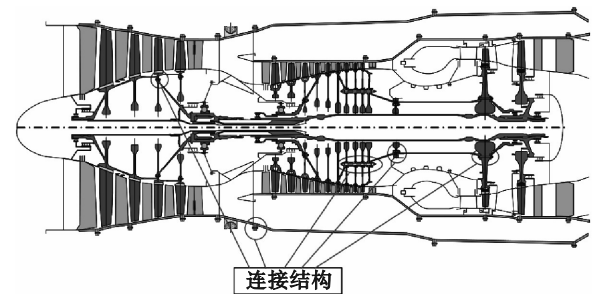


图1 转子系统连接结构示意图

Fig. 1 Connection structure diagram of the rotor system

转子系统工作时,由于陀螺力矩和不平衡力的作用,连接结构会承受复杂的弯矩载荷,螺栓、法兰以及止口等结构都会产生一定的变形,螺栓-法兰、法兰-法兰以及止口间的非连续性接触面的接触状态会发生突变,对弯矩载荷下连接结构的力学特性有显著影响。

### 1.2 连接结构非线性刚度分析

为分析连接结构的非线性刚度,将转子系统中连接结构简化为如图2所示的螺栓法兰连接结

构. 止口连接结构在承受复杂的弯矩载荷时, 一部分区域承受拉伸载荷时形成拉伸区域; 另一部分区域承受压力载荷时形成压缩区域.

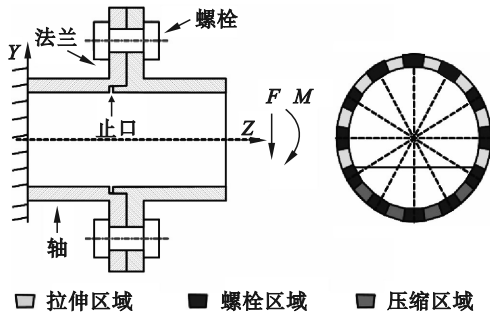


图 2 连接结构变形区域分析

Fig. 2 Deformation zone analysis of the connection structure

在弯矩载荷的作用下, 整个连接结构在弯矩的作用下应力可分解为多个单螺栓区域在轴向拉伸或压力载荷作用下的应力. 因此, 可以从分析受轴向载荷作用的螺栓区域的角度来表征连接结构弯曲刚度的非线性特征. 当受到压力载荷时, 载荷在压缩区域的应力平衡如图 3a 所示. 在这种情况下, 轴向刚度主要取决于压缩面积, 压缩区域可提供足够的刚度抵抗变形. 当对接头施加较小的拉伸载荷时, 止口结构内的摩擦力能够平衡外部载荷, 因此止口处于黏滞状态. 在这种情况下, 轴向刚度主要由止口的切向刚度决定, 同时, 法兰也可以提供一定的刚度. 当拉伸载荷大于摩擦力时, 止口发生滑移, 法兰结构发生弯曲变形, 如图 3b 所示. 这种情况下的轴向刚度取决于法兰结构的弯曲刚度. 因此, 随着轴向载荷的变化, 螺栓连接的轴向刚度呈非线性变化. 此外, 当施加交变载荷时, 止口会出现重复的黏滞和滑移状态.

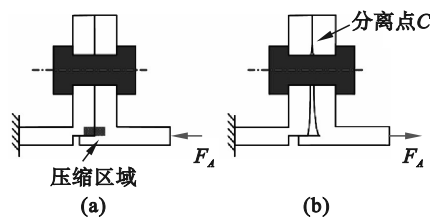


图 3 不同轴向载荷下的力学行为

Fig. 3 Mechanical behavior under different axial loads  
(a)—压力载荷; (b)—拉伸载荷.

当轴向载荷  $F_A \leq 0$  时, 单个螺栓连接结构处于压缩状态如图 3a 所示, 压缩刚度  $k_c$  如式(1)所示:

$$k_c = \frac{EWh_c}{h_{ca}} \quad (1)$$

式中:  $E$  为连接材料的杨氏模量;  $h_{ca}$  为压缩区域的轴向长度;  $W$  为螺栓区域轴向压缩区域的平均宽度;  $h_c$  为止口径向宽度. 当轴向载荷  $F_A > 0$  时, 单个螺栓连接结构处于拉伸状态, 如图 3b 所示, 拉伸刚度的变化趋势主要包括两个阶段.

第一阶段单个螺栓连接结构处于止口结构黏滞状态, 拉伸刚度  $k_1$  取决于止口结构黏滞状态下的切向刚度  $k_0$ ,

$$k_1 = k_0 \quad (2)$$

第二阶段单个螺栓连接结构处于止口滑移状态, 结合面出现分离点  $C$ , 如图 3b 所示. 可以将单个螺栓连接结构的扇形区域简化为梁模型, 如图 4 所示. 该模型将单个螺栓连接结构简化为一端有固定约束的弹性欧拉梁, 其中,  $l_{AB}$  为轴到螺栓中心的距离,  $l_{AC}$  为分离点  $C$  到轴的距离, 螺栓简化为具有刚度  $k_b$  的弹簧, 由于法兰弯曲时轴有加强作用, 因此在点  $A$  应存在弯矩  $M_A$ , 并且存在边界条件  $\theta_A = 0$ , 螺栓位置  $B$  处的位移记为  $\delta_B$ ,  $F_B$  为螺栓预紧力,  $I_F$  为单个螺栓区域的等效惯性矩. 根据梁理论的平衡方程和位移协调公式可得式(3)~(5).

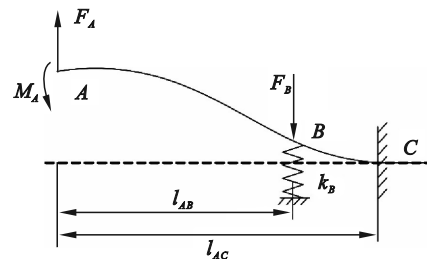


图 4 简化梁模型

Fig. 4 Simplified beam model

$$F_A l_{AC} - k_b \delta_B (l_{AC} - l_{AB}) - F_B (l_{AC} - l_{AB}) - M_A = 0, \quad (3)$$

$$\theta_A = \frac{F_A l_{AC}^2}{2EI_F} - \frac{k_b \delta_B (l_{AC} - l_{AB})^2}{2EI_F} - \frac{F_B (l_{AC} - l_{AB})^2}{2EI_F} - \frac{M_A l_{AC}}{EI_F} = 0, \quad (4)$$

$$\delta_B = \frac{F_A (l_{AC} - l_{AB})^2 (3l_{AC} - (l_{AC} - l_{AB}))}{6EI_F} - \frac{F_B (l_{AC} - l_{AB})^3}{3EI_F} - \frac{k_b \delta_B (l_{AC} - l_{AB})^3}{3EI_F} - \frac{M_A (l_{AC} - l_{AB})^2}{2EI_F} \quad (5)$$

同时求解式(3)~(5)可以得到未知数  $\delta_B, l_{AC}, M_A$ . 根据式(6)可以得到法兰的位移  $\delta_A$ , 将其代入式(7), 求得等效刚度  $k_2$ .

$$\delta_A = \frac{F_A l_{AC}^3}{3EI_F} - \frac{F_B (l_{AC} - l_{AB})^2 (2l_{AC} + l_{AB})}{6EI_F} - \frac{k_b \delta_B (l_{AC} - l_{AB})^2 (2l_{AC} + l_{AB})}{6EI_F} - \frac{M_A l_{AC}^2}{2EI_F}, \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{F_A}{\delta_A} \quad (7)$$

由上述推导,最终可以得到压缩和拉伸条件下的刚度  $k_c, k_t$ . 为了分析弯曲刚度,引入以下假设:①法兰的接触面积符合小变形假设;②将单螺栓连接结构的轴向变形简化为轴向弹簧,压缩刚度为  $k_c$ 、拉伸刚度为  $k_t$ ;③弹簧只有在施加力矩时才发生变形. 其中  $\delta_t$  为轴向拉伸变形,  $\delta_c$  为轴向压缩变形,  $M$  为承受弯矩,  $\theta$  为弯曲角度.

连接结构轴向变形如图 5 所示. 在循环载荷作用下,连接结构承受的拉压载荷不断变化,单个螺栓连接结构具有不同的变形特征,压缩刚度基本保持不变,拉伸刚度具有明显的非线性特征. 在止口连接结构中,单个螺栓连接结构的拉压刚度决定了止口连接结构的弯曲刚度,使弯曲刚度表现出复杂的非线性特征.

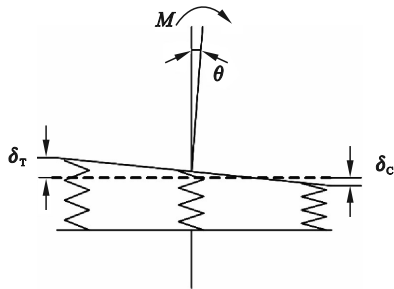


图 5 连接结构轴向变形

Fig. 5 Axial deformation of the connection structure

## 2 有限元模型建立及静力学分析

在复杂的弯矩下,连接结构弯曲刚度表现出复杂的非线性特征,因此建立了止口连接结构和无止口连接结构的有限元模型,验证了止口连接结构的非线性弯曲刚度特征,对比分析了止口连接结构和无止口连接结构的弯曲刚度、接触状态及承载能力.

### 2.1 连接结构有限元模型的建立

利用 ANSYS 有限元仿真软件,建立了如图 6 所示的止口螺栓连接结构有限元模型. 为分析装配工艺参数对连接结构连接性能的影响规律,在螺栓连接结构的有限元建模中忽略了垫片结构,其中单元类型选择如表 1 所示,材料参数如表 2 所示. 在设置边界条件时,约束连接结构左端轴的端面全部自由度,在右端轴的端面中心处建立一个无质量的弯矩节点,与连接结构右端所有节点进行刚化耦合,在中心点处施加载荷.

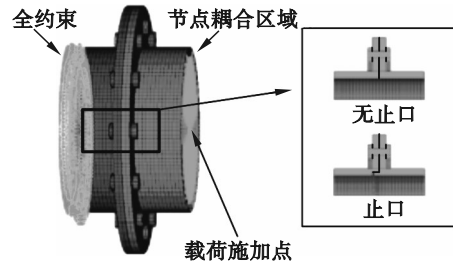


图 6 连接结构有限元模型

Fig. 6 Finite element model of the connection structure

表 1 单元类型选择  
Table 1 Element type selection

| 特征类型  | 单元类型                   |
|-------|------------------------|
| 实体建模  | Solid 185              |
| 接触设置  | Target 170 与 Conta 174 |
| 预紧力设置 | Prets 179              |
| 过盈配合  | CNOF                   |

注: CNOF(contact surface offset), 实常数名称.

表 2 连接结构材料参数  
Table 2 Material parameters of the connection structure

| 参数                                     | 数值    |
|--|-------|
| 弹性模量/GPa                               | 108   |
| 泊松比                                    | 0.34  |
| 密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 4 500 |
| 摩擦系数                                   | 0.15  |

### 2.2 静力学特性分析

根据 2.1 节中有限元模型的边界条件和载荷公式,分析止口连接结构和无止口连接结构的弯曲刚度. 图 7 为止口连接结构和无止口连接结构弯曲刚度随弯矩的变化曲线,止口连接结构与无止口连接结构随着弯矩的施加存在明显的刚度损失;止口连接结构的弯曲刚度显著大于无止口连接结构的弯曲刚度,这说明止口连接有利于提高连接结构的弯曲刚度. 止口连接结构的弯曲刚度大致分为两个阶段:第一阶段由于止口的存在,弯曲刚度随着弯矩的增加大致保持不变;第二阶段随着弯矩的增加刚度开始下降至一个相对稳定值,无止口连接结构的弯曲刚度随着弯矩的增加持续下降至一个相对稳定值. 文中与文献 [2] 中止口连接和无止口连接弯曲刚度变化规律趋势一致,如图 8 所示,验证了有限元模型和结论的正确性.

图 9 为前文数值分析得到的弯曲刚度计算结果. 在第一阶段弯曲刚度随着弯矩的增加保持不变,第二阶段弯曲刚度随着弯矩的增加开始下降至一个相对稳定值,与有限元仿真得到的结果变

化趋势一致,因此,数值分析与有限元分析结果相互验证,同时揭示了止口连接结构的非线性弯曲刚度特征.

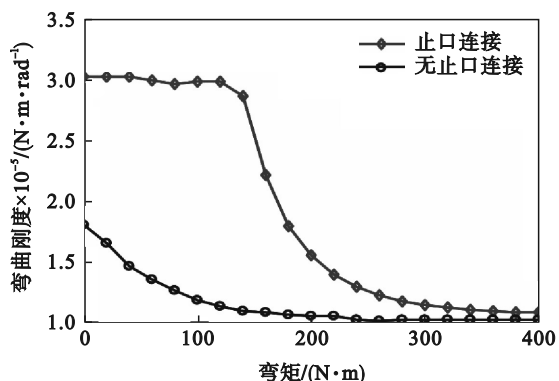


图 7 弯曲刚度的变化规律  
Fig. 7 Variation of bending stiffness

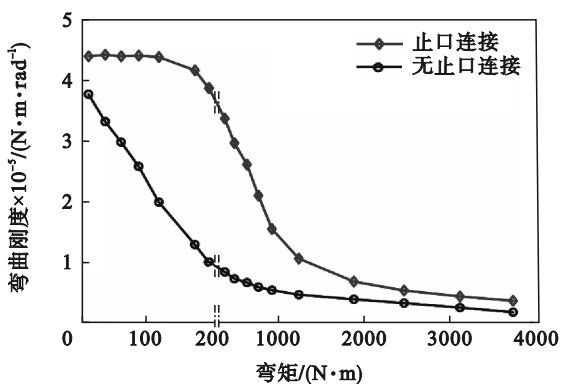


图 8 文献[2]中弯曲刚度的变化规律  
Fig. 8 Variation of the bending stiffness in literature [2]

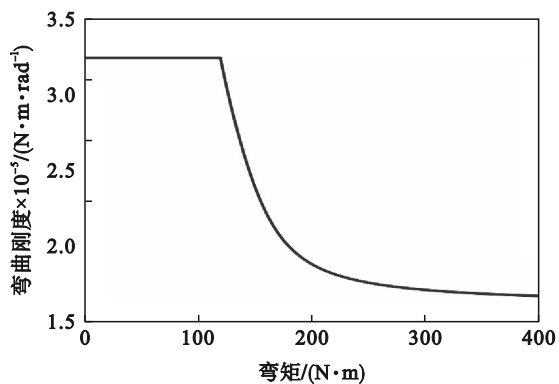
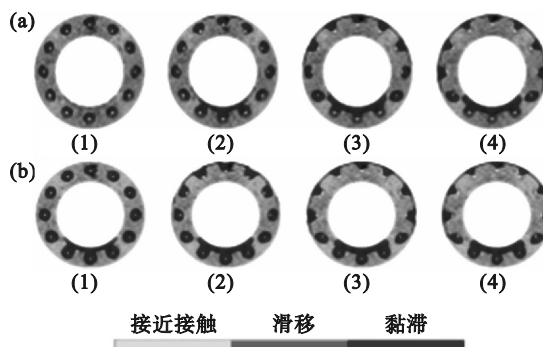


图 9 弯曲刚度数值分析结果  
Fig. 9 Results of numerical analysis of bending stiffness

为了更清晰地展示在承受弯矩时连接结构接触状态的变化趋势,分别对连接结构施加 20, 120, 260, 400 N·m 弯矩,止口连接结构和无止口连接结构接触状态的变化云图如图 10 所示.

由图 10 可知,当弯矩为 20 N·m 时,无止口

连接结构内侧出现了黏合区域;当弯矩增加到 120 N·m 时,止口连接结构内侧出现黏合区域,无止口连接结构黏合区域增大,并且螺栓孔附近黏合区域开始向连接结构外侧转移;当弯矩增加到 260 N·m 和 400 N·m 时,止口连接结构和无止口连接结构的黏合区域继续增大,螺栓孔附近黏合区域向连接结构外侧移动的趋势更加明显,但均未出现明显的不均匀滑移现象.由此可以得出结论,止口连接结构相较于无止口连接结构能够承受更大的弯矩.



注: (1)—20 N·m; (2)—120 N·m; (3)—260 N·m; (4)—400 N·m.

图 10 接触状态云图

Fig. 10 Contact status nephogram

(a)—止口连接结构; (b)—无止口连接结构.

施加弯矩后连接结构的承载能力也是关注的重点,提取如图 11 所示螺栓 1 的预紧力变化情况作为衡量承载能力的重要参数.

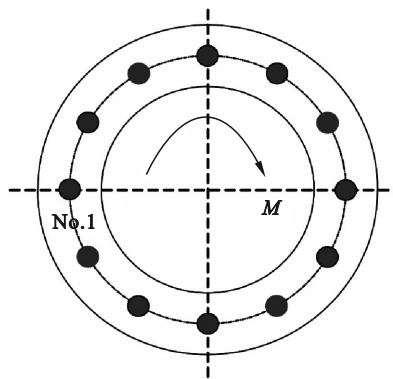


图 11 螺栓 1 的示意图

Fig. 11 Bolt 1 schematic diagram

图 12 表示随着弯矩的增加有无止口连接结构螺栓 1 预紧力和初始预紧力的倍数关系.螺栓 1 预紧力倍数关系变化曲线分为两个阶段:第一阶段内螺栓预紧力倍数为 1,说明第一阶段内螺栓预紧力不发生改变;第二阶段内螺栓预紧力倍数开始增加,并且无止口连接结构增加趋势大于

止口连接结构,无止口连接结构螺栓预紧力的变化更加显著,而且曲线出现拐点时止口连接结构能够承受大的弯矩.这说明止口连接结构相较于无止口连接结构能够承受更大的弯矩.

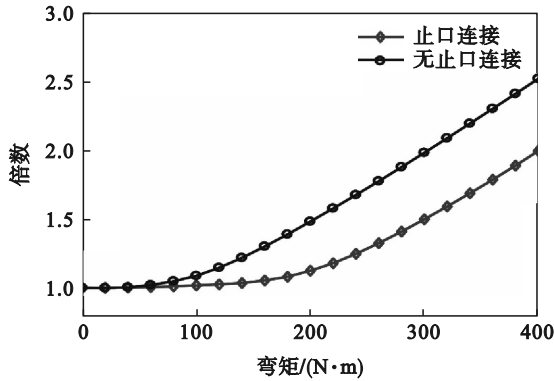


图 12 螺栓预紧力倍数关系

Fig. 12 Multiple relation of the bolt preload

### 3 装配工艺参数对止口连接结构弯曲刚度特性影响分析

为了研究装配工艺参数对连接结构非线性弯曲刚度特性的影响规律,根据单个螺栓连接结构扇形区域非线性刚度模型的影响参数,基于前文所建立的止口螺栓连接结构有限元模型,分别从螺栓预紧力、螺栓直径、止口过盈量几个方面进行弯曲刚度分析.

#### 3.1 螺栓预紧力对弯曲刚度特性影响分析

为探究螺栓预紧力  $F_b$  对连接结构的弯曲刚度特性的影响规律,设置螺栓的预紧力矩  $T_b$  分别为 20, 25, 30  $N \cdot m$ , 根据预紧力计算公式(8)可得螺栓预紧力  $F_b$  分别为 7 500, 9 500, 11 500 N, 并进行弯曲刚度特性分析.

$$T_b = KF_b d. \quad (8)$$

其中:  $K$  为拧紧力矩系数,取 0.22;  $d$  为螺栓直径.

不同预紧力下连接结构的弯曲刚度变化曲线如图 13 所示. 3 种预紧工况下第一阶段弯曲刚度基本保持不变,分别为  $3.03e+5$ ,  $3.11e+5$ ,  $3.21e+5 N \cdot m/rad$ ; 当弯矩分别达到 140, 160, 160  $N \cdot m$  时,弯曲刚度进入第二阶段;当弯矩达到 400  $N \cdot m$  时,连接结构的弯曲刚度分别为  $1.09e+5$ ,  $1.17e+5$ ,  $1.25e+5 N \cdot m/rad$ . 螺栓预紧力从 7 500 N 增加到 11 500 N, 第一阶段弯曲刚度提高了 5.94%, 第二阶段弯曲刚度提高了 14.7%. 因此,增大螺栓预紧力能够提高连接结构的弯曲刚度.

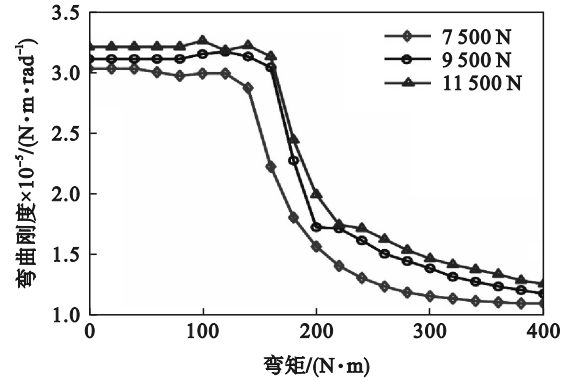


图 13 不同预紧力下连接结构弯曲刚度

Fig. 13 Bending stiffness of the connection structure under different bolt preload

图 14 为不同预紧力下螺栓预紧力倍数关系变化曲线.增大螺栓预紧力可以明显提高拐点时的弯矩值,第二段内初始预紧力越大,预紧力倍数值越小,所以增加螺栓初始预紧力可以明显提高连接结构的承载能力.

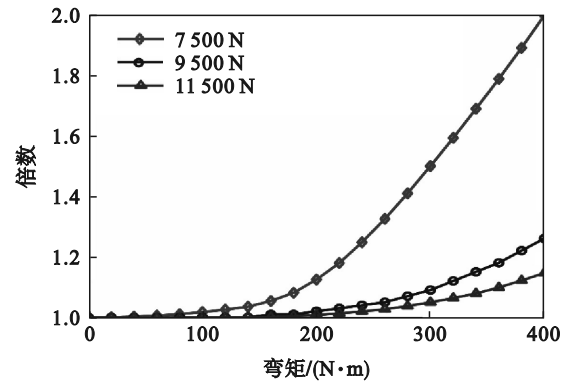


图 14 不同预紧力下螺栓预紧力倍数关系

Fig. 14 Multiple relation of the bolt preload under different preload

#### 3.2 螺栓直径对弯曲刚度特性影响分析

为探究螺栓直径对连接结构弯曲刚度特性的影响规律,建立螺栓直径分别为 12, 14, 16 mm 的连接结构有限元模型,进行弯曲刚度特性分析.连接结构的弯曲刚度变化曲线如图 15 所示.可以看出,连接结构的第一阶段弯曲刚度基本保持不变,分别为  $3.03e+5$ ,  $3.04e+5$ ,  $3.10e+5 N \cdot m/rad$ ; 当弯矩达到 100, 140, 140  $N \cdot m$  时,弯曲刚度进入第二阶段;当弯矩达到 400  $N \cdot m$  时,刚度分别为  $1.09e+5$ ,  $1.16e+5$ ,  $1.24e+5 N \cdot m/rad$ . 随着螺栓直径的增加,第一阶段弯曲刚度提高了 2.31%, 第二阶段弯曲刚度提高了 13.76%, 这说明增大螺栓直径能够提高连接结构的弯曲刚度,且增大螺栓直径对连接结构第二阶段弯曲刚度的增加更加显著.

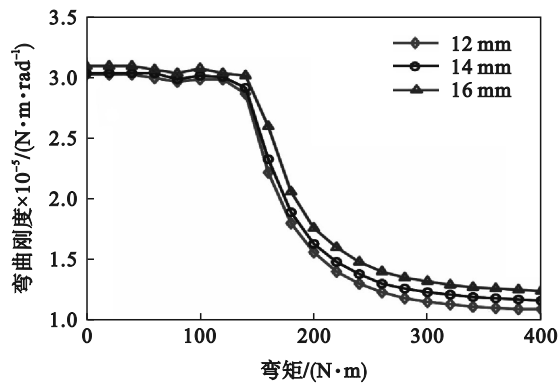


图 15 不同螺栓直径下连接结构弯曲刚度

Fig. 15 Bending stiffness of the connection structure under different bolt diameters

图 16 为不同螺栓直径下螺栓预紧力倍数关系变化曲线.增大螺栓直径并不能提高拐点时的弯矩,但螺栓直径越大,预紧力倍数越小,因此,增大螺栓直径可以提高连接结构的承载能力.

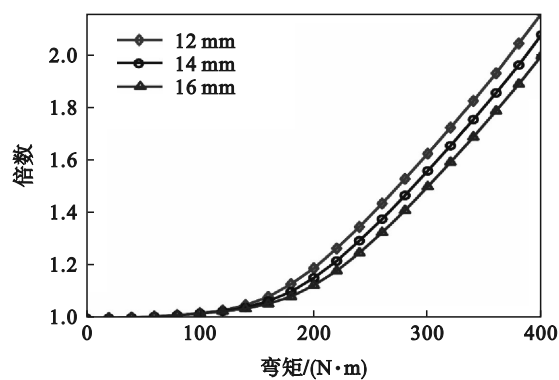


图 16 不同螺栓直径下螺栓预紧力倍数关系

Fig. 16 Multiple relation of the bolt preload under different bolt diameters

### 3.3 止口过盈量对弯曲刚度特性影响分析

为探究止口装配过盈量对连接结构弯曲刚度特性的影响规律,分别建立止口过盈量为 0.070, 0.085, 0.100 mm 的有限元模型,进行弯曲刚度特性分析.连接结构弯曲刚度曲线如图 17 所示,3 种过盈量工况连接结构的第一阶段弯曲刚度值基本保持不变,分别  $2.79 \times 10^5$ ,  $2.89 \times 10^5$ ,  $3.03 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ;当弯矩载荷达到  $140 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,弯曲刚度进入第二阶段;当弯矩载荷为  $400 \text{ N}\cdot\text{m}$  时,刚度值分别为  $1.08 \times 10^5$ ,  $1.09 \times 10^4$ ,  $1.09 \times 10^4 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ .随着止口装配过盈量的增加,第一阶段弯曲刚度提高了 8.60%,第二阶段弯曲刚度提高了 0.93%,这说明增加止口装配过盈量能够提高弯曲刚度,且对第一阶段弯曲刚度影响更加显著.

图 18 为不同止口装配过盈量下螺栓预紧力

倍数关系变化曲线.增大止口装配过盈量并不能提高拐点时的弯矩,但增大止口装配过盈量可以降低预紧力的变化情况,因此,增大止口装配过盈量可以提高连接结构的承载能力.

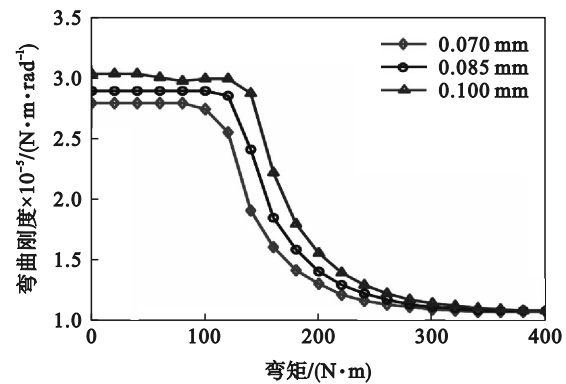


图 17 不同过盈量下连接结构弯曲刚度

Fig. 17 Bending stiffness of the connection structure under different interference

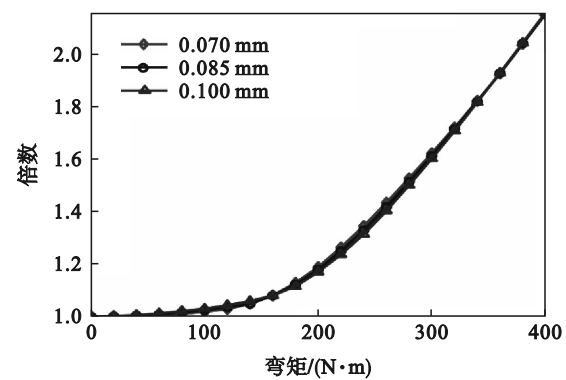


图 18 不同过盈量下螺栓预紧力倍数关系

Fig. 18 Multiple relation of the bolt preload under different interference

装配工艺参数的改变在一定程度上会影响连接结构的弯曲刚度,为了更直观地体现螺栓预紧力、螺栓直径、止口过盈量对连接结构弯曲刚度的影响情况,现绘制不同装配工艺参数的增幅对比条形图,如图 19 所示.止口过盈量对连接结构第一阶段弯曲刚度影响最显著,螺栓直径对连接结构第一阶段弯曲刚度影响最小;螺栓预紧力和螺栓直径对连接结构第二阶段弯曲刚度影响最显著,止口过盈量对连接结构弯曲刚度影响最小.

## 4 螺栓连接转子系统振动特性分析

连接结构弯曲刚度特性随弯矩的变化存在非线性变化特征,连接结构接触界面之间刚度和

接触状态的变化必然会引起螺栓连接转子系统动力学特性的改变.基于连接结构弯曲刚度的变化规律,分析止口连接结构和无止口连接结构对转子系统振动特性的影响规律,从而对航空发动机螺栓连接转子系统的设计、装配提供一定的参考意义.针对图1所示的航空发动机转子系统中低压转子系统,利用ANSYS实体单元建模方法建立如图20所示的低压转子系统有限元模型,其中单元类型选择如表1所示,材料参数如表2所示,采用弹簧单元combin 14模拟轴承支撑.

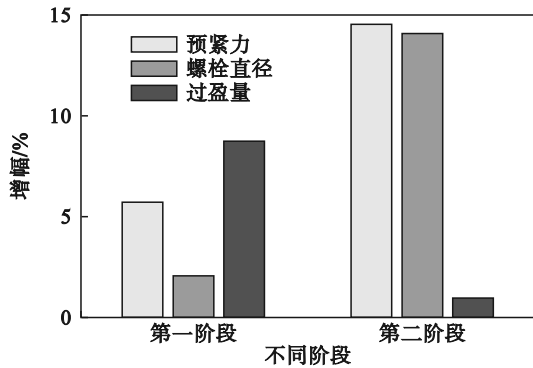


图19 装配工艺参数对弯曲刚度增幅对比  
Fig. 19 Comparison of assembly process parameters on increase of bending stiffness

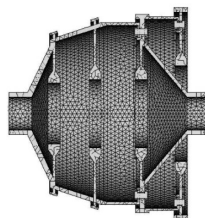


图20 低压转子系统有限元模型  
Fig. 20 Finite element model of the low pressure rotor system

为研究有无止口连接结构对转子系统固有特性的影响,基于建立的转子系统有限元模型和边界条件,进行模态分析,得到止口螺栓连接转子系统的前三阶振型如图21所示,无止口螺栓连接转子系统的前三阶振型如图22所示.

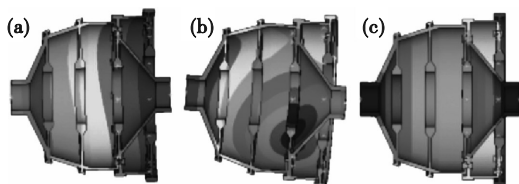


图21 止口螺栓连接转子系统前三阶振型  
Fig. 21 First three modes of the rotor system with the spigot  
(a)——一阶; (b)——二阶; (c)——三阶.

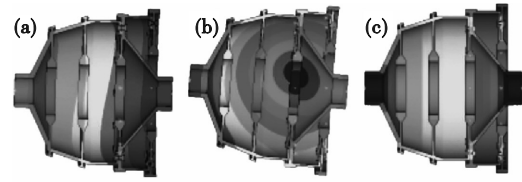


图22 无止口螺栓连接转子系统前三阶振型  
Fig. 22 First three modes of the rotor system without the spigot  
(a)——一阶; (b)——二阶; (c)——三阶.

对比分析止口螺栓连接转子系统和无止口螺栓连接转子系统的前三阶固有频率,如表3所示.

表3 转子系统前三阶固有频率  
Table 3 First three natural frequencies of the rotor system

| 模态阶数 | 频率/Hz  |        | 相对误差% |
|------|--------|--------|-------|
|      | 止口     | 无止口    |       |
| 一阶   | 34.958 | 34.953 | 0.014 |
| 二阶   | 53.004 | 52.725 | 0.53  |
| 三阶   | 360.75 | 366.53 | 1.58  |

图23为螺栓连接转子系统的幅频特性曲线,止口螺栓连接转子系统的最大振动幅值为 $9.83 \times 10^{-3}$  mm,无止口螺栓连接转子系统的最大振动幅值为 $1.10 \times 10^{-3}$  mm,止口结构能够提高连接结构的刚度,降低转子系统的振动幅值.

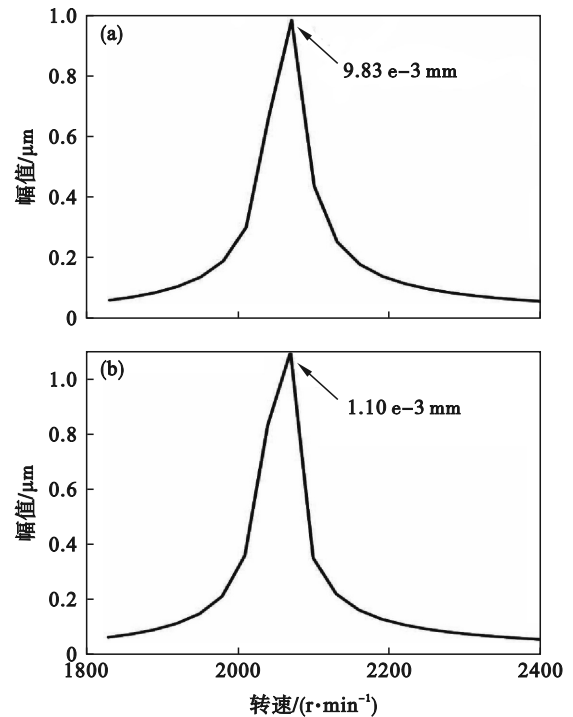


图23 转子系统幅频特性曲线  
Fig. 23 Amplitude-frequency characteristic curve of the rotor system  
(a)——止口连接; (b)——无止口连接.

由表3可以看出,有无止口连接结构对转子系统固有频率的影响随着模态阶数的增大而增大,固有频率的相对误差也在增大,但前三阶的固有频率相对误差小于2%,说明连接结构形式的变化对转子系统固有特性的影响比较小.止口连接能够降低转子系统的最大振动幅值,能够有效地提高连接结构的弯曲刚度、改善接触特性以及提高承载能力,对提高转子力学性能、降低转子振动意义重大.

## 5 结 论

1) 以转子系统中止口螺栓连接结构为研究对象,建立了单螺栓连接结构拉压刚度解析模型,分析了单螺栓连接结构的拉压刚度,得到了止口连接结构的非线性弯曲刚度特征.基于ANSYS建立了止口连接结构的有限元模型,通过静力学分析,对比了有无止口连接结构的弯曲刚度曲线、接触状态和承载能力,止口连接结构能够提高连接结构的弯曲刚度及其稳定性.

2) 通过装配工艺对止口连接结构弯曲刚度和承载能力的影响规律可知,增大螺栓预紧力、螺栓直径、止口装配过盈量均能提高连接结构的弯曲刚度和承载能力,螺栓预紧力从7 500 N增加到11 500 N时,第二阶段弯曲刚度提高了14.7%;止口过盈量从0.070 mm提高到0.100 mm时,对第一阶段弯曲刚度影响比较显著,增加了8.60%;螺栓直径从12 mm增大到16 mm时,对第二阶段弯曲刚度影响比较显著,增加了13.76%.

3) 建立了转子系统有限元模型,得到了转子系统前三阶振型、固有频率和最大振动幅值,结果表明止口连接结构对转子系统的固有频率的影响随着模态阶数的增大而增大,但前三阶固有频率的相对误差小于2%,而且止口连接结构能够降低转子系统的最大振动幅值.

### 参考文献:

[1] 马辉,高昂,杨天瑞,等.止口及螺栓对法兰盘结构静力学特性的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(10):1438-1445.  
(Ma Hui, Gao Ang, Yang Tian-rui, et al. Influence of rabbets and bolts on static characteristics of flange structures [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(10): 1438-1445.)

[2] 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 Lun-xu, Chen Guo, Yu Ping-chao, et al. Nonlinear

stiffness mechanism analysis and numerical simulation of rabbet-bolted connection structure [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(2): 358-368.)

- [3] Montgomery J. Methods for modeling bolts in the bolted joint [C]//ANSYS User's Conference. Orlando, Florida, 2002:5.
- [4] Luan Y, Guan Z Q, Cheng G D, et al. A simplified nonlinear dynamic model for the analysis of pipe structures with bolted flange joints [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2012, 331(2): 325-344.
- [5] Wang C, Zhang D Y, Zhu X B, et al. Study on the stiffness loss and the dynamic influence on rotor system of the bolted flange joint [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. Düsseldorf, 2014: 1-13.
- [6] Yu P C, Li L X, Chen G, et al. Dynamic modelling and vibration characteristics analysis for the bolted joint with spigot in the rotor system [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 94: 306-331.
- [7] Luo Z, Li Y Q, Li L, et al. Nonlinear dynamic properties of the rotor-bearing system involving bolted disk-disk joint [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, 235(20): 4884-4899.
- [8] Wu Z J, Nassar S A, Yang X J. Nonlinear deformation behavior of bolted flanges under tensile, torsional, and bending loads [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2014, 136(6): 061201.
- [9] 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 Xing-yu, Wang Jian-jun. Effects of load and structure parameters of aero-engine bolted joints on joint stiffness [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(2): 424-433.)
- [10] Shi W B, Zhang Z S. An improved contact parameter model with elastoplastic behavior for bolted joint interfaces [J]. *Composite Structures*, 2022, 300: 116178.
- [11] Liu S G, Ma Y H, Zhang D Y, et al. Studies on dynamic characteristics of the joint in the aero-engine rotor system [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 29: 120-136.
- [12] Niu N N, Zhao Y S, Yang C B, et al. Contact stiffness attenuation model of bolted joint based on time-varying uncertainty [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 124(11): 3847-3856.
- [13] Li C F, Qiao R H, Tang Q S, et al. Investigation on the vibration and interface state of a thin-walled cylindrical shell with bolted joints considering its bilinear stiffness [J]. *Applied Acoustics*, 2021, 172: 107580.
- [14] Qin Z Y, Han Q K, Chu F L. Bolt loosening at rotating joint interface and its influence on rotor dynamics [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 59: 456-466.
- [15] Sun W, Li T, Yang D J, et al. Dynamic investigation of aeroengine high pressure rotor system considering assembly characteristics of bolted joints [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 112: 104510.
- [16] Zhao G, Xiong Z L, Jin X, et al. Prediction of contact stiffness in bolted interface with natural frequency experiment and FE analysis [J]. *Tribology International*, 2018, 127: 157-164.
- [17] Wall M, Allen M S, Kuether R J. Observations of modal coupling due to bolted joints in an experimental benchmark structure [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 162: 107968.