

文章编号:1000-8055(2021)02-0358-11

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2021.02.014

止口螺栓连接结构非线性刚度机理分析 及数值仿真

李伦绪, 陈 果, 于平超, 杨默晗
(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘 要: 以高速转子的止口螺栓连接结构为研究对象, 从结构不同阶段的应力-应变分析和有限元数值仿真两方面研究其拉伸刚度和弯曲刚度的非线性特征及其形成机理, 重点讨论了止口对连接结构非线性刚度的影响, 获得了关键参数对连接刚度的影响规律, 在此之上, 定量分析了止口螺栓连接刚度损失对某高压转子振动特性的影响。结果表明: 止口螺栓连接结构受拉时具有 3 种变形状态, 拉伸刚度呈现分段非线性特征。弯曲刚度具有“倒 S”形非线性变化规律, 非线性拉伸刚度和拉压区域面积变化是其产生的内在原因。止口紧度对弯曲刚度影响较为明显, 转速则影响较小。止口螺栓连接刚度损失对弯曲型和俯仰型临界转速存在一定影响, 而对平动型临界转速影响极小。

关 键 词: 高速转子; 止口螺栓连接; 非线性刚度; 特征参数; 动力特性

中图分类号: V231.96

文献标志码: A

Nonlinear stiffness mechanism analysis and numerical simulation of rabbet-bolted connection structure

LI Lunxu, CHEN Guo, YU Pingchao, YANG Mohan

(College of Civil Aviation,

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

Abstract: Focusing on the rabbet-bolted connection structure of high speed rotor, the nonlinear mechanism of tensile stiffness and bending stiffness was analyzed based on structure's stress and strain analysis of different deformation stages and finite element numerical simulation. The influence of rabbet on the nonlinear stiffness of connection structure was discussed, the influence regulation of key parameters on the connection stiffness was obtained, and then the influence of stiffness loss on vibration characteristics of high pressure rotor was analyzed quantitatively. Results showed that, the rabbet-bolted connection structure had three deformation states when the structure was in tension, and the tensile stiffness was piecewise nonlinear. The bending stiffness had an inverted S-shaped nonlinear change regulation due to the nonlinear tensile stiffness and the change of tension and compression area. The penetration of rabbet had obvious influence on the bending stiffness, while the rotational speed had little influence. The stiffness loss of rabbet-bolted connection had a certain

收稿日期:2020-07-07

基金项目: 国家科技重大专项(2017-IV-0008-0045); 国家自然科学基金(51675263, 52005252);
中央高校基本科研业务费(NT2020018)

作者简介: 李伦绪(1995-), 男, 硕士生, 主要从事转子动力学研究。E-mail: lilunxu@nuaa.edu.cn

通信作者: 于平超(1991-), 男, 讲师, 博士, 主要从事转子动力学研究。E-mail: yupingchao@nuaa.edu.cn

引用格式: 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.

effect on the critical speed of bending type and pitching type, but it had little effect on the critical speed of translational type.

Key words: high speed rotor; rabbet-bolted connection; nonlinear stiffness; characteristic parameters; dynamic property

止口螺栓连接结构由于结构简单、安装方便、定心性能好等优势,成为现代航空发动机转子系统中最为广泛采用的一种连接结构。然而,止口螺栓连接结构通常存在多个接触界面,结构本质上具有非连续特征,在外载荷作用下连接结构不仅会产生刚度损失^[1],同时其刚度还具有非线性变化特征。尤其是现代航空发动机,其对高性能和高推质比的追求,导致转子转速和负荷不断增大,连接结构的非线性刚度更为凸显,这不仅使转子动力学特性偏离设计状态,还成为造成转子振动过大的重要原因之一^[2]。

目前,国内外学者在螺栓法兰连接结构刚度特性方面开展了广泛的研究工作。南宫自军等^[3]应用接触理论和有限元方法,分析了螺栓预紧力对连接刚度的影响。姚星宇等^[4-5]分析了螺栓预紧力下法兰的应力分布特点,并根据应力分布特点提出了螺栓连接刚度的理论表达形式。Luan等^[6]分析了螺栓连接拉压刚度非线性问题,提出了双线性弹簧等效模型。Wang等^[7]依靠双线性弹簧等效模型建立螺栓法兰连接结构的弯曲刚度模型,并分析了部分参数对弯曲刚度的影响规律。Nizametdinov等^[8]建立了压气机轴和涡轮盘之间的螺栓法兰连接结构,分析了弯曲刚度非线性特征以及弯矩作用下连接面的接触状态。郭文新等^[9]建立螺栓连接有限元模型,计算得到不同变形量下的刚度非线性规律,并对变化规律进行了参数拟合。上述研究主要关注法兰结合面对螺栓连接刚度特性的影响。针对连接中的止口影响,洪杰、马艳红等^[2,10]基于连接面变形和应力分布特点,建立了长拉杆止口连接结构刚度损失模型,并提出了弯曲刚度的修正方法。王志等^[11]对含止口的法兰连接进行了研究,主要探讨了止口接触滑移对连接结构阻尼特性的影响。

在含螺栓连接的转子系统动力特性方面,Qin等^[12-13]建立螺栓连接弯曲刚度的解析模型,将刚度矩阵带入转子系统,利用谐波平衡法计算了刚度损失和螺栓松动对系统动力特性的影响。Beaudoin等^[14]将螺栓连接等效为 3 个方向上的弹簧单元,导入实体有限元模型分析结构的固有

特性。Tang等^[15-16]建立了螺栓连接圆柱壳结构的非线性连接模型,分析了螺栓预紧力、激励幅值、摩擦因数和连接刚度对系统动力学响应的影响。孟春晓等^[17]建立了梁-壳-弹簧混合单元转子模型,分析了螺栓松动对结构时变刚度和动力响应特性的影响。刘卓乾等^[18]将螺栓连接简化为刚度分段线性模型,分析了螺栓连接系统模态特性和稳态动力学响应。

综上所述,目前国内外学者在螺栓连接刚度损失机理、等效建模方法及含螺栓连接的结构动力学特性方面已经取得了极为丰硕的理论成果。然而,对于螺栓连接,现有工作多侧重于分析法兰连接面对结构刚度特性的影响,对于止口的影响考虑较少,特别是对含止口的螺栓连接结构非线性刚度及其形成机理缺乏深入研究。有鉴于此,本文以含止口的螺栓连接结构为研究对象,从结构不同阶段的应力-应变分析及有限元数值仿真两方面研究其非线性刚度特征,重点揭示止口对连接结构整体刚度特征带来的影响,并在此之上,分析止口螺栓连接刚度变化对转子系统动力学特性的影响。

1 止口螺栓连接结构非线性刚度机理

1.1 止口螺栓连接结构

典型的航空发动机高压转子结构如图 1 所示,由于质量和结构功能的要求,高压转子通常由材料不同的组件通过连接结构组装而成。止口螺栓连接结构布置灵活、拆装方便,在高压转子系统中广泛使用。在图 1 所示高压转子系统中,前后共有 4 个止口螺栓连接结构。以连接 2 为例,如图 2 所示,止口螺栓连接结构主要包括螺栓、法兰、止口圆柱面和轮盘等结构,短螺栓提供轴向预紧力 F_p 将法兰和轮盘轴向压紧,止口圆柱面采用过盈配合以实现可靠的装配定心,在初始装配后止口圆柱面存在正压力 F_r 将内外止口径向压紧,止口处于紧密接触状态。止口紧度通常用来描述止口的过盈配合程度,其定义为过盈配合时内外止口的径向变形大小^[1],如图 3 所示。

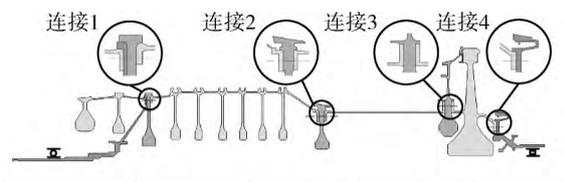


图 1 典型航空发动机高压转子

Fig. 1 Typical high pressure rotor of aero-engine

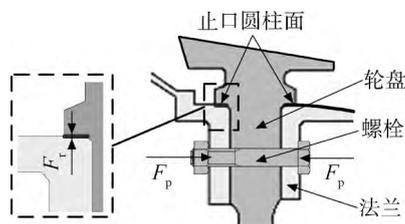


图 2 止口螺栓连接结构

Fig. 2 Rabbet-bolted connection structure

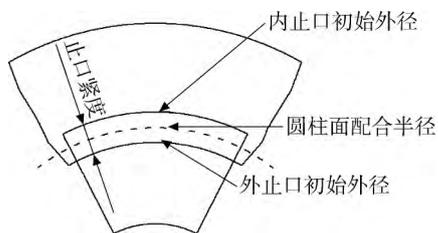


图 3 止口紧度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tightness of rabbet

在图 1 高压转子中,止口螺栓连接结构主要包括两种类型:一种是两侧鼓筒端部伸出法兰边通过螺栓压紧,为双层法兰连接,如连接 4;一种是轮盘打孔,与两侧法兰边通过螺栓压紧,为多层法兰连接,如连接 2。两种结构在螺栓预紧力的作用下应力分布不同^[4],但在拉压载荷和弯矩作用下两侧法兰的变形状态相同,拉伸刚度和弯曲刚度的变化规律也相同。因此本文选取双层法兰连接作为典型结构,忽略次要特征,仅保留螺栓、法兰、止口和部分鼓筒结构,建立本文研究对象,如图 4 所示。在实际工作环境中,高压转子承受不平衡力引起的弯矩、陀螺力矩等复杂的弯矩 M ,由于结构不连续,连接处特征参数和变形状态存在突变,弯曲刚度通常具有非线性特征。

1.2 非线性刚度特征及其产生机理

止口螺栓连接结构在承受弯矩 M 时,一部分结构承受拉伸载荷,一部分结构承受压力,拉伸、压缩刚度决定了止口螺栓连接的弯曲刚度。在弯矩 M 作用下,止口螺栓连接的受力与变形情况如

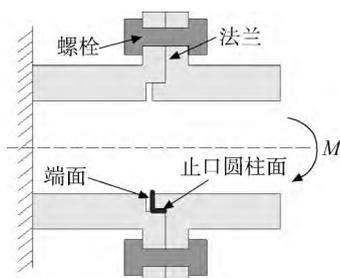


图 4 止口螺栓连接结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rabbet-bolted connection structure

图 5 所示,拉伸区域承受螺栓法兰约束力 F_t 和止口摩擦力 f ,压缩区域承受端面压力 F_n 。与连续结构拉、压区域对称(图 6)不同,止口螺栓连接由于结构不连续,拉伸刚度和压缩刚度不同,连接面拉伸区域和压缩区域不对称,并且拉伸、压缩区域面积随拉伸刚度和压缩刚度变化而不断改变,导致弯曲刚度具有明显的非线性特征。因此止口螺栓连接结构非线性弯曲刚度与单个螺栓法兰扇形区域的拉、压刚度密切相关。

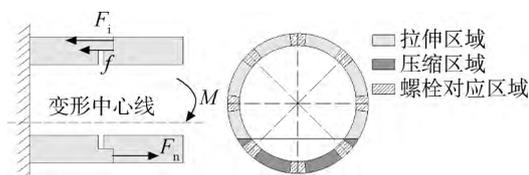


图 5 止口螺栓连接结构变形和受力分析

Fig. 5 Rabbet-bolted connection structure deformation and stress

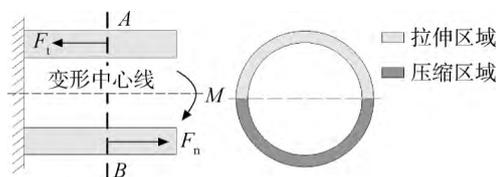


图 6 连续结构变形和受力分析

Fig. 6 Continuous structure deformation and stress

取单个螺栓法兰扇形区域分析止口螺栓连接结构的拉伸刚度。在拉伸载荷下,螺栓法兰扇形区域的变形主要包括 3 个阶段。

1) 第 1 阶段:止口黏滞状态。如图 7 所示, F 为拉伸载荷, F_r 为止口过盈配合带来的接触压力。当 $F < \mu F_r$ 时,止口区域处于黏滞或微滑移状态,在拉伸载荷作用下,止口螺栓连接结构近似发生弹性变形。拉伸刚度 k 取决于止口黏滞状态下的切向刚度 k_0 ,为

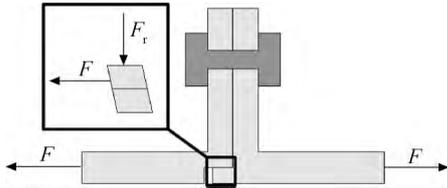


图 7 止口黏滞阶段止口螺栓连接变形与受力分析
Fig. 7 Deformation and stress of the rabbet-bolted connection during the viscous phase of the rabbet

$$k = k_0 \quad (1)$$

通常情况下,黏滞状态下的切向刚度 k_0 与连续体发生弹性变形时的拉伸刚度相近,但略小于弹性变形的拉伸刚度^[19]。

2) 第 2 阶段:螺栓前部法兰分离。当 $F > \mu F_r$ 时,止口位置产生滑移,如图 8 所示,螺栓前部法兰克服螺栓的压紧效果发生分离,法兰对应的扇形区域的变形可简化为悬臂梁结构发生弯曲变形,如图 9 所示, A 为分离点, P 为拉伸载荷作用点, P 点的挠度可表示为

$$\delta_P = \frac{(F - f)l_{PA}^3}{3EI_F} \quad (2)$$

式中 E 为弹性模量, l_{PA} 为 A 点到 P 点的长度, I_F 为截面惯性矩, 拉伸刚度 k 为

$$k = \frac{3FEI_F}{(F - f)l_{PA}^3} \quad (3)$$

3) 第 3 阶段:螺栓后部法兰分离。随着拉伸

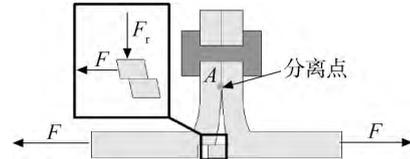


图 8 螺栓前部法兰分离阶段止口螺栓连接变形与受力分析
Fig. 8 Deformation and stress of the rabbet-bolted connection during flange separation in front of the bolt

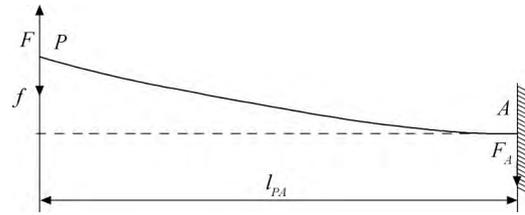
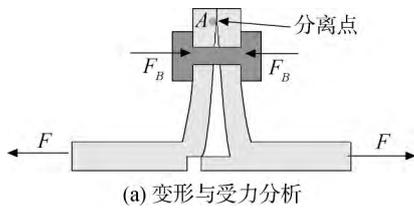


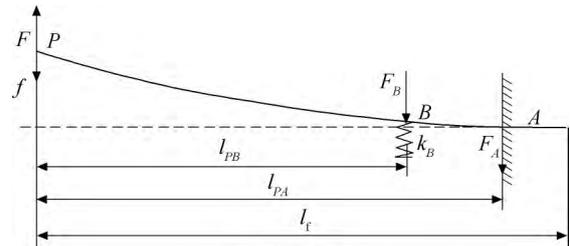
图 9 螺栓前部法兰分离阶段等效梁模型

Fig. 9 Equivalent beam model during flange separation in front of the bolt

载荷增加,分离点 A 不断向外扩展,螺栓逐渐被拉开,螺栓后部法兰开始分离,如图 10(a)所示,将法兰对应的扇形区域简化为悬臂梁结构,将螺栓等效为拉伸刚度为 k_B 的弹簧,等效悬臂梁模型如图 10(b)所示, B 点为螺栓位置, F_B 为螺栓约束力, l_t 为法兰长度。悬臂梁 P 点的弯矩平衡方程和 B 点的位移协调方程为



(a) 变形与受力分析



(b) 等效梁模型

图 10 螺栓后部法兰分离阶段止口螺栓变形受力分析与等效梁模型

Fig. 10 Deformation, stress and equivalent beam model of the rabbet-bolted connection during flange separation in back of the bolt

$$(F - f)l_{PA} - F_B(l_{PA} - l_{PB}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{(F - f)(l_{PA} - l_{PB})^2 [3l_{PA} - (l_{PA} - l_{PB})]}{6EI_F} - \frac{F_B(l_{PA} - l_{PB})^3}{3EI_F} = \frac{F_B}{k_B} \quad (5)$$

联立式(4)和式(5)得 P 点的挠度为

$$\delta_P = \frac{(F - f)l_{PA}^3}{3EI_F} - \frac{F_B(l_{PA} - l_{PB})^2 [3l_{PA} - (l_{PA} - l_{PB})]}{6EI_F} \quad (6)$$

拉伸刚度 k 可表示为

$$k = \frac{6FEI_F}{(2F - 2f - 2F_B)l_{PA}^3 + 3l_{PA}^2 l_{PB} - l_{PB}^3} \quad (7)$$

在不同的变形状态下,止口螺栓连接结构的拉伸刚度可分段表示为

$$k = \begin{cases} k_0 & l_{PA} = 0 \\ \frac{3FEI_F}{(F-f)l_{PA}^3} & 0 < l_{PA} \leq l_{PB} \\ \frac{6FEI_F}{(2F-2f-2F_B)l_{PA}^3 + 3l_{PA}^2l_{PB} - l_{PB}^3} & l_{PA} > l_{PB} \end{cases} \quad (8)$$

止口螺栓连接结构在不同拉伸载荷下具有不同的变形状态,拉伸刚度具有分段非线性特征。拉伸区域的拉伸刚度和压缩区域的压缩刚度决定了止口螺栓连接结构的弯曲刚度。随着弯矩 M 变化,压缩刚度基本保持不变,拉伸区域的拉伸刚度按式(8)分段非线性变化,导致拉、压区域面积不断变化,最终使得弯曲刚度表现出复杂的非线性特征。

2 基于有限元的止口螺栓连接结构数值仿真

在不同载荷下,止口螺栓连接结构具有不同的变形状态,连接刚度表现出明显的非线性特征,同时,止口的存在对于止口螺栓连接结构刚度变化规律产生特殊的影响。因此建立止口螺栓连接和非止口螺栓连接的接触有限元模型,定量分析止口和非止口螺栓连接的非线性刚度特征,讨论关键特征参数对弯曲刚度的影响规律。

2.1 止口螺栓连接的数值仿真模型

采用 SOILD185 单元建立止口螺栓连接结构的接触有限元模型,模型结构尺寸如图 11 所示,有限元模型如图 12 所示,为了便于对比止口对连接结构带来的影响,同时建立了不含止口的螺栓连接有限元模型,该模型除不含止口外,其他参数均与止口螺栓连接模型相同。在图 11 所示接触面采用 CONTA174 和 TARGE170 单元建立接触对,在螺栓连接处通过 PRETS179 预紧力单元

施加螺栓预紧力,模拟螺栓拧紧力矩。模型载荷和约束情况如图 13 所示,左侧鼓筒施加全约束,右侧鼓筒上下两端施加方向相反、大小相等的轴向拉伸载荷以等效弯矩,模型的材料参数与载荷参数如表 1 所示。

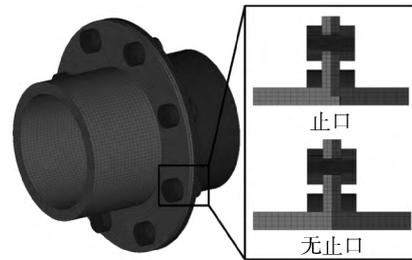


图 12 止口和无止口螺栓连接结构有限元模型
Fig. 12 Finite element model of bolt connection and rabbet-bolted connection structures

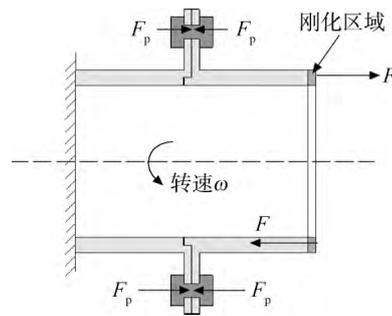


图 13 模型载荷和约束示意图
Fig. 13 Schematic diagram of model loads and constraints

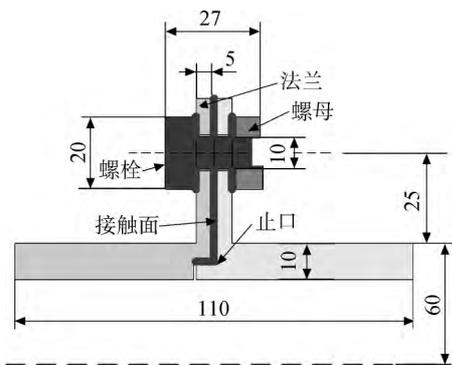


图 11 止口螺栓连接结构尺寸(单位: mm)
Fig. 11 Dimensions of rabbet-bolted connection structure (unit: mm)

表 1 止口螺栓连接结构模型的材料与载荷参数
Table 1 Material parameters and loading parameters of rabbet-bolted connection structure model

参数	数值
实体单元弹性模量/GPa	210
泊松比	0.3
摩擦因数	0.15
止口紧度/mm	0.04
螺栓预紧力/kN	15
转速/(r/min)	9000

2.2 拉压刚度仿真分析

由于螺栓连接结构的弯曲刚度是各个螺栓区域拉压刚度的组合,其非线性弯曲刚度与螺栓法兰区域的非线性拉伸刚度密切相关,因此本节首先研究止口螺栓连接结构的拉压刚度特征,重点探讨拉伸刚度的非线性特征。

图 14 为止口螺栓连接结构、无止口螺栓连接结构和连续结构拉伸刚度随轴向拉伸载荷的变化规律,其中连续结构为将构件间接触界面固结,忽略其接触面接触状态影响时的止口螺栓连接结构。结果表明:①止口和无止口螺栓连接结构与连续结构相比,拉伸刚度较小,存在明显的刚度损失。②止口螺栓连接的拉伸刚度显著高于无止口螺栓连接结构,表明止口有利于提高连接结构的拉伸刚度,其原因是止口处的柱面-柱面接触存在一定的接触摩擦力。③止口螺栓连接结构拉伸刚度变化可大致分为 3 个阶段,在 *ab* 段拉伸刚度基本保持不变,约为 1.73×10^9 N/m;在 *bc* 段拉伸刚度迅速下降为 1.98×10^8 N/m;在 *cd* 段拉伸刚度变化缓慢。无止口螺栓连接结构在拉伸载荷 $F < 3000$ N 时,拉伸刚度迅速下降。对于无止口螺栓连接,其只存在刚度下降段以及之后的稳定段,不存在初始的刚度稳定段(即止口螺栓连接结构刚度变化的 *ab* 段)。

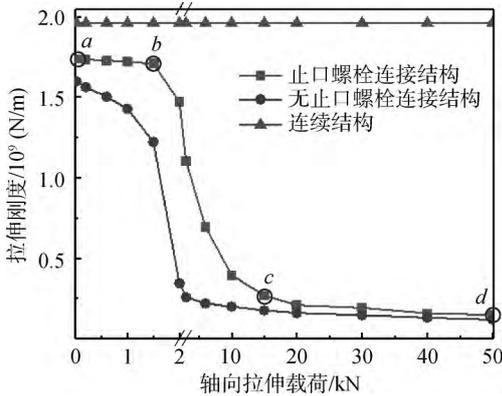


图 14 拉伸刚度随轴向拉伸载荷的变化规律
Fig. 14 Variation of tensile stiffness with axial tension

止口螺栓连接结构拉伸刚度变化规律与其变形状态有关。在小载荷作用下,两法兰面的接触间隙如图 15(a)所示。由于止口的过盈效果,止口区域和两法兰面都没有发生分离,止口螺栓连接结构处于变形状态中的止口黏滞阶段,拉伸刚度保持不变,对应于文中第 1.2 节中的第 1 阶段。在 *bc* 阶段,两法兰面的接触间隙如图 15(b)所示,法兰面

之间出现间隙,法兰发生弯曲变形,止口螺栓连接结构处于螺栓前部法兰分离阶段,分离面随着拉伸载荷 F 增加迅速向外扩展,拉伸刚度迅速下降,即文中第 1.2 节中的第 2 阶段。随着 F 不断增大,分离面逐渐扩展至螺栓外侧,如图 15(c)所示,止口螺栓连接结构处于螺栓后部法兰分离阶段。在这一阶段,由于螺栓预紧力的存在,分离面向外扩展缓慢,基本保持恒定,拉伸刚度在 *cd* 段变化缓慢。

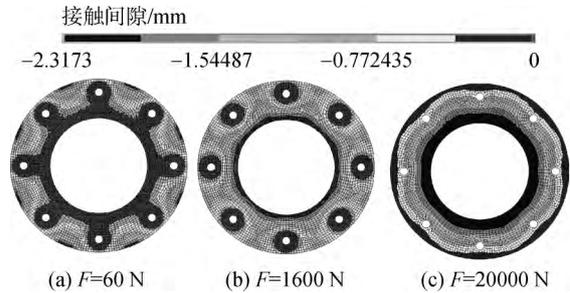


图 15 轴向拉伸载荷作用下法兰面接触间隙
Fig. 15 Flange contact clearance under axial tension

止口螺栓连接结构压缩刚度约为 1.86×10^9 N/m,随着轴向压力增加,压缩刚度基本保持不变,如图 16 所示。其压缩刚度与图 14 中 *cd* 阶段的拉伸刚度差异巨大,主要原因是在两种载荷下,连接结构的承力部位和传力方式不同。如图 17 和图 18 所示,当结构轴向受拉时,法兰产生弯曲变形,拉伸刚度取决于法兰的弯曲刚度和螺栓的抗拉刚度,而轴向受压时,轴向压力主要由鼓筒承担。

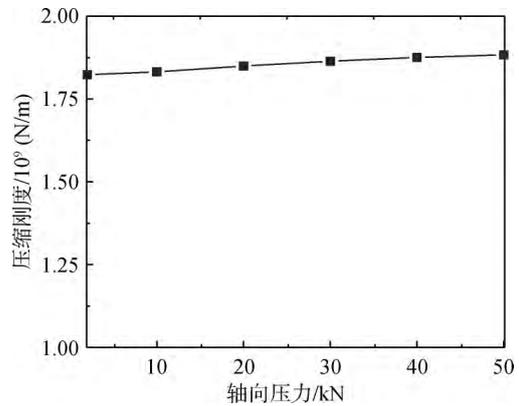


图 16 压缩刚度随轴向压力的变化规律
Fig. 16 Variation of compression stiffness with axial pressure

2.3 弯曲刚度仿真分析

根据图 13 加载方式对连接结构施加不同的弯矩,分析止口螺栓连接结构的弯曲刚度变化规律,计算结果如图 19 所示。止口和无止口螺栓连

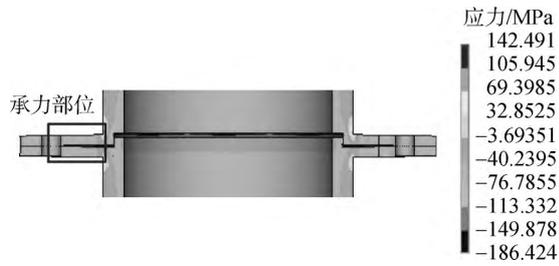


图 17 拉伸载荷下止口螺栓连接结构的应力应变图
Fig. 17 Stress-strain diagram of rabbet-bolted connection structure under tensile load



图 18 压缩载荷下止口螺栓连接结构的应力应变图
Fig. 18 Stress-strain diagram of rabbet-bolted connection structure under compression load

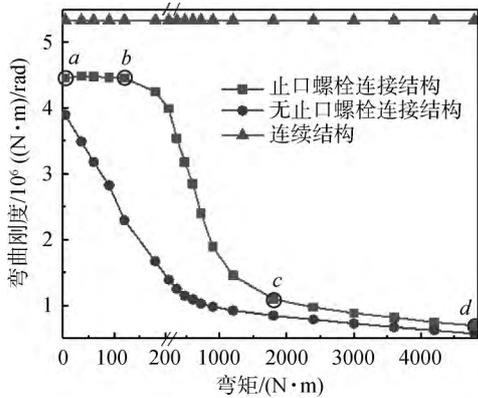


图 19 弯曲刚度随弯矩的变化规律
Fig. 19 Variation of bending stiffness with bending moment

接结构相对于连续结构存在不同程度的刚度损失,止口螺栓连接结构弯曲刚度始终大于无止口螺栓连接结构,其弯曲刚度随弯矩变化呈“倒 S”形非线性变化特征,刚度变化大致分为 3 个阶段。在 *ab* 段,弯曲刚度基本保持不变,约为 4.47×10^6 (N·m)/rad;在 *bc* 段弯曲刚度迅速下降为 1.10×10^6 (N·m)/rad;在 *cd* 段弯曲刚度变化趋势减缓。无止口螺栓连接结构在弯矩 $M < 200$ N·m 时弯曲刚度迅速下降,缺少弯曲刚度变化的 *ab* 阶段。为方便下文描述,将图中 *ab*、*bc* 和 *cd* 三个弯曲刚度变化阶段分别称为弯曲刚度变化的高刚度阶段、

刚度迅速下降阶段以及低刚度阶段。

在高刚度阶段,法兰面的接触状态如图 20(a) 所示,止口处于黏滞或微滑移状态,所以弯曲刚度基本保持不变。在弯曲刚度迅速下降阶段,法兰面的接触状态如图 20(b) 所示,在这一阶段,各螺栓对应的法兰区域逐渐被拉开,单个螺栓法兰扇形区域拉开时拉伸刚度呈现非线性变化,法兰自上而下逐渐被拉开,拉、压区域面积迅速变化,加剧了弯曲刚度的非线性特征,导致弯曲刚度迅速降低。在低刚度阶段,仅底侧螺栓对应的法兰区域处于压缩状态,如图 20(c) 所示,拉、压区域面积基本不再发生变化,弯曲刚度变化趋势减缓。

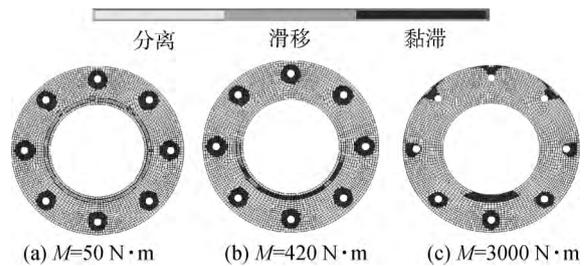


图 20 不同弯矩作用下法兰面接触状态
Fig. 20 Contact state of flange under different bending moments

2.4 关键参数影响规律分析

止口紧度和转速是影响止口接触状态和力学特性的重要参数,本小节讨论止口紧度和转速对止口螺栓连接结构非线性弯曲刚度的影响。

2.4.1 止口紧度

不同止口紧度下,弯曲刚度的变化规律如图 21 所示。当止口过盈量 $\delta = 0$ mm 时,弯曲刚度变化规律与无止口螺栓连接结构相似,只有弯曲刚度变化的刚度迅速下降阶段以及低刚度阶段。当止口过盈量 $\delta > 0$ mm 时,止口存在黏滞状态,弯曲刚度变化曲线出现高刚度阶段。随着止口过盈量 δ 增加,止口螺栓连接结构各阶段的弯曲刚度明显增加,止口发生滑移所需要的弯矩 M 不断增加。止口过盈量 δ 由 0.02 mm 变为 0.05 mm 时,止口黏滞状态的弯曲刚度由 4.37×10^6 (N·m)/rad 增加到 4.57×10^6 (N·m)/rad,止口产生滑移所需要的弯矩由 60 N·m 增加为 180 N·m,这表明提高止口紧度有利于提高连接结构的刚度及其稳定程度,降低刚度损失。

取弯矩 $M = 3000$ N·m,分析止口紧度对弯曲刚度的增强效果,计算结果如图 22 所示,止口过盈

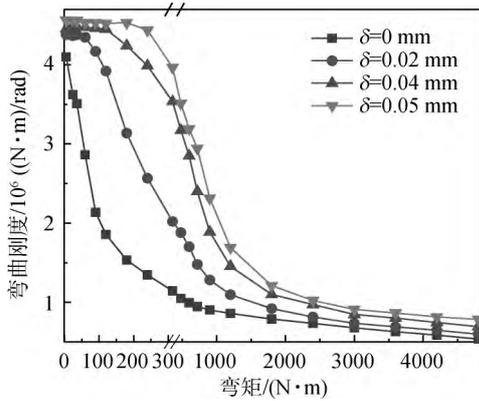


图 21 不同止口紧度下弯曲刚度变化规律
Fig. 21 Bending stiffness change under different rabbet interference

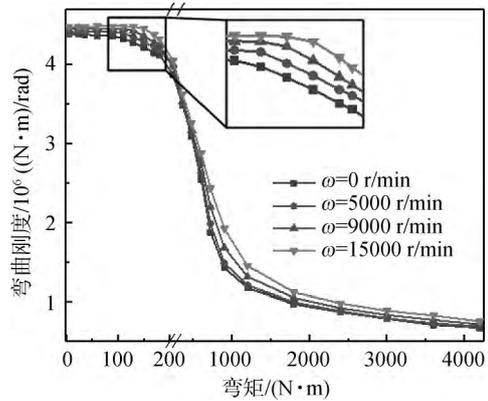


图 23 不同转速下弯曲刚度变化规律 ($\delta=0.04\text{ mm}$)
Fig. 23 Variation of bending stiffness with rotational speeds ($\delta=0.04\text{ mm}$)

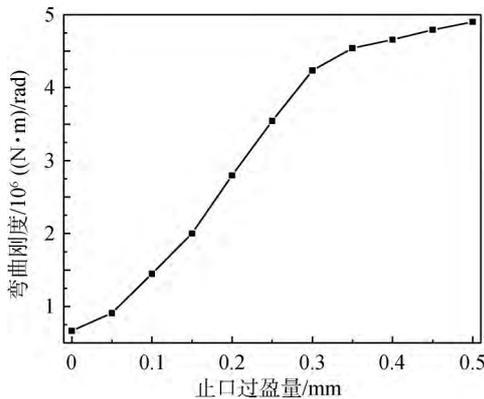


图 22 止口紧度对弯曲刚度的影响 ($M=3000\text{ N}\cdot\text{m}$)
Fig. 22 Effect of rabbet interference on bending stiffness ($M=3000\text{ N}\cdot\text{m}$)

量 δ 由 0 mm 变为 0.05 mm 时,弯曲刚度由 $6.67 \times 10^5\text{ (N}\cdot\text{m)/rad}$ 变为 $9.10 \times 10^5\text{ (N}\cdot\text{m)/rad}$,止口螺栓连接结构一直处于低刚度阶段,弯曲刚度增加较为缓慢。止口过盈量 δ 在 $0.05 \sim 0.3\text{ mm}$ 范围内时,弯曲刚度逐渐由低刚度阶段过渡为刚度迅速下降阶段,弯曲刚度迅速增加。止口过盈量 $\delta > 0.3\text{ mm}$ 后,弯曲刚度处于高刚度阶段,刚度增加缓慢。因此止口过盈量 δ 不仅能有效提高结构的弯曲刚度,还能改变弯矩下连接结构的变形状态。

2.4.2 转速

止口紧度 $\delta=0.04\text{ mm}$ 时,转速 ω 对弯曲刚度的影响规律如图 23 所示。结果表明,随着转速增加,止口螺栓连接结构的弯曲刚度有所增加,同时止口产生滑移所需要的弯矩也有所增加。但总体而言,转速对弯曲刚度的影响较小,转速由 0 r/min 增加到 15000 r/min 时,高刚度阶段的弯曲刚度由 $4.39 \times 10^6\text{ (N}\cdot\text{m)/rad}$ 增加到 4.45×10^6

$(\text{N}\cdot\text{m)/rad}$ 。

在低刚度阶段,取弯矩 $M=3000\text{ N}\cdot\text{m}$,转速对弯曲刚度的影响规律如图 24 所示。随着转速增加,弯曲刚度不断增加,转速对弯曲刚度的影响越来越大,转速由 0 r/min 增加到 15000 r/min 时,弯曲刚度由 $7.88 \times 10^5\text{ (N}\cdot\text{m)/rad}$ 增加到 $8.60 \times 10^5\text{ (N}\cdot\text{m)/rad}$,弯曲刚度提高 9.19% 。

在转速作用下,止口螺栓连接结构的受力情况如图 25 所示, F_{c1} 、 F_{c2} 为左侧和右侧法兰的离

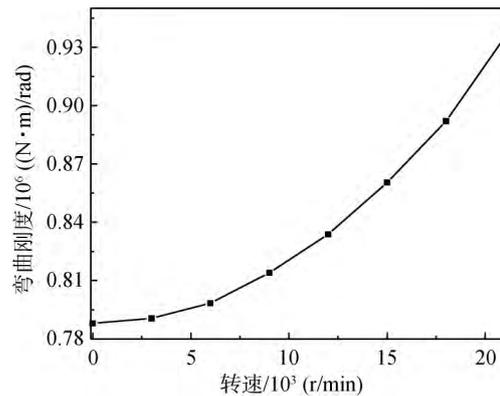


图 24 转速对弯曲刚度的影响 ($M=3000\text{ N}\cdot\text{m}$)
Fig. 24 Effect of rotational speed on bending stiffness ($M=3000\text{ N}\cdot\text{m}$)

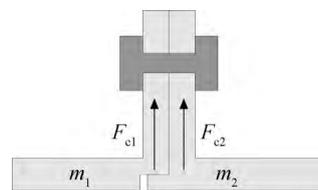


图 25 转速作用下止口螺栓连接结构受力图
Fig. 25 Rabbet-bolted connection structure stress under rotational speed

心力, m_1 、 m_2 分别为左侧法兰和右侧法兰的质量。由于存在止口, 质量 $m_1 < m_2$, 使得离心力 $F_{c1} < F_{c2}$, 离心力 F_{c1} 、 F_{c2} 的差值使得止口不断压紧, 弯曲刚度不断增加。离心载荷对弯曲刚度的影响与实际结构有关, 当螺栓和法兰位于鼓筒内侧、止口位于鼓筒外侧时, 随着转速增加, 离心载荷差值将使止口分离, 弯曲刚度将不断减低。

3 止口螺栓连接转子振动特性

止口螺栓连接结构弯曲刚度随载荷存在非线性变化, 且变化幅值较大, 连接处刚度变化会影响高压转子的振动特性。基于止口螺栓连接结构弯曲刚度变化规律, 计算止口螺栓连接结构弯曲刚度变化对某型航空发动机高压转子振动特性的影响。

3.1 不考虑连接结构时高压转子振动特性

针对图 1 中的高压转子, 采用 SOILD185 实体单元建立有限元模型如图 26 所示, 不考虑止口螺栓连接结构刚度损失及非线性变化, 计算得到高压转子前 3 阶模态振型如图 27 所示。

应变能可以定量反应结构的弯曲变形程度, 通过结构应变能分布可以判断不同连接处弯曲刚度变化对高压转子动力特性的影响程度^[2]。表 2

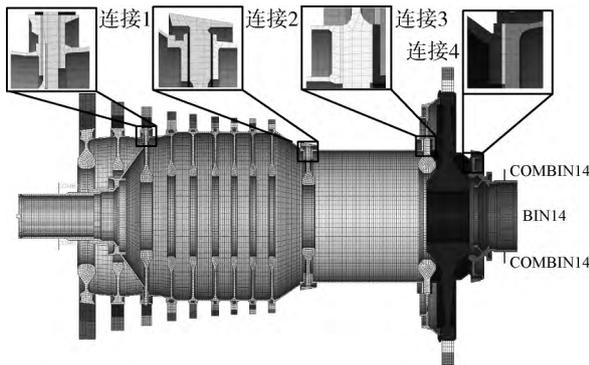
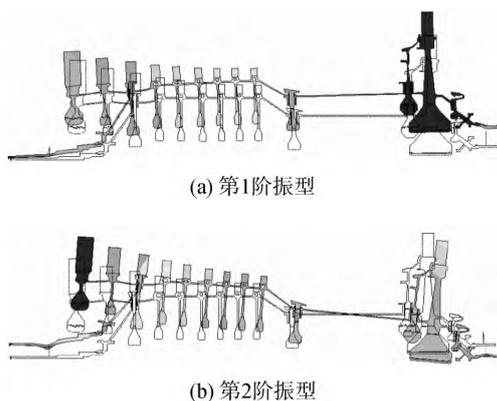


图 26 高压转子有限元模型

Fig. 26 Finite element model of high pressure rotor



(c) 第3阶振型

图 27 高压转子模态振型

Fig. 27 Modal shape of the high pressure rotor

表 2 止口螺栓连接结构应变能占转子应变能的比例

Table 2 Proportion of the strain energy of the rabbet-bolted connection structure in the rotor strain energy

阶数	止口位置应变能占比/%			
	连接 1	连接 2	连接 3	连接 4
1	0.141	0.124	0.034	0.301
2	0.404	0.035	0.004	0.022
3	0.067	1.174	0.274	0.003

为前 3 阶模态振型中各止口螺栓连接结构的应变能占高压转子应变能的比例, 可以看出止口螺栓连接 1 对于高压转子第 2 阶俯仰振型较为敏感, 止口螺栓连接 2 对于第 3 阶弯曲振型十分敏感, 止口螺栓连接结构 4 对于第 1 阶平动振型较为敏感。

3.2 考虑止口螺栓连接影响时高压转子振动特性

文中第 2 节结果表明, 止口螺栓连接结构弯曲刚度变化分为 3 个阶段: 在高刚度阶段弯曲刚度基本保持不变, 与连续结构弯曲刚度相近; 在刚度迅速下降阶段弯曲刚度快速下降; 在低刚度阶段弯曲刚度变化缓慢, 与连续结构弯曲刚度相差最大。通常情况下, 高压转子稳态涡动时, 止口螺栓连接处弯曲程度一定, 弯曲刚度处于某一变化阶段, 为一定值。当高压转子振动较大时, 止口螺栓连接结构弯曲刚度可能处于弯曲刚度变化的低刚度阶段, 此时止口螺栓连接结构刚度变化对高压转子动力特性影响最大。

根据文中第 3.1 节应变能分析, 连接 1、连接 2 和连接 4 对高压转子振动特性影响较大, 下面重点分析这三处止口螺栓连接结构弯曲刚度变化对高压转子临界转速的影响。通过改变止口位置薄层单元的弹性模量等效止口螺栓连接结构低刚度阶段的弯曲刚度, 根据文中第 2.3 节计算结果, 低刚度阶段弯曲刚度损失约为 80%。等效方法为: 在弯矩作用下, 止口螺栓连接结构接触模型的弯曲刚度损失与弹性模量修正模型的弯曲刚度损失相同^[2]。计算结果如表 3 所示。止口螺栓连接

表 3 止口螺栓连接结构弯曲刚度变化对临界转速的影响

Table 3 Effect of rabbet-bolted connection structure bending stiffness change on the critical speed

止口螺栓连接 低刚度阶段	临界转速/(r/min)			变化率/%		
	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
不考虑	4383	8620	41603			
连接 1	4349	8288	41215	0.78	3.85	0.93
考虑 连接 2	4358	8597	38592	0.57	0.27	7.24
连接 4	4343	8607	41200	0.91	0.15	0.97

结构 1 弯曲刚度变化后,第 2 阶临界转速产生较大偏移,转速变化率为 3.85%。由图 27(b)高压转子俯仰振型可以看出,第 1、2 级压气机盘振动幅值最大,当连接 1 存在较大刚度损失时,第 1、2 级压气机盘可能由整体俯仰转化为局部弯曲,使高压转子临界转速产生偏移,同时使 1、2 级压气机盘振幅增加,影响高压转子的振动特性。止口螺栓连接结构 2 弯曲刚度变化后,第 3 阶临界转速变化率为 7.24%,临界转速产生较大的偏移。止口螺栓连接结构 4 弯曲刚度变化后,第 1 阶临界转速变化率为 0.91%,总体而言,止口螺栓连接结构弯曲刚度变化对于高压转子第 1 阶平动振型影响较小。

4 结 论

1) 从单个止口-螺栓扇形区域出发,根据结构应力-应变特点,分析了止口螺栓连接结构非线性拉伸刚度特征及其产生机理:不同载荷下,止口螺栓连接结构的变形和受力情况不同,导致拉伸刚度具有分段非线性特征。小载荷作用下,止口处于黏滞状态,连接结构拉伸刚度取决于止口切向接触刚度;随着载荷增加,止口发生滑移,螺栓前部法兰分离,拉伸刚度迅速下降;载荷增加到一定程度,螺栓后部法兰分离,拉伸刚度基本稳定。通过拉伸刚度的有限元数值仿真验证了上述力学过程。

2) 基于接触有限元数值仿真,定量获得了止口螺栓连接结构弯曲刚度变化规律。结果表明止口螺栓连接弯曲刚度呈现“倒 S”形非线性变化特征,即随载荷增加,弯曲刚度依次经历高刚度阶段、刚度迅速下降阶段以及低刚度阶段,止口螺栓连接非线性拉伸刚度及拉压刚度的差别,以及由此造成的不同载荷下拉、压区域面积变化,是该非线性规律产生的内在原因。提高止口紧度有利于提高弯曲刚度和降低刚度损失,并增加高刚度阶

段所占的区域,而转速对弯曲刚度的影响相对较小。

3) 以某型航空发动机高压转子为研究对象,考虑不同连接面在大振动状态下的刚度损失,定量分析了止口螺栓连接对高压转子固有特性的影响,结果表明止口螺栓连接结构对转子弯曲型临界转速影响最大,其次为俯仰型临界转速,而对平动型的临界转速影响很小。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 洪杰,徐翕如,苏志敏,等. 高速转子连接结构刚度损失及振动特性[J]. 北京航空航天大学学报,2019,45(1):18-25.
HONG Jie, XU Xiru, SU Zhimin, et al. Joint stiffness loss and vibration characteristics of high-speed rotor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 18-25. (in Chinese)
- [3] 南宮自军,姜晋庆,张铎. 固体火箭发动机连接结构接触应力研究[J]. 推进技术,1997,18(4):54-57.
NANGONG Zijun, JIANG Jinqing, ZHANG Duo. Study on contact stress of flanged connection structure in SRM[J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(4): 54-57. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 姚星宇,王建军,翟学. 航空发动机螺栓连接薄层单元建模方法[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(12):2269-2279.
YAO Xingyu, WANG Jianjun, ZHAI Xue. Modeling method of bolted joints of aero-engine based on thin-layer element[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and

- Astronautics, 2015, 41(12): 2269-2279. (in Chinese)
- [6] LUAN Yu, GUAN Zhenqun, CHENG Gengdong, et al. A simplified nonlinear dynamic model for the analysis of pipe structures with bolted flange joints[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 331(2): 325-344.
- [7] WANG Cun, ZHANG Dayi, ZHU Xiaobin, et al. Study on the stiffness loss and the dynamic influence on rotor system of the bolted flange joint[R]. ASME Paper GT2014-26191, 2014.
- [8] NIZAMETDINOV F R, ROMASHIN Y S, BERNE A L, et al. Investigation of bending stiffness of gas turbine engine rotor flanged connection[EB/OL]. [2020-05-08]. https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/AD1A045E25B240EE9346F351BA6E9DA1/S1727719120000143a.pdf/investigation_of_bending_stiffness_of_gas_turbine_engine_rotor_flanged_connection.pdf.
- [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] 马艳红, 倪耀宇, 陈雪骑, 等. 长拉杆-止口连接弯曲刚度损失及对转子系统振动响应影响[EB/OL]. [2020-05-08]. <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/10.7527/S1000-6893.2020.23861>.
- [11] 王志, 李吉凯, 刘玉. 带止口法兰连接结构刚度特性对结构振动影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6): 1201-1208. WANG Zhi, LI Jikai, LIU Yu. Stiffness characteristics of flange joint with a snap and its influence on structure vibration[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1201-1208. (in Chinese)
- [12] QIN Zhaoye, HAN Qinkai, CHU Fulei. Analytical model of bolted disk-drum joints and its application to dynamic analysis of jointed rotor[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(4): 646-663.
- [13] 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.
- [14] BEAUDION 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.
- [15] TANG Qiansheng, LI Chaofeng, SHE Houxin, et al. Nonlinear response analysis of bolted joined cylindrical-cylindrical shell with general boundary condition[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 443: 788-803.
- [16] TANG Qiansheng, LI Chaofeng, SHE Houxin, et al. Modeling and dynamic analysis of bolted joined cylindrical shell[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 93(4): 1953-1975.
- [17] 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)
- [18] 刘卓乾, 曹树谦, 郭虎伦, 等. 含螺栓连接转子系统非线性振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 10-16, 37. LIU Zhuoqian, CAO Shuqian, GUO Hulun, et al. Vibration characteristics of rotor systems with bolt joints[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(22): 10-16, 37. (in Chinese)
- [19] WANG Lei, LIU Haitao, ZHANG Jun, et al. Analysis and modeling for flexible joint interfaces under micro and macro scale[J]. Precision Engineering, 2013, 37(4): 817-824.

(编辑: 陈越)