

DOI:10.11918/202509092

航空发动机螺栓止口连接转子动力学建模及特性

罗丰¹, 邓旺群¹, 吕彪¹, 钱正明¹, 吴志渊², 张文明²

(1. 中国航空发动机集团 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;
2. 机械系统与振动全国重点实验室(上海交通大学), 上海 200240)

摘要:为解决航空发动机转子螺栓止口连接结构在高转速、多载荷激励下动力学特性精确表征难题,文中提出一种考虑多螺栓止口连接的转子动力学建模方法,系统揭示连接界面对转子固有特性、临界转速及不平衡响应的影响。首先,通过SOLID186实体单元构建轮盘与转轴,COMBI214单元模拟轴承,MATRIX27单元表征含拉伸/横向/弯曲/扭转多维刚度的连接界面,结合MPC接触算法实现装配面自由度耦合,建立了高精度动力学模型。其次,搭建了含多处螺栓止口的转子测试平台,采用超声波预紧力测试、模态测试及激振实验,获取螺栓预紧力、不同边界下固有特性以及定频/扫频激励下的振动响应,验证了模型的有效性。最后,分析了螺栓止口连接对转子系统临界转速及不平衡响应的影响。结果表明:螺栓止口连接界面显著影响转子自由模态,忽略界面刚度会导致固有频率过度预估;在轴承支承状态下,螺栓止口连接界面对平动和俯仰模态影响较小,对弯曲模态影响较大,并显著影响与弯曲模态对应的临界转速;不平衡响应中,弯曲模态振幅因界面刚度损失而明显增大,2~3阶临界转速区间出现横向/转角位移不连续现象。该研究为航空发动机转子连接结构设计优化提供理论支撑。

关键词:航空发动机;螺栓止口连接;模态测试;临界转速;不平衡响应

中图分类号: V231.96, TH113.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)12-0219-10

Modeling and characteristics of aero-engine rotor with bolted-rabbit joints

LUO Feng¹, DENG Wangqun¹, LÜ Biao¹, QIAN Zhengming¹, WU Zhiyuan², ZHANG Wenming²

(1. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou 412002, Hunan, China;
2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the challenge of characterizing the dynamic properties of bolted-rabbit joint structures in aero-engine rotors under high rotational speeds and multi-load excitation, a rotor dynamic modeling method considering multiple bolted-rabbit joints is established, and the influence of joint interfaces on the rotor's natural characteristics, critical speeds, and unbalance response is systematically revealed in this study. Firstly, SOLID186 solid elements are employed to model the disks and shafts, COMBI214 elements to simulate the bearings, and MATRIX27 elements to characterize the multi-dimensional stiffness (tensile, lateral, bending, and torsional) of the joint interfaces. By combining the MPC (multi-point constraint) contact algorithm to achieve degree-of-freedom coupling with the bolted-rabbit assembly surfaces, a high-precision dynamic model is established for aero-engine rotors with bolted-rabbit joints. Secondly, a rotor test rig with multiple bolted-rabbit joints is constructed. Ultrasonic preload testing, modal testing, and excitation experiments are conducted to acquire bolt preloads, natural characteristics under different boundaries, and vibration responses under constant-frequency and sweep-frequency excitation, thus verifying the model's correctness. Finally, the influence of bolted-rabbit joints on the rotor system's critical speeds and unbalance response is analyzed. The results show that: the bolted-rabbit joint interfaces significantly affect the rotor's free modes, and ignoring interface stiffness results in the overestimation of natural frequencies; under bearing support, the joint interfaces have minimal impact on translational and pitching modes but a pronounced influence on bending modes, and notably alter the critical speeds associated with bending modes; in the unbalance response, the amplitude of bending modes increases significantly due to interface stiffness loss, and discontinuities in lateral and rotational displacements emerge in the speed interval between the 2nd and 3rd critical speeds. This study provides theoretical support for the design optimization of joint structures in aero-engine rotors.

Keywords: aero-engine; bolted-rabbit joints; modal test; critical speed; unbalance response

收稿日期: 2025-09-22; 录用日期: 2025-10-14; 网络首发日期: 2025-10-24

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251024.1454.006>

基金项目: 国家自然科学基金(12402019)

作者简介: 罗丰(1990—),男,高级工程师;张文明(1978—),男,教授,博士生导师

通信作者: 张文明, wenmingz@sjtu.edu.cn; 吴志渊, zhiyuanwu@sjtu.edu.cn

受加工、装配与维修等条件限制,现代航空发动机转子通常通过螺栓连接、止口连接、套齿连接,以及铆接等方式组装多个部件而成^[1]。螺栓止口连接结构因具有多个接触界面而呈现非连续特性,在外部载荷作用下易发生刚度损失,并表现出非线性刚度行为^[2]。随着现代航空发动机对高性能与高推重比要求的不断提升,转子系统面临更高的转速与机械负荷,同时承受离心、气动、热及弯曲等多源耦合载荷,致使连接界面刚度和接触状态发生改变,进而影响结构整体稳健性^[3]。此类变化不仅会导致转子动力学特性偏离设计预期,还可能引发强烈振动等不良后果^[4]。因此,深入研究螺栓止口连接界面刚度对转子动力学行为的影响,对航空发动机整机振动分析与控制具有重要意义。螺栓连接转子系统动力学建模包含螺栓连接界面建模与转子系统建模两部分。螺栓连接界面非线性接触行为的建模方法包括唯象模型、机理模型与有限元模型。唯象模型需要借助实验数据或仿真结果,其计算精度高度依赖于参数辨识的准确性^[5]。基于界面力学的机理模型分为分形、统计学及确定性接触模型,有更明确的物理意义,但需要较为深厚的理论知识。借助于有限元商业软件的有限元模型模拟螺栓连接时主要采用刚性连接单元^[6]、弹簧单元^[7]、薄层单元^[8]和接触单元^[9]。姚星宇等^[10]基于薄层单元建立螺栓连接结构的参数化模型,研究单元材料参数对连接刚度的影响规律。王志等^[11]通过并联 Jenkins 单元与弹簧单元建立带止口法兰连接结构的有限元模型,分析其界面变形-滑移机理与迟滞行为。洪杰等^[12]提出了定量描述连接界面刚度损失的力学模型,以及基于应变能分布优化的连接结构刚度损失抑制方法。

螺栓连接转子系统的建模方法包括解析法和有限元法。Li 等^[13]基于 Donnell 壳理论构建了含离心力与初始环张力的转鼓盘系统动力学模型,分析弹性支撑对系统非线性振动行为的影响。解析方法物理可解释性强,便于理解物理现象的本质,然而难以处理复杂几何模型。Chen 等^[14]基于 ANSYS 软件分析叶片-盘-鼓结构的模态振型与各零件的耦合效应。Beaudoin 等^[15]采用有限元法构建了螺栓法兰连接结构的非线性动力学分析模型,在有限非线性单元使用前提下具有更高计算效率与响应预测精度。

对于整个螺栓连接转子系统动力学特性,学者也进行了探索。Tang 等^[16]建立了分段线性模型,分析了连接刚度和螺栓数量对圆柱壳固有频率的影响。Qin 等^[17]基于有限元方法表征螺栓界面刚度,

通过 Timoshenko 梁单元推导了松动螺栓转子的运动方程,研究螺栓松动对系统响应影响。洪杰等^[18-19]针对含界面连接的多级轮盘结构,采用质心-惯性主轴空间位置描述转子质量分布,并建立了完整的旋转惯性载荷力学模型,研究了高速多盘转子的动力学特性。罗忠等^[20]通过 ANSYS 仿真分析得到螺栓装配的连接刚度及初始变形,引入基于 Timoshenko 梁单元建立的螺栓连接转子系统动力学模型分析装配工艺对临界转速的影响。

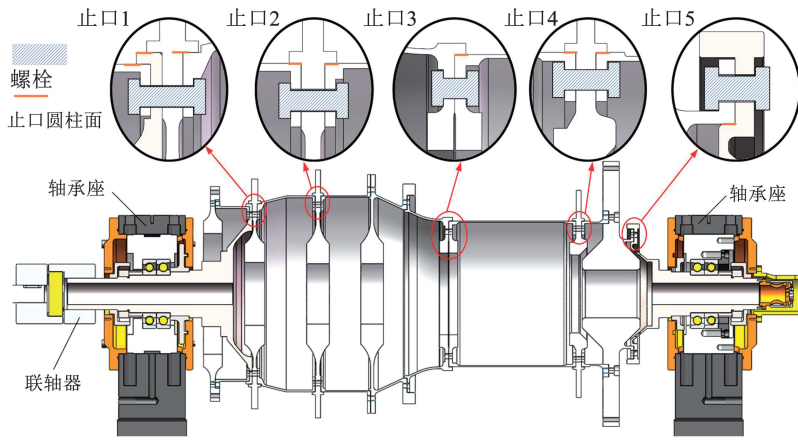
综上所述,含螺栓止口连接的转子系统由于连接界面接触以及螺栓预紧力的存在,使得结构存在不连续性,从而影响转子系统的动力学特性。研究人员在螺栓连接研究基础上,逐渐对含止口配合的螺栓连接结构展开调查和研究。目前,螺栓止口连接转子的研究大部分针对界面刚度损失,或针对单盘转子的简单模型。针对上述问题,本文基于某航空发动机高压转子结构,提出一种考虑多螺栓止口连接的转子动力学建模方法,通过 MATRIX27 单元表征界面拉伸/横向/弯曲/扭转多向刚度,并系统分析了螺栓止口连接界面对转子固有特性、临界转速,以及不平衡响应的影响。

1 螺栓止口连接的转子动力学建模方法

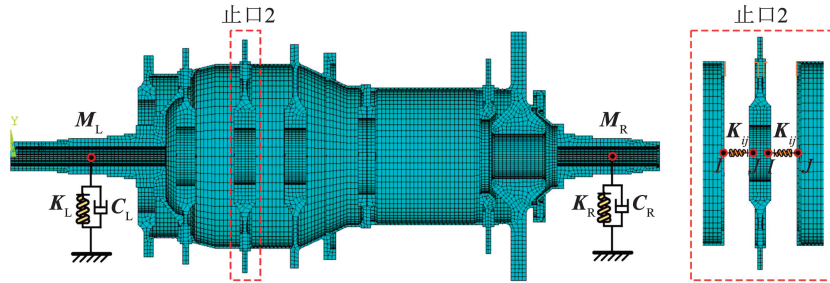
1.1 螺栓止口连接转子动力学建模

航空发动机高压转子通常通过连接结构组装而成,基于某航空发动机高压转子结构,搭建了螺栓止口连接模拟转子测试平台,其核心组成包括螺栓止口连接转子、轴承座和联轴器,见图 1(a)。螺栓止口连接界面主要包括螺栓、止口圆柱面和法兰等结构,止口圆柱面实现不同旋转部件的装配定心,螺栓提供轴向预紧力实现不同零件的紧固。

本文螺栓止口连接转子包含 5 个螺栓止口连接界面(止口 1~止口 5),采用若干 M8 螺栓进行紧固,并通过扭矩预紧控制实现螺栓预紧力可调,止口圆柱面之间采用过渡配合。螺栓止口连接转子的精细化有限元模型见图 1(b),在 ANSYS 仿真平台中,采用 SOLID186 实体单元模拟螺栓止口连接转子的轮盘和转轴,采用 COMBI214 弹簧阻尼轴承单元轴承模拟(其中 K_L 、 K_R 和 C_L 、 C_R 分别为左、右两侧轴承的刚度和阻尼),采用 MASS21 模拟轴承附件(其中 M_L 、 M_R 分别为左、右两侧轴承附件的质量属性)。考虑螺栓数量多,配合界面复杂,采用 MATRIX27 弹簧单元模拟螺栓止口连接界面等效刚度。



(a) 螺栓止口连接转子三维结构



(b) 螺栓止口连接转子动力学模型结构

图 1 螺栓止口连接转子三维结构及动力学模型

Fig. 1 3D structure and dynamic model of rotor with bolted-rabbit joints

具体而言,以止口 2 为例,存在 4 个连接界面,每个界面几何中心建立节点并通过 MPC 接触算法与相应界面进行耦合,相邻界面的中心节点可用节点 I 和节点 J 进行标识,分别用 \mathbf{q}_i 和 \mathbf{q}_j 表示节点 I 和节点 J 的 6 个方向位移向量($x/y/z$ 平动、 $\theta_x/\theta_y/\theta_z$ 转动),节点 I 和节点 J 之间的 6 个方向等效刚度可构成对角线矩阵 \mathbf{K}_{ij} ,表示为 $\mathbf{K}_{ij} = \text{diag}[k_x, k_y, k_z, k_{\theta_x}, k_{\theta_y}, k_{\theta_z}]$,螺栓止口连接界面的势能可表示为

$$V_{ij} = \frac{1}{2} [\mathbf{q}_i \quad \mathbf{q}_j] \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ij} & -\mathbf{K}_{ij} \\ -\mathbf{K}_{ij} & \mathbf{K}_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_i \\ \mathbf{q}_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

节点 I 和节点 J 之间的连接刚度可表示为

$$\mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ij} & -\mathbf{K}_{ij} \\ -\mathbf{K}_{ij} & \mathbf{K}_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将连接刚度引入螺栓止口连接转子系统中,可得到系统的动力学方程,表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{C} + \mathbf{G})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{G} 、 \mathbf{K} 分别为螺栓止口连接转子系统的质量矩阵、阻尼矩阵、陀螺矩阵和刚度矩阵, \mathbf{q} 为系统的位移向量, \mathbf{F} 为系统的载荷向量。

为了更加清晰表示螺栓止口连接转子的建模方法,图 2 展示了螺栓止口连接转子系统的刚度矩阵组集示意图。 \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 、 \mathbf{K}_n 分别表示第 1、2、 n 个旋转部件本身的弹性刚度矩阵,且第 1 和第 n 个旋转部

件分别安装有左轴承和右轴承,因此,在刚度矩阵 \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_n 上叠加轴承刚度 \mathbf{K}_L 和 \mathbf{K}_R 。假设部件 1 上的节点 I 和部件 2 上的节点 J 是某一处螺栓止口连接中相邻界面的中心节点,在 $[I, J]$ 对应的自由度中叠加式(2)中的连接刚度 \mathbf{K}_e ,并将各螺栓止口连接中的各相邻界面之间连接刚度按上述步骤依次组集后,最终得到了螺栓止口连接转子系统的刚度矩阵。同理,按上述方法可获得螺栓止口连接转子系统质量矩阵、陀螺矩阵和阻尼矩阵。

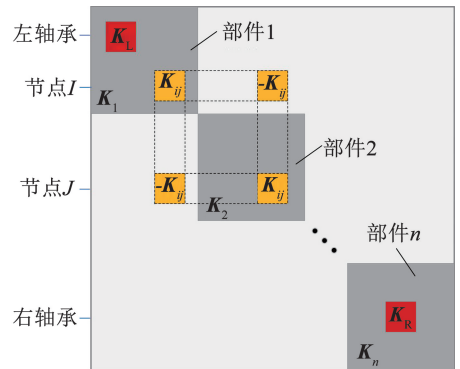


图 2 螺栓止口连接转子系统的刚度矩阵组集示意

Fig. 2 Schematic diagram of stiffness matrix assembly for rotor system with bolted-rabbit joints

1.2 螺栓止口连接界面等效刚度表征

为了准确表征螺栓止口连接界面的连接刚度 \mathbf{K}_e ,建立了仅含螺栓止口的精细化有限元模型,见

图 3。各连接结构和螺栓采用 SOLID186 实体单元模拟,在法兰接触面、螺栓与螺栓孔、螺栓与法兰接触面,以及止口接触面之间,采用 CONTA174 和 TARGE170 接触单元建立接触对,且摩擦系数均为 0.15。考虑本文模型实际装配为过渡配合,止口配合界面采用默认接触设置。在各个螺栓的螺杆部位采用 PRETS179 预紧力单元模拟螺栓预紧力。此外,分别在约束面和加载面的几何中心处创建节

点,通过 MPC 接触算法将约束面和加载面与相应的节点进行刚性耦合。在约束面对应的中心节点进行全约束,在加载面中心节点施加不同方向载荷,通过加载面中心节点位移计算螺栓止口连接界面等效拉伸、横向、弯曲、扭转刚度。需要说明的是,为了避免结构本身弹性变形对界面等效刚度的影响,截取的约束面和安装面与螺栓安装面在同一平面内。

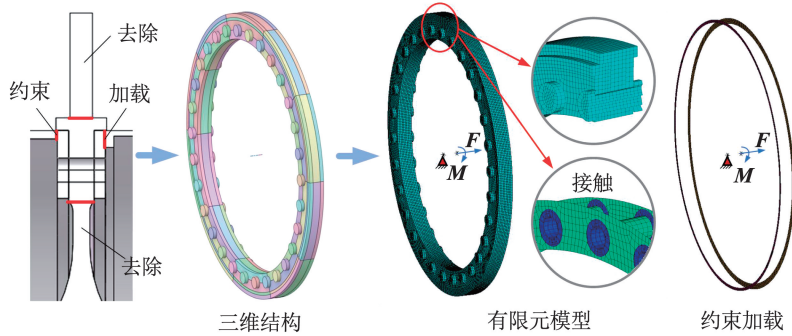


图 3 螺栓止口界面连接刚度表征

Fig. 3 Characterization of joint stiffness for bolted-rabbit interface

2 模型验证及固有特性研究

为验证本文动力学模型的正确性,开展了螺栓止口连接转子螺栓预紧力及自由模态测试,见图 4。通过扭矩扳手对各个连接面上的螺栓进行预紧,将超声探头固定在螺栓的一侧端面,利用螺栓预紧力

超声波测试仪 (IFAST 超声波系统) 获得螺栓预紧力。采用锤击法对螺栓止口连接转子进行自由模态测试,测试系统主要包括:信号采集系统 (SIEMENS SCADAS)、三轴加速度传感器 (PCB 356A01)、力锤 (KISTLER 9724A2000),以及计算机。通过多点激励单点拾振的方法获得系统各阶模态振型和固有频率。

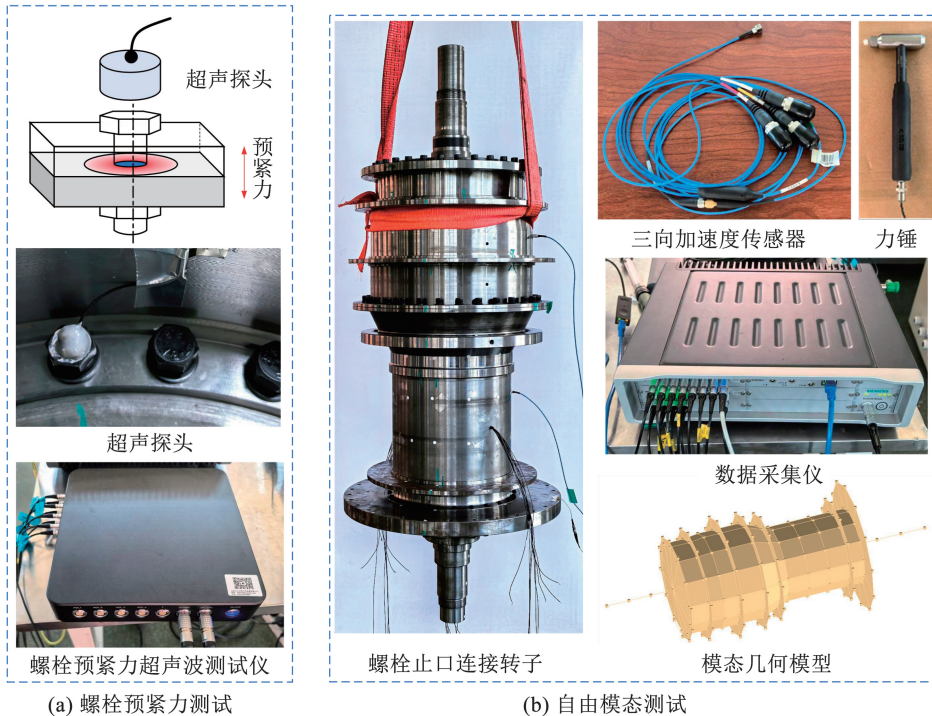


图 4 螺栓止口连接转子螺栓预紧力及自由模态测试

Fig. 4 Bolt preload and free modal test of rotor with bolted-rabbit joints

2.1 自由模态验证及分析

通过扭矩扳手(25 N·m)对每个螺栓止口连接面上的螺栓预紧,采用螺栓预紧力超声波测试仪对每个连接面上的两个螺栓进行测量,并取平均值见表 1。从表 1 中可以看出,即使通过扭矩扳手调控螺栓预紧,然而受连接件表面摩擦系数、螺纹几何形状等多因素影响,各个连接面上的螺栓预紧力差别较大。将实际测得的螺栓预紧力输入到仅含螺栓止口的精细化有限元模型中(图 3),在加载面中心节点分别施加轴向、横向、弯曲和扭转载荷,并获得相应的位移。螺栓止口连接界面等效轴向、横向、弯曲和扭转刚度计算表达式如下:

$$\begin{cases} k_i = \frac{F_i}{u_i} \\ k_{\theta_i} = \frac{M_i}{\theta_i} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_i 为不同坐标方向的集中力载荷, u_i 为不同坐标方向的平动位移, k_i 为不同坐标方向的等效平动刚度;同理, M_i 为不同坐标方向的扭矩载荷, θ_i 为不同坐标方向的转角位移, k_{θ_i} 为不同坐标方向的等效转动刚度, $i = x, y, z$ 。考虑转子系统为循环对称结构,可认为正交方向的横向刚度和弯曲刚度相等。

表 1 转子各螺栓止口连接界面螺栓预紧力及等效刚度

Tab. 1 Bolt preload and equivalent stiffness of each bolted-rabbit joint interface of rotor

连接界面	螺栓预紧力/ kN	拉伸刚度/ (N·m ⁻¹)	横向刚度/ (N·m ⁻¹)	扭转刚度/ ((N·m ⁻¹)·rad ⁻¹)	弯曲刚度/ ((N·m ⁻¹)·rad ⁻¹)
止口 1	23.21	2.972 6 × 10 ¹⁰	4.233 8 × 10 ⁹	7.902 5 × 10 ⁷	2.619 2 × 10 ⁸
止口 2	16.84	9.601 8 × 10 ⁹	3.112 3 × 10 ⁹	7.924 5 × 10 ⁷	1.244 3 × 10 ⁸
止口 3	13.21	1.666 9 × 10 ¹⁰	1.073 2 × 10 ¹⁰	9.825 0 × 10 ⁷	9.995 3 × 10 ⁷
止口 4	20.65	4.250 8 × 10 ¹⁰	5.632 2 × 10 ⁹	8.372 1 × 10 ⁷	2.734 8 × 10 ⁸
止口 5	12.12	5.177 1 × 10 ⁹	1.273 9 × 10 ¹⁰	3.923 1 × 10 ⁷	2.093 6 × 10 ⁷

表 2 螺栓止口连接转子自由模态固有频率对比

Tab. 2 Comparison of free modal natural frequencies of rotor with bolted-rabbit joints

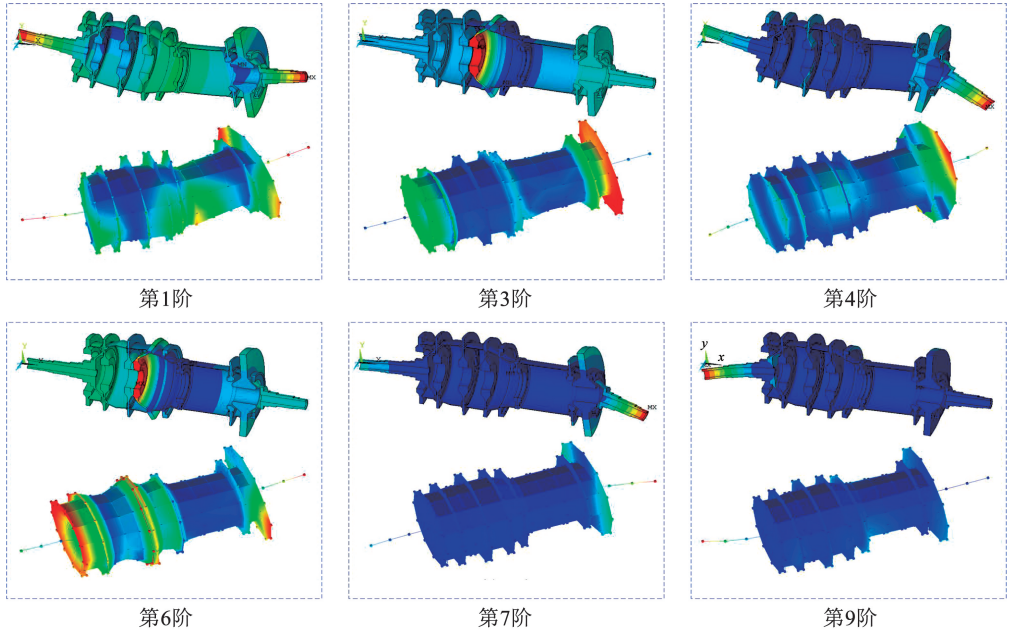
阶次	实验/Hz	考虑界面刚度/Hz	误差 1/%	不考虑界面刚度/Hz	误差 2/%
第 1 阶(f_{n1})	438.29	457.82	4.46	491.78	12.20
第 2 阶(f_{n2})	—	457.82(与第 1 阶模态正交)	—	491.78	—
第 3 阶(f_{n3})	635.41	650.85	2.43	663.19	4.37
第 4 阶(f_{n4})	779.26	763.23	-2.06	802.49	2.98
第 5 阶(f_{n5})	—	763.23(与第 4 阶模态正交)	—	802.49	—
第 6 阶(f_{n6})	739.96	767.41	3.71	812.21	9.76
第 7 阶(f_{n7})	887.20	920.55	3.76	947.05	6.75
第 8 阶(f_{n8})	—	920.55(与第 7 阶模态正交)	—	947.05	—
第 9 阶(f_{n9})	1 038.24	1 046.45	0.79	1 086.67	4.66
第 10 阶(f_{n10})	—	1 046.45(与第 9 阶模态正交)	—	1 086.67	—

因此,获得的螺栓止口连接界面等效轴向、横向、弯曲和扭转刚度见表 1。

为进一步阐述螺栓止口连接界面刚度对转子系统动态特性的影响,验证其在动力学建模中的必要性,本文对比了考虑界面刚度、不考虑界面刚度(即界面刚度趋近于无穷大,无任何刚度损失)时转子系统自由边界的固有频率,见表 2。将各个螺栓止口连接界面的等效刚度引入螺栓止口连接转子有限元模型中(图 2),可获得自由边界状态下考虑界面刚度时螺栓止口连接转子的固有频率;将各个连接界面的等效刚度放大 1 000 倍,可获得不考虑界面刚度的转子系统自由模态固有频率。由表 2 可知,考虑界面刚度的螺栓止口连接转子自由模态固有频率与实验结果对比,最大误差为 4.46%;不考虑界面刚度会导致所有阶次的固有频率都有不同程度的增大,与实验结果对比,最大误差为 12.20%。上述结果揭示了“忽略界面刚度会导致模态频率过度预估”的建模缺陷,进一步说明了引入界面刚度精细化表征的必要性,为后续临界转速计算、不平衡响应分析的模型精度控制提供了关键依据,也为同类连接转子的建模误差修正提供了参考思路。

图 5 展示了仿真及实验考虑螺栓止口连接界面刚度的转子系统自由模态振型。仿真模态振型与实验模态振型一致,第 1、4、7、9 阶模态体现为转子的弯曲模态,且第 1 阶模态为转子系统的整体弯曲模态,这也是导致表 2 中考虑/不考虑界面刚度时第 1 阶模态误差较大的主要原因。第 3 阶和第 6 阶模

态体现转子的轴向拉伸模态,说明了螺栓止口连接界面的刚度不仅影响转子系统的弯曲模态,对转子系统的轴向拉伸模态也有较大的影响。仿真结果和实验结果振型差异的主要原因为:实验中锤击点在转子系统表面,因此只能获取表面位置的模态变形。



注:各阶模态振型图中的上图为仿真分析结果,下图为实验测试结果

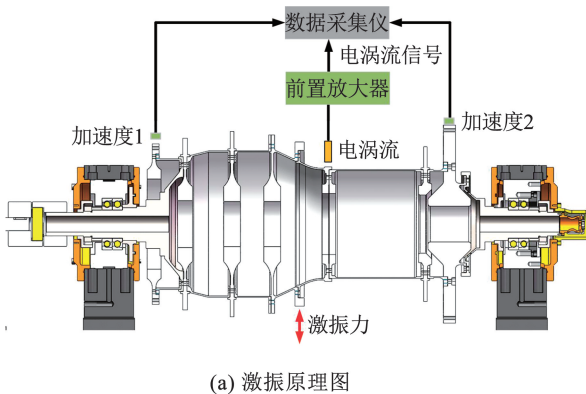
图 5 螺栓止口连接转子自由模态振型

Fig. 5 Free modal shapes of rotor with bolted-rabbit joints

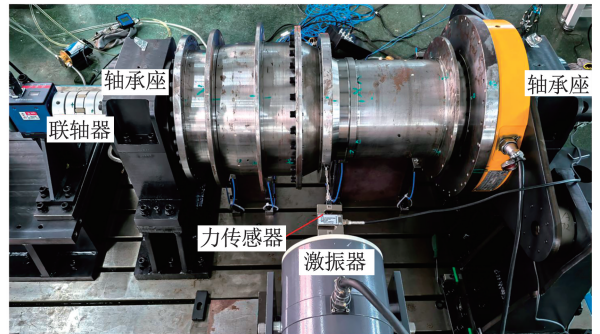
2.2 约束模态验证及分析

为了分析螺栓止口连接转子在轴承支承状态下的固有特性,开展了螺栓止口连接转子激振测试,见图 6。激振器与转子系统通过力传感器进行连接,

力传感器作为输入信号与控制器连接,控制器通过功率放大器对激振器进行闭环控制。采用电涡流位移传感器测量鼓筒连接处的位移响应,采用加速度传感器测量 1 级叶盘和涡轮叶盘上的加速度响应。



(a) 激振原理图



(b) 激振测试现场

图 6 螺栓止口连接转子激振测试

Fig. 6 Excitation test of rotor with bolted-rabbit joints

开展螺栓止口连接转子定频激振实验,激振频率为 15 Hz,获得不同激振力下鼓筒连接处的位移-载荷曲线,见图 7。不同激振力下的位移-载荷曲线呈线性变化,通过拟合可得测试点处的当量刚度为 2.79×10^7 N/m。需要说明的是,图 7 中未出现螺栓连接结构在动态激励下产生典型迟滞现象

的主要原因是螺栓尺寸和螺栓数量较大,导致螺栓止口连接界面的等效刚度较大,界面之间未产生明显滑移,导致激振力与位移呈线性变化,进一步说明了在本文模型中将螺栓止口连接界面等效为线性刚度的合理性。此外,轴承座的设计刚度为 2.50×10^7 N/m,将其引入螺栓止口连接转子有限元模型中

(图 2),在激振力位置施加 200 N 的集中载荷,通过静力学分析可得相应电涡流测试位置的节点位移为 6.45×10^{-6} m,仿真获得的当量刚度为 3.10×10^7 N/m,与实际测试值相对误差为 10%,与实验结果吻合。误差较大的原因主要为仿真中螺栓止口连接转子本身刚度与实际刚度存在偏差,以及轴承座加工误差导致设计刚度与实际刚度偏离。

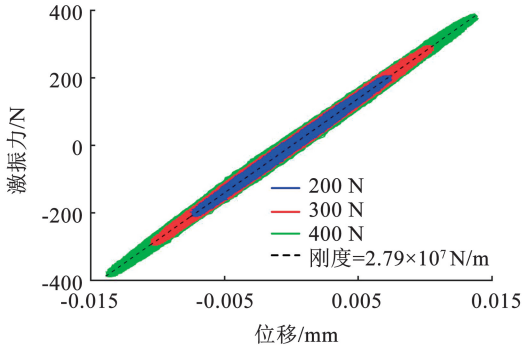
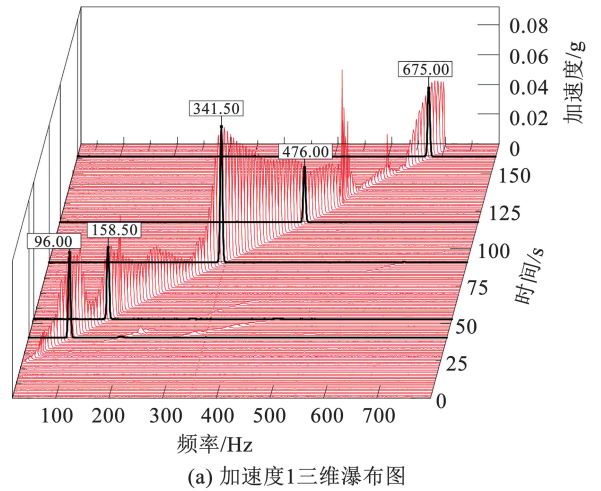


图 7 螺栓止口连接转子不同定频激振下的位移 - 载荷曲线
Fig. 7 Displacement-load curves of rotor with bolted-rabbit joints under different constant-frequency excitations

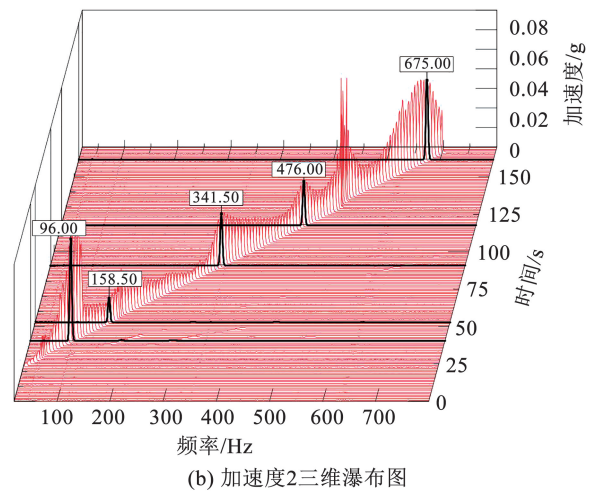
开展螺栓止口连接转子扫频激振实验,频率范围为 0 ~ 800 Hz,扫频速率为 5 Hz/s,获得螺栓止口连接转子扫频激振下加速度 1 和加速度 2 的三维瀑布图,见图 8。由图 8 可知,在轴承支承状态下,存在 96.00、158.50、341.50、476.00、675.00 Hz 等多个共振峰。

仿真计算考虑界面刚度、不考虑界面刚度时转子系统支承状态下的固有频率,见表 3。同时考虑界面刚度转子系统支承状态下模态振型,见图 9。仿真结果与实验结果吻合较好,最大误差绝对值不大于 8%。第 1 阶与第 2 阶仿真结果与实验结果误差较大,主要因为第 1 阶和第 3 阶模态为转子平动模态和俯仰模态,主要由轴承刚度决定。此外,第 6 ~ 11 阶模态为转子弯曲模态,考虑界面刚度的仿

真结果与实验结果吻合较好,且频率值小于不考虑界面刚度的仿真结果,这与表 2 中结果类似,进一步说明了界面刚度会影响转子系统弯曲模态,忽略界面刚度会导致模态频率过度预估。



(a) 加速度 1 三维瀑布图



(b) 加速度 2 三维瀑布图

图 8 螺栓止口连接转子扫频激振三维瀑布图

Fig. 8 Three-dimensional waterfall diagram of rotor with bolted-rabbit joints under sweep-frequency excitation

表 3 螺栓止口连接转子支承状态下固有频率对比

Tab. 3 Comparison of natural frequencies of rotor with bolted-rabbit joints under bearing support

阶次	实验/Hz	考虑界面刚度/Hz	误差 1/%	不考虑界面刚度/Hz	误差 2/%
第 1 阶 (f_{n1})	96.00	89.08	-7.21	90.01	-6.24
第 2 阶 (f_{n2})	—	89.08	—	90.01	—
第 3 阶 (f_{n3})	158.50	146.22	-7.75	146.79	-7.39
第 4 阶 (f_{n4})	—	146.22	—	146.79	—
第 5 阶 (f_{n5})	341.50	326.87	-4.28	345.41	1.14
第 6 阶 (f_{n6})	476.00	461.10	-2.21	489.72	3.86
第 7 阶 (f_{n7})	—	461.10	—	489.72	—
第 8 阶 (f_{n8})	675.00	671.09	-0.58	695.88	3.09
第 9 阶 (f_{n9})	—	671.09	—	695.88	—
第 10 阶 (f_{n10})	—	838.03	—	870.80	—
第 11 阶 (f_{n11})	—	838.03	—	870.80	—

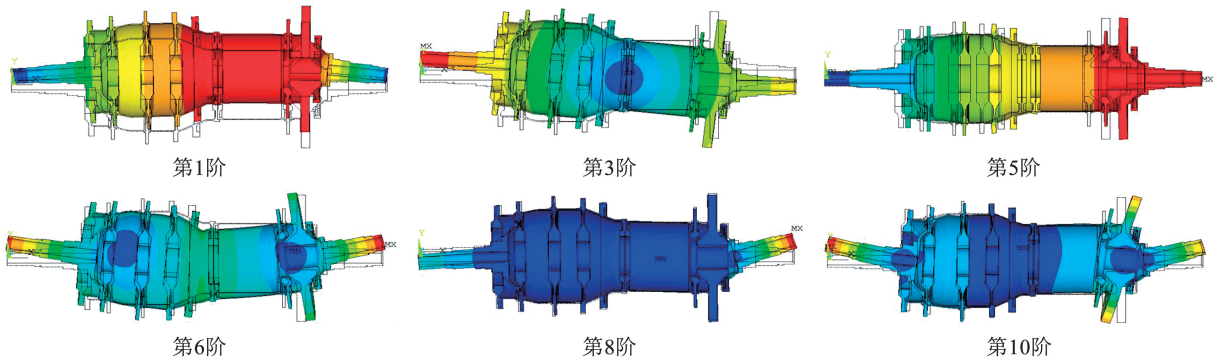


图 9 螺栓止口连接转子支承状态下模态振型

Fig. 9 Modal shapes of rotor with bolted-rabbit joints under bearing support

3 螺栓止口连接转子动力学特性研究

3.1 螺栓止口连接对临界转速影响

图 10 展示了考虑/不考虑螺栓止口状态下螺栓止口连接转子的 Campell 图,红色线表示激励线,激励线与动频曲线的交点即为临界转速。由图 10 可知,第 1、2 阶和第 5 阶动频随着转速的增加基本保持不变,主要原因为第 1 阶和第 2 阶为转子平动模态,第 5 阶为转子轴向拉伸模态(图 9),转速对其影响小;第 3、4 阶为转子俯仰模态,随着转速的增大动频曲线发散,主要是由于陀螺效应导致;第 6、7 阶为转子弯曲模态,随着转速的增大,正进动频率增大,反进动频率减小,也是由于陀螺效应导致。此外,考虑/不考虑螺栓止口对转子系统第 1~4 阶影响不大,对其他阶次影响较大,与表 3 有相同的趋势。

表 4 列出了不同螺栓止口对转子系统临界转速的影响。考虑全部止口位置的界面刚度后,与不考虑螺栓止口相比,第 1~3 阶临界转速变化率分别为 1.00%、0.50%、5.45%,进一步说明了止口刚度对转子平动模态(第 1 阶临界)和俯仰模态(第 2 阶模态)影响小,对转子弯曲模态(第 3 阶临界)影响大。

此外,由表 4 可知,相对其他止口位置,仅考虑止口 5 位置,导致第 1、2 阶临界较大偏移,转速变化率分别为 0.31%、0.18%;仅考虑止口 2 位置,导致第 3 阶临界较大偏移,转速变化率为 1.82%。全部止口的临界转速变化率(1.00%~5.45%)大于单个止口的最大变化率(0.31%~1.82%),表明多止口刚度存在叠加效应,设计中需考虑整体耦合;优先控制止口 2 与止口 5 的连接界面刚度,通过提高预紧力或止口过盈量,减少临界转速降幅。

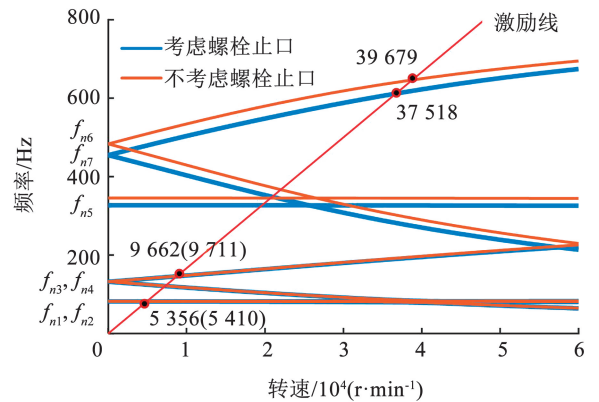


图 10 螺栓止口连接转子的 Campell 图

Fig. 10 Campell diagram of rotor with bolted-rabbit joints

表 4 不同螺栓止口状态下连接转子临界转速对比

Tab. 4 Comparison of critical speeds of connected rotor under different bolted-rabbit states

螺栓止口状态	临界转速/($r \cdot \min^{-1}$)			变化/%		
	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
不考虑	5 410	9 711	39 679			
考虑止口 1	5 402	9 705	39 278	0.15	0.06	1.01
考虑止口 2	5 395	9 699	38 956	0.28	0.12	1.82
考虑止口 3	5 400	9 708	39 439	0.18	0.03	0.60
考虑止口 4	5 405	9 700	39 541	0.09	0.11	0.35
考虑止口 5	5 393	9 694	39 182	0.31	0.18	1.25
考虑全部止口	5 356	9 662	37 518	1.00	0.50	5.45

3.2 螺栓止口连接对不平衡响应影响

为了进一步分析螺栓止口对转子系统动力学响应的影响,开展了螺栓止口连接转子不平衡响应分析,见图 11。在 1 级叶盘以及涡轮叶盘位置分别设置不平衡质量 $100 \text{ g}\cdot\text{mm}$,并取轴承阻尼为 $5 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$,获得了 $0 \sim 700 \text{ Hz}$ 的不平衡响应曲线。为了精确分析各止口位置的动态特性,本文提取了与每个止口连接面耦合的所有中心节点(图 2)横向位移和转角位移响应,止口 1~止口 5 分别包括 6 节点、4 节点、2 节点、4 节点和 2 节点。需要说明的是,由于不考虑螺栓止口连接后,各个止口位置处耦合中心节点的横向位移和转角位移几乎重合,因此,不考虑螺栓止口时仅取节点 1 处的横向位移和转角位移。

由图 11 可以看出,考虑螺栓止口连接后,在 91 Hz (1 阶临界)、 161 Hz (2 阶临界),以及 602 Hz (3 阶临界)有明显的共振峰,分别对应转子系统平动模

态、俯仰模态以及弯曲模态;与不考虑螺栓止口连接对比,在 1 阶和 2 阶临界附近,振幅几乎重合,且各个节点的横向和转角位移也几乎重合,转子系统的振幅主要由轴承刚度和阻尼决定;在 3 阶临界转速附近,考虑界面刚度的振幅比不考虑界面刚度的模型有明显的增大,共振峰前移,主要是由于考虑界面刚度降低了转子本身的刚度,进而使得弯曲模态固有频率减小。此外,止口 1、2、4 在转子弯曲模态附近产生明显的横向位移不连续,不同节点之间横向位移振幅差值分别为 0.22×10^{-5} 、 0.24×10^{-5} 、 $0.14 \times 10^{-5} \text{ m}$;止口 2、3、5 在转子弯曲模态附近产生明显的转角位移不连续,不同节点之间角向位移振幅差值分别为 0.80×10^{-5} 、 0.52×10^{-5} 、 $0.52 \times 10^{-5} \text{ rad}$,导致转子系统在 2 阶临界和 3 阶临界之间由整体俯仰产生局部弯曲,使得振幅增大,影响转子系统的振动特性。

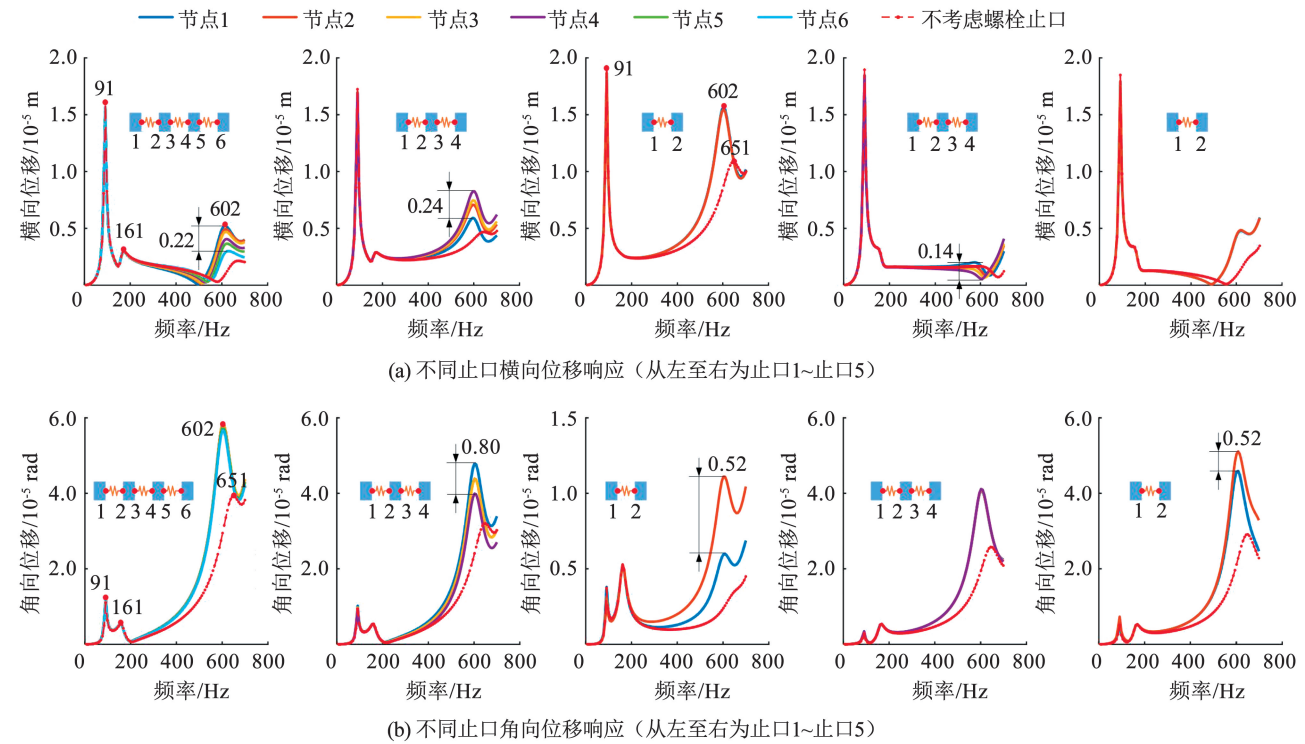


图 11 螺栓止口连接转子不平衡响应

Fig. 11 Unbalance response of rotor with bolted-rabbit joints

4 结 论

1) 构建了航空发动机螺栓止口连接转子的动力学建模框架。采用实体单元模拟轮盘与转轴,弹性支承单元模拟轴承, MPC 接触算法实现连接面自由度耦合,结合矩阵单元构建含多向刚度的界面等效刚度矩阵,为同类多连接界面旋转机械转子的动力学建模提供通用方法。

2) 验证了在多边界条件下本文模型的有效性。

通过螺栓预紧力超声测试、自由模态测试,以及约束模态测试,验证了模型在不同边界下模型有效性,阐明了忽略界面刚度会导致模态频率过度预估,止口刚度对转子平动模态和俯仰模态固有频率影响小,对转子弯曲模态固有频率影响大,明确了界面精细化表征的必要性。

3) 揭示了螺栓止口对转子动力学特性的影响规律。考虑全部螺栓止口连接后,临界转速降低,弯曲模态对应的临界转速对界面刚度变化更敏感;不

平衡响应中,螺栓止口连接对平动和俯仰模态振幅影响较小,对弯曲模态振幅影响较大,在 2 阶临界和 3 阶临界中间螺栓止口配合面开始发生横向和转角位移不连续。

参考文献

- [1] HAN Zhuoluo, WANG Dong, WANG Yongfeng, et al. Dynamic effects of the initial skewness of the inertial principal axis on the rotor with bolted joint [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 200: 110564. DOI: 10.1016/j.ymssp.2023.110564
- [2] 吕东晓, 陈雪骑, 王东, 等. 转子螺栓连接结构界面滑移损伤机理及影响因素研究[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(1): 20230027
LYU Dongxiao, CHEN Xueqi, WANG Dong, et al. Mechanism and influential factors research of slip damage in rotor bolted joint structures [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(1): 20230027. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20230027
- [3] 王东, 韩卓莹, 杨哲夫, 等. 连接结构刚度非对称对高速转子动力特性影响[J]. *航空动力学报*, 2024, 39(12): 20220995
WANG Dong, HAN Zhuoluo, YANG Zhefu, et al. Influence of unsymmetrical stiffness of joints on high-speed rotor dynamic characteristics [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(12): 20220995. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20220995
- [4] 洪杰, 宋制宏, 王东, 等. 高速转子系统支承结构及力学特性设计方法[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(5): 961
HONG Jie, SONG Zhihong, WANG Dong, et al. Design method for bearing-support structure and mechanical properties of high-speed rotor system [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(5): 961. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2019.05.001
- [5] 朱志敏. 考虑界面接触的螺栓连接转子动力学特性研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2024
ZHU Zhimin. Dynamic analysis of a bolted joint rotor system considering the contact at mating interface [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2024. DOI: 10.27759/d.cnki.ggxg.2024.000124
- [6] KIM J, YOON J C, KANG B S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31(5): 895. DOI: 10.1016/j.apm.2006.03.020
- [7] TAHERI-BEHROOZ F, SHAMAEI KASHANI A R, HEFZABAD R N. Effects of material nonlinearity on load distribution in multi-bolt composite joints [J]. *Composite Structures*, 2015, 125: 195. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.01.047
- [8] ZHAO Guang, XIONG Zhiliang, JIN Xin, et al. Prediction of contact stiffness in bolted interface with natural frequency experiment and FE analysis [J]. *Tribology International*, 2018, 127: 157. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.05.044
- [9] MAYER M H, GAUL L. Segment-to-segment contact elements for modelling joint interfaces in finite element analysis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(2): 724. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.10.006
- [10] 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
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. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0796
- [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
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. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2019.06.003
- [12] 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
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. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0222
- [13] LI Chaofeng, MIAO Boqing, TANG Qiansheng, et al. Nonlinear vibrations analysis of rotating drum-disk coupling structure [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 420: 35. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.01.019
- [14] CHEN Yugang, ZHAI Jingyu, HAN Qingkai. Multilevel finite element modeling and coupling vibration analysis of the drum in blade-disk-drum assembly [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G. Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 231(6): 998. DOI: 10.1177/0954410016646600
- [15] 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. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.056
- [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. DOI: 10.1007/s11071-018-4300-4
- [17] 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. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.002
- [18] 洪杰, 闫琦, 丰少宝, 等. 界面连接多盘转子旋转惯性模型及动力响应特性[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(5): 897
HONG Jie, YAN Qi, FENG Shaobao, et al. Rotational inertia model and dynamic response characteristics of multi-disk rotor system with interface [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(5): 897. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20210556
- [19] 洪杰, 杨哲夫, 孙博, 等. 局部旋转惯性对转子系统动力特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(4): 673
HONG Jie, YANG Zhefu, SUN Bo, et al. Influence of local rotary inertia on the dynamic properties of rotor systems [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(4): 673. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20210579
- [20] 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
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. DOI: 10.3901/JME.2024.08.396

(编辑 张红)