

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.02.011

双转子-支承-机匣耦合系统 非线性动力学响应分析*

张耀涛,徐可君*,秦海勤

(海军航空大学 航空机械工程与指挥系(青岛校区),山东 青岛 266041)

摘要:针对航空发动机安全可靠使用的现实问题,对某型航空发动机双转子试验器的转速、转子偏心量以及转速比等方面进行了研究。建立了考虑高低压转子中介轴承的耦合和机匣的弹性变形的简化整机有限元模型,将所建模型与文献中双转子系统算例的数据进行了对比,评价了理论模型的正确性;利用 Newmark- β 数值积分法求解了系统的非线性动力学响应。研究结果表明:偏心量的位置不同,高压转子与低压转子的振动响应幅值差异明显,当偏心量施加在高压转子部分时,系统的幅值响应更加复杂;转子系统的运动形态受高低压转速比的变化影响显著,系统可能做周期、概周期或者混沌运动。

关键词:双转子-支承-机匣系统;非线性动力学;庞加莱截面图;频谱分析

中图分类号:TH113.1;V231.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)02-0168-06

Nonlinear dynamic response analysis of dual-rotor-support-casing system

ZHANG Yao-tao, XU Ke-jun, QIN Hai-qin

(Department of Aviation Mechanical Engineering and Management in Qingdao Branch,
Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: Aiming at the problem of the aero-engine safe and reliable using, the rotational speed, rotor eccentricity and rotational speed ratio of an aero-engine dual rotor tester were studied. A simplified complete machine finite element model with high and low pressure rotor intermediate bearings and the elastic deformation of the casing was established, the validity of the theoretical model was evaluated by comparing the model with the data of a dual rotor system in the literature, the Newmark- β numerical integration method was used for solving nonlinear dynamic responses of systems. The results indicate that the vibration response amplitude of high pressure rotor and low pressure rotor is distinct difference when the eccentric position is different. The amplitude response is complicated when the eccentricity is applied to the high pressure rotor part. The motion pattern of the rotor system is significantly influenced by the ratio of high and low pressure speed to rotation ratio, the system may do cycle, almost cycle or chaotic motion.

Key words: dual-rotor-support-casing system; nonlinear dynamic; the Poincare map; spectrum analysis

0 引 言

目前,航空发动机广泛采用双转子结构,特点是转子系统由高压转子和低压转子两个子系统组成,

它们之间通过中介轴承联接^[1-3]。较之于单转子系统的发动机,振动情况更为复杂,分析计算也较为困难。为了提高发动机推重比,不但要将转子设计为柔性转子,在工作转速范围内转子更要越过一阶、二阶甚至三阶临界转速^[4-6],并且为降低陀螺力矩对机

收稿日期:2018-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11772089)

作者简介:张耀涛(1993-),男,河南上蔡人,硕士,主要从事转子动力学方面的研究。E-mail:zhangyaotao1993@163.com

通信联系人:徐可君,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:xukejunxuran@126.com

匣的负荷,进一步提高飞机机动性,部分先进发动机采用了高低压转子反向旋转的先进结构设计。无论柔性还是反向旋转设计均对发动机转子动力学特性提出了很高的要求。因此,为确保航空发动机安全可靠使用,进行双转子系统动力学研究具有重大国防战略意义。

由于双转子系统结构特征和力学性能复杂,涉及轴承、挤压油膜阻尼器的非线性油膜力等导致的非线性刚度和阻尼问题,以及支承故障如基座松动、转子裂纹和碰摩等导致的非线性问题^[7-9],理论分析和求解困难。现有的研究中,考虑双转子系统中机匣结构的不多。针对双转子系统的线性耦合特性,罗贵火等^[10]采用传递矩阵法计算了双转子系统的临界转速和振型,模型中考虑了中介轴承耦合、滚动轴承间隙、非线性赫兹接触力作用,分析了同向旋转和反向旋转时双转子系统的拍振响应和轴心轨迹响应,并利用双转子模拟试验器对仿真结果进行了验证,但是模型中没有考虑陀螺矩阵的影响;徐可君等^[11]采用改进的整体传递矩阵法对同转双转子系统临界转速进行了计算;费钟秀等^[12]采用有限单元法,综合考虑转动惯量、陀螺力矩、转轴剪切变形以及重力因素的影响,分析了陀螺力矩对同向旋转和反向旋转下系统临界转速的影响,以及转速比和中介轴承刚度对系统临界转速的影响,但是缺乏机匣模型;CHIANG H 等^[13]建立了有限元离散模型,包含单转子-轴承支承模型和双转子-轴承支承模型,将单转子系统圆盘简化为3个,双转子系统的内、外转子轮盘分别简化为两个,分析了高低压转速比对双转子临界转速的影响;CUPTA 等^[14]在双转子实验器的基础上,利用传递矩阵法计算了含中介支承的双转子系统的不平衡振动响应,并对该系统的模态振型、临界转速和不平衡振动响应等进行了实验研究。上述研究均将中介轴承简化为弹簧-阻尼。从双转子系统的现有研究成果看,国内外研究人员多采用传递矩阵法和有限元模型对其复杂非线性响应进行了有益的分析,但是在转子系统建模时考虑机匣结构的文献极少。

因此,为研究双转子-支承-机匣耦合系统的非线性动力学响应,同时验证有限元方法数值计算结果的准确性,本文以实验室带机匣的双转子航空发动机试验器为研究对象,考虑高低压转子中介轴承的耦合和机匣的弹性变形,建立该试验器的整机有限元模型,通过 Newmark- β 数值解法求解系统的非线性响应,以验

证有限元模型计算结果准确性。

1 双转子-支承-机匣耦合系统有限元模型建立

1.1 模型示意图

针对目前航空发动机广泛采用的双转子结构,为研究双转子-支承-机匣系统的整机振动响应,本研究首先利用能量法和 Lagrange 方程得到了盘元素、轴元素的惯性矩阵、刚度矩阵和陀螺矩阵后,通过组装,获得了高、低压转子系统各自的整体矩阵;其次,针对航空发动机机匣的薄壁结构特点采用截锥壳元素法求解了刚度矩阵和质量矩阵,经过组装得到了机匣系统的整体矩阵。

本文以航空发动机整机动力学特性双转子试验器为参考,建立双转子-支承-机匣耦合系统动力学模型,系统共有57个节点,其中低压转子部分有17个节点,高压转子部分有14个节点,机匣部分有26个节点。该模型中所有轴承均采用线性弹簧-阻尼模型,其中: $k_{bx1} = k_{by1} = 6 \times 10^7 \text{ N/m}$, $k_{bx2} = k_{by2} = 3 \times 10^7 \text{ N/m}$, $k_{bx3} = k_{by3} = 8 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_{bx4} = k_{by4} = 2 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_{bx5} = k_{by5} = 1.5 \times 10^7 \text{ N/m}$, $c_{bx1} = c_{by1} = c_{bx2} = c_{by2} = c_{bx5} = c_{by5} = 1\ 200 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $c_{bx3} = c_{by3} = 1\ 300 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $c_{bx4} = c_{by4} = 1\ 800 \text{ N} \cdot \text{s/m}$,内转子采用1-1-1支承方式,外转子采用1-0-1支承方式,高低压转子之间通过一个中介轴承连接,从而带来两个转子的振动耦合明显,振动特性复杂;但采用这种支承结构的优点是可以使得发动机长度缩短,承力框架数目减少,减轻发动机重量^[15]。

双转子-支承-机匣耦合系统动力学模型如图1所示。

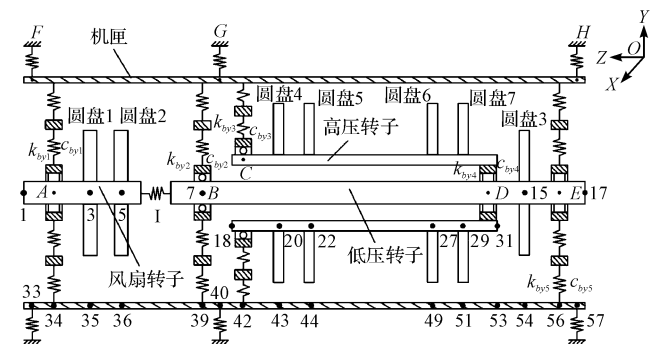


图1 双转子-支承-机匣耦合系统动力学模型

1.2 系统运动方程

为降低模型的复杂性,提高求解效率,模型的建立基于以下假设:

(1) 轮盘、转子的材料为各向同性,其本构关系符合胡克定律;

(2) 转轴采用 Timoshenko 梁单元来表征,仅考虑转子的横向弯曲振动,不考虑转轴的扭转和轴向振动;

(3) 圆盘的径向刚度远远大于机匣刚度,故不考虑其弹性变形,圆盘简化为刚性盘;

(4) 结合动力相似性与物理结构特征相似性,采用截锥壳元素法对机匣进行建模;

(5) 支承方式简化为弹簧-阻尼模型,忽略轴承的非线性,不考虑其交叉项。

双转子系统在划分单元节点时,按照转子结构与尺寸特点依次对低压转子部分与高压转子部分进行单元节点的划分。若低压转子划分单元后节点数为 n_1 ,其广义位移向量为:

$$q^{R1} = [u_1^1 \quad v_1^1 \quad \theta_1^1 \quad \psi_1^1 \quad \cdots \quad u_{n_1}^1 \quad v_{n_1}^1 \quad \theta_{n_1}^1 \quad \psi_{n_1}^1]^T \quad (1)$$

综合所有低压转子上圆盘的运动方程与所有轴元素的运动方程,得到低压转子系统的运动方程:

$$M^{R1} \ddot{q}^{R1} - \Omega G^{R1} \dot{q}^{R1} + K^{R1} q^{R1} = Q^{R1} \quad (2)$$

式中: M^{R1} — 整体惯性矩阵; K^{R1} — 刚度矩阵; G^{R1} — 陀螺矩阵; Q^{R1} — 转子所受到的广义力。

同理可得高压转子系统的运动方程。

本文采用截锥壳元素法对机匣进行分析,将机匣简化为有限多个锥壳单元组合,用一系列垂直于旋转轴的平面来划分单元,而在周向方向上无需进行单元划分,其优点不仅节省内存,大大减少数据准备工作量,且其计算精度也比梁单元有很大提高。截锥壳元素分析坐标系如图 2 所示。

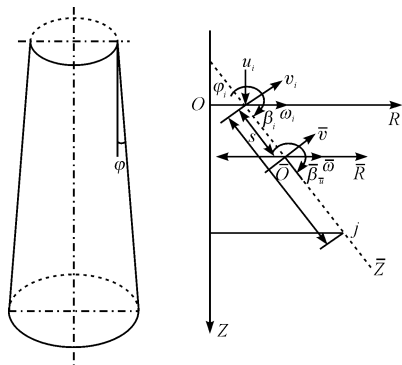


图 2 截锥壳元素分析坐标系

φ - 锥顶角的一半,4 个自由度; ROZ - 整体坐标系;

\overline{ROZ} - 局部坐标系

每个节点有轴向位移 u 、径向位移 v 、切向位移 w 和转角 β ,节点 i 的位移为:

$$\overline{\delta}_i = [\overline{u}_i \quad \overline{v}_i \quad \overline{w}_i \quad \overline{\beta}_i]^T \quad (3)$$

机匣划分单元后节点数为 m ,其广义位移向量为:

$$q^C = [u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad \beta_1 \quad \cdots \quad u_m \quad v_m \quad w_m \quad \beta_m]^T \quad (4)$$

将截锥壳单元的质量矩阵进行组装,可得到机匣总质量矩阵 M^C ,将单元刚度矩阵组装成机匣的总刚度矩阵 K^C ,则机匣的动力学方程为:

$$M^C \ddot{q}^C + K^C q^C = Q^C \quad (5)$$

根据高、低压转子以及机匣之间耦合节点的对接条件:耦合界面上的位移相等,以及界面上的作用力与反作用力相等。高、低压转子与机匣的运动方程写成通式为:

$$M \ddot{q} + (C - \Omega G) \dot{q} + K q = Q \quad (6)$$

式中: M — 系统质量矩阵; C — 系统粘性阻尼矩阵,本文采用 Rayleigh 比例阻尼; G — 系统阻尼矩阵,包括圆盘、转轴的陀螺矩阵和支承阻尼矩阵; K — 系统刚度矩阵; q — 系统广义位移向量; Q — 广义力。

2 双转子系统有限元模型验证

根据文献[16]中双转子系统算例的数据,利用所编双转子有限元模型 Matlab 程序计算其临界转速,高、低压转子转速比为 1.5。

双转子系统临界转速计算结果如表 1 所示。

表 1 双转子系统临界转速计算结果

阶数	文献[16]计算结果/ (rad · s ⁻¹)		本文计算结果/ (rad · s ⁻¹)	
	低压转子	高压转子	低压转子	高压转子
一阶临界转速	1 126.5	1 072.5	1 125.9	1 073.2
二阶临界转速	1 727.3	1 593.2	1 726.6	1 592.8
三阶临界转速	2 279.6	2 265.6	2 279.5	2 265.1

由表 1 计算结果可以看出:两者结果近乎相等,验证了所编双转子有限元计算程序是有效可行的。

3 双转子-支承-机匣耦合系统非线性动力学响应

3.1 响应分岔图

在研究双转子系统的动力学响应时,转速的变化对转子系统的影响是其中重要的一个因素,在不同的转速下,转子系统的动力学特性将会有所不同。与单转子系统不同的是,双转子系统响应有两个主要不平衡力激励,即低压转子不平衡力激励和高压转子不平衡力激励^[17-18]。对双转子这种双频激励系统,应采用

多频法求解分岔图与庞加莱图。设高、低压转子转速比为 1.3,在此工况下,低压转子分岔图如图 3 所示。

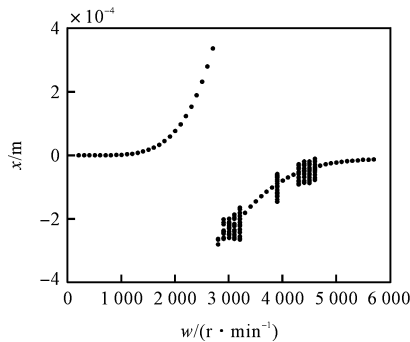


图 3 低压转子分岔图

由图 3 可知: 低压转子转速 $w = 100 \text{ r/min} \sim 2700 \text{ r/min}$ 、 $w = 3400 \text{ r/min} \sim 3800 \text{ r/min}$ 、 $w = 3900 \text{ r/min} \sim 4200 \text{ r/min}$ 和 $w = 4700 \text{ r/min} \sim 5800 \text{ r/min}$ 范围内时,分岔图的图形在每个转速下为一个点,整体近似为一条简单曲线,表明低压转子的运动状态为周期运动;当低压转子转速 $w = 2700 \text{ r/min} \sim 3400 \text{ r/min}$ 、 $w = 3800 \text{ r/min} \sim 3900 \text{ r/min}$ 和 $w = 4200 \text{ r/min} \sim 4700 \text{ r/min}$ 范围内时,低压转子分岔图

的图形为不规则分布,表明低压转子在做倍周期运动甚至是混沌运动。

3.2 偏心量对系统振动特性的影响

笔者分别施加一个外部不平衡质量为 0.1 g 的力在转子节点 3(圆盘 1)、节点 5(圆盘 2)、节点 22(圆盘 5) 和节点 29(圆盘 7),同转双转子 - 机匣系统的坎贝尔图如图 4 所示。

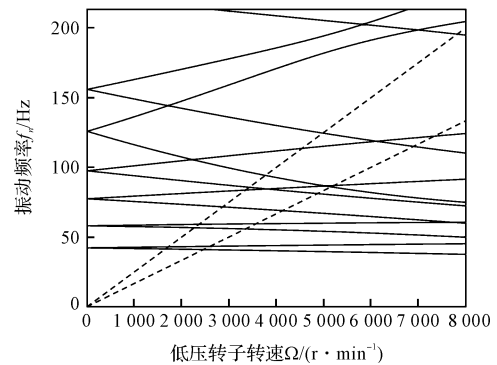
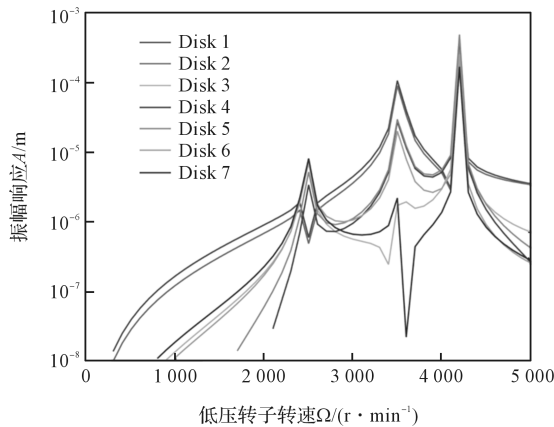
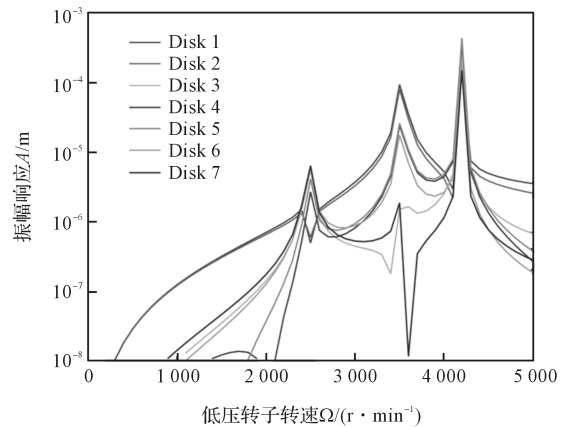


图 4 同转双转子 - 机匣系统坎贝尔图

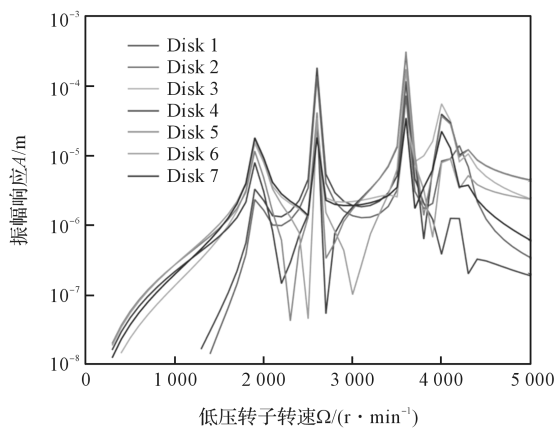
振幅 - 转速曲线如图 5 所示。



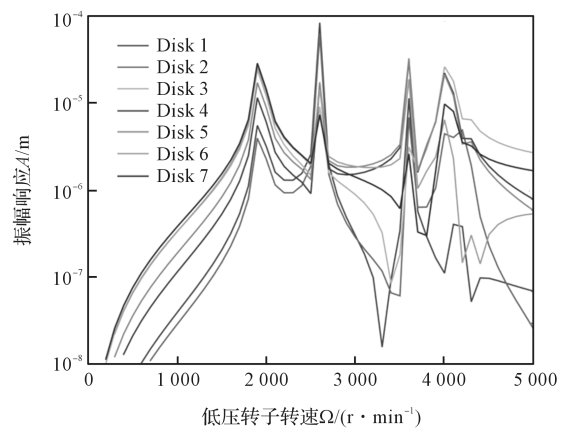
(a) 节点3



(b) 节点5



(c) 节点22



(d) 节点29

图 5 振幅 - 转速曲线

由上图可知:不同的部件在不同的共振频处取得极大值。当不平衡质量在节点 3 和 5 时,共有 3 个极值点;当不平衡质量在节点 22 和 29 时,共有 4 个极值点;对比图(4,5) 结果表明:不同圆盘位置处的极大值即为该阶的临界转速。

3.3 转速比对系统振动特性的影响

针对不同的转速比,高低压转子的运动既有周期性的,也有非周期性的。为了分析其对系统响应的影响,本研究选取试验器低压转子工作转速为 $w = 3\ 300\ \text{r/min}$ 进行试验,详细分析在某一具体转速比下高低压转子的运动形态。

$\lambda = 1.1$ 时高压转子的庞加莱截面和频谱图如图 6 所示。

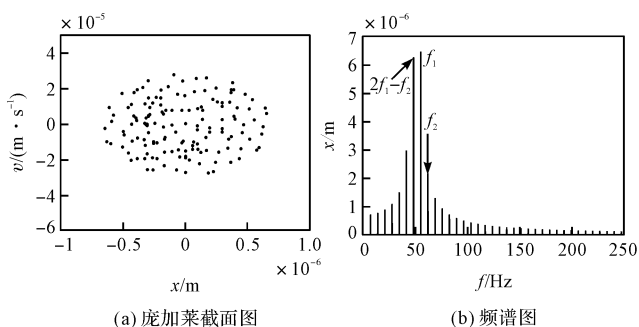


图 6 $\lambda = 1.1$ 时高压转子的庞加莱截面和频谱图

由图 6 可知:高压转子的庞加莱截面图为一乱分布的点,频谱图中频率成分复杂,频谱中除了两个基频外还有其他的组合频率成分,据此可以判断系统此时处于混沌运动状态。

当 $\lambda = 1.5$ 时,高压转子的庞加莱截面和频谱图如图 7 所示。

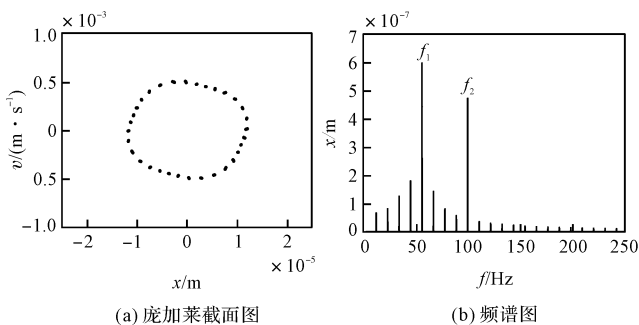


图 7 $\lambda = 1.5$ 时高压转子的庞加莱截面和频谱图

由图 7 可知:庞加莱截面图为一闭合曲线,频谱中除了两个基频 f_1, f_2 , 还有其他的分频、倍频及组合频率成分,故此时高压转子做概周期运动。

当 $\lambda = 2.1$ 时,高压转子的庞加莱截面和频谱图

如图 8 所示。

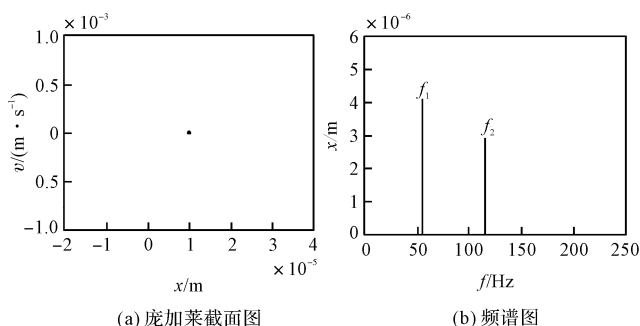


图 8 $\lambda = 2.1$ 时高压转子的庞加莱截面和频谱图

由图 8 可知:庞加莱截面图为一个点,频谱中只有基频 f_1, f_2 , 此时系统做周期运动。

综上所述,试验及结果分析表明转子系统的运动形态受高低压转速比的变化影响显著,在不同的转速比下,转子系统可能做周期、概周期,甚至混沌运动。当转速比较小时,系统做非周期的复杂运动;而转速比较大时,系统做周期运动,故较大一些的转速比将有利于转子系统的平稳运行。

4 结束语

本文以实验室带机匣的双转子航空发动机试验器为研究对象,建立了双转子-支承-机匣耦合系统有限元模型,考虑了高低压转子中介轴承的耦合和机匣的弹性变形,通过 Newmark- β 数值解法求解了系统的非线性响应,得到以下结论:

- (1) 通过对双转子-支承-机匣耦合系统的数值仿真,对比已有文献里的数据,验证了所建有限元模型计算结果的准确性;
- (2) 偏心量的位置不同,高压转子与低压转子的振动响应幅值差异明显,当偏心量施加在高压转子部分时,系统的幅值响应更加复杂;
- (3) 在不同的转速比下,转子系统的运动形态受高低压转速比的变化影响显著,系统可能做周期、概周期或者混沌运动。

参考文献 (References):

[1] HU Qing-hua, DENG Si-er, TENG Hong-fei. A 5-DOF/model for aeroengine spindle dual-rotor system analysis [J]. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2011, 24(2): 224-234.

[2] 邓四二, 付金辉, 王燕霜, 等. 航空发动机滚动轴承-双转子系统动态特性分析 [J]. **航空动力学报**, 2013, 28(1): 195-204.

- [3] THIERY F, AIDAPÄÄ J O. Nonlinear vibrations of a misaligned bladed Jeffcott rotor[J]. **Nonlinear Dynamics**, 2016,86(3):1807-1821.
- [4] 陈果. 双转子航空发动机整机振动建模与分析[J]. 振动工程学报,2011,24(6):619-631.
- [5] NELSON H D, MCVAUGH J M. The dynamics of rotor-bearing systems using finite elements[J]. **Journal of engineering for industry**, 1976,98(2):593-600.
- [6] ROQUES S, LEGRAND M, CARTRAUD P, et al. Modeling of a rotor speed transient response with radial rubbing [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2010(329):527-546.
- [7] 符毅强, 陈予恕, 侯磊, 等. 反向旋转双转子系统滞后特性分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(15):23-27.
- [8] 陈果. 含复杂滚动轴承建模的航空发动机整机振动耦合动力学模型[J]. 航空动力学报, 2017, 32(9):2193-2204.
- [9] 路振勇, 侯磊, 侯升亮, 等. 含裂纹故障的航空发动机转子系统动力学特性分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(3):40-46.
- [10] 罗贵火, 周海仑, 王飞, 等. 含滚动轴承的同向和反向旋转双转子系统动力学响应[J]. 航空动力学报, 2012, 27(8):1887-1894.
- [11] 徐可君, 张龙平. 整体传递矩阵法求解双转子系统临界转速的改进[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(2):133-136.
- [12] FEI Z X, TONG S G, WEI C. Investigation of the dynamic characteristics of a dual rotor system and its start-up simulation based on finite element method [J]. **Journal of Zhejiang University Science A**, 2013, 14(4):268-280.
- [13] CHIANG H W D, HSU C N, TU S H. Rotor-bearing analysis for turbo machinery single-and dual-rotor systems[J]. **Journal of Propulsion and Power**, 2004, 20(6):1096-1104.
- [14] GUPTA K, GUPTA K D, ATHRE K. Unbalance response of a dual rotor system: theory and experiment [J]. **Journal of Vibration and Acoustics**, 1993, 115(4):427-435.
- [15] 张大义, 刘焯辉, 洪杰, 等. 航空发动机整机动力学模型建立与振动特性分析[J]. 推进技术, 2015, 36(5):768-773.
- [16] 廖明夫. 航空发动机转子动力学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2015.
- [17] 白长青, 李志国, 熊小念, 等. 冲击气流作用下放空管道流固耦合动力学分析[J]. 流体机械, 2016(2):34-38.
- [18] 胡绚. 反向旋转双转子系统动力学特性[D]. 南京:南京航空航天大学能源与动力学院, 2007.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

张耀涛, 徐可君, 秦海勤, 等. 双转子-支承-机匣耦合系统非线性动力学响应分析[J]. 机电工程, 2019, 36(2):168-173.

ZHANG Yao-tao, XU Ke-jun, QIN Hai-qin, et al. Nonlinear dynamic response analysis of dual-rotor-support-casing system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(2):168-173.《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>