

基于有限元法的转子细观结构对 宏观刚度的影响

程礼^{1,2}, 高君宇^{1,3}, 屈轲¹, 李帅莹¹

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

3. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

摘 要: 基于有限元法,通过研究转子内部细观结构非线性环节对宏观系统动力学参数影响的规律,构建了降维映射函数的研究思路.针对某型航空发动机轮盘拉杆螺栓接触结构,通过适当简化转子模型,利用ANSYS软件分析轮盘不同偏心状况下,拉杆螺栓不同预紧状态对宏观刚度的影响,探究其刚度非线性特性.结果表明:螺栓均匀预紧,预紧力变化,转子系统非线性特征的变化趋势与偏心夹角有关;半数螺栓松动,偏心夹角越大、松动预紧力越小,非线性特征越明显.

关 键 词: 有限元; 转子系统; 非线性; 刚度; 映射模型

中图分类号: V231.96; TK47

文献标志码: A

Influence on macroscopic stiffness of rotor mesostructure based on finite element method

CHENG Li^{1,2}, GAO Jun-yu^{1,3}, QU Ke¹, LI Shuai-ying¹

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;

3. School of Aerospace,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A research thought of establishing the mapping function based on the rules of dynamics parameters of macroscopic system due to the non-linear behavior of mesostructure for rotor system was put forward which based on finite element method, and then the dimensions of rotor systems were reduced legitimately. By simplifying the rotor model of contact structure of rod bolt in a type of engine disk appropriately, the effects of inhomogeneous rod bolt preload on the rotor macroscopic stiffness under different eccentric states of disks were analysed with ANSYS, nonlinear characteristics of stiffness were obtained. Results show that, when the bolts are evenly preloaded, along with the change of preload forces, the variation trend of nonlinear characteristics is related to the eccentric angle alteration; when half of the bolts are loose, the eccentric angle is larger while the loose preload forces are smaller, and the nonlinear characteristics are more obvious.

Key words: finite element; rotor system; nonlinear; stiffness; mapping model

航空发动机是一种典型的高速旋转机械,其转子系统由压气机轮盘轴、涡轮盘轴、叶片及轴承与阻尼器组成,具有高度非线性特征,因而很难对其整体进行详尽的动力学研究。

转子系统非线性特性通常来源于其内部非线性环节与子系统之间的机电耦合、刚弹耦合、流固耦合、热弹耦合或者非线性控制所引发^[1]。国内外科技工作者针对转子系统的阻尼油膜振荡、裂纹效应、碰摩、装配误差、热弯曲及上述各故障相互耦合等非线性特性进行了大量研究,并取得了丰硕的成果^[2-8]。但较少涉及针对转子系统几何非线性及边界非线性等源于内部环节引发的非线性振动的机理研究,许多复杂机械系统的非线性动力学问题仍未能得到认知和解决,除了高维非线性动力学理论方法不足之外,对非线性模型表述的不全面和不精确也是其主要障碍之一^[1]。陈予恕院士等提出面向工程应用的整机参数的综合集成精细化建模与简化概念^[9]：“综合考虑航空发动机设计、制造、工作过程中各方面的经验因素,采用商用有限元软件对航空发动机系统进行整机参数的综合集成精细化建模,接入非线性因素,并在简化模型定性分析结果的指导下进行定量计算,对航空发动机的优化设计是十分有必要的。”张力等针对涡扇发动机转子系统的结构和力学特征,运用有限元方法对低压转子进行了建模方法和动力特性研究,采用等效圆盘法求解计算,验证该建模方法在工程应用上的可行性^[10]。

以解决“非线性因素接入”和“高维系统降维”问题为出发点,本文基于有限元法,提出了通过研究转子细观结构非线性环节对宏观动力学影响规律,构建二者映射函数关系,建立简化转子非线性动力学方程的研究思路。基于非线性有限元分析方法,针对某型航空发动机轮盘式拉杆转子具有几何及边界非线性典型结构的特点,建立了能够反映薄壁变形、接触界面微观摩擦的刚度非线性模型,模拟航空发动机工作转速载荷,接入轮盘质量偏心影响,探寻拉杆螺栓不同预紧状态下转子结构的刚度特性变化规律。

1 有限元模型映射关系的建立与分析

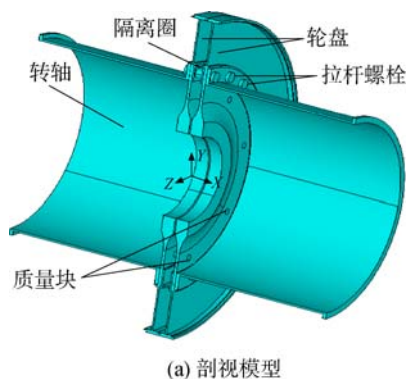
1.1 转子细观结构有限元模型建立

某型涡扇发动机高压压气机第7级、第8级轮盘之间的隔离圈通过圆柱面与轮盘相互定位,

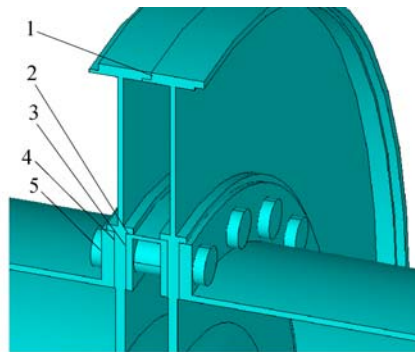
高压压气机各级轮盘和鼓筒靠24颗长螺栓拉紧,通过端面摩擦传递扭矩。建模过程中若直接采用实体模型不利于计算的进行和问题分析,需要对其进行合理简化。

可以看出,经过简化后的模型考虑了拉杆转子结构中拉杆预紧力及各个接触面的作用。

本文运用ANSYS进行分析,采用SOLID 8node 185和SOLID 10node 187作为实体单元,TARGET 170和CONTA 174作为接触单元,根据实体模型建立接触对。拉杆转子的三维实体模型如图1所示,转子系统网格划分如图2所示。



(a) 剖视模型



1 轮盘止口接触; 2 轮盘与隔离圈径向接触;
3 轮盘与隔离圈轴向接触; 4 轮盘与转轴的轴向接触;
5 螺帽与转轴接触

(b) 接触位置

图1 拉杆转子的三维实体模型

Fig. 1 Three-dimensional solid model of rod rotor

本文采用扩展拉格朗日法^[11-12]进行求解,需要确定出有限元模型摩擦因子 μ 的数值。根据文献^[13]中所阐述的平面接触斑点因两物体之间法向压力而产生的弹性变形几何关系,可推导出摩擦因子

$$\mu = \operatorname{tg} \left[\arccos \frac{1 - \sigma_s / E}{1 + \sigma_s / E} \right] \quad (1)$$

式中 $\sigma_s = 745 \text{ MPa}$ 为材料的屈服极限应力, $E =$

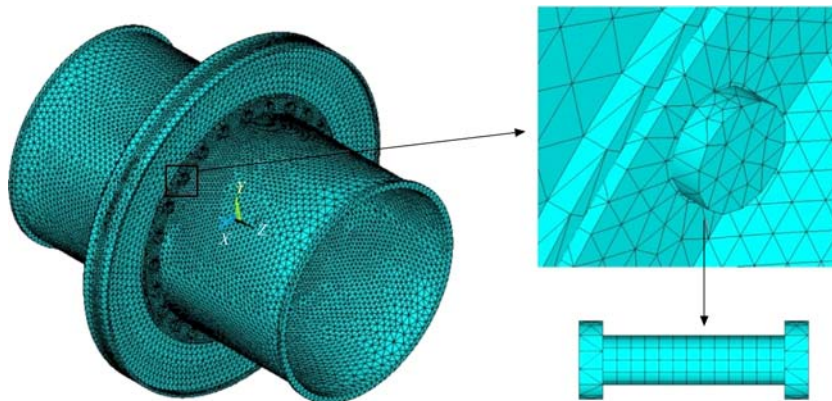


图2 转子系统网格划分
Fig. 2 Meshing of rotor system

1.8×10^{11} Pa 为弹性模量, 代入式(1)中计算出 μ 范围为 0.12~0.18.

由于理论计算值与实际值存在一定的误差, 经过简单试算, 比较计算收敛性, 在有限元计算中 μ 取中间值为 0.15.

1.2 转子宏观刚度参数分析

1.2.1 两轮盘相对位移 ΔU 求解

设旋转过程中两轮盘之间产生的相对位移为 ΔU , 假定左右两轮盘的节点数分别为 N_1 和 N_2 , 左侧轮盘上第 i 个节点 Y 方向(径向)的位移为 U_{Yi} ($1 \leq i \leq N_1$), 右侧轮盘上第 j 个节点 Z 方向的位移为 U_{Zj} ($1 \leq j \leq N_2$), 则可得出如下关系式:

$$\Delta U = \frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} U_{Zj} - \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} U_{Yi} \quad (2)$$

1.2.2 转子受力分析

简化转子受力分析(如图3), 轮盘的偏心距离为 e , 转子旋转时会产生不平衡离心力, 转转轴产生挠度 y , 假设轮盘只作平面运动且不计阻尼, 则轮盘的离心力应与转轴和拉杆的弹性恢复力平衡. 假设轮盘1是完全对称且无偏心, 轮盘2质量为 m , 偏心距离为 e , 由于不平衡离心力 P_c 而使转轴产生的挠度为 y , 在转速 ω 下达到平衡.

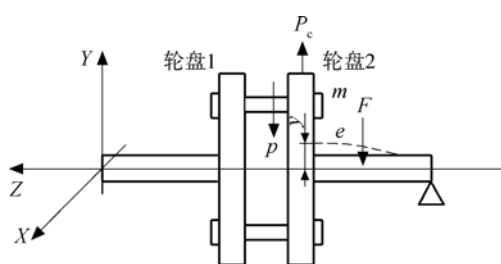


图3 简化转子受力分析
Fig. 3 Simplified rotor forces analysis

拉杆与转轴的弹性恢复力分别为 p , F , 则满足平衡方程

$$P_c = p + F \quad (3)$$

轮盘2的离心力为

$$P_c = m\omega^2(y + e) \quad (4)$$

转轴的刚性系数为 c , 则弹性恢复力为

$$F = cy \quad (5)$$

转轴的跨度远远大于挠度, 则转轴的刚性系数可近似为

$$c = \frac{6EI}{l^3} \quad (6)$$

式中 E 为材料弹性模量; I 为界面对 Z 轴的惯性矩; l 为转轴的长度.

将式(4)~式(6)代入式(3), 可得拉杆的弹性恢复力为

$$p = m\omega^2(y + e) - \frac{6EI}{l^3}y \quad (7)$$

1.2.3 转子径向刚度分析

为接入非线性因素, 构建部分细观结构非线性环节与宏观刚度之间的函数映射关系. 考虑轮盘质量偏心并改变螺栓预紧状态, 计算得出轮盘相对位移及拉杆螺栓作用在轮盘上的弹性恢复力, 进而得到宏观刚度计算关系式. 在轮盘上加载叶片影响, 转子左转轴端面进行全约束, 右转轴端面进行径向约束, 如图4.

在两轮盘上创建8个均匀分布质量块, 通过调节其密度改变轮盘偏心距离和方向. 转子系统整体施加工作转速, 根据式(2)得出两轮盘相对位移 ΔU , 综合螺栓预紧力与不平衡离心力影响计算轮盘转轴接触径向平均位移(即转轴的挠度 y), 代入式(7)得出 p . 轮盘间径向刚度 K_l 可由式(8)得出

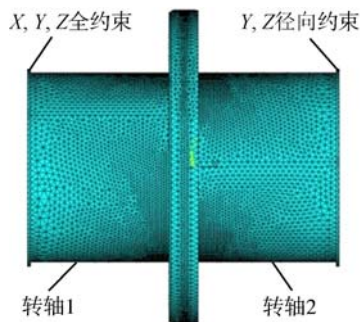


图4 有限元模型约束加载

Fig. 4 Restraint loading of finite element model

$$K_i = \frac{p(m, \omega, E, I, y)}{\Delta U(U_Y, N_i)}, \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

运用扩展拉格朗日法,确定摩擦因子 μ ,在有限元分析中,通过改变细观结构的非线性特征,如:拉杆螺栓预紧力大小以及轮盘偏心距离及偏心夹角等,基于界面接触效应机理,研究在离心载荷下宏观刚度的变化规律,建立如式(8)函数映射关系。

2 离心力作用下拉杆转子刚度特性

计算过程中有限元模型主要参数如下: $m=10.1936\text{ kg}$, $\rho=8230\text{ kg/m}^3$, $l=0.25\text{ m}$, $c=2.592\times 10^9\text{ N/m}$, $I=7.50\times 10^{-5}\text{ m}^4$, $E=1.8\times 10^{11}\text{ Pa}$ 。

2.1 两轮盘偏心时拉杆转子模型仿真

轮盘上24颗螺栓分为上端和下端螺栓组各12颗,改变螺栓组的预紧扭矩,通过定量计算将扭矩转化为拉杆上的预紧应力^[14],在有限元模型中采用降温法进行加载;同时调节两轮盘上质量块的密度,使轮盘产生偏心。对模型施加转速,模拟真实发动机工作过程。

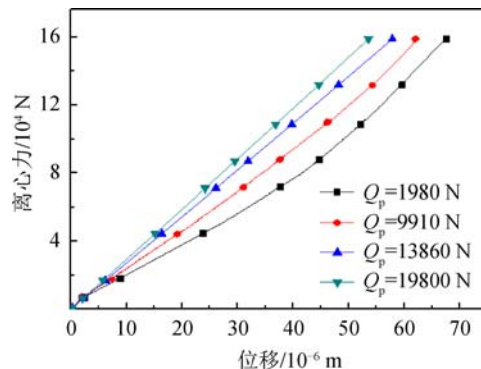
2.1.1 螺栓均匀预紧

本节将研究在螺栓均匀预紧情况下,两轮盘偏心夹角的变化对转子接触刚度非线性的影响。分别设定两轮盘偏心量,使得偏心夹角分别呈 180° , 90° 和 0° ,螺栓预紧力均匀加载分别为19800, 13860, 9910, 1980 N。施加转速进行计算,得出两轮盘相对位移和剩余离心力之间的拟合曲线和拟合关系式表征线性和非线性程度,进而分析预紧力变化与宏观刚度特性之间的定性关系。

1) 两轮盘偏心夹角为 180°

调整两轮盘上质量块的密度,保证其质量偏心处于同一径向位置的原点两侧(即偏心夹角为 180°),两轮盘偏心距离均为 $e=7.903\text{ mm}$,螺栓均匀预紧,预紧力 Q_p 分别为标准预紧($Q_p=$

19800 N)和松动预紧($Q_p=1980\text{ N}$, $Q_p=9910\text{ N}$ 和 $Q_p=13860\text{ N}$)。施加转速进行仿真,两轮盘相对位移与剩余离心力关系拟合曲线如图5所示。

图5 偏心夹角为 180° 不同预紧力下位移-离心力拟合曲线Fig. 5 Fitting curve of displacement-centrifugal force with different preload forces when eccentric angle of 180°

利用式(9)对数据进行拟合

$$F(x) = K_1 x + K_2 x^3 \quad (9)$$

拟合系数 K_1 , K_2 见表1。

表1 偏心夹角为 180° 时的拟合系数Table 1 Fitting coefficient when eccentric angle is 180°

Q_p/N	$K_1/10^8\text{ (N/m)}$	$K_2/10^{16}\text{ (N/m}^3\text{)}$
1980	16.941	14.292
9910	21.865	5.872
13860	27.184	1.172
19800	29.213	0.837

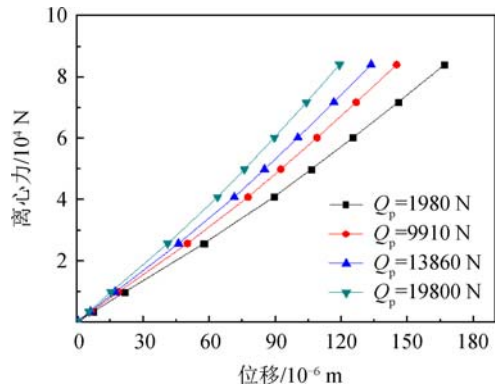
2) 两轮盘偏心夹角为 90°

调整质量块密度,使两轮盘偏心夹角为 90° ,偏心距离仍为 $e=7.903\text{ mm}$,其余加载方式不变,拟合曲线如图6所示,进行数据拟合,拟合系数见表2。

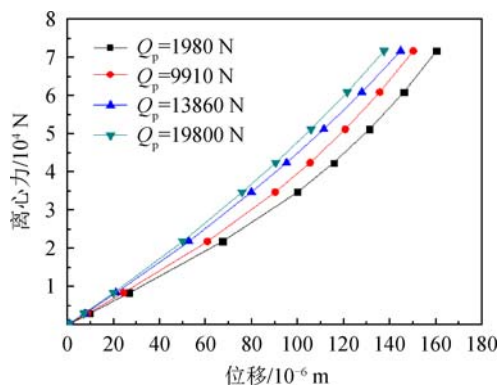
3) 两轮盘偏心夹角为 0°

调整质量块密度,使两轮盘偏心夹角同向,右侧轮盘偏心距离 $e=7.903\text{ mm}$,左侧轮盘偏心距离 $e=4.542\text{ mm}$,其余加载方式不变,计算拟合曲线如图7所示,进行数据拟合,拟合系数见表3。

综上可得到:在不同偏心夹角情况下,线性拟合系数 K_1 随着螺栓预紧力的减小而减小,非线性拟合系数 K_2 则由于偏心夹角的不同表现出不同的变化规律;线性拟合系数 K_1 决定了转子整体刚度的大小,偏心夹角越大则刚度越大。

图6 偏心夹角 90° 下不同预紧力拟合曲线Fig. 6 Fitting curve of displacement-centrifugal force with different preload forces when eccentric angle of 90° 表2 偏心夹角为 90° 时的拟合系数Table 2 Fitting coefficient when eccentric angle is 90°

Q_p / N	$K_1 / 10^8 (\text{N/m})$	$K_2 / 10^{16} (\text{N/m}^3)$
1980	4.449	0.228
9910	5.206	0.264
13860	5.555	0.360
19800	6.180	0.610

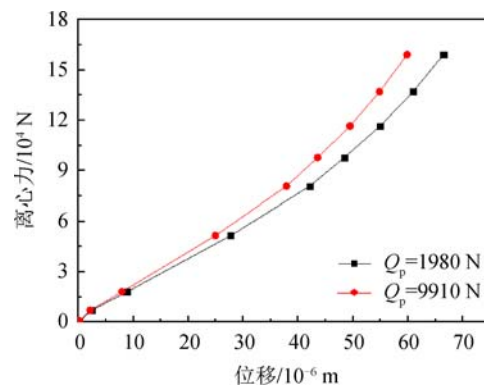
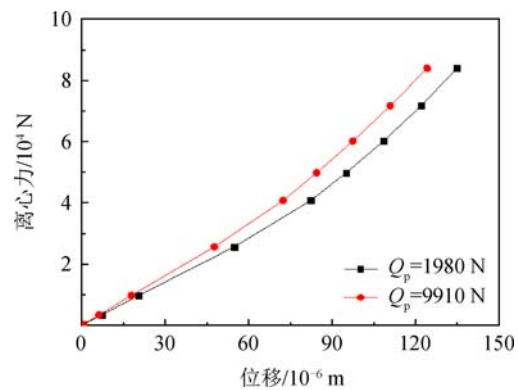
图7 偏心夹角 0° 下不同预紧力拟合曲线Fig. 7 Fitting curve of displacement-centrifugal force with different preload forces when eccentric angle of 0° 表3 偏心夹角为 0° 时的拟合系数Table 3 Fitting coefficient when eccentric angle is 0°

Q_p / N	$K_1 / 10^8 (\text{N/m})$	$K_2 / 10^{16} (\text{N/m}^3)$
1980	2.995	0.549
9910	3.012	0.478
13860	4.159	0.347
19800	4.377	0.316

2.1.2 螺栓非均匀预紧

本节研究在螺栓非均匀预紧情况下,两轮盘偏心夹角变化对转子接触刚度非线性性的影响。

下端螺栓组标准预紧力 $Q_p = 19800 \text{ N}$, 上端螺栓组的预紧载力分别为 $Q_p = 1980 \text{ N}$ 和 $Q_p = 9910 \text{ N}$. 右侧轮盘偏心方向始终向上, 偏心距离为 $e = 7.903 \text{ mm}$, 调节左侧轮盘上质量块的密度, 使两轮盘产生不同偏心夹角, 0° 时左侧轮盘偏心距离为 $e = 4.542 \text{ mm}$, 计算数据拟合曲线如图8所示; 偏心夹角为 90° 和 180° 时两轮盘偏心距离均为 $e = 7.903 \text{ mm}$, 计算数据拟合曲线分别如图9和图10所示. 进行数据拟合, 拟合系数见表4. 对比仿真结果可以看出, 上端螺栓组预紧力增大(轮盘翘曲程度减小), 转子刚度逐渐增大, 且其非线性特征减小。

图8 偏心夹角为 0° 螺栓非均匀预紧下位移-离心力拟合曲线Fig. 8 Fitting curve of displacement-centrifugal force with non-uniform preload of bolt when eccentric angle of 0° 图9 偏心夹角 90° 螺栓非均匀预紧下位移-离心力拟合曲线Fig. 9 Fitting curve of displacement-centrifugal force with non-uniform preload of bolt when eccentric angle of 90°

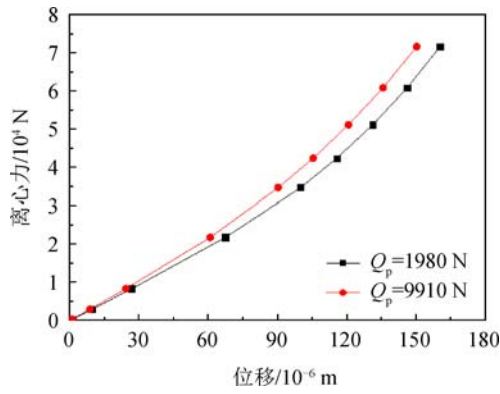


图 10 偏心夹角 180°螺栓非均匀预紧下位移-离心力拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of displacement-centrifugal force with non-uniform preload of bolt when eccentric angle of 180°

表 4 连续半数螺栓松动预紧下刚度拟合系数

Table 4 Stiffness fitting coefficient when half of the bolts are loosening preload

预紧方式	拟合系数	偏心夹角/(°)		
		180°	90°	0°
上端螺栓 $Q_p=1980\text{ N}$	$K_1/10^8\text{ (N/m)}$	18.412	4.434	3.008
	$K_2/10^{16}\text{ (N/m}^3\text{)}$	9.090	1.034	0.541
上端螺栓 $Q_p=9910\text{ N}$	$K_1/10^8\text{ (N/m)}$	19.874	5.128	3.263
	$K_2/10^{16}\text{ (N/m}^3\text{)}$	17.392	1.128	0.670

2.2 转子宏观刚度映射关系

考虑质量偏心,轮盘在高速工作条件下出现椭圆变形产生形变位移,如图 11;由于质量偏心方向的不同,离心力的大小或方向的不同使两轮盘相互挤压,使得拉杆螺栓及其余接触面的接触条件变化而产生偏移位移,如图 12. 上述两部分位移对轮盘整体相对位移产生综合影响. 若螺栓均匀预紧,当偏心夹角为 0°时,转子产生较大动不平衡量,将产生较大挠度,两转轴向上弯曲,此时两轮盘下端紧紧贴合,上侧接触力减少,容易产生相对滑移并使转子刚度明显降低;偏心夹角为 180°时,左侧转轴向下弯曲,右侧转轴向上弯曲,轮盘之间的接触未发生较大变化,因此两轮盘径向滑移和形变位移受限,椭圆变形方向相反,转子刚度有所增加.

转子刚度特性与拉杆螺栓的预紧情况密切相关. 基于有限元分析结果,对转子宏观刚度进行非线性拟合,线性拟合系数 K_1 决定转子整体刚度的大小,非线性拟合系数 K_2 则反映其非线性程

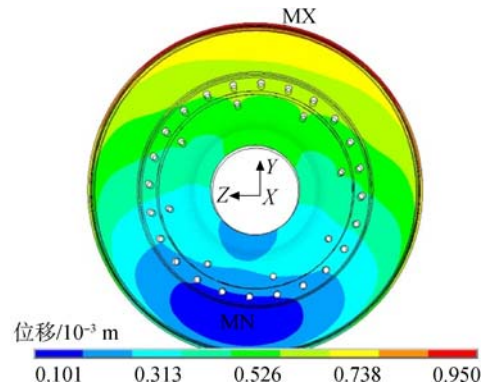


图 11 轮盘位移形变

Fig. 11 Displacement deformation of disk

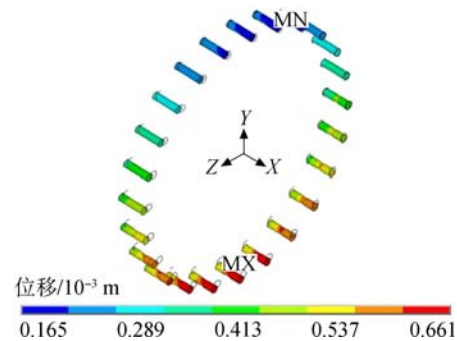


图 12 拉杆螺栓位移形变

Fig. 12 Displacement deformation of rod bolts

度. 由拟合数据所得的刚度系数变化趋势可以看出:螺栓均匀预紧情况下,螺栓预紧力减小,转子刚度减小,其非线性的变化趋势与两轮盘偏心夹角有关;螺栓非均匀预紧情况下,松动螺栓组预紧力越小,转子刚度越小,其非线性特征越强.

采用本文所提出的建立细观结构非线性因素与宏观刚度特性之间映射关系的研究思路,研究带挤压油膜阻尼器的某型航空发动机轮盘拉杆转子双稳态振动特性^[15],较好模拟了工作状态出现的双稳态现象,并分析得出双稳态现象是振动突跳故障的主要来源.

3 结 论

通过本文理论与数值研究,可以得出如下结论:

1) 基于有限元分析方法,建立转子细观结构非线性环节与宏观刚度特性之间函数映射关系的思路是一种有效的复杂系统非线性动力学研究方法. 运用该方法,以某型航空发动机第 7 级、第 8 级轮盘的拉杆转子为例,构建了部分细观结构与宏观刚度之间的映射关系,针对转子非线性特征

进行分析,得出了合理的分析结果。

2) 均匀预紧螺栓在不同预紧力的情况下,对任意偏心情况,螺栓预紧力越小,转子刚度越小,而转子刚度的非线性特征与偏心夹角有关。

3) 假定半数螺栓松动,两轮盘偏心夹角越大、松动螺栓预紧力越小,转子系统的非线性特征越明显。

参考文献:

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科技发展战略报告(2011~2020)[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [2] 黄文虎,武新华,焦映厚,等. 非线性转子动力学研究综述[J]. 振动工程学报,2000,13(4):497-599.
HUANG Wenhui, WU Xinhua, JIAO Yinghou, et al. Research summary on non-linear dynamic of rotor systems[J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(4): 497-599. (in Chinese)
- [3] 高鑫,张新江,焦映厚. 非线性转子动力学问题研究综述[J]. 东南大学学报:自然科学版,2002,32(3):443-451.
GAO Wei, ZHANG Xinjiang, JIAO Yinghou. Research summary on non-linear dynamic problems of rotor systems[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2002, 32(3): 443-451. (in Chinese)
- [4] Kogut L, Etsion F. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat[J]. Journal of Applied Mechanics, 2002, 69(5): 657-662.
- [5] Hyun S, Pei L, Molinari J F, et al. Finite element analysis of contact between elastic self-affine surfaces[J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics, 2004, 70(2): 1-12.
- [6] 闻邦椿,武新华,丁千. 故障旋转机械非线性动力学的理论与实验[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [7] Sahoo P, Ghosh N. Finite element contact analysis of fractal surfaces[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(14): 4245-4252.
- [8] CHENG Li, LI Ning, CHEN Xuefeng, et al. The influence of crack breathing and imbalance orientation angle on the characteristics of the critical speed of a cracked rotor[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(9): 2031-2048.
- [9] 陈予恕,张华彪. 航空发动机整机动力学研究进展与展望[J]. 航空学报,2011,32(8):1371-1391.
CHEN Yushu, ZHANG Huabiao. Review and prospect on the research of dynamics of complete aero-engine systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1371-1391. (in Chinese)
- [10] 张力,洪杰,马艳红. 航空发动机转子系统建模方法的振动特性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(2):148-163.
ZHANG Li, HONG Jie, MA Yanhong. Modeling method and vibration characteristics of aero-engine rotor system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(2): 148-163. (in Chinese)
- [11] 孔祥安,江晓禹,金学松. 固体接触力学[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
- [12] 苏春峰,艾延廷,娄小宝. 接触非线性仿真中接触刚度因子选取的方法研究[J]. 沈阳航空工业学院学报,2009,26(3):6-9.
SU Chunfeng, AI Yanting, LOU Xiaobao. Analysis on contact stiffness factor selecting method in contact non-linear simulation[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2009, 26(3): 6-9. (in Chinese)
- [13] 张绪祥. 一种摩擦系数计算方法[J]. 机械设计与制造, 2006(1):45-47.
ZHANG Xuxiang. A calculating method for friction coefficient[J]. Machinery Design and Manufacture, 2006(1): 45-47. (in Chinese)
- [14] 李会勋,胡迎春,张建中. 利用 ANSYS 模拟螺栓预紧力的研究[J]. 山东科技大学学报,2006,25(1):57-59.
LI Huixun, HU Yingchun, ZHANG Jianzhong. Analysis on simulating bolts preloading based on ANSYS[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2006, 25(1): 57-59. (in Chinese)
- [15] 程礼,李帅莹,钱征文. 带挤压油膜阻尼器的盘式拉杆转子双稳态振动特性[J]. 航空动力学报,2013,28(9):2044-2049.
CHENG Li, LI Shuaiying, QIAN Zhengwen. Bistable vibration characteristics of disk-rod-fastening rotor with squeeze film damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(9): 2044-2049. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)