

# 某型航空发动机不对中双转子 系统动态特性对比分析

蒋玲莉<sup>1,2\*</sup>, 陈雨蒙<sup>1</sup>, 赵广<sup>2</sup>

(1.湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;  
2.苏州东陵振动试验仪器有限公司,江苏 苏州 215163)

**摘要:**为了更好地了解和掌握某型航空发动机转子系统固有的振动特性及不对中状态下振动特性变化趋势,对正常和平行不对中状态下的该型航空发动机双转子系统进行了模态分析,分别计算了各自前 6 阶固有频率,并对仿真结果进行了对比分析.研究工作可为该型航空发动机的优化运行及其双转子结构优化设计提供参考和依据.

**关键词:**航空发动机;双转子;模态对比分析;固有频率

**中图分类号:**V231.96 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)01-0053-04

## Comparative Analysis of Misalignment Dynamic Characteristics of an Aero-engine Dual Rotor System

Jiang Lingli<sup>1,2</sup>, Chen Yumeng<sup>1</sup>, Zhao Guang<sup>2</sup>

(1.Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. Suzhou DONGLING Vibration Test Instrument Limited Company, Suzhou 215163, China)

**Abstract:** In order to better understand and master the inherent vibration characteristics of an aero-engine and the variation trend of the vibration characteristics in misalignment state, the modal analysis of the dual rotor system of the aero-engine under normal and parallel misalignment conditions was carried out, the natural frequencies of the first 6 orders were calculated respectively, and the simulation results were compared and analyzed. The research work provides a reference and basis for the optimized operation of the aero-engine and the optimization design of its dual-rotor structure.

**Keywords:** aero-engine; double rotor; modal contrast analysis; natural frequency

航空发动机结构复杂,工作条件恶劣,振动问题非常突出,转子系统振动故障直接决定着机器整机振动水平.而不对中故障导致的系统整机振动过大、支点及轴承载荷分布不均、轴向振动剧烈问题,制约着旋转机械装备的稳定性和可靠性<sup>[1-3]</sup>.据统计,超过 70%的航空发动机故障是由于振动问题所引起的<sup>[4]</sup>.所以发动机振动机理研究和故障诊断在航空领域中一直是一个重大的研究课题<sup>[5-6]</sup>.

航空发动机转子系统的各阶固有频率和振型是发动机动力荷载设计过程中需要考虑的重要参数,当激振频率与系统固有的某阶频率接近时,振幅会急剧增大,从而产生严重后果,因此为了在发动机的设计过程中更好地了解发动机的性能,需要对发动机进行动态特性分析和研究<sup>[7-8]</sup>;而在进行其他的动力学研

收稿日期:2015-12-14

基金项目:中国博士后基金资助项目(2016M590220);湖南省科技厅省科技创新平台与人才计划资助项目(2017RS3049);国家自然科学基金资助项目(51575177;11672106)

\*通信作者,E-mail:linlyjiang@163.com

究之前,首先要对其进行模态分析.

以某型航空发动机内外双转子系统为研究对象,利用三维建模软件 Catia 分别对其正常状态下和平行不对中状态下的转子系统进行建模,并将建好的模型导入到 Workbench 中,对其分别进行模态分析,得到转子系统 2 种状态下的固有频率;其对比结果可为该型航空发动机的优化运行和双转子结构优化设计提供参考,对改善该型双转子系统的动态特性具有十分重要意义.

## 1 转子系统模态理论

现以双转子系统的固有模态为例,忽略阻尼的影响,故该双转子系统属于无阻尼的自由振动系统的分析研究<sup>[9]</sup>.系统的运动微分方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F. \quad (1)$$

式中: $M$  为系统的质量矩阵; $C$  为系统的阻尼矩阵; $K$  为系统的刚度矩阵; $X$  为系统各点位移响应向量; $F$  为系统整体载荷向量.

阻尼对结构的固有频率和振型影响很小,令阻尼项  $C$  和外力项  $F$  均为零,于是系统的无阻尼自由振动方程为

$$M\ddot{X} + KX = 0. \quad (2)$$

转子系统的自由振动可以分解为一系列的简谐运动的叠加,则方程解的形式为

$$X_i = A^i \sin(\omega_{mi}t + \varphi_i). \quad (3)$$

式中: $\omega_{mi}$  为系统的第  $i$  阶阵型的固有频率; $\varphi_i$  为系统的第  $i$  阶阵型的相位角; $X_i$  为系统的第  $i$  阶阵型的位移列阵; $A^i$  为系统的第  $i$  阶阵型中各点的最大位移值或最大振幅向量.

将式(3)代入式(2)中来,得到如下的代数方程:

$$(K - \omega_{mi}^2 M)A^i = 0. \quad (4)$$

式中: $\omega_{mi}$  为特征值; $A^i$  为特征向量.

对于一个振动系统来说,当系统的振幅不全都是零时,微分方程必有:

$$|K - \omega_{mi}^2 M| = 0. \quad (5)$$

式(5)为双转子系统的特征方程,求得  $\omega_{mi}$  为系统固有频率.

## 2 模态分析

### 2.1 转子系统建模

内外双转子系统由低压转子和高压转子组成,通过中介轴承支承.低压转子主要包括低压压气机转子和低压涡轮转子.高压转子主要包括高压压气机转子和高压涡轮转子.某型航空发动机总体支承结构如图 1 所示.

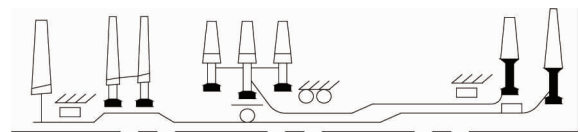


图 1 某型发动机总体支承结构

由于发动机结构复杂,直接在 Workbench 中建模难度大且精度不高,Workbench 软件中设置了与多种三维设计软件的无缝连接,可将在三维设计软件 Catia 中建好的模型导入到 Workbench 中<sup>[10]</sup>.在现有研究中,在进行发动机转子系统的建模过程中,会对一些细小的结构如:螺栓、凸台、倒角、销钉及叶片作简化处理,从而把复杂的发动机转子系统简化为转子-圆盘系统,将模型简单化.建立的模型如图 2 所示.

### 2.2 定义材料属性与划分网格

该航空发动机内外双转子系统,低压压气机(1 级压气机及 2 级和 3 级压气机)和高压压气机为优质钢,密度为  $7\ 800\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,泊松比为 0.3,弹性模量为  $200\ \text{GPa}$ ;低压涡轮和高压涡轮为钛合金,密度为  $4\ 620\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,泊松比为 0.36,弹性模量为  $96\ \text{GPa}$ .

经综合考虑,本文通过自动划分网格方式对该模型进行网格划分<sup>[11]</sup>,并将网格等级设为 3 级,网格尺寸为  $10\ \text{mm}$ ,划分后节点为 576 255,单元数为 328 712,有限元模型如图 3 所示.

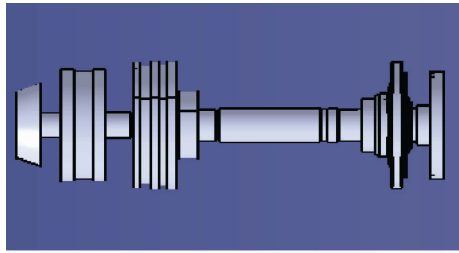


图 2 某型航空发动机双转子系统三维模型

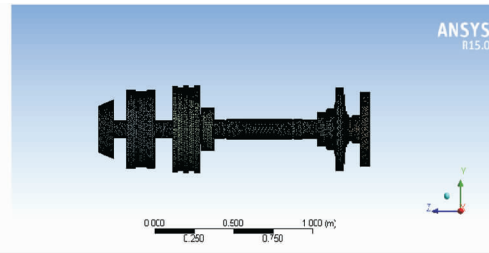


图 3 双转子系统有限元模型

### 2.3 设置边界条件及模型求解

将轴承简化为弹簧作为边界条件加载在模型上.2 处中介轴承简化的弹簧连接于高低压轴,3 处与机匣连接的支承轴承简化得到的弹簧一端固定,另一端分别与低压压气机轴和高压转子轴(2 处)相连.轴承刚度均采用静刚度<sup>[12]</sup>.由振动相关理论知,对于本多自由度振动系统,系统的低阶固有频率就能反映转子系统的动态特性,低阶模态起主导作用,高阶模态影响相对较小<sup>[7]</sup>,因此对正常状态和平行不对中量为 5 mm 及 10 mm 状态下的有限元模型分别求解,前六阶固有频率及振型图如表 1 和图 4 所示.

表 1 双转子系统固有频率

阶次	正常状态固有频率/Hz	不对中量为 5 mm 固有频率/Hz	不对中量为 10 mm 固有频率/Hz
一	47.109	44.020	40.12
一	86.405	85.018	83.76
三	116.300	112.760	108.34
四	130.170	122.100	119.81
五	249.740	250.760	250.94
六	342.500	334.900	325.70

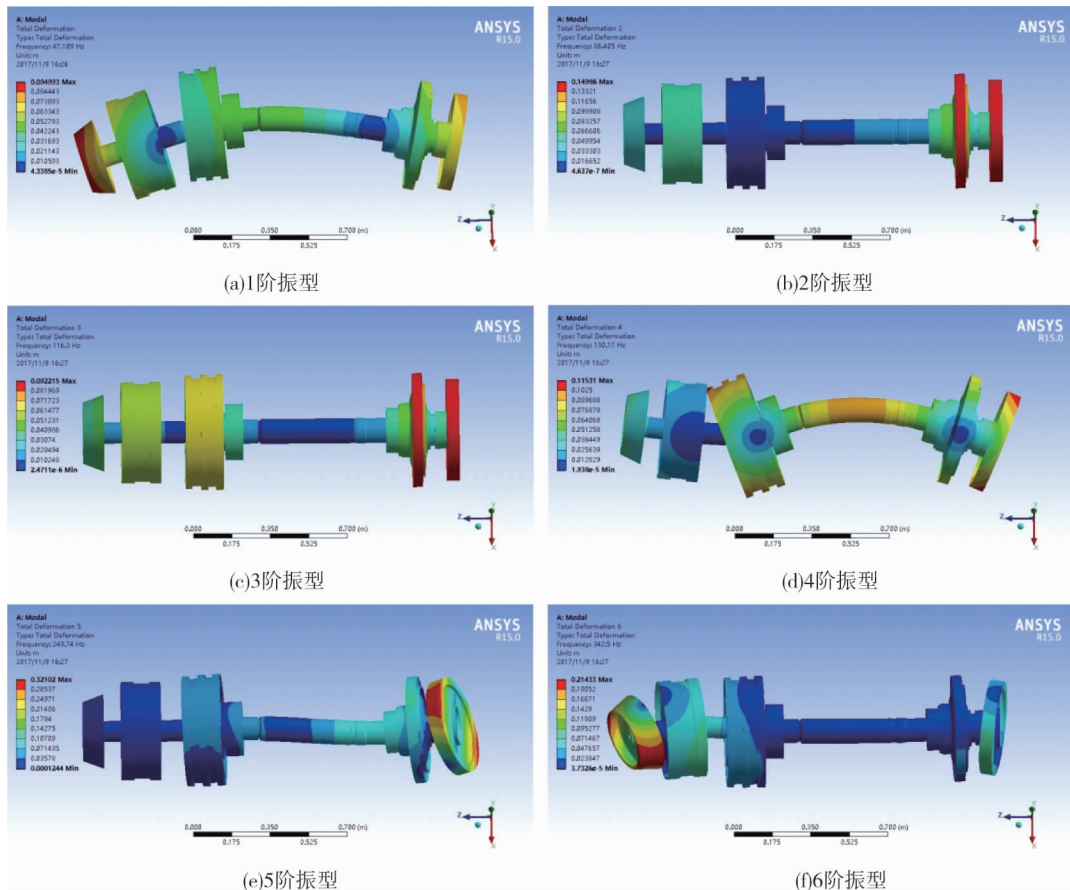


图 4 不对中量为 5 mm 时转子系统振型

## 2.4 结果分析对比

由图4看出,当激励频率达到各阶固有频率时,该转子系统表现如下:

一阶振型主要表现为整个转子系统的弯曲变形,从而易引起轴的弯曲断裂;

二阶振型主要表现为涡轮盘的变形,从而易造成涡轮盘出现裂纹;

三阶振型主要表现为整个转子系统盘的变形,从而易造成盘出现裂纹;

四阶振型主要表现为轴系弯曲,从而易造成2级和3级低压压气机和高压压气机产生碰磨及轴的断裂;

五阶振型主要表现为轴系弯曲,从而易造成高压涡轮盘和低压涡轮盘产生碰磨及轴的断裂;

六阶振型主要表现为轴的弯曲,从而易造成1级压气机和2级和3级压气机产生碰磨及轴的断裂.

由表1知,与正常状态下的双转子系统前六阶固有频率相比,平行不对中状态下一阶、二阶、三阶、四阶、六阶频率有所下降、五阶固有频率小幅上升.对应的临界转速变动趋势与固有频率变动趋势相同.当存在平行不对中故障时,双转子系统的动态特性将发生变化,必须通过正确的装配或修改设计,改变共振出现的频率范围,以提高发动机运行过程的平稳性.

## 3 结论

1) 将Catia中建立的正常状态下和不对中状态下的某型航空发动机双转子模型,导入到Workbench进行模态分析,分别求得2种状态下系统前六阶固有频率,对比分析表明,存在平行不对中的转子系统各阶固有频率均小于正常状态下的固有频率值,不对中量越大,固有频率值越小.

2) 为该型航空发动机的优化运行及其双转子结构优化设计提供参考,对改善该型双转子系统的动态特性具有十分重要意义.

## 参考文献:

- [1] 韩清凯,王美令,赵广,等.转子系统不对中问题的研究进展[J].动力学与控制学报,2016,14(1):1-13.
- [2] Li Q, Yan L, Hamilton J F. Investigation of the steady-state response of a dual-rotor system with intershaft squeeze film damper [J]. Transactions Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1986, 108(4): 605-612.
- [3] Qiu Z L, Tieu A K. Experimental study of freely alignable journal bearings-part2: Dynamic Characteristics [J]. Journal of Tribology, 1996, 118(3): 503-508.
- [4] 姜晓莲,王斌.浅析未来航空发动机技术的发展[J].航空科学技术,2010(2):10-12.
- [5] Liu S, Ma Y, Zhang D, et al. Studies on dynamic characteristics of the joint in the aero-engine rotor system [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2012, 29(5): 120-136.
- [6] Daniel B, Christopher M, Daniel R K, et al. Gas turbine engine with tie shaft for axial high pressure compressor rotor:US, 20110219781 [P]. 2011.
- [7] 申苗,唐驾时,李克安,等.航空发动机双转子系统的模态分析[J].兵工自动化,2010,29(2):34-36.
- [8] 王娅卫,任兴民,秦卫阳,等.转子系统动力特性分析[J].机械科学与技术,2002,21(1):49-51.
- [9] 董霄.转子系统不对中故障的振动特性分析与实验研究[D].沈阳:东北大学,2010.
- [10] 陈萌,马艳红,刘书国,等.航空发动机整机有限元模型转子动力学分析[J].北京航空航天大学学报,2007,33(9):1013-1016.
- [11] 黄杰.航空发动机实验平台设计及其稳定性研究[D].湘潭:湖南科技大学,2015.
- [12] 闻邦椿,顾家柳,夏松波,等.高等转子动力学:理论、技术与应用[M].机械工业出版社,2000.