

# 转子不平衡量的微型涡喷发动机轴承动反力分析

李 宁, 曹有荣

(空军工程大学理学院,西安,710051)

**摘要** 高速旋转的微型涡喷发动机转子系统的不平衡量对转子工作状态的影响尤为突出。在考虑陀螺效应的前提下,采用谐响应分析的方法,研究了微型涡喷发动机轴承动反力随转速及不平衡量分布方位角的变化规律。结果表明:转速越大,轴承处动反力越大,不平衡量的大小对轴承动反力影响远大于转速;涡轮和压气机的不平衡量分布方位角为  $180^\circ$  时压气机一端轴承动反力最大,而涡轮一端轴承动反力最小。研究结论为减少微型涡喷发动机因不平衡量而产生的振动问题以及防止轴承破坏等提供了重要依据。

**关键词** 转子系统;谐响应分析;陀螺效应;轴承动反力

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.001

**中图分类号** V231.96 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)06-0001-05

## Research on Bearing Dynamical Reaction of Micro Turbojet Engine Based on Rotor Unbalanced Quantity

LI Ning, CAO Yourong

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** The unbalanced quantity of high-speed rotating micro turbojet engine in rotor system has especially effects on working state of the rotor. On the premise that gyro is effective, the variations of bearing dynamical reaction in the micro turbojet engine with the rotating speed and unbalanced quantity distribution azimuth angle are studied by using harmonic response analysis method. The results show that the greater the rotating speed is, the greater the bearing dynamical reaction, and the influence of the magnitude of unbalanced quantity on bearing dynamical reaction is greater than that of rotating speed. The bearing dynamic reactions in the position of compressor and turbine are of maximum and minimum at unbalanced quantity distribution azimuth angle of  $180^\circ$  respectively. The results of analysis provide an important reference for decreasing the vibration problem of engine and avoiding bearing damage caused by unbalanced quantity.

**Key words:** rotor system; harmonic response analysis; gyroscopic effect, bearing dynamical reaction

微型涡喷发动机是导弹、无人机等小型飞行器的重要动力装置之一,广泛应用于军事和民用领

收稿日期:2016-05-04

基金项目:国家自然科学基金(51275374);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JQ5155)

作者简介:李 宁(1964—),女,广西北海人,副教授,主要从事结构振动控制研究.E-mail:lining\_chieng@aliyun

**引用格式:**李宁,曹有荣.转子不平衡量的微型涡喷发动机轴承动反力分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(6):1-5. LI Ning, CAO Yourong. Research on Bearing Dynamical Reaction of Micro Turbojet Engine Based on Rotor Unbalanced Quantity[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 1-5.

域<sup>[1-3]</sup>。其工作转速高达 500 kr/min 到 100 kr/min 之间,最高可达到 300 kr/min,同时由于工作中机动载荷复杂,且转子上不可避免的存在不平衡量,使得转子产生振动,导致轴承动反力较大,易造成轴承发生破坏。因此,轴承是微型涡喷发动机工作可靠性的薄弱环节,是发动机寿命的关键部件。在微型涡喷发动机改进、改型的理论研究以及装配与工作中进行轴承的力学特性分析极其重要。

对发动机转子系统动态特性的研究是转子动力学的的一个重要的课题,国内外学者对转子系统的不平衡响应做了大量的分析研究。文献[4]基于 ANSYS 软件建立了汽轮机转子系统的有限元模型,计算了其临界转速,进行了不平衡响应分析;文献[5]基于互相关原理设计了获取转子不平衡量信号的电路;文献[6]用传递矩阵法分析了某微型发动机转子系统的不平衡响应特性;文献[7]采用超谐波响应的方法,在考虑惯性激励力的情况下,对转子系统进行了分析和研究。Fawzi M.A.等建立了转子在受到激励力以及转子存在不平衡质量时的动力学方程<sup>[8]</sup>;Hamdi 和 Mehmet 通过建立燃气涡轮转子的 2D 和 3D 模型,对转子的动力学特性进行分析和评估<sup>[9]</sup>。在转子动力学特性的研究中,轴承的力学特性更是人们关注的课题<sup>[10-12]</sup>。本文基于 ANSYS 软件在考虑陀螺效应的前提下,采用谐波响应的分析方法,研究了压气机和涡轮在不同的转速、不同大小的不平衡量作用下轴承动反力随不平衡量分布方位角的变化规律。

## 1 微型涡喷发动机转子系统有限元模型

### 1.1 基于 ANSYS 的转子系统有限元建模

由于微型涡喷发动机转子系统几何形状复杂,直接在 ANSYS 软件平台上难以建立实体结构模型,因此,首先利用 Solidworks 软件建立转子系统的实体模型,然后将通过 PARA 格式导入 ANSYS 中。转子系统主要由压气机、涡轮、轴及滚动轴承组成。滚动轴承由外环、内环以及滚珠三部分组成,在不对它进行简化的情况下必须创建非线性接触对,而 2 个轴承共有 16 个滚珠,每个滚珠产生 2 个接触对,这就使得计算变得复杂,不但需要大量的计算时间,还对计算机内存以及运算性能等提出更高要求。为了便于分析和计算,对微型涡喷发动机转子系统作进一步的简化。在具体建模时,发动机轴采用

Beam188 梁单元,涡轮和压气机采用 Mass21 质量单元,轴承采用 Combin214 单元。

在 ANSYS 中 Beam188 单元能够很好的分析轴类构件拉压、弯曲、扭转等结构振动问题,为旋转结构的模态分析、谐响应分析等提供了便利<sup>[13]</sup>。压气机和涡轮结构复杂,有限元建模过程中单元数过大,计算比较困难,在计算出质量以及转动惯量的情况下,采用 Mass21 质量单元进行简化,简化的模型不考虑剪切和扭矩的影响。Combin214 单元是二维弹簧阻尼轴承单元,是轴承结构的理想化计算模型,计算时需要确定 4 个刚度系数以及 4 个阻尼系数。模型中所有节点约束其沿转轴轴向的平移位移以及绕转轴的转动位移,Combin214 单元远离轴的一端节点采用全位移约束。简化后转子系统的有限元模型见图 1。



图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element mode

### 1.2 考虑陀螺效应的谐响应分析

在微型涡喷发动机转子系统的动力学计算中,谐响应分析得到的是结构在固有频率处的实际响应,采用谐响应分析的方法,在设定压气机和涡轮 2 个不平衡量不同分布方位角的情况下,可计算分析轴承动反力的变化规律。

微型涡喷发动机转子柔度较大,在高速旋转的情况下陀螺力矩对进动角速度、振型以及临界转速等物理量将具有重要作用,如果忽略陀螺效应会造成较大的计算误差<sup>[14-16]</sup>。在考虑陀螺效应的情况下, $n$  自由度系统受随时间按简谐规律变化的载荷作用时的运动微分方程为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + (\mathbf{C} + \mathbf{G})\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$  为质量矩阵; $\mathbf{C}$  为阻尼矩阵; $\mathbf{K}$  为刚度矩阵; $\mathbf{G}$  为陀螺矩阵,它与转速有关,并且在转子动力学计算中具有重要影响。

在谐响应分析中,激励载荷  $F$  是随时间按简谐规律变化的,因此可以写成  $F = (F_r + iF_i)e^{i\omega t}$  的形式,其中  $F_r$  和  $F_i$  分别为载荷矢量的实部和虚部, $\omega$  为振动频率。

转子旋转过程中由不平衡质量产生的惯性力在垂直于转轴的  $y$  方向和  $z$  方向的分量为:

$$\begin{cases} F_y = \omega^2 (m e \cos\varphi \cos\omega t + m e \sin\varphi \sin\omega t) \\ F_z = \omega^2 (m e \cos\varphi \sin\omega t - m e \sin\varphi \cos\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\omega$  为转子的旋转角速度; $\varphi$  为初始相位; $m$  为不平衡质量的大小; $e$  为偏心距。

当转子系统中由不平衡质量产生的惯性力之间不存在相位差时,激励力在 2 个坐标轴方向的分量分别为:

$$\begin{cases} F_y = \omega^2 m e \cos \omega t \\ F_z = \omega^2 m e \sin \omega t \end{cases} \quad (3)$$

从上式可知,由不平衡质量产生的惯性力相当于在转子中心 2 个相互垂直的方向上作用 2 个简谐激励,它们的相位差是  $\pi/2$ 。在具体计算中,根据不平衡量及偏心距的大小,转化为以上 2 个简谐激励的幅值,可以较为方便的研究轴承动反力随不同不平衡量分布方位角的变化规律。

## 2 计算结果

### 2.1 系统参数

结合试验中所使用的某型号微型涡喷发动机的实际情况,在转子系统中,压气机的材料为铝,涡轮的材料为 K418 镍基铸造合金,轴的材料为刚钢 2Cr13,材料常数见表 1。

表 1 材料常数  
Tab.1 Material constant

名称	弹性模量/Gpa	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比
涡轮(K418)	176	8 000	0.30
压气机(铝)	70	2 800	0.31
轴(2Cr13)	219	7 750	0.30

发动机转子系统中 2 个轴承材料相同,不考虑交叉刚度并且忽略轴承阻尼。发动机轴承刚度一般难以直接测量,通过对转子系统进行模态分析与实验数据作比较,反推出轴承实常数的取值,见表 2。

表 2 轴承实常数  
Tab.2 The real constant of bearing

$k_{11}$	$k_{22}$	$k_{12}$	$k_{21}$	$c_{11}$	$c_{22}$	$c_{12}$	$c_{21}$
5e7	5e7	0	0	0	0	0	0

压气机和涡轮使用 Mass21 质量单元进行简化,它们的质量以及转动惯量见表 3。

表 3 压气机及涡轮的质量和转动惯量  
Tab.3 The mass and rotational inertia of compressor and turbine

名称	质量/kg	$I_{xx}/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$I_{yy}/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	$I_{zz}/\text{kg} \cdot \text{m}^2$
涡轮	0.359 9	3.578 8e-4	1.824 5e-4	1.824 5e-4
压气机	0.305 2	2.575 4e-4	1.630 1e-4	1.630 1e-4

在 ANSYS 软件谐响应分析模块中施加载荷时

不能直接输入相位角和幅值,而是通过输入实部和虚部这 2 个分量来完成,因此输入的垂直于转轴的 2 个载荷分量要相差  $\pi/2$ 。通过对转子系统进行模态分析,第一阶固有频率在 1 050 Hz 左右,取谐响应扫描频率范围取 600~1 400 Hz,谐响应分析子步为 200,阻尼比取 0.01,在不同转速以及不同不平衡量分布方位角的情况下,对转子系统简化模型进行谐响应分析。

### 2.2 不同转速下陀螺效应对固有频率的影响

当压气机和涡轮存在不平衡量,且不平衡量产生的惯性力大小相等时,在陀螺效应的影响下,压气机一端轴承动反力随激励力频率的变化见图 2。4 条曲线分别对应不同转子转速下压气机一端轴承动反力随频率的变化规律。其中 6 000 rad/s 在第 1 阶临界转速以下,7 000 rad/s 在第 1 阶和第 2 阶临界转速之间,8 000 rad/s 和 9 000 rad/s 在第 2 阶临界转速之上。由于陀螺效应的影响,转子在实际工作过程中转速增大使得转子刚度增大,固有频率也随着增大,图 2 所表现出来的变化规律符合实际情况,说明建立的转子模型是合理可靠的。

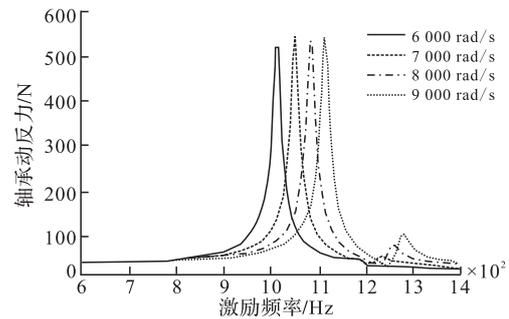


图 2 不同转速下压气机一端轴承动反力随频率的变化

Fig.2 The change of the bearing dynamic reaction at the end of compressor with different rotating speed which varies from the frequency

### 2.3 不同转速下不平衡量对轴承动反力的影响

不平衡量对轴承动反力的影响因素主要有两个:一个是不平衡量的大小,一个是压气机和涡轮两个不平衡量的分布方位角。不平衡量分布方位角定义为:在垂直于转轴的平面内,压气机上不平衡量的质心到转轴中心的连线与涡轮上不平衡量的质心到转轴中心连线的夹角。以下分析中简称方位角。压气机和涡轮上不平衡量的大小可以通过动平衡试验测量得到。为了分析不平衡量对轴承动反力的影响规律,具体计算时,当涡轮和压气机处不平衡量大小相等时,不平衡量的大小取 10 g,大小不等时,大的不平衡量取 25 g,小的不平衡量取 10 g。

#### 2.3.1 压气机和涡轮存在大小相等的不平衡量

不同转速下,当压气机和涡轮存在大小相等的不平衡量时,轴承反力最大值随方位角的变化见图3。转速越大,由不平衡量产生的惯性力越大,轴承处所受动反力增大,动反力随方位角变化的幅值越大。当方位角为 $180^\circ$ 时,涡轮一端轴承动反力达到最小,压气机一端轴承动反力达到最大,方位角为 $0^\circ$ 时,涡轮一端轴承动反力达到最大,压气机一端轴承反力达到最小。

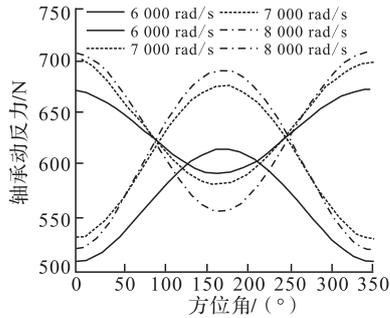


图3 不平衡量相等时轴承动反力最大值随方位角的变化  
Fig.3 The change of maximum bearing dynamical reaction varies from the azimuth angle when the unbalance quantity equals

### 2.3.2 压气机上的不平衡量大于涡轮

不同转速下,当压气机上不平衡量大于涡轮时,轴承动反力最大值随方位角的变化见图4。由于压气机上存在的不平衡量较大,转子转动过程中压气机处产生的惯性力远大于涡轮,使得压气机一端轴承承受更大的动反力。涡轮处轴承动反力在方位角为 $180^\circ$ 时达到最小,在 $0^\circ$ 时最大,压气机处轴承动反力在方位角为 $180^\circ$ 时达到最大,在 $0^\circ$ 时最小。

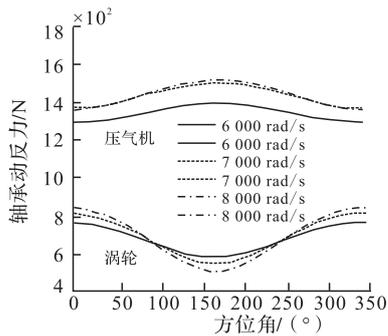


图4 压气机处不平衡量较大时轴承动反力最大值随方位角的变化  
Fig.4 The change of maximum bearing dynamical reaction varies from the azimuth angle when the unbalance quantity in compressor is larger

### 2.3.3 涡轮上的不平衡量大于压气机

不同转速下,当涡轮处存在的不平衡量大于压气机时,轴承动反力最大值随方位角的变化见图5。由于涡轮上存在的不平衡量较大,使得涡轮一端轴承承受更大的动反力。涡轮处轴承动反力在方位角

为 $180^\circ$ 时达到最小,压气机处轴承动反力在方位角为 $180^\circ$ 时达到最大。

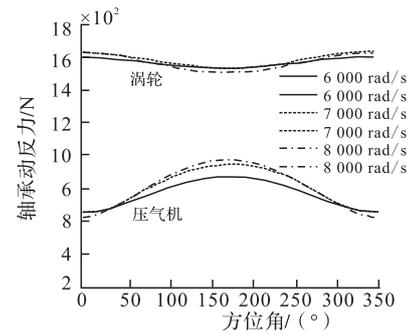


图5 涡轮处不平衡量较大时轴承动反力最大值随方位角的变化  
Fig.5 The change of maximum bearing dynamical reaction varies from the azimuth angle when the unbalance quantity in turbine is larger

## 3 结论

本文首先建立了发动机转子系统的实体模型,利用 ANSYS 软件进一步简化建立了转子系统的有限元模型。在不同转速下,通过对发动机转子系统进行谐响应分析,得到以下结论:

1) 转速和不平衡量的大小是影响轴承动反力的重要因素,其中不平衡量的大小对轴承动反力的影响远大于转速,在降低轴承动反力的设计中要最大程度减小不平衡量大小,而不是以降低转速为代价。

2) 当压气机上不平衡量远大于涡轮时,可以在涡轮上方位角为 $0^\circ$ 处加上一个较小的不平衡量,使压气机处轴承动反力达到最小。当涡轮上不平衡量较大时,可以在压气机上方位角为 $180^\circ$ 处加上一个较小的不平衡量,使涡轮处轴承动反力达到最小。当压气机和涡轮上的不平衡量大小相等或相近时,压气机和涡轮处的轴承动反力在 $100^\circ$ 和 $260^\circ$ 时相等,如果在装配、安装过程中方位角处于这两个角度上,轴承动反力将达到最优结果。

轴承是决定微型涡喷发动机工作可靠性的重要环节。在微型涡喷发动机生产和制造中通过动平衡试验机测定压气机和涡轮不平衡量的方位,根据以上规律装配安装,使轴承动反力折中,提高微型涡喷发动机工作可靠性。论文所得结论在避免因轴承动反力过大而造成结构破坏方面提供了依据,在实际的工程应用中有重要的指导意义。

### 参考文献(References):

- [1] CHIGIER N, GEMEI T. A Review of Micro Propulsion Technology [R]. AIAA 2003-670.
- [2] 王力国,刘科辉,郑言.微型涡喷发动机特性计算研究

- [J]. 战术导弹技术, 2013, (5):85-90.  
WANG Ligu, LIU Kehui, ZHENG Yan. Research on Simulation Method of Micro Turbojet Engine's Characteristics [J]. Tactical Missile Technology, 2013(5):85-90. (in Chinese)
- [3] ALLATTAB K A, ZAINAL Z A. Turbine Startup Methods for Externally Fired Micro Gas Turbine (EFMGT) System Using Biomass Fuels [J]. Applied Energy, 2010, 87(4):1336-1341.
- [4] 瓮雷, 杨自春, 曹跃云. 转子系统临界转速计算及不平衡响应分析[J]. 四川兵工学报, 2012, 3(11):65-69.  
WENG Lei, YANG Zichun, CAO Yueyun. The Calculate of Critical Speed and Unbalance Response Analysis For Rotor System [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012, 33(11):65-69. (in Chinese)
- [5] 周巍, 张仁杰. 转子平衡测试信号获取电路的设计与实现[J]. 信息技术, 2015, (2):197-200.  
ZHOU Wei, ZHANG Renjie. Signal for Circuit Design and Implementation Based on Rotor Balancing Test [J]. Information Technology, 2015, (2):197-200. (in Chinese)
- [6] 何海强, 李小柱. 微型涡喷发动机转子动力学特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4):68-70.  
HE Haiqiang, LI Xiaozhu. Rotor Dynamical Characteristics Analysis of Micro-Turbine Jet Engine [J]. Journal of Arrows and Guidance, 2005, 25(4):68-70. (in Chinese)
- [7] HOU Lei, CHEN Yushu. Super-Harmonic Responses Analysis for a Cracked Rotor System Considering Inertial Excitation [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(11):1924-1934.
- [8] FAWZI M A, EI Saeidy, FRED Sticher. Dynamics of a Rigid Rotor Liner/Nonlinear Bearings System Subject to Rotating Unbalance and Base Excitations [J]. Journal of Vibration and Control, 2010, 16(3):403-438.
- [9] TAPLAK Hamdi, PARLAK Mehmet. Evaluation of Gas Turbine Rotor Dynamic Analysis Using the Finite Element Method [J]. Measurement, 2012, 45(5):1089-1907.
- [10] 唐云冰, 高德平, 罗贯火. 航空发动机高速滚珠轴承力学特性分析与研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2):354-360.  
TANG Yunbing, GAO Deping, LUO Guanhuo. Research of Aero-Engine High-Speed Ball Bearing [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2):354-360. (in Chinese)
- [11] PANDA K C. Optimum Support Characteristics for Rotor-Shaft System with Preloaded Rolling Element Bearings [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 260(4):731-755
- [12] 杨法立, 廖明夫, 王四季, 等. 基于 ANSYS 的某型航空发动机轴承试验器支撑刚度研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(13):116-118.  
YANG Fali, LIAO Mingfu, WANG Siji, et al. Research on Supporting Stiffness of an Aero-Engine Bearing Tester Based on ANSYS [J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(13):116-118. (in Chinese)
- [13] 赵晶, 王世杰. ANSYS 有限元分析应用教程 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.  
ZHAO Jing, WANG Shijie. The Finite Element Analysis Application Tutorial of ANSYS [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [14] 隋永枫, 吕和祥. 陀螺效应对转子横向振动的影响分析[J]. 计算力学学报, 2003, 20(6):711-714.  
SUI Yongfeng, LÜ Hexiang. Influence of Gyroscopic Term to the Vibration of Rotor System [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20(6):711-714. (in Chinese)
- [15] 刘伟佳. 陀螺效应对转子临界转速的影响[J]. 吉林师范大学学报, 2012(3):47-49.  
LIU Weijia. Impact of Gyroscopic Effect on the Critical Speed of the Rotor [J]. Journal of Jilin Normal University, 2012(3):47-49. (in Chinese)
- [16] 孙虎儿, 苏飞, 陈勇, 等. 基于陀螺效应转子动不平衡横向-轴向耦合振动分析[J]. 机械强度, 2014, 36(3):325-329.  
SUN Huer, SU Fei, CHEN Yong, et al. Based on the Gyroscopic Effect of the Rotor Dynamic Imbalance Lateral-Axial Coupling Vibration Analysis [J]. Journal of Mechanical Strength, 2014, 36(3):325-329. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)