

文章编号:1006-1355(2015)03-0204-04

# 基于航空发动机转子试验器的碰摩特征测试

金业壮<sup>1,2</sup>, 王德友<sup>3</sup>, 闻邦椿<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819;

2. 沈阳航空航天大学 航空航天工程学部, 沈阳 110136;

3. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

**摘要:**利用航空发动机转子试验器模拟不同部位的碰摩,测试获得碰摩时机匣的加速度响应信号,并与无碰摩时机匣加速度时、频域波形进行对比。测试结果表明,航空发动机叶盘结构的转子—机匣碰摩时,其加速度信号具有冲击、调幅特征,即在碰摩频率及其整数倍频附近存在边频带,其边频宽度为旋转频率。同时,与无碰摩状态相比,在低频段时碰摩特征主要表现为转频及其倍频分量,且倍频分量更加突出。

**关键词:**振动与波;航空发动机;转子试验器;碰摩;调幅特征

中图分类号:TB535

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2015.03.044

## Rubbing Characteristic Test Based on an Aeroengine Rotor-stator Testing Rig

JIN Ye-zhuang<sup>1,2</sup>, WANG De-you<sup>3</sup>, WEN Bang-chun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

3. AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** Using the aeroengine's rotor-stator testing rig, the rub-impact performance of the rotor-stator system was simulated, and the acceleration signals and the wave forms in frequency domain of the rotor-stator case under rub-impact status were obtained and compared with those without rub-impact phenomenon. The results show that when the rub-impact happens, the acceleration signals have impact and amplitude modulation characteristics, i.e. there exist some sidebands in the vicinity of rubbing frequency and the  $n$ -th harmonic frequencies (where  $n$  is an integer). In the low frequency range, the rubbing was characterized by the rotation frequency and the  $n$ -th harmonic components, and usually these components were more obvious than the former.

**Key words:** vibration and wave; aeroengine; rotor-stator testing rig; rubbing; amplitude modulation

碰摩是航空发动机一种常见的强非线性故障,初期和中期碰摩故障常包含冲击信号特征,它不仅影响设备的使用寿命,还会造成较严重后果,甚至引发机毁人亡的恶性事故<sup>[1,2]</sup>。

目前,国内外许多学者已对碰摩故障进行了一定程度的理论与试验研究<sup>[3-9]</sup>。晏砺堂等<sup>[10]</sup>通过理论和试验研究发现双转子发动机发生动静件碰摩时,除出现转子的基频振动外,当发生碰摩时还会出现多种倍频、分频成分以及以两转子转速频率为主的多种复合频率成分。高艳蕾等<sup>[11]</sup>以转子—机匣模型试验器为对象,通过试验研究方式模拟航空发动机试车过程中的典型碰摩故障,总结了转、静件碰摩故障特征谱。陈果等<sup>[12]</sup>针对实际的航空发动机转子系统,建立了含碰摩故障的转子—滚动轴承—支承—机匣耦合动力学模型。同时,利用航空发动机转

收稿日期:2014-12-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助  
(N110203001)

作者简介:金业壮(1964—),男,沈阳人,博士研究生,副教授,主要研究方向为航空发动机及转子动力学分析及测试。

Email: jyz8133@163.com。

子实验器及其故障信号测试系统,进行了碰摩故障实验,验证了仿真计算的正确性。陈果等<sup>[13]</sup>还提出一种基于倒频谱分析方法的航空发动机转静碰摩部位识别新方法,该方法直接对机匣测点的振动加速度信号进行倒频谱分析,可以分离出反映碰摩部位的传递特征信息,进而提取出了20个碰摩部位的识别特征。符晓等<sup>[14]</sup>利用小波分析方法对航空发动机转静子碰摩故障信号进行了分析,发现利用小波分析方法可以有效地滤除高频噪声,使得故障特征的观察和提取更加方便。马中存等<sup>[15]</sup>利用有限元与包络解调方法研究碰摩故障下静子振动信号的变化规律。研究表明。该方法能够从强大背景信号与噪声中提取高频碰摩故障信息。于明月等<sup>[16]</sup>提出了基于机匣加速度信号的航空发动机转静碰摩部位识别方法。利用航空发动机转子试验器模拟了大量不同部位的碰摩,采用直接提取机匣加速度信号归一化均方值和提取机匣加速度信号小波极大模归一化能量特征的实验方案对转静碰摩部位进行了识别。但上述研究还存在一些问题,部分学者所做实验只是为了验证某种理论,且有些研究结论离实际应用还存在一定的距离。

本文利用航空发动机转子试验器模拟了不同部位的碰摩,通过试验研究方式获得了碰摩时机匣的加速度响应信号,并与无碰摩时机匣加速度时、频域波形进行了对比,以期获得转子叶片和机匣碰摩的特性和规律。

## 1 碰摩实验简介

利用带机匣的航空发动机转子试验器进行了不同部位的碰摩故障试验。机匣为航空发动机的薄壁结构,转子为转轴—轮盘—叶片结构,碰摩发生在涡轮机匣端。实验时在涡轮机匣处设计了四个碰摩螺钉,实现四个部位的碰摩实验,沿涡轮机匣相应布置4个加速度传感器,并采集机匣加速度信号。图1给出了试验器实物图以及传感器的安装位置,图2为以面向涡轮机匣为标准的碰摩部位以及4个加速度传感器的安装方向示意图,CH1—CH4分别表示4个加速度传感器所对应的测试通道。

测试时采用的数据采集设备器为NI公司的USB 9234,采样频率为10 240 Hz,实验温度为室温。采用东大仪器厂SE系列电涡流位移传感器测量转子转速、丹麦B&K公司的4508型加速度传感器测量加速度。测试时试验器转速为1 489 r/min,对应旋转频率为24.8 Hz,叶片总数为32个。

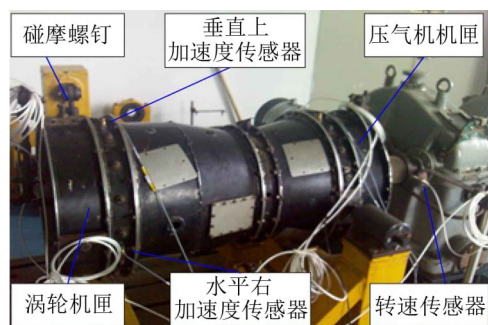


图1 航空发动机转子试验器实物及传感器位置

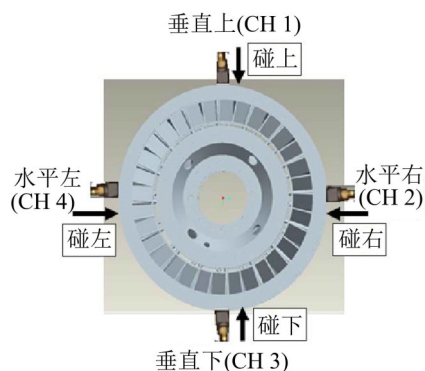


图2 传感器及碰摩位置分布图

## 2 碰摩时机匣加速度特征测试

在垂直碰摩的情况下,测试获取涡轮机匣垂直方向上测点(CH1)对应的加速度传感器的响应信号。图3和图4分别给出了转静碰摩发生在垂直方向上方时,机匣垂直方向上测点(CH1)的时域波形和局部放大波形。图5、图6和图7分别为该测点时域波形对应的频谱及其不同频段的局部放大图。

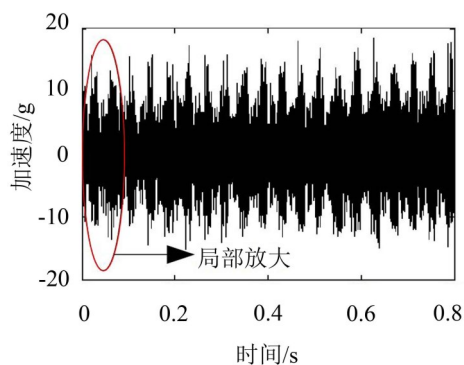


图3 碰摩时机匣垂直方向上测点(CH1)的时域波形

## 3 无碰摩时机匣加速度特征测试

无碰摩的情况下,同样测试获取涡轮机匣垂直方向上测点(CH1)对应的加速度传感器的响应信号。图8和图9分别为无转静碰摩时,机匣垂直上测点(CH1)的时域波形和局部放大波形。图10和

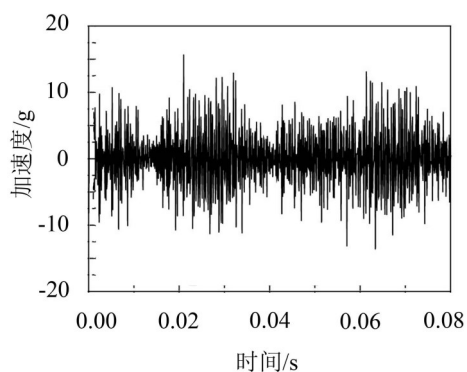


图4 碰摩时机匣垂直方向上测点(CH1)的局部放大波形

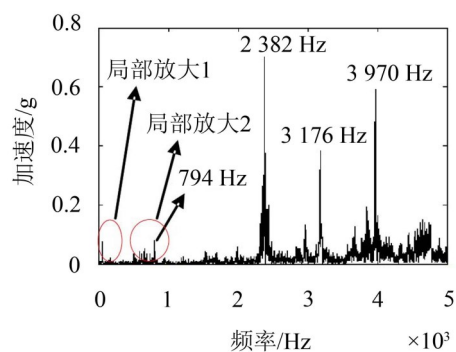


图5 碰摩时机匣垂直方向上测点(CH1)的频谱

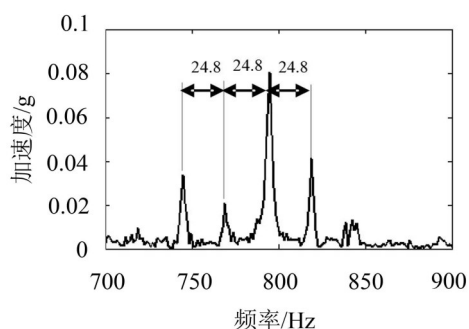


图6 碰摩时机匣垂直方向上测点(CH1)频谱(局部放大)

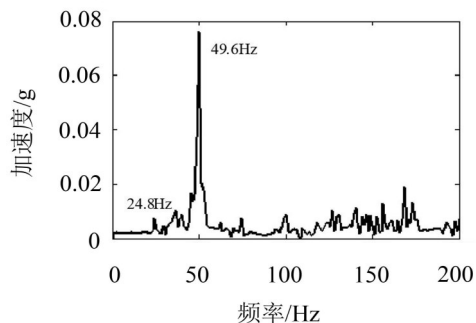


图7 碰摩时机匣垂直方向上测点(CH1)频谱(局部放大)

图11分别为该测点时域波形对应的频谱及其局部放大图。

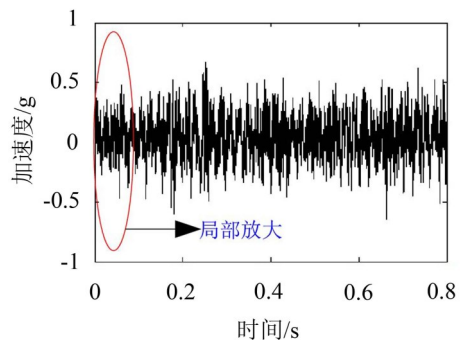


图8 无碰摩时机匣垂直方向上测点(CH1)的时域波形

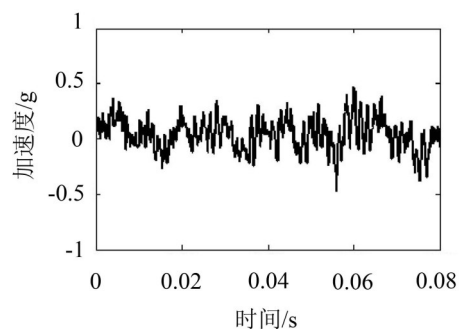


图9 无碰摩时机匣垂直方向上测点(CH1)的局部放大波形

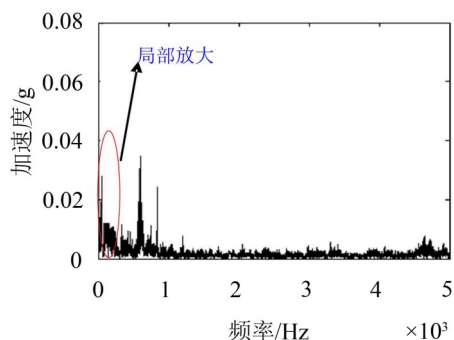


图10 无碰摩时机匣垂直方向上测点(CH1)的频谱

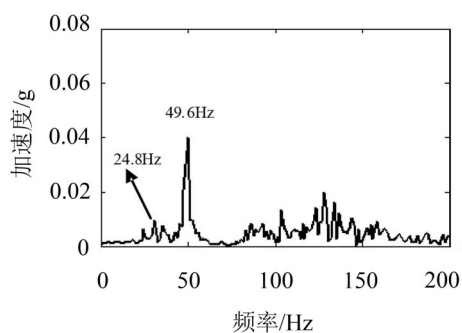


图11 无碰摩时机匣垂直方向上测点(CH1)频谱(局部放大)

#### 4 碰摩特征测试结果分析

通过对比碰摩与无碰摩时机匣加速度信号的时、频域波形,可以得出如下结论:

(1) 由于试验器采用的是转子—轮盘—叶片结构,因此,当碰摩发生时,每个叶片将轮流碰撞碰摩点,即当转子旋转一周时,这种作用将循环一次。此时,由碰摩引起的振动非常类似齿轮的振动,其碰摩频率相当于齿轮的啮合频率,为叶片数乘以旋转频率。而振动的大小又受到旋转频率的幅值调制的影响,所以才会频谱中表现出明显的调幅特征,即在碰摩频率及其整数倍频附近存在边频带,其边频宽度为旋转频率;

试验中试验器旋转频率为24.8 Hz,叶片数目为32,碰摩频率为794 Hz,从图5可以发现明显的碰摩频率及其整数倍频,即794 Hz、2 382 Hz、3 176 Hz、和3 970 Hz等。同时,在它们附近还存在许多边频,边频宽度为旋转频率24.8 Hz,这点可以在图6得到验证,从图中可以很明显地看出在794 Hz附近以24.8 Hz为间隔的边频成分;

(2) 对比正常的无碰摩时机匣振动加速度信号特征,可以看出,无碰摩时信号中不存在调幅特征,也不存在转速的整数倍频率成分;

(3) 在低频段,碰摩时机匣加速度特征主要表现为转频及其倍频分量,且与无碰摩状态相比,倍频分量更加突出。

## 5 结 语

通过测试研究发现航空发动机叶盘结构的转子—机匣的碰摩时,其加速度信号具有冲击、调幅特征,即在碰摩频率及其整数倍频附近存在边频带,其边频宽度为旋转频率。同时,与无碰摩状态相比,在低频段时碰摩特征主要表现为转频及其倍频分量,且倍频分量更加突出。

本文研究结果可为后续的仿真分析结果提供依据,为其它实验条件下的碰摩试验提供重要参考。

### 参考文献:

- [1] 闻邦椿,武新华,丁千,等. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M]. 北京:科学出版社,2004:1-14.
- [2] 韩清凯,于涛,王德友,等. 故障转子系统的非线性振动

分析与诊断方法[M]. 北京:科学出版社,2010:1-14.

- [3] Muszynska A. Stability of whirl and whip in rotor bearing system[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1988, 127 (1): 49-64.
- [4] Chu F L, Zhang Z S, Feng G P. Chaotic behavior of a rub model[J]. *Journal of Tsinghua University (Sci&Tech)*, 1996, 36 (7): 52-57.
- [5] Ehrich H. Observations of subcritical superharmonic and chaotic response in rotor dynamics[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1992, 114 (6): 93-100.
- [6] Raghothama A, Narayanan S. Bifurcation and chaos in geared rotor bearing system by incremental harmonic balance method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 226 (3): 469-492.
- [7] Wu X H, Zhang X J, Xia S B, et al. Nonlinear dynamics of an unbalanced rotor flexible mounted on three journal bearings[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2001, 14 (3): 298-302.
- [8] 袁惠群,闻邦椿,王德友. 非线性碰摩力对碰摩转子分叉与混沌行为的影响[J]. *应用力学学报*, 2001, 18(4): 16-20.
- [9] Chu F L, Lu W X. Experimental observation of nonlinear vibrations in a rub-impact rotor system[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 283: 621-643.
- [10] 晏砺堂,王德友. 航空双转子发动机动静件碰摩振动特征研究[J]. *航空动力学报*, 1998, 13(2): 173-176.
- [11] 高艳蕾,李 勇,王德友. 转子-机匣系统碰摩故障特征试验研究[J]. *航空发动机*, 2002, (4): 16-21.
- [12] 陈 果,李成刚,王德友. 航空发动机转子—滚动轴承—支承—机匣耦合系统的碰摩故障分析与验证[J]. *航空动力学报*, 2008, 23(7): 1304-1311.
- [13] 陈果,于明月,刘永泉,等. 基于倒频谱分析的航空发动机转静碰摩部位识别[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(7): 32-38.
- [14] 符晓,张群岩,赵述元. 航空发动机转静子碰摩故障信号用小波分析的方法检测和分析[J]. *噪声与振动控制*, 2012, 32(1): 124-127.
- [15] 马中存,张永祥. 有限元与包络解调相结合的碰摩故障诊断[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(6): 158-162.
- [16] 于明月,陈果,姜广义,等. 基于机匣加速度信号的航空发动机转静碰摩部位识别[J]. *中国机械工程*, 2014, 25 (8): 1102-1108.