

DOI: 10.3901/JME.2014.07.032

基于倒频谱分析的航空发动机转静碰摩部位识别*

陈 果¹ 于明月¹ 刘永泉² 姜广义² 李成刚² 冯国全² 王德友²

(1. 南京航空航天大学民航学院 南京 211106;

2. 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: 提出基于倒频谱分析的航空发动机碰摩部位识别方法, 利用倒频谱分析方法, 从机匣振动加速度信号中分离出传递路径特征, 该特征反映从碰摩点到机匣测点的传递路径信息, 因此, 不同的碰摩部位将具有不同的传递特征信息, 并以此提取出 20 个碰摩部位识别特征。利用航空发动机转子试验器模拟大量不同部位的碰摩试验, 对不同碰摩部位的试验样本进行特征分析, 表明相同碰摩部位的特征一致性, 以及不同碰摩部位的特征差异性, 利用最近邻分类方法, 进行碰摩部位识别, 识别率达到 100%, 充分验证了方法的有效性。

关键词: 航空发动机转静碰摩; 碰摩部位识别; 倒频谱分析; 传递路径

中图分类号: TB132

Identifying Rotor-stator Rubbing Positions Using the Cepstrum Analysis Technique

CHEN Guo¹ YU Mingyue¹ LIU Yongquan² JIANG Guangyi² LI Chenggang²
FENG Guoquan² WANG Deyou²

(1. College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106;

2. Shenyang Aero-engine Design Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015)

Abstract: The method of aero-engine rubbing positions identification based on cepstrum analysis is proposed. The transfer path characteristics which reflect the transfer characteristics information from rubbing points to casing measuring points are separated from the vibration acceleration signals of casing by means of cepstrum analysis. Therefore, there is different transfer characteristics information at different rubbing positions, and in view of this, twenty rubbing positions identification features are extracted. A large number of rubbing experiments of different positions are simulated with the rotor experiment rig of aero-engine, and the characteristic analysis of experimental samples at different rubbing positions is carried out, and the results indicate the consistency of features to the same rubbing position and the difference of the features to the different rubbing positions. Aero-engine rubbing positions identification is carried out using the nearest neighbor classification method. The recognition rate reaches 100%, and the effectiveness of the method is full verified.

Key words: aero-engine rotor-stator rubbing; rubbing position identification; cepstrum analysis; transfer path

0 前言

转静碰摩故障是包括航空发动机在内的高速旋转机械的常见强非线性故障, 具有严重的危害性^[1]。目前研究大多集中于如何判断设备是否发生碰摩故障, 但对碰摩部位的研究相对较少, 文献[2]

以定子振动信号为诊断源, 利用共振解调法、傅里叶变法及希尔伯特变换分离出定子的高频固有振动包络信号, 与角度定位信号相结合, 实现了碰摩故障的定位; 文献[3]利用声发射技术与小波包及互相关方法相结合, 通过比较相关系数来确定碰摩位置; 文献[4]利用声发射信号的特点, 建立能量衰减模型, 将定位问题转换为估计问题, 采用自适应次梯度投影系统估计算法逼近声源位置, 实现定位; 文献[5]根据碰摩点与未碰摩点的动刚度变化的差异

* 国家安全重大基础研究(613139)和国家自然科学基金(61179057)资助项目。20121106 收到初稿, 20131223 收到修改稿

性结合最小二乘法实现了转子系统的碰摩定位研究; 文献[6]根据建立的带有碰摩故障的转子系统有限元模型, 将碰摩位置、定转子间隙等参数识别问题转换为多参数的优化问题, 利用遗传算法进行优化求解, 实现了碰摩位置识别; 文献[7]利用板波理论进行声发射信号传播特性研究, 建立近场声发射波束形成法, 并利用该方法实现了转静碰摩的定位; 文献[8]为消除声发射信号噪声的影响, 利用小波变换将声发射信号分解至不同频率段并结合自相关函数方法实现了碰摩故障的定位; 文献[9]对球结构支持向量机进行改进, 把转轴上不同位置的碰摩当作不同的故障, 运用改进的球结构支持向量机进行转轴碰摩故障位置识别; 文献[10]根据非线性输出频率响应函数并结合转子系统有限元模型进行碰摩定位。

但这些方法普遍存在测试手段不常用, 方法过于复杂, 以及未考虑航空发动机的实际结构特征和碰摩特性的问题, 因而难于应用于工程实际。现代大型航空发动机中, 碰摩的主要原因来源于转子不平衡、机匣变形以及支座不同心等。由于转子质量较大, 机匣普遍采用薄壁结构, 其质量较轻, 碰摩力很难使转子反弹。因此, 在航空发动机中, 碰摩现象主要表现为偏磨, 即基本上是在机匣固定位置碰摩, 但是由于机匣变形不同、支座不同心的方向不同, 其发生偏磨的部位将有所区别, 因此, 有效地诊断和识别出偏磨的位置, 对于发现航空发动机偏磨故障的原因和改进设计具有重要意义。

基于此, 本文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, 分离出反映碰摩部位的传递特征信息, 进而提取出用于进行碰摩部位识别的特征量。利用航空发动机转子试验器进行不同部位的碰摩试验, 用试验数据验证了本文方法的正确有效性。

1 基于倒频谱分析的转静碰摩部位识别的特征提取

设连续信号 $x(t)$, 按采样周期 T_s 采样, 分别得到 N 个点的时间序列 $x(n), n=1, 2, \dots, N$ 。则, 可由快速傅里叶变换 FFT 计算出, $X(k) = \text{DFT}[x(n)]$, 其中 $\text{DFT}[\cdot]$ 为离散傅里叶变换, 频谱间隔为 $\Delta f = 1/(NT_s)$ 。则利用 $X(k), k=1, 2, \dots, N$, 可以计算出功率谱密度函数, 即

$$S_{xx}(k) = \frac{1}{N} T_s X^*(k) X(k) = \frac{1}{N} T_s \|X(k)\|^2 \quad (1)$$

式中 $X(k)$ ——信号 $x(n)$ 所对应的离散傅里叶变换;

$X^*(k)$ —— $X(k)$ 的共轭复数;

N —— $x(n)$ 信号的长度;

k —— 傅里叶变换的点数。

在工程中常用的是功率倒频谱, 其定义为信号的功率谱函数取对数后的傅里叶反变换, 其中 $\text{IDFT}[\cdot]$ 为离散傅里叶反变换, 即

$$C_x(k) = \text{IDFT}[\lg(S_{xx}(k))] \quad (2)$$

式中 $C_x(k)$ ——信号 $x(n)$ 的功率倒频谱。

设 $x(n)$ 为数据采集得到的响应信号, 其频谱为 $X(k)$, 碰摩点产生的碰摩力为 $f(n)$, 其频谱为 $F(k)$, 从碰摩点到测点的频率响应函数为 $h(n)$, 其频谱为 $H(k)$; 其中, $n, k=1, 2, \dots, N$, 则线性系统的响应特性可得

$$X(k) = F(k)H(k) \quad k=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

由式(1)、(2)、(3)可得功率倒频谱式(4)

$$\begin{aligned} C_x(k) &= \text{IDFT}[\lg(S_{xx}(k))] = \\ &= \text{IDFT} \left[\lg \left(\frac{1}{N} T_s \|X(k)\|^2 \right) \right] = \\ &= \text{IDFT} \left[\lg \left(\frac{1}{N} T_s \|H(k)F(k)\|^2 \right) \right] = \\ &= \text{IDFT} \left[\lg \left(\frac{1}{N} T_s \|H(k)\|^2 \|F(k)\|^2 \right) \right] = \\ &= \text{IDFT} \left[\lg \left(\frac{1}{N} T_s \right) \right] + 2\text{IDFT} \left[\lg(\|F(k)\|) \right] + \\ &= 2\text{IDFT} \left[\lg(\|H(k)\|) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出, 功率倒频谱 $C_x(k)$ 分离出了激发碰摩的碰摩力信号和从碰摩点到响应测点的传递路径, 其中式(4)中右边第一项对应零倒频率成分, 第二项对应碰摩激励力倒频率成分, 第三项对应从碰摩点到响应测点的传递路径的倒频率成分。

倒频率具有时间的量纲, 在倒频谱上, 低倒频率段, 主要体现传递特征; 高倒频率段, 主要体现激励特征。因此, 为了提取出反映碰摩点到测点的传递特征, 可以从倒频谱上低倒频率段的若干个倒频率点所对应的倒频谱值作为反映传递路径的特征量。在本文中, 选择提取零倒频率点以后的 20 个倒频率点对应的倒频谱的实部作为特征量, 从而形成碰摩部位识别的特征矢量。

2 碰摩试验

传统的碰摩试验没有考虑航空发动机的薄壁结构以及转子-轮盘-叶片结构, 因此其碰摩特征难于与实际航空发动机接近。本文利用沈阳发动机研

研究所设计研制的航空发动机转子试验器进行碰摩试验,该试验器在结构设计上,首先考虑在外形上与发动机核心机的机匣一致,尺寸缩小三倍;内部结构作了必要简化,将核心机简化为 0—2—0 支承结构形式,并设计了可调刚度支承结构以调整系统的动特性;多级压气机简化为单级的盘片结构,在结构上形成了转子-支承-叶盘-机匣系统。试验器如图 1 所示。

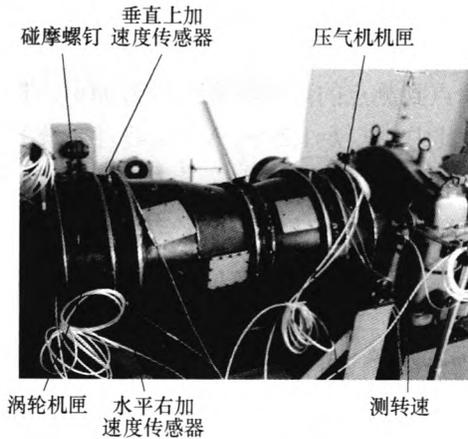


图 1 航空发动机转子试验器碰摩试验

试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试验,沿涡轮机匣相应布置四个加速度传感器以采集机匣加速度信号,碰摩位置及加速度传感器的安装位置如图 1 及图 2 所示,图 2 为以面向涡轮机匣为标准碰摩部位及传感器的安装方向示意图,图 2 中表明 4 个传感器所对应的测试通道。

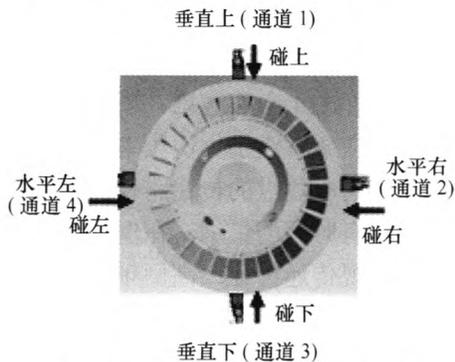


图 2 传感器及碰摩位置分布图

进行了两天 6 次独立试验,每次试验均进行碰上、碰下、碰左、碰右四个部位的碰摩试验,每次试验保存 100 个样本,每个样本为 8 192 个采样点。具体试验数据见表 1。

表 1 碰摩试验数据

试验日期	试验次数	碰摩程度	试验转速/(r/min)
2012-05-12	3	中度碰摩	1 500
2012-05-17	3	中度碰摩	1 500

各次试验均采用东大仪器厂 SE 系列电涡流位移传感器测量转子转速;丹麦 Brüel & Kjær 公司的 4508 型加速度传感器测加速度;数据采集器为 National Instruments 公司的 USB9234,采样频率为 10 kHz。

3 基于机匣加速度信号的特征分析

3.1 机匣加速度信号的倒频谱分析

选择 2012 年 5 月 12 日第 1 次试验的通道 1 的测试数据进行分析。图 3~7 分别为转静碰摩发生在垂直上方的加速度信号的时域波形、频谱、自功率谱密度,倒频谱,以及从倒频谱中提取出的 20 个特征值。图 8~13 分别为不发生转静碰摩的该通道的加速度信号的时域波形、频谱、自功率谱密度,倒频谱,以及从倒频谱中提取出的 20 个特征值。

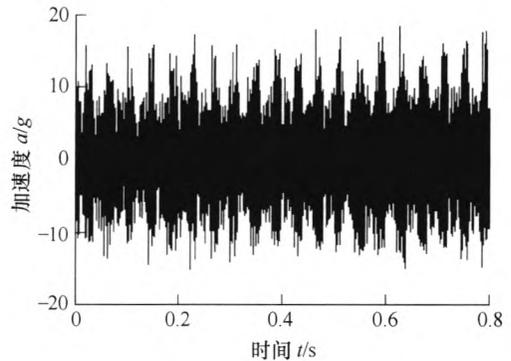


图 3 时域波形(碰上)

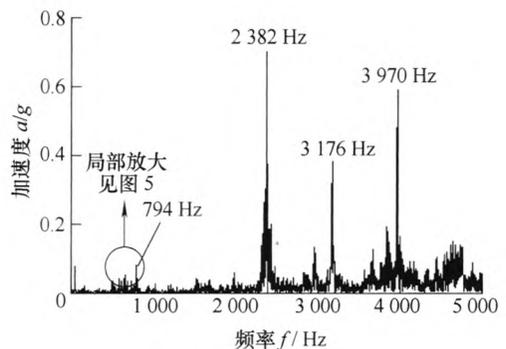


图 4 频谱(碰上)

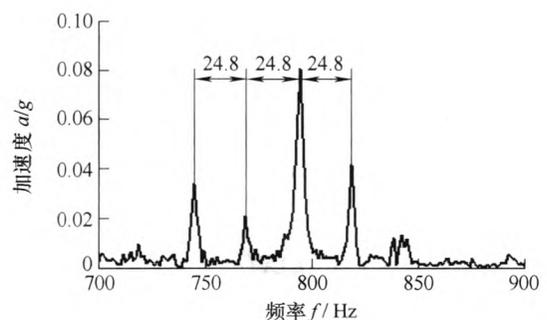


图 5 在图 4 中的局部放大图(碰上)

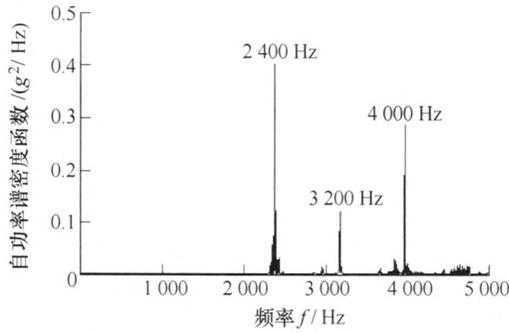


图6 自功率谱密度函数(碰上)

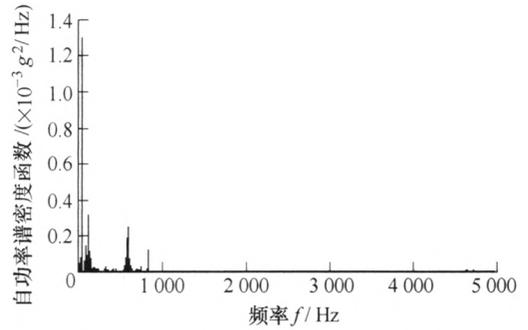


图11 自功率谱密度函数(无碰摩)

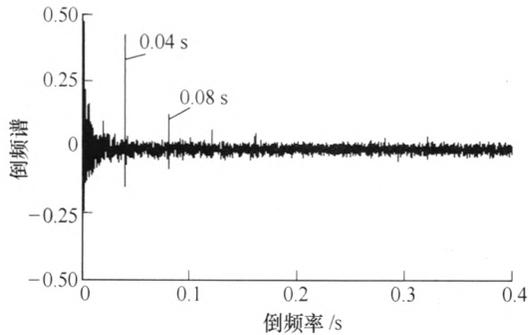


图7 倒频谱(碰上)

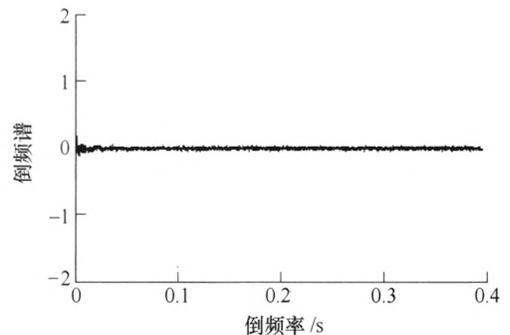


图12 倒频谱(无碰摩)

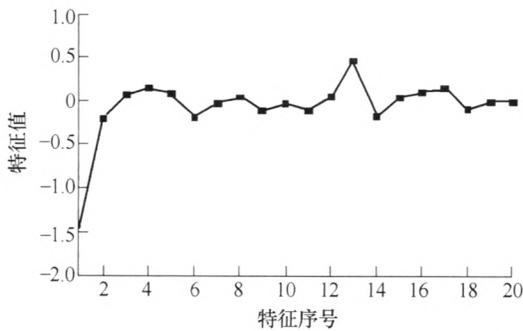


图8 特征值(碰上)

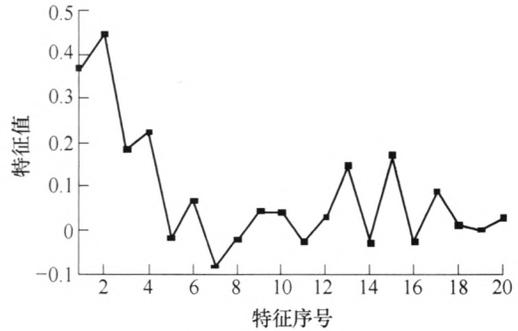


图13 特征值(无碰摩)

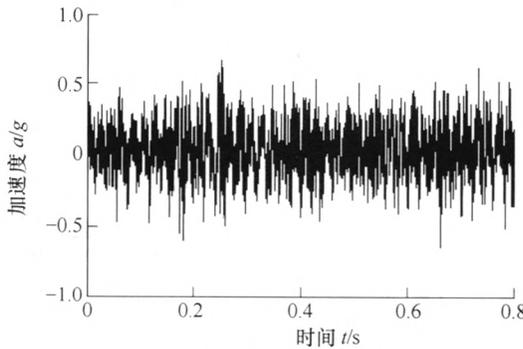


图9 时域波形(无碰摩)

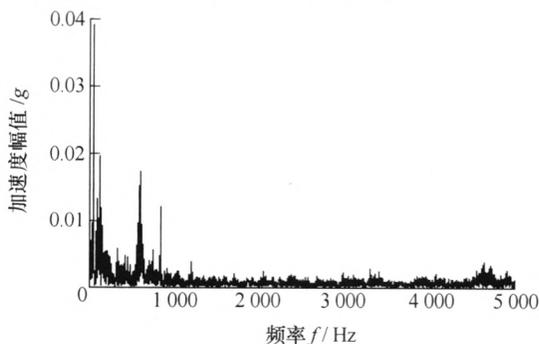


图10 频谱(无碰摩)

从图3~13中可以得出如下结论。

(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，当转子旋转一周时，这种作用将循环一次。因此，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。因此，在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。试验中试验器转速为1489 r/min，旋转频率为24.8 Hz，叶片数目为32，碰摩频率为794 Hz，在图4中均表现出了碰摩频率及其整数倍频，即794 Hz，2382 Hz，3176 Hz，3970 Hz，在它们附近均存在许多边频，边频宽度为旋转频率24.8 Hz，图5为图4在794 Hz附近的局部放大图，从图5中可以很明显的看出794 Hz附近的以24.8 Hz为间隔的边频。

(2) 由于倒频谱对边频成分具有“概括”能力，

能较明显地显示出频谱上的周期成分，将原来频谱上的成簇边频带谱线简化为单根谱线，从图 7 中的倒频谱中可以明显看到单根谱线，对应的倒频率为 0.0403 s^{-1} (24.8 Hz)。显然，从倒频谱中也可看出碰摩故障所导致的振动信号的调制现象。

(3) 对比正常的无碰摩时的机匣振动加速度信号，可以看出，无碰摩时，信号中不存在调制现象，从倒频谱中没出现 0.0403 s^{-1} 的倒频率分量及其倍频。在频谱中也无边频成分。

(4) 由于在倒频谱上，调制边频表现为倒频率及其倍频，位于高倒频率区域，所以反应传递路径的倒频谱应该主要体现在低倒频率段，由于零倒频率不反应系统传递特性，介于此，本文从第 1 个非零倒频率点开始，依次选择第 20 个倒频率点的倒频谱的实部值作为表征系统传递特性的特征。如图 7 所示，对比无碰摩时的特征值(图 13)，该特征值差别很大。表明了其对碰摩与不碰摩的区分度。下面将详细分析该特征量对碰摩部位的区分度。

3.2 碰摩部位识别的特征分析

利用 2012-05-12 的三次不同试验次数的来进行相同碰摩部位的特征分析。图 14~17 分别为碰上、碰右、碰下和碰左时，从通道 1 信号中提取的特征。

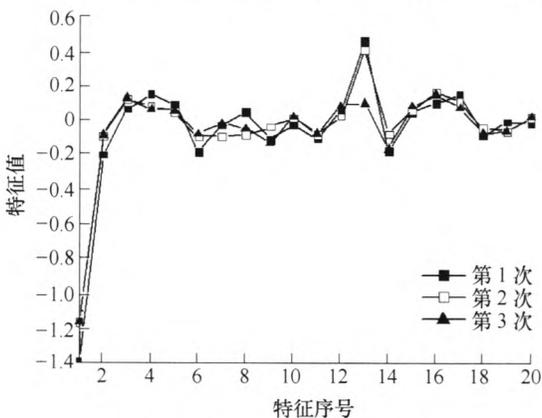


图 14 特征值(碰上、通道 1)

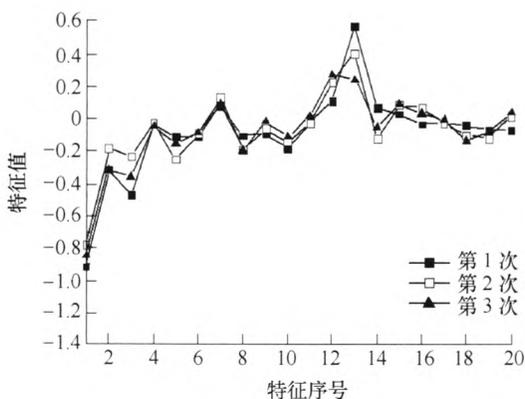


图 15 特征值(碰右、通道 1)

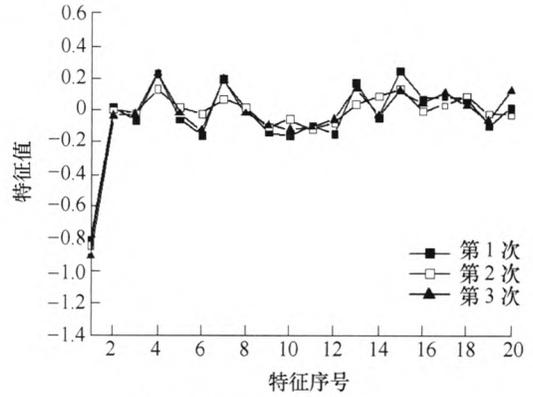


图 16 特征值(碰下、通道 1)

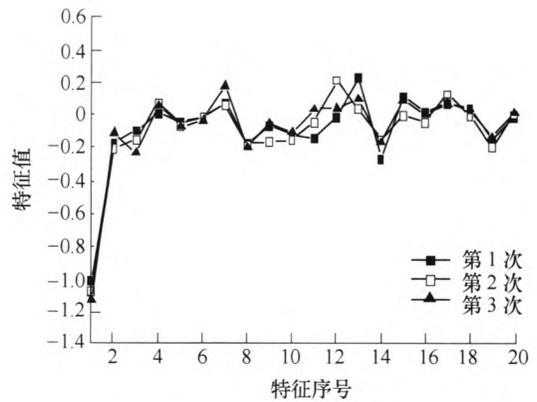


图 17 特征值(碰左、通道 1)

从图 14~图 17 中可以看出，相同的碰摩部位表现出了非常一致的特征量。图 18 为对 2012-05-12 第一次不同的碰摩部位试验中，利用通道 1 测试信号提取的特征量，从图 18 中不难看出，不同的碰摩部位，特征量存在较大的差异，其原因在于，不同的碰摩部位表征不同的传递路径，由此可见，本文提出的碰摩部位识别特征具有很强的碰摩部位识别能力。

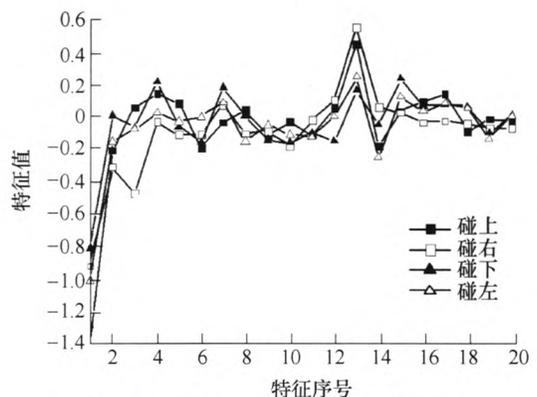


图 18 特征值(4个碰摩部位、通道 1)

为了进一步分析特征的有效性，选择第 21 个到第 40 个倒频谱点作为特征来进行比较。图 19 为利用 2012 年 5 月 12 日的三次试验，在碰上的情况下，利用通道 1 的信号提取的特征量。从图 19 可以看出，特征的一致性变得较差。继续选择第 41 个到

第60个倒频谱点作为特征来进行比较。图20为利用2012年5月12日的三次试验,在碰上的情况下,利用通道1的信号提取的特征量。从图20可以看出,特征的一致性同样也变得较差。其原因在于,高倒频率段受激励的影响较大,受传递路径的影响较小。由此可见,从第1个非零倒频率点开始提取20个倒频率点的倒频谱值作为传递路径识别特征量最为有效。

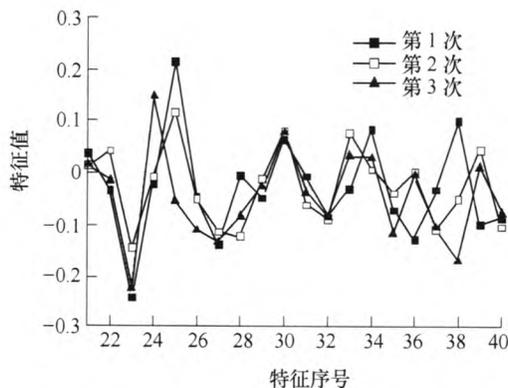


图19 特征值(碰上、通道1、序号21~40)

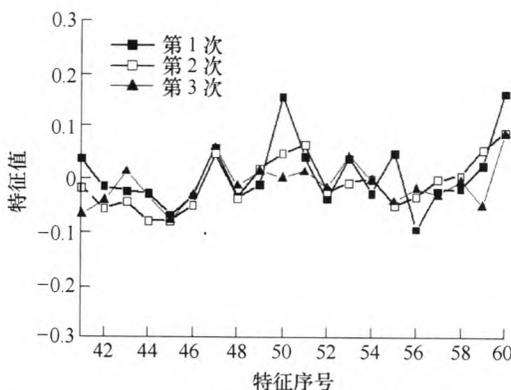


图20 特征值(碰上、通道1、序号41~60)

4 碰摩部位识别

上述分析表明本文所提取的特征对碰摩部位具有很好的识别能力,而且根据每个通道均可对碰摩部位进行有效识别,因此,本文选择通道1的试验数据进行碰摩部位识别试验分析,利用最近邻分类方法^[15],对碰摩部位识别率进行计算,其基本步骤为如下。

(1) 将2012-05-12的第1次试验结果,进行特征提取,形成标准样本,试验数据中包括碰上、碰右、碰下和碰左的4个部位。

(2) 对2012-05-12的第2次、第3次试验结果,以及2012-05-17的3次试验数据,进行特征提取,形成待识别样本,包括碰上、碰右、碰下和碰左的4个部位。

(3) 分别计算待识别样本与标准样本的欧几里得距离,将待识别样本判别为与之距离最近的标准样本的类别。最后,统计出识别率。

碰摩部位识别试验如表2所示。从表中可以看出,本文所提出的特征对碰摩部位达到了100%的识别率,其根本原因在于该特征体现了相同碰摩部位的良好一致性和不同碰摩部位的较大差异性。由于特征反映了传递路径,受响应的影响小,所以对不同转速和不同强度的碰摩部位识别均具有很强的稳健性。

表2 碰摩识别结果

	标准样本	待识别样本	识别率(%)
碰上样本数	100	500	100
碰右样本数	100	500	100
碰下样本数	100	500	100
碰左样本数	100	500	100

5 结论

(1) 利用倒频谱分析方法,从机匣振动加速度信号中分离出传递路径特征,并以此提取出20个碰摩部位识别特征。

(2) 利用航空发动机转子试验器模拟大量不同部位的碰摩试验,对不同碰摩部位的试验样本进行了特征分析,表明了相同碰摩部位的特征一致性,以及不同碰摩部位的特征差异性。

(3) 利用最近邻分类方法,进行了碰摩部位识别,识别率达到100%,充分验证了方法的有效性。

(4) 实际航空发动机通常表现为局部偏摩,与本文试验器的碰摩状态类似。因此,对于实际航空发动机碰摩故障部位识别,需要收集通过分解确认碰摩部位的典型碰摩案例,这样就可以利用本文方法进行识别。对于多点碰摩,按照本文方法原理,其传递路径必将有区别,只要收集一定的样本,本文方法依旧能够实用,通常,实际航空发动机的局部偏摩一般不会超过3点,以单点和两点居多。

参 考 文 献

- [1] 谭继勇,陈雪峰,何正嘉. 冲击信号的随机共振自适应检测方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 61-67.
TAN Jiyong, CHEN Xuefeng, HE Zhengjia. Impact signal detection method with adaptive stochastic resonance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 61-67.
- [2] 孙云岭,张永祥,常汉宝. 基于定子振动的转子碰摩故障诊断方法研究[J]. 机械工程学报, 2009, 22(4):

- 391-394.
SUN Yunlin, ZHANG Yongxiang, CHANG Hanbao. Method of rotor rub-impact faults diagnosis based on stator vibration signal [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(4): 391-394.
- [3] 褚福磊, 王庆禹, 卢文秀. 用声发射技术与小波包分解确定转子系统的碰摩位置[J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 139-143.
CHU Fulei, WANG Qingyu, LU Wenxiu. Detective of the rub location in a rotor system with AE sensors and wavelet analysis.[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(3): 139-143.
- [4] 邓艾东, 包永强, 赵力. 基于能量衰减模型的转子碰摩声发射源次梯度投影定位方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 66-72.
DENG Aidong, BAO Yongqiang, ZHAO Li. Positioning of acoustic emission source by using sub-gradient projection based on energy attenuation model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 66-72.
- [5] CHU F, LU W. Determination of the rubbing location in a multi-disk rotor system by means of dynamic stiffness identification [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(2): 235-246.
- [6] 卢文秀, 褚福磊, 郭丹. 基于遗传算法的碰摩位置辨识[J]. 清华大学学报, 2005, 45(2): 208-211.
LU Wenxiu, CHU Fulei, GUO Dan. Rubbing location identification based on genetic algorithms[J]. J. Tsinghua University, 2005, 45(2): 208-211.
- [7] 何田, 刘耀光, 陈亚农, 等. 基于声发射波束形成法的转静子碰摩故障定位[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2207-2213.
HE Tian, LIU Yaoguang, CHEN Yanong, et al Method for Locating rub fault of rotor-stator based on acoustic emission beamforming[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10): 2207-2213.
- [8] WANG Q, CHU F. Experimental determination of the rubbing location by means of acoustic emission and wavelet transform[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(1): 91-103.
- [9] 袁胜发, 褚福磊. 球结构支持向量机在转轴碰摩位置识别中的应用[J]. 振动与冲击, 2009, 28(8): 70-77.
YUAN Shengfa, CHU Fulei. The application on shaft rubbing positions identification based on sphere support vector machine [J]. Journal of Vibration and Shock. 2009, 28(8): 70-77.
- [10] HAN Q K, YU T, LI H, et al. Hybrid model based identification of local rubbing fault in rotor systems[J]. Key Engineering Materids, 2005, 293-294: 355-364.
- [11] 刘小峰, 秦树人, 张开飞. 小波域的冲击能量相关技术及应用[J]. 振动与冲击, 2012, 32(12): 129-134.
LIU Xiaofeng, QIN Shuren, ZHANG Kaifei. Corrlative technique for wavelet-domain impact energy and it's application[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 32(12): 129-134.
- [12] 艾延廷, 费成巍. 转子振动故障的小波能谱熵 SVM 诊断方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1830-1835.
AI Yanting, FEI Chengwei. Rotor vibration fault diagnosis method based on wavelet energy spectrum entropy and SVM[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1830-1835.
- [13] 陈果. 一种改进的谐波小波及其在转子故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 8-16.
CHEN Guo. An improved harmonic wavelet and its application to rotor faults diagnosis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 8-16.
- [14] 褚福磊, 彭志科, 冯志鹏, 等. 机械故障诊断中的现代信号处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
CHU Fulei, PENG Zhike, FENG Zhipeng. The application of modern signal process method in mechanical fault diagnosis [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [15] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
BIAN Shaoqi, ZHANG Xuegong. Pattern recognition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.

作者简介: 陈果(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为航空发动机智能诊断及专家系统, 转子动力学。

E-mail: czzyx@263.net

于明月, 女, 1981 年出生, 博士研究生。主要研究方向为信号处理、微弱信号检测和故障诊断。

E-mail: yumingyue211@163.com

刘永泉, 男, 1965 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为航空发动机、结构强度与振动。

姜广义, 男, 1975 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航空发动机和转子动力学。

E-mail: jgy1301@163.com

李成刚, 男, 1972 年出生, 硕士, 研究员。主要研究方向为航空发动机及转子动力学。

E-mail: lichenggang606@163.com

冯国全, 男, 1967 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为转子动力学和航空发动机智能诊断。

E-mail: feng2004606@163.com

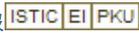
王德友, 男, 1955 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为转子动力学、航空发动机智能诊断。

E-mail: saeriem@mail.sy.ln.cn

基于倒频谱分析的航空发动机转静碰摩部位识别

作者: [陈果](#), [于明月](#), [刘永泉](#), [姜广义](#), [李成刚](#), [冯国全](#), [王德友](#), [CHEN Guo](#), [YU Mingyue](#), [LIU Yongquan](#), [JIANG Guangyi](#), [LI Chenggang](#), [FENG Guoquan](#), [WANG Deyou](#)

作者单位: [陈果, 于明月, CHEN Guo, YU Mingyue\(南京航空航天大学民航学院 南京211106\)](#), [刘永泉, 姜广义, 李成刚, 冯国全, 王德友, LIU Yongquan, JIANG Guangyi, LI Chenggang, FENG Guoquan, WANG Deyou\(中国航空工业集团公司沈阳发动机设计研究所 沈阳 110015\)](#)

刊名: [机械工程学报](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING](#)

年, 卷(期): 2014, 50(7)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jxgxb201407005.aspx