

# 基于机匣加速度信号的航空发动机 转静碰摩部位识别

于明月<sup>1</sup> 陈果<sup>1</sup> 姜广义<sup>2</sup> 李成刚<sup>2</sup> 冯国全<sup>2</sup> 王德友<sup>2</sup>

1. 南京航空航天大学, 南京, 210016 2. 沈阳航空发动机设计研究所, 沈阳, 110015

**摘要:**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, 将小波局部极大模归一化能量与直接提取的机匣加速度信号归一化均方值输入至支持向量机中, 以进行识别验证及对比分析。结果表明, 小波局部极大模方法提取的归一化能量特征比直接提取的加速度信号均方值能更加有效地进行转静碰摩部位的识别。

**关键词:**极大模; 能量特征; 加速度信号; 支持向量机; 碰摩位置识别

**中图分类号:** TB132

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2014.08.021

## Aero-engine Rotor-stator Rubbing Positions Identification Based on Casing Acceleration Signals

Yu Mingyue<sup>1</sup> Chen Guo<sup>1</sup> Jiang Guangyi<sup>2</sup> Li Chenggang<sup>2</sup> Feng Guoquan<sup>2</sup> Wang Deyou<sup>2</sup>

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. Shenyang Aero-engine Design Institute, Shenyang, 110015

**Abstract:** A method of aero-engine rubbing positions identification based on casing acceleration signals was proposed. The rotor experimental rig of aero-engine was used to simulate rubbing faults of different radial rubbing positions. The normalized energy features of wavelet partial maximum modulus were used to input into support vector machine by comparison with directly extracted casing accelerate signal mean square features. The results show that the normalized energy features based on the wavelet partial maximum modulus are more effective than direct extracted casing acceleration signal mean square feature in rotor-stator rubbing positions identification.

**Key words:** maximum modulus; energy feature; acceleration signal; support vector machine; rubbing position identification

## 0 引言

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, 还会造成较严重的后果<sup>[1]</sup>。利用冲击信号的特征有效识别转静碰摩部位对于新机研制及防止重大事故的发生都有重要的技术价值。目前的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。在对碰摩部位识别的研究中, 文献[2]以定子振动信号为诊断源, 将分离出的定子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]将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, 采用自适应次梯度投影系统估计算法逼近声源位置, 从而实现定位; 文献[5]根据碰摩点与未碰摩点的动刚度变化的差异性并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, 利用遗传算法进行优化求解, 实现

了碰摩位置识别; 文献[7]利用板波理论建立了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的位置识别; 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了碰摩定位。

小波变换由于其良好的时频局部性, 得到了广泛的应用<sup>[11-16]</sup>。小波局部极大模的位置及大小包含了信号的主要信息, 可以通过小波变换的局部极大模的位置和大小来完成对信号冲击特征表征和分析<sup>[17]</sup>。碰摩故障常常包含冲击信号成分, 且加速度传感器广泛用于航空发动机的振动监测中, 基于此, 提出基于机匣加速度信号的小波局部极大模能量方法来识别航空发动机转静碰摩部位。将该方法与直接提取加速度信号均方值的方法进行了对比分析, 结果表明, 小波局部极大模能量特征方法较直接提取加速度信号均方值的方法鲁棒性更好, 能更有效地进行转静碰摩部位的识别。

收稿日期: 2012-08-31

基金项目: 国家安全重大基础科研项目(613139); 国家自然科学基金资助项目(61179057)

### 1 小波局部极大模能量特征方法

小波的局部极大模所携带的信息可以进行信号奇异性的检测<sup>[17]</sup>,对碰摩故障所包含的冲击信号的表征和分析可以通过小波局部极大模来完成。

#### 1.1 小波局部极大模<sup>[17]</sup>

设  $\theta(t)$  是一适当光滑的函数,满足

$$\psi_1(t) = d\theta(t)/dt \quad (1)$$

令

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(t) dt = 1, \text{ 且 } \theta(t) = O(1/(1+t^2))$$

如果  $\psi_1(t)$  满足小波容许条件,则可以将  $\psi_1(t)$  用作小波函数,以作小波变换。对函数  $\theta(t)$  引入尺度参数  $s$ ,表示为  $\theta_s(t) = \theta(t/s)/s$ 。函数  $f(t) \in L^2(R)$ ,则  $\psi_1(t)$  的小波变换为

$$W_{1f}(s, t; \psi_1) = f(t) * \psi_1(t) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \psi_1\left(\frac{t-\tau}{s}\right) d\tau \quad (2)$$

可以看出,小波变换  $W_{1f}(s, t; \psi_1)$  可表示为信号  $f(t)$  在尺度  $s$  下被  $\theta_s(t)$  平滑后的一阶导数。由以上分析可以看出,  $f(t)$  的突变点和  $W_{1f}(s, t; \psi_1)$  的模极大点之间存在对应关系。

在尺度因子  $s_0$  下,若对属于  $t_0$  的某一邻域内的任一点  $t$ ,都有  $|W_{s_0} f(t)| \leq |W_{s_0} f(t_0)|$ ,称  $(s_0, t_0)$  为局部极大模点。

#### 1.2 小波极大模能量特征

小波变换中,原始信号在时域的能量与信号的二范数的平方等价。信号的极大模包含了信号的主要信息,将各个子空间内小波局部极大模信号的平方和作为极大模能量的标志,来消除每次实验时极大模能量相对值大小的影响,对能量进行归一化处理。

若子空间的小波极大模变换结果用序列  $d_i(k)$  表示,则  $i$  层极大模能量定义为

$$E_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |d_i(k)|^2 \quad (3)$$

式中,  $N$  为第  $i$  层极大模系数的总个数。

#### 1.3 基于机匣加速度信号的小波局部极大模能量特征提取

利用转子试验器采集机匣加速度信号,并对信号进行  $l$  层小波分解。对分解后的信号进行小波极大模变换,寻找极大模的位置及大小,以确定冲击点的位置及大小。对得到的极大模信号进行小波降噪处理,降噪时的阈值  $t_l = c\sigma_l$ ,其中,  $t_l$  为第  $l$  阈值;  $\sigma_l$  为  $l$  层均方差;  $c$  的取值采用文献<sup>[18]</sup>的方法,经多次实验分析,确定取值在 1.8~2.5 之间。极大模能量特征提取的具体实现过程如图 1 所示。

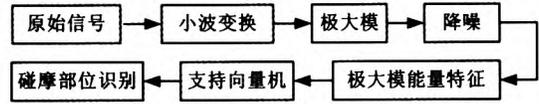


图 1 小波极大模能量转静碰摩部位识别流程图

### 2 碰摩实验

碰摩实验利用沈阳发动机研究所设计研制的航空发动机转子试验器,通过调节碰摩螺钉挤压碰摩环实现,试验器如图 2 所示。实验时,在涡轮机匣处设计了 4 个碰摩螺钉,可实现 4 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 2、图 3 所示。图 2 所示为垂直上及水平右传感器的安装位置,垂直下及水平左传感器安装于试验器垂直上及水平右传感器的 180° 方向。图 3 为碰摩部位及传感器的安装方向示意图。

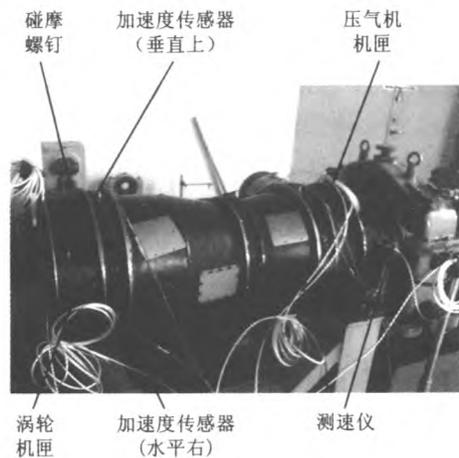


图 2 转子试验器碰摩实验

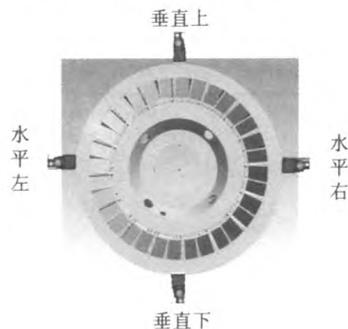


图 3 传感器及碰摩位置分布图

#### 2.1 实验方案

为说明机匣加速度均方值可有效进行航空发动机转静碰摩部位的识别,且小波极大模能量特征的识别效果优于直接提取机匣加速度信号均方值的效果,采用下面两种实验方案进行转静碰摩部位的识别:

**方案 1** 直接提取机匣加速度信号的均方值。直接计算加速度传感器所采集信号的均方值,将各通道传感器采集的加速度信号的均方值分别与 4 个传感器采集的加速度信号均方值之和做比值,将该比值作为特征参数,进行碰摩部位的识别。

**方案 2** 提取机匣加速度信号的极大模能量特征。将各通道加速度传感器采集的信号利用小波变换将其分解至  $l$  层,并对分解后的信号进行小波极大模变换,确定冲击点的位置及大小。对得到的极大模信号进行小波降噪处理,降噪时的阈值  $t_l = c\sigma_l = 2.0\sigma_l$ 。提取降噪后信号的小波第  $l$  层极大模能量,将各通道极大模能量分别与 4 个传感器的极大模能量和的比值作为特征参数,进行转静碰摩部位的识别。

## 2.2 实验数据

为实现两种实验方案的比较,取相同实验数据,实验数据来自 4 次独立实验(转速为 1500 r/min),每次实验均进行碰垂直上、碰垂直下、碰水平左、碰水平右四个部位的碰摩实验。

各次实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 NI 公司的 USB9234,采样频率为 10 kHz,实验温度为室温。

## 3 基于机匣加速度信号的特征提取

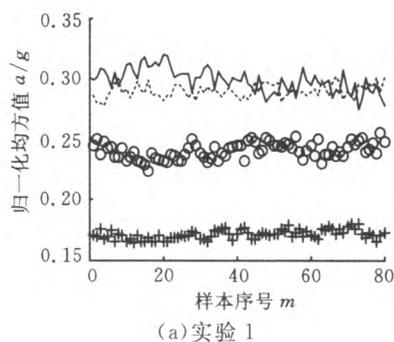
### 3.1 特征提取

航空发动机碰摩部位不同时,安装于机匣同一位置的加速度传感器采集到的信号特征值(均方值及小波局部极大模能量值)占机匣所有传感器采集到信号的特征值之和的比例不同。碰摩部位相同时,同一位置加速度传感器采集到的信号特征值占机匣所有传感器采集到信号的特征值之和的比例又有一定的一致性。基于此,将特征值作为特征参数,利用支持向量机进行分类,从而实现转静碰摩部位识别。具体过程如下:采集航空发动机转子试验器碰摩状态下安装于机匣各位置加速度传感器的实验数据;提取各数据的均方值或小波极大模能量特征;将各加速度传感器的特征值分别与 4 个传感器特征值之和做比值以进行归一化处理;将进行了一归一化处理的特征值作为特征参数输入至支持向量机中,进行转静碰摩部位的识别。

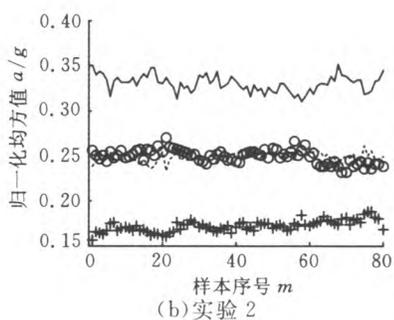
### 3.2 不同碰摩部位的加速度信号特征分析

为对 2 种实验方案进行对比分析,对实验方案随机取相同的实验数据(以前 2 次实验数据为例),碰摩位置为涡轮机匣垂直上、垂直下、水平左、水平右的实验数据各 80 组,实验转速为 1500 r/min。

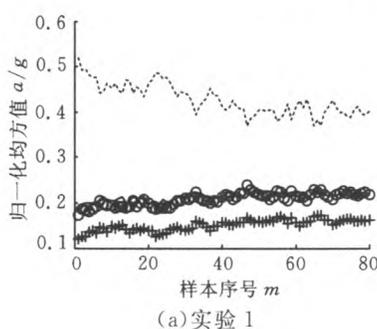
(1)直接提取加速度信号均方值。直接提取机匣加速度信号均方值的实验结果如图 4~图 7 所示。



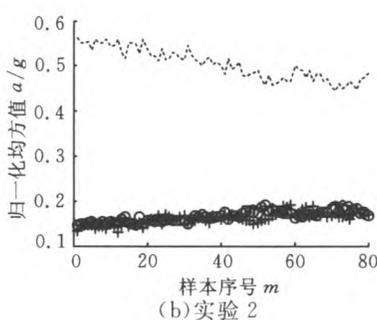
(a) 实验 1



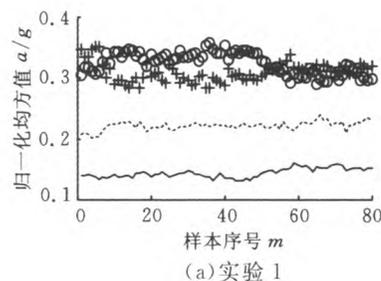
(b) 实验 2



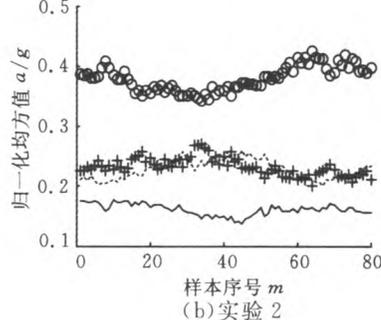
(a) 实验 1



(b) 实验 2



(a) 实验 1



(b) 实验 2

— 垂直上      ..... 水平右      ○ 垂直下      + 水平左

图 4 碰涡轮机匣归一化均方值(垂直上)

图 5 碰涡轮机匣归一化均方值(水平右)

图 6 碰涡轮机匣归一化均方值(垂直下)

由图 4~图 7 可以看出:碰摩位置相同时,2 次独立实验有一定的一致性,如碰涡轮机匣水平右时,归一化均方值最大处的位置在机匣右方加速度传感器上。碰摩位置不同时,2 次独立实验有一定的差异性。以第一次实验为例,碰涡轮机匣垂直上时,归一化均方值最大的位置大多数在涡轮机匣垂直上方加速度传感器上;碰涡轮机匣水平右时,归一化均方值最大的位置位于涡轮机匣水平右加速度传感器上。

(2)提取加速度信号小波局部极大模能量特征。为便于比较和分析,实验数据取与方案 1 中相同的实验数据。实验结果如图 8~图 11 所示。

由图 8~图 11 可以发现:碰摩位置相同时,2 次独立实验的一致性较好,如碰涡轮机匣垂直上时,两次实验均为安装于机匣上方加速度传感器的小波极大模归一化能量特征最大(图 8a、图 9a)。碰摩位置不同时,2 次独立实验的差异性较大,以第一次实验为例,碰涡轮机匣垂直上时,位

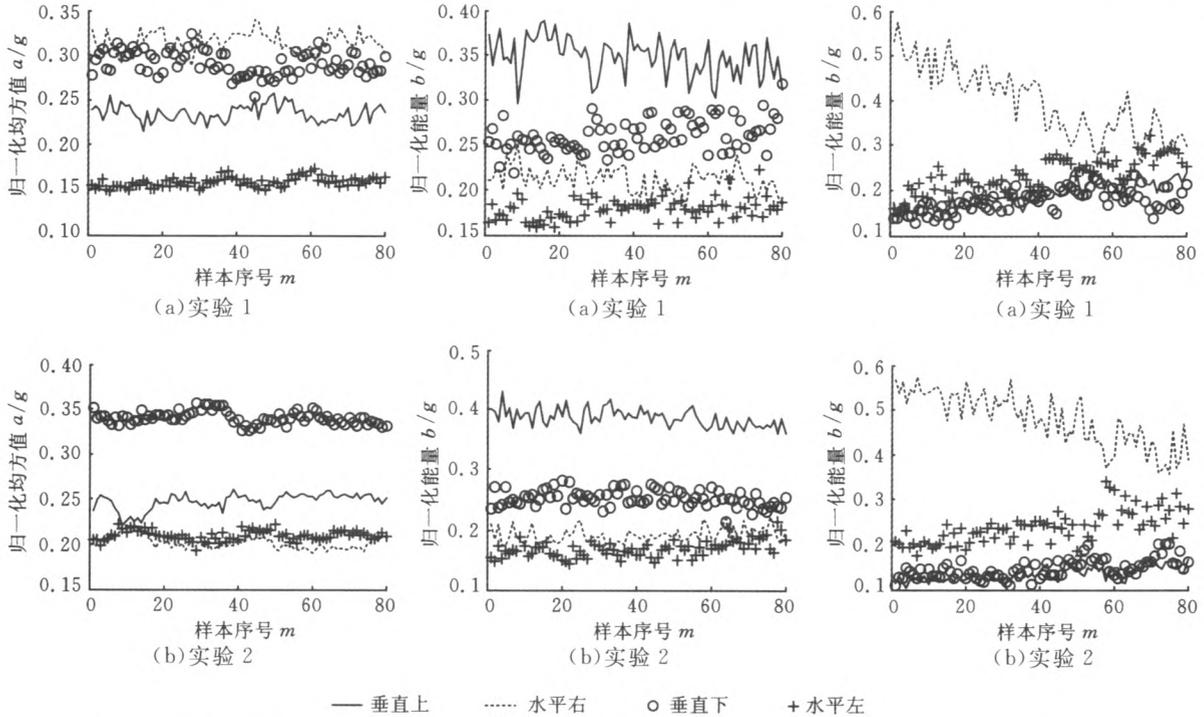


图 7 碰涡轮机匣归一化均方值(水平左)

图 8 碰涡轮机匣归一化能量(垂直上)

图 9 碰涡轮机匣归一化能量(水平右)

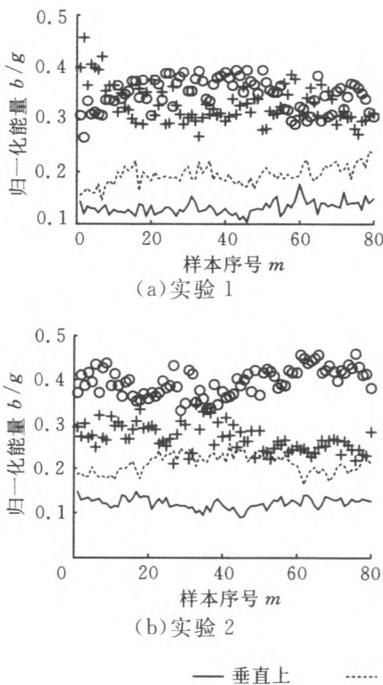


图 10 碰涡轮机匣归一化能量(垂直上)

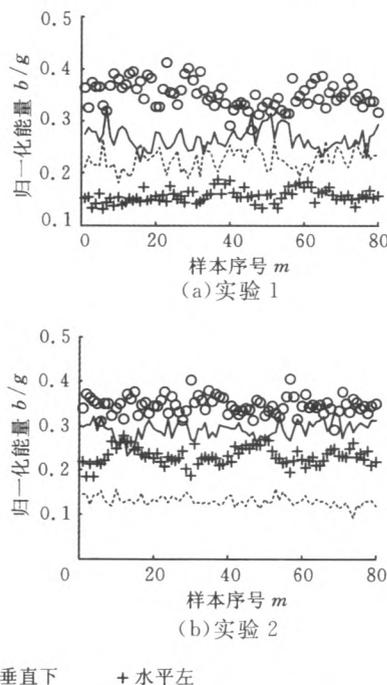


图 11 碰涡轮机匣归一化能量(水平左)

于涡轮机匣垂直上方加速度传感器的小波极大模归一化能量特征最大(图 8a);碰涡轮机匣水平右时,位于涡轮机匣水平右加速度传感器的小波极大模归一化能量特征最大(图 9a)。

这种较好的差异性及其一致性为碰摩部位的识别奠定了良好的基础。

#### 4 支持向量机的碰摩部位识别

为验证方法的有效性,采用 LIBSVM 软件包<sup>[19]</sup>中的支持向量机对转静碰摩部位进行识别。支持向量机的核函数为高斯核函数,对核函数的参数优化采用 10 重交叉验证法。

对 2 种实验方案均采用 4 种测试方法进行测试以进行对比验证,方法如下:将第  $i(i=I, II, III, IV)$  次实验的样本随机近似两等份,分别为训练样本、测试样本。将其余 3 次实验样本作为未知样本,用来测试。

每种测试方法均采用 10 重交叉验证法,根据训练样本对高斯核函数的参数进行优化,利用优化的参数值对训练样本、测试样本、未知样本进行测试,对 2 种实验方案的识别效果进行对比分析。

支持向量机的识别结果如表 2、表 3 所示。限于篇幅,对两实验方案的 4 种测试方法均随机连续测试 10 次,将 10 次识别率的平均值作为平均识别率。

表 2 机匣加速度信号均方值转静碰摩部位识别率

测试方法	训练样本数	测试样本数	未知样本数	训练样本识别率(%)	测试样本识别率(%)	未知样本识别率(%)			
						第 1 次实验	第 2 次实验	第 3 次实验	第 4 次实验
I	197	203	800	100	99.9	—	95.0	99.0	67.4
II	202	198	800	99.6	99.7	78.9	—	95.9	88.4
III	199	201	800	99.9	99.8	92.1	99.0	—	79.4
IV	201	199	800	100	100	74.5	97.8	89.9	—

表 3 机匣加速度信号小波极大模能量特征转静碰摩部位识别率

测试方法	训练样本数	测试样本数	未知样本数	训练样本识别率(%)	测试样本识别率(%)	未知样本识别率(%)			
						第 1 次实验	第 2 次实验	第 3 次实验	第 4 次实验
I	201	199	800	99.7	99.4	—	91.5	98.0	99.5
II	196	204	800	100	99.1	96.2	—	98.4	92.4
III	199	201	800	99.9	99.9	97.4	99.0	—	86.7
IV	198	202	800	99.8	99.9	87.0	98.7	98.7	—

从表 2 可以看出,直接提取机匣加速度信号的均方值,可以比较有效地进行转静碰摩部位的识别。4 次独立实验、4 种测试方案中,对训练样本、测试样本的识别率均很高,但对未知样本的识别率不是非常稳定。如以第 1 次实验为训练样

本,对未知样本第 4 次实验的 10 次测试平均识别率只有 67.4%,对未知样本第 3 次实验的 10 次测试平均识别率却达到了 99.0%。

从表 3 可以看出,提取机匣加速度信号小波极大模能量特征的方法,对训练样本、测试样本的识别效果较好,对未知样本的 10 次平均识别率均超过 85%。

分别将表 2 的测试方法 I~IV 与表 3 的测试方法 I~IV 的识别率对应进行比较分析可以发现:2 种实验方案对训练样本、测试样本的识别效果差距不大,均超过 99%。差别主要在对未知样本的识别效果上,如方案 1 测试方法 I 对未知样本第 4 次实验的 10 次平均识别率仅为 67.4%,方案 2 测试方法 I 对未知样本第 4 次实验的 10 次平均识别率却达到了 99.5%,识别率提高了 30%以上(同样测试方法下,2 种实验方案采用的原始加速度数据完全相同)。

对两种方案进行比较可以发现,小波极大模能量方法可以对转静碰摩部位进行更加有效的识别,且效果稳定。

#### 5 结论

(1)提出的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,可以非常方便地应用于工程实际。

(2)利用航空发动机转子试验器模拟了大量不同碰摩部位的实验样本,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,并对两种实验方案采用 4 种测试方法进行了对比分析。

(3)两种实验方案对训练样本、测试样本的识别效果相当,均达超过 99%;在使用同样原始数据的情况下,小波极大模能量特征方法对未知样本的识别率更高,识别效果更加理想、稳定,能更有效地对转子试验器的转静碰摩部位进行识别。

(4)小波极大模能量特征方法在不同转速下的有效性分析还需进一步研究。

#### 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 Atochastic Resonance[J]. Chinese 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, Cheng Hanbao. Method of Rotor Rub-impact Faults Diagnosis Based on Stator Vibration Signal[J]. Chinese 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]. Chinese 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 Univ. (Sci. & Tech.), 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 Beam Forming [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] 史东锋,鲍明,屈梁生. 小波包络分析在滚动轴承诊断中的应用[J]. 中国机械工程,2000,11(12):1382-1386.  
Shi Dongfeng, Bao Ming, Qu Liangsheng. Application of Wavelet Envelope Analysis to Rolling Bearing Diagnosis[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(12): 1382-1386.
- [14] 张邦基,于德介,杨胜. 基于小波变换与粗集理论的滚动轴承故障诊断[J]. 中国机械工程,2008,19(15):1793-1795,1831.  
Zhang Bangji, Yu Dejie, Yang Sheng. Roller Bearing Fault Diagnosis Approach Based on Wavelet Transform and Rough Set Theory[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(15): 1793-1795, 1831.
- [15] 王冬云,张文志. 基于小波包变换的滚动轴承故障诊断[J]. 中国机械工程,2012,23(3):295-299.  
Wang Dongyun, Zhang Wenzhi. Fault Diagnosis Study of Ball Bearing Based on Wavelet Packet Transform [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(3): 295-299.
- [16] 宋雪萍,李朝峰,马辉. 基于小波分析的旋转机械故障诊断技术及其试验研究[J]. 中国机械工程,2006,17(S2):328-331.  
Song Xueping, Li Chaofeng, Ma Hui, et al. Fault Diagnosis Technology and Experimental Research on Rotating Mechanical Based on the Wavelet Analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(S2): 328-331.
- [17] 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.
- [18] 高立新,殷海晨,张建宇,等. 第二代小波分析在轴承故障诊断中的应用[J]. 北京工业大学学报,2009,35(5):577-581.

# 基于磁场梯度测量的脉冲涡流检测关键技术研究

齐 勇 刘相彪 李 勇 陈振茂 李炜昕

西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室,西安,710049

**摘要:**提出一种新型脉冲涡流检测技术,将广泛应用于医学核磁共振成像、超导量子干涉仪的磁场梯度测量技术引入到脉冲涡流检测技术中,以提高脉冲涡流检测金属构件表面缺陷灵敏度。通过仿真和试验,着重分析了脉冲涡流检测表面裂纹的扫描结果。研究发现,磁场梯度信号较磁场差分信号具有更高的检测灵敏度,验证了所提出技术的有效性。

**关键词:**电磁无损检测;脉冲涡流检测;磁场梯度测量技术;表面裂纹

中图分类号: TG115.28

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.08.022

## Pulsed Eddy Current Testing Based on Gradient Magnetic Field Measurement

Qi Yong Liu Xiangbiao Li Yong Chen Zhenmao Li Weixin

State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

**Abstract:** This paper proposed a new PECT technique by introducing GMFM which was intensively used in magnetic resonance imaging (MRI) and superconducting quantum interference devices (SQUID) to PECT in an effort to enhance the PECT sensitivity to surface cracks. The scanning results regarding PECT evaluation of surface cracks were intensively analyzed via simulations and experiments. It is found that the GMFM signals have higher sensitivity than that of the conventional PECT differential signals in evaluation of surface cracks, which verifies the validity of the proposed method.

**Key words:** electromagnetic nondestructive testing and evaluation; pulsed eddy current testing (PECT); gradient magnetic field measurement (GMFM); surface crack

## 0 引言

脉冲涡流检测技术<sup>[1-3]</sup> (pulsed eddy current testing, PECT) 是近年来发展起来的一种电磁无损检测新技术。脉冲涡流检测通常采用方波电流信号作为激励,因此所拾取的暂态磁场信号具有丰富的频谱信息,可在一次激励下获取缺陷不同深度下的信息,检测效率高,广泛应用于飞机机翼、石油化工检测等领域。脉冲涡流检测的技术原理为:当金属试件靠近激励线圈所激发的交变磁场时,其内部会感应暂态涡流,随激励时间的推移,涡流在金属试件中逐步扩散,当试件内部存在缺

陷时,缺陷将扰动涡流,影响其分布及强度,导致磁感应强度  $B$  随之改变。因此,磁场传感器所拾取到的磁场信号中包含着大量缺陷信息,对信号的特征进行提取和分析可实现对所检缺陷的定量评估。

传统的涡流/脉冲涡流检测探头一般采用磁场传感器直接测量磁场信号。周德强等<sup>[4]</sup>同时使用峰值、峰值时间,以及主成分分析方法实现了多种缺陷的定量和识别。杨宾峰等<sup>[5]</sup>采用矩形线圈对金属试件表面裂纹的长度和深度定量评估以及缺陷的分类识别进行了研究。Tian 等<sup>[6]</sup>提出采用时间上升点方法实现对缺陷的检测和分类识别。

收稿日期:2012-07-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51007069/E070104)

Gao Lixin, Yin Haichen, Zhang Jianyu, et al. An Application of the Second Generation of Wavelet Transform in the Fault Diagnosis of Rolling Bearings[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(5): 577-581.

[19] Chang Chih-Chung, Lin Chih-Jen. LIBSVM: A Library for Support Vector Machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2(3): 10.1145/1961189.1961199.

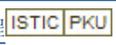
(编辑 张 洋)

**作者简介:**于明月,女,1978年生。南京航空航天大学民航学院博士研究生。主要研究方向为信号处理、微弱信号检测、故障诊断。发表论文8篇。陈 果,男,1972年生。南京航空航天大学民航学院教授、博士研究生导师。姜广义,男,1975年生。沈阳航空发动机设计研究所高级工程师。李成刚,男,1972年生。沈阳航空发动机设计研究所高级工程师。冯国全,男,1967年生。沈阳航空发动机设计研究所研究员。王德友,男,1955年生。沈阳航空发动机设计研究所研究员。

# 基于机匣加速度信号的航空发动机转静碰摩部位识别

作者: [于明月](#), [陈果](#), [姜广义](#), [李成刚](#), [冯国全](#), [王德友](#), [Yu Mingyue](#), [Chen Guo](#), [Jiang Guangyi](#),  
[Li Chenggang](#), [Feng Guoquan](#), [Wang Deyou](#)

作者单位: [于明月, 陈果, Yu Mingyue, Chen Guo](#)(南京航空航天大学, 南京, 210016), [姜广义, 李成刚, 冯国全, 王德友](#),  
[Jiang Guangyi, Li Chenggang, Feng Guoquan, Wang Deyou](#)(沈阳航空发动机设计研究所, 沈阳, 110015)

刊名: [中国机械工程](#) 

英文刊名: [China Mechanical Engineering](#)

年, 卷(期): 2014, 25(8)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_zgjxgc201408021.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgjxgc201408021.aspx)