

文章编号:1000-6893(2010)06-1156-08

# 碰摩故障静电监测方法及模拟实验

李耀华, 左洪福

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

## Method for Rub Fault Detection Based on Electrostatic Technique: Model and Simulated Experiments

Li Yaohua, Zuo Hongfu

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**摘要:** 针对航空发动机叶片碰摩故障难以实现在线监测的问题, 展开基于静电感应原理的碰摩故障监测新方法研究。分析了碰摩颗粒产生与荷电机理, 以静电传感器理论和点电荷感应信号特征为依据, 建立了周期碰摩静电感应理论模型。研究表明: 周期碰摩在静电传感器上的输出是一系列以碰摩频率为间隔的随频率增大幅值迅速衰减的周期离散谱线。为了验证模型的正确性, 利用自行研制的静电传感器, 采用模拟碰摩的方式进行了两组实验。第1组实验结果表明传感器可以监测到模拟碰摩故障产生的带电颗粒, 碰摩阶段的信号活动率水平明显增大, 但事件率没有出现明显的变化; 第2组实验在信号频域出现了非常明显的特征频率及其二倍频, 且二倍幅值随频率增大迅速衰减, 证明了模型的有效性。

**关键词:** 航空发动机; 碰摩故障; 静电; 模型; 实验

**中图分类号:** V231.25 **文献标识码:** A

**Abstract:** A new method for rub fault detection based on electrostatic technique is discussed for online monitoring of blade rub in aeroengine. The generation process and charging mechanism of blade rub debris are first analyzed, and then the electrostatic probe theory and characteristics of electrostatic induction of a point charge are presented. After that a periodical rub detection model is established. The model shows that a series of characteristic frequencies which decay greatly over frequency will appear in the sensor output signal when periodical rub occurs. Two simulated rub experiments are performed with an electrostatic sensor. The result of the first experiment shows that rub debris could be detected by the sensor, while the activity level (AL) significantly increases and the event rate (ER) does not change during the rub. The second experiment shows that the characteristic frequency and its double frequency in the signal and the amplitude decay greatly over frequency. Thus, the validity of the periodical rub detection model is proved.

**Key words:** aeroengine; rub fault; electrostatics; model; experiment

叶片与机匣碰摩是航空发动机常见气路机械故障, 对飞行安全存在较大的影响。碰摩故障会改变转子系统的力平衡和动刚度, 引起振动加剧, 使叶片寿命降低, 其次造成间隙增大、效率降低, 最终使发动机性能下降。然而由于减小叶尖间隙能够有效提高发动机效率, 制造商将航空发动机的叶尖间隙做的越来越小, 使得碰摩故障更容易发生。

叶片与机匣碰摩属于典型的旋转机械故障, 目前对该问题的研究主要集中在基于转子动力学分析的故障建模和故障辨识方面, 能够在一定程

度上揭示碰摩的故障特征, 但由于航空发动机的结构复杂, 是一个无限自由度的振动系统, 无论用解析法或实验法都难以彻底研究其振动特性, 实现碰摩故障的在线监测与诊断仍然非常困难, 对碰摩故障的早期预警则更加困难。

航空发动机气路颗粒静电监测技术是一种新型监测技术。该技术是基于静电感应的原理, 利用静电传感器对气路静电荷整体水平进行监测, 以达到气路部件早期故障监测和故障预警的目的。气路典型的故障(叶片碰摩、导向叶片烧蚀掉块、燃烧室烧蚀)在其发生的最初阶段便会产生颗粒, 气路颗粒静电监测技术能够在故障颗粒刚刚产生时监测到异常, 因此能够提供气路早期故障预警。其他的发动机监测技术, 如振动监测和性能监控则只能对原始故障产生的征

收稿日期: 2009-06-03; 修订日期: 2010-03-05

基金项目: 国家自然科学基金与中国民航联合资助基金重点项目(60939003)

通讯作者: 李耀华 E-mail: liyaohua@nuaa.edu.cn

兆进行监测。例如,在涡轮叶片碰摩发生时,只有损失了足够多的材料导致不平衡,才能因振动加剧而监测到异常;对性能监控而言,只有叶尖间隙已经影响到所监控的性能参数(温度、压力等),才能监测到故障。气路颗粒静电在线监测技术能够实现早期故障预警和故障跟踪,对于未来航空器的健康管理理念的实施具有重要的意义。

文献[1]在一个发动机加速验证项目中对碰摩类故障的静电监测方法展开实验研究,研究结果表明碰摩故障首先会造成静电活动率水平(Activity Level, AL)增大,其次在信号中出现轴频成分。文献[2]在发动机低压涡轮上模拟了碰摩故障,尾气静电监测显示碰摩在发动机加速阶段状态突变时发生,活动率水平超出正常范围。文献[3]对轴弯曲造成的碰摩故障进行研究,研究表明活动率水平出现峰值,并且信号中轴频成分也有增大。

由于静电监测技术被美国列为军事技术限制出口,目前国内尚处于实验探索阶段<sup>[4-6]</sup>。本文建立了周期碰摩静电感应理论模型,并进行了两组模拟实验,分别验证了静电监测碰摩颗粒的可行性和利用轴频参数识别周期碰摩故障的可能性。

## 1 气路静电监测原理

气路静电监测是基于静电感应原理,如图1所示。该技术通过监测发动机尾气中的静电荷水平来判断某些早期故障。正常发动机尾气中的静电荷水平随着发动机工况的变化而变化,在一个正常范围内波动。当气路中出现某些故障时,因故障产生的颗粒增多造成静电荷水平超出该范围,被传感器监测到。

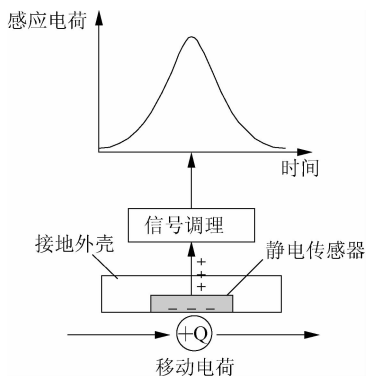


图1 静电监测原理

Fig. 1 Principle of electrostatic monitoring

## 2 叶片碰摩颗粒产生与荷电机理

### 2.1 碰摩颗粒产生机理

从摩擦学的角度来看,叶片与机匣碰摩属于典型的高速干摩擦过程,即摩擦副之间没有任何润滑剂或保护膜,纯固体高速接触摩擦形式<sup>[7]</sup>;叶片划过机匣表面的速度超过 100 m/s<sup>[8]</sup>,产生极高的表面温度(可达 700~800 °C 以上)、造成材料的过量磨损,并产生大量的磨粒<sup>[8]</sup>,甚至叶片损伤<sup>[9]</sup>。

干摩擦的磨损量高于润滑条件下几个数量级,材料在高速干摩擦条件下的磨损率可以近似用 Archard 磨损定律表示<sup>[10]</sup>:

$$W = \frac{kPV}{H} \quad (1)$$

式中:  $W$  为磨损率;  $k$  为磨损系数;  $P$  为载荷;  $V$  为滑动速度;  $H$  为摩擦副中较软材料的硬度。

从式(1)可以看出,对于特定的叶片-机匣摩擦副,碰摩时的磨损率与载荷、滑动速度成正比,与较软材料的硬度成反比。

碰摩会产生粒径差别很大的颗粒产物。小颗粒的产生通常是由于叶片和机匣间渐进的接触摩擦,而大颗粒产物则是由于叶片机匣间严重的碰摩,在剧烈的碰撞和冲击下产生。叶片与机匣碰摩产生的颗粒产物粒径通常在 40  $\mu\text{m}$  以上。

### 2.2 碰摩颗粒荷电机理

碰摩颗粒带荷电的原因非常复杂。磨粒在产生时就已带有静电荷(本文的实验也证明了这一点),与高速气流和其他磨粒摩擦作用下会得到或失去电荷,经过涡轮段高温环境时会继续吸附电荷,直到最后经过尾喷管时被传感器监测到。在磨粒产生的初期,荷电机理主要包括破裂起电和摩擦起电,荷电量与碰摩摩擦副的材料特性、碰摩时的速度、压力和温度等因素有关。文献[11]认为碰摩颗粒产物上的静电荷与颗粒产生时表面形状的改变或原子键的断裂有关。磨粒产生后,会在气路高速气流的带动下与气流剧烈摩擦而起电<sup>[12]</sup>。除此之外,燃烧室中的热电离过程以及电荷吸附也是导致碰摩颗粒产物带荷电的主要原因<sup>[13]</sup>。

## 3 静电监测特征参数

### 3.1 活动率水平

活动率水平用于度量信号中的高频成分,并

表征气路中小颗粒的数量。在碰摩故障发生时,活动率水平会超出正常范围。活动率水平的定义为<sup>[14]</sup>

$$AL(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C_i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_{in}^2} \quad (2)$$

式中: $C_i$ 为经带通滤波的感应电荷信号; $T$ 为所取时间长度,通常取为1 s,即每1 s长度计算一个AL点; $N$ 为 $C_i(t)$ 经离散采样后在 $T$ 内的采样点数; $C_{in}$ 为 $C_i(t)$ 经离散采样后的感应电荷信号。

### 3.2 事件率

事件率(Event Rate, ER)的定义为

$$ER(t) = \frac{M}{N} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $M$ 为每一个AL点对应的静电信号段中超过AL值 $K$ 倍的点的个数,本文中 $K=2$ ;  $N$ 为该信号段中总采样数。事件率是以百分比表示的,按照静电信号的正负分别计算为正事件率(Positive Event Rate, PER)和负事件率(Negative Event Rate, NER)。

### 3.3 轴频分析

轴频分析(Shaft Order Analysis, SOA)用于分析颗粒的产生是否与轴的转速有关,也用于识别与轴旋转频率相关的故障(如叶尖碰摩)。

## 4 叶片碰摩故障的静电感应信号特征

从目前国外的相关研究来看,叶片碰摩会造成静电监测信号两方面的异常:一是活动率水平增大;二是出现轴频成分<sup>[1]</sup>。由于其他故障类型(例如燃烧效率下降)也可能造成活动率水平增大,所以轴频分析是静电方法检测碰摩故障的关键。目前国外的研究文献中虽然给出了一些碰摩故障的轴频检测结果,但并没有分析过静电感应信号中出现轴频成分的原因,更没有给出相应的理论模型。

本节从静电传感器理论出发,以直线运动点电荷静电感应信号为基础,结合转子动力学中周期性碰摩的结论,推导出周期碰摩静电感应理论模型。该理论模型是受滚动轴承单点损伤故障诊断模型的启发而来<sup>[15]</sup>。

### 4.1 静电传感器理论

设 $q$ 为一点电荷,以 $q$ 为中心, $x$ 为半径做一

闭合曲面 $s$ ,根据高斯定理,通过 $s$ 的电场强度

$$E = \frac{q}{\epsilon 4\pi x^2} \quad (4)$$

式中: $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ,  $\epsilon$ 为 $s$ 曲面内部的介电常数, $\epsilon_0$ 为真空中的介电常数, $\epsilon_r$ 为实际介质中的相对介电常数。设传感器上感应电荷量为 $Q$ ,传感器感应面积为 $A$ ,由于点电荷发出的电场线仅有一部分收敛于传感器表面,沿着该表面做一高斯面,其电通量可近似表达为

$$AE_A \approx \frac{Q}{\epsilon} \quad (5)$$

式中: $E_A$ 为 $A$ 区域的电场强度,在传感器表面近似有 $E_A = E$ 。由式(4)和式(5)可得

$$Q \approx \frac{Aq}{x^2} \quad (6)$$

即静电传感器表面的感应电荷量 $Q$ 正比于施感电荷 $q$ ,反比于二者之间距离的平方。

### 4.2 直线运动点电荷静电感应信号

设颗粒在传感器探极上的感应电荷量为 $Q(t)$ ,输出电压的测量可由图2所示的电路表示。图中: $R$ 为测量回路的等效电阻; $C$ 为测量回路的等效电容。

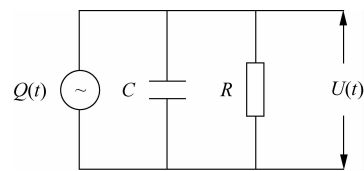


图2 静电测量等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of electrostatic monitoring

假设电路的初始状态为零,则输出电压的拉普拉斯变换 $U(s)$ 和感应电荷的拉普拉斯变换 $Q(s)$ 之间的关系为

$$U(s) = RsQ(s)/(RCs + 1) \quad (7)$$

当 $RCs \ll 1$ 时,测量模型等效为

$$U(t) = RQ'(t) \quad (8)$$

即传感器的输出信号与探极上感应电荷的一阶导数成正比,输出信号表示的是感应电荷变化率。根据式(6)和式(8)可计算得出点电荷以恒速做直线运动经过传感器时的输出信号及其频谱,如图3(a)和图3(b)所示。

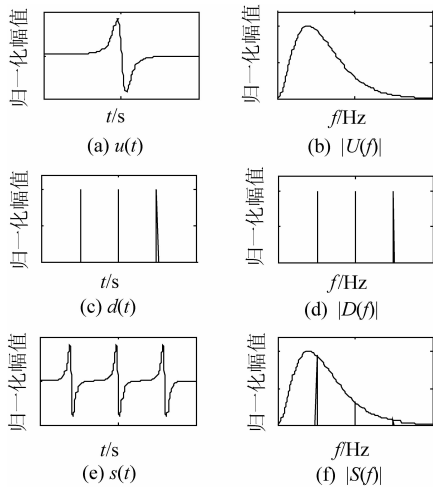


图 3 周期碰摩静电感应理论模型

Fig. 3 Periodical rub fault detection model based on electrostatic technique

### 4.3 周期碰摩静电感应理论模型

假设将叶片与机匣间一次接触-分离的碰摩过程产生的颗粒视为点电荷, 将引起传感器输出一个如图 3(a) 所示的信号。由于碰摩通常是周期性的, 磨损产物将引起周期性的静电感应脉冲, 若假设每次碰摩产生的颗粒荷电量相同, 并以相同的速度和方向经过传感器, 碰摩引起的传感器输出信号可表示为

$$s(t) = u(t + nT_r) \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

式中:  $u(t)$  为输出电压;  $T_r = 1/f_r$  为碰摩周期;  $f_r$  为碰摩频率, 即  $u(t)$  在信号中以等间隔  $T_r$  周期性出现。如图 3(e) 所示。

令周期脉冲函数为(见图 3(c))

$$d(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_0 \delta(t - kT_r) \quad (k \in \mathbf{Z}) \quad (10)$$

式中:  $d_0$  为脉冲强度;  $\delta(t)$  为脉冲函数。根据卷积定理,  $s(t)$  可看做是由  $u(t)$  函数和周期脉冲函数  $d(t)$  卷积的结果, 即在每个周期脉冲处重构  $u(t)$ 。

$$s(t) = u(t) * d(t) \quad (11)$$

式中:  $*$  表示卷积运算。设  $u(t)$ 、 $d(t)$  和  $s(t)$  函数的频谱函数分别为  $U(f)$ 、 $D(f)$  和  $S(f)$ , 根据卷积定理, 时域卷积等于频域乘积:

$$|S(f)| = |U(f) \cdot D(f)| \quad (12)$$

周期脉冲函数的频谱依然是一系列以脉冲频率为间隔的周期脉冲(见图 3(d)),  $U(f)$  如图 3(b) 所示, 二者相乘的结果如图 3(f) 所示。周期碰摩在静电传感器上的输出是一系列以碰摩频率

$f_r$  为间隔的随频率增大幅值迅速衰减的周期离散谱线。因为碰摩频率与转子转速有关, 所以当传感器输出信号频域中出现具有如图 3(f) 所示特征的谱峰时, 表明可能发生了碰摩。

## 5 碰摩模拟实验之一: 砂轮实验

严重的碰摩故障在叶片与机匣之间发生, 以发动机涡轮碰摩为例。涡轮叶片由于可能承受外来物冲击和较高的制造成本, 强度和硬度通常较高, 常用的材料为镍基高温合金, 硬度通常在 40HRC 以上。涡轮机匣常用的材料之一包括铁基高温合金, 硬度在 30HRC 左右。因此, 在这样的叶片-机匣摩擦副下的磨损产物主要为铁基镍合金颗粒。

考虑到铁基高温合金中铁的含量非常高(以 GH34 铁基合金为例, 其中铁的含量超过 95%), 而颗粒的荷电特性主要由颗粒材料决定, 所以本节采用普通碳素钢作为替代物, 用砂轮碰摩的方式进行模拟实验, 验证静电传感器监测碰摩产物的可行性。

### 5.1 实验环境

建立实验环境如图 4 所示。在不锈钢管道的一端安装中压风机、固定的碰摩材料以及碰摩砂轮。碰摩材料为 Q235A 碳素钢, 碳素钢与砂轮碰摩产生磨粒, 以模拟叶片与机匣碰摩产生的颗粒。在碰摩发生位置后侧安装中压风机, 用于产生高速气流, 在管道的另一端安装轴流风机, 磨粒在高速气流带动下经过管道。采用自行研制的静电传感器进行监测, 传感器探针直径为 8 mm, 长度为 250 mm, 传感器装于管道侧壁, 距碰摩点 0.7 m, 传感器探针上套有陶瓷管, 以避免颗粒与探针之间发生接触。采样频率为 2 000 Hz。

设颗粒在传感器探极上的感应电荷量为  $q(t)$ ,

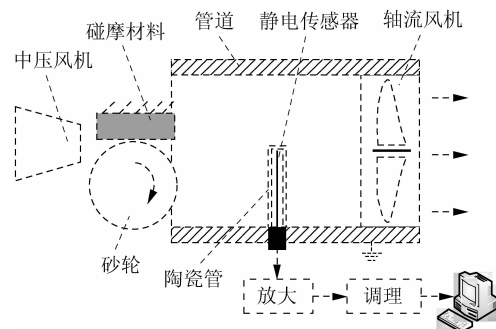


图 4 叶片碰摩故障模拟实验环境

Fig. 4 Test rig for simulated blade rub

传感器输出电压为  $u(t)$ 。静电传感器如图 5 所示。

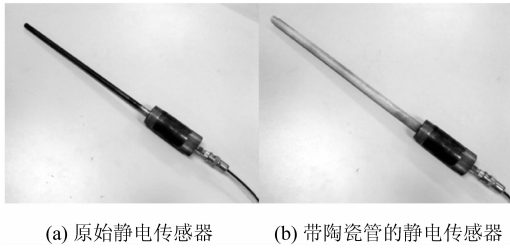


图 5 静电传感器

Fig. 5 Electrostatic sensors

本文模拟的是叶片与机匣间发生的碰摩故障,将砂轮碰摩产生的颗粒收集后,在显微镜下进行观察,典型磨粒放大图像如图 6 所示。采用广州光学仪器厂的透反射双光源显微镜 L2020A 作为放大设备,物镜放大倍数为 10 倍,采用大恒图像公司的 DH-HV3102UC 数字摄像机作为显微图像的采集设备。碰摩产生的典型颗粒等效直径约  $126 \mu\text{m}$ 。

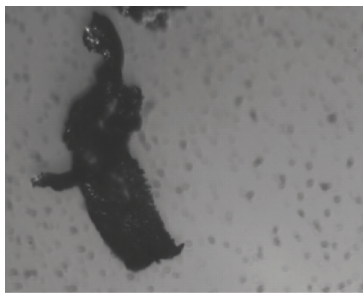
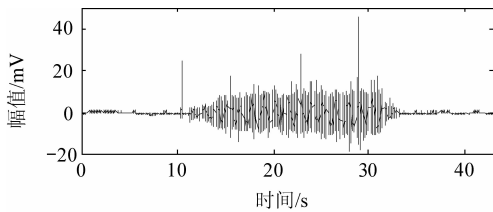


图 6 典型碰摩颗粒显微图像

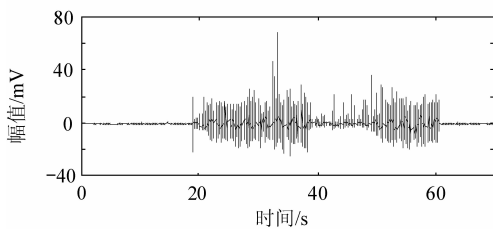
Fig. 6 Micrograph of typical rub debris

### 5.2 砂轮实验结果

在常温环境下进行两组砂轮碰摩实验。测得常温碰摩静电监测时域信号,如图 7 所示。可以明



(a) 第1组碰摩实验信号



(b) 第2组碰摩实验信号

图 7 两组碰摩实验信号

Fig. 7 Rub experimental signal of two groups

显看到,在碰摩发生的时间内,信号幅值出现了明显的变化。第 2 组实验进行了两次碰摩,间隔 10 s,如图 7(b)所示。

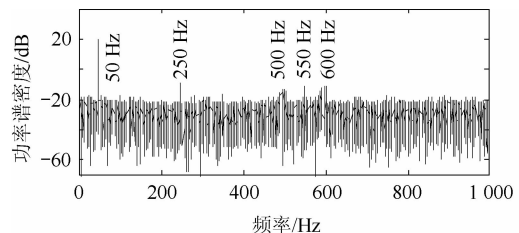
### 5.3 时域统计特征分析

取图 7(a)所示信号无碰摩段和碰摩段信号各 5 s,分别进行时域统计特征分析,结果表明碰摩期间信号的标准方差值从 0.203 6 增大至 3.901 5,极差从 1.281 7 增大至 40.466 3,表明碰摩阶段的静电感应信号偏离其平均值的程度加剧,信号幅值的变化范围增大。

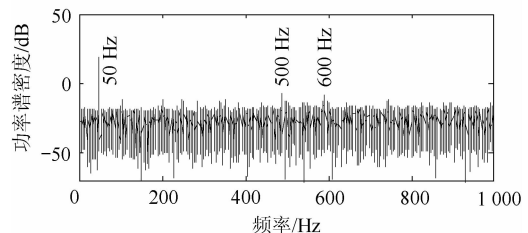
碰摩实验证明:碰摩颗粒产生时是带电荷的。碰摩使静电感应信号的标准方差和极差增大。

### 5.4 频域分析

对图 7 的实验结果做频谱分析,功率谱密度如图 8 所示。图中较为明显的几个谱峰峰值均为 50 Hz 或其倍频,可以判断这些峰值均为市电电源以及电机引入的工频干扰及其倍频。



(a) 第1组碰摩信号频谱



(b) 第2组碰摩信号频谱

图 8 两组碰摩信号频谱

Fig. 8 Frequency domain of rub experimental signal of two groups

### 5.5 时频分析

对两组碰摩实验信号分别做短时傅里叶变换。矩形窗口长度为 2 560,窗口间交迭长度为 1 280,变换点为 2 560。得到实验信号时频分布如图 9 所示。为了方便对照,将原始实验信号与时频图放在一起对比,可以看到,在碰摩发生的时间内,频域出现了明显的变化,频谱幅值明显增大。

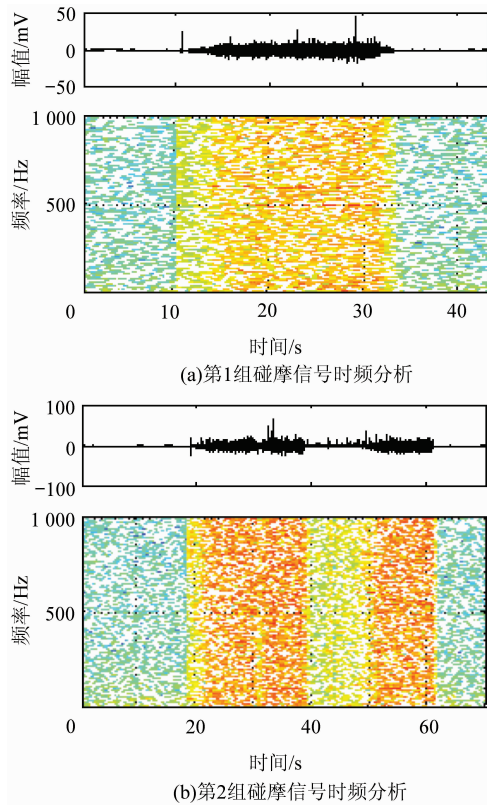


图 9 两组碰摩信号时频分析  
Fig. 9 Time-frequency analysis of rub test signal of two groups

### 5.6 活动率水平和事件率分析

由于实验测得的是电压信号,在计算 AL 前需要对信号做积分运算,积分间隔为 1 s。AL 参数用于衡量信号中的高频成份,通常需要在计算前对信号做带通滤波,本文采用小波方法对信号进行滤波。利用小波的优良滤波特性,对信号进行一层分解后单支重构,得到信号低频部分、高频部分和母小波。对高频部分做积分后计算 AL、PER 和 NER 参数变化,如图 10 和图 11 所示。

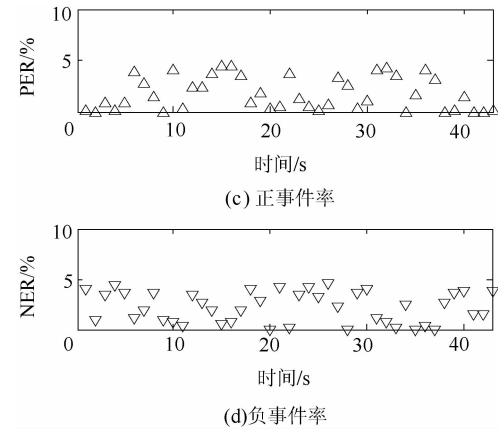
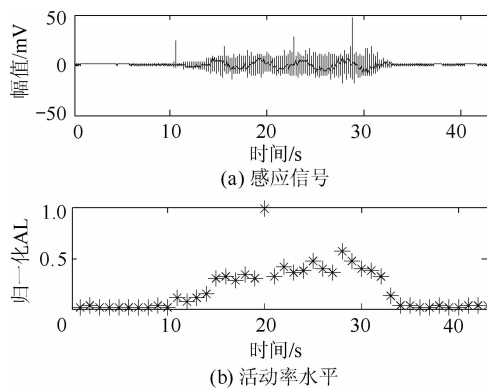


图 10 第 1 组信号活动率水平和正、负事件率变化曲线  
Fig. 10 AL, PER, NER curves of rub signal of first group

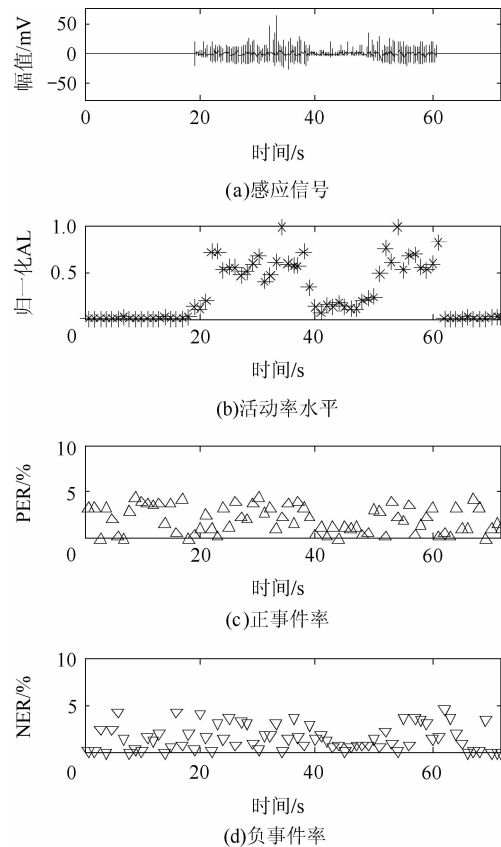


图 11 第 2 组信号活动率水平和正、负事件率变化曲线  
Fig. 11 AL, PER, NER curves of rub signal of second group

从图 10 和图 11 可以看到,感应电荷信号的 AL 在无碰摩发生时相对比较平稳,在模拟碰摩时间段内参数出现了非常明显的变化。图 11 中,两次碰摩间隔时间内,AL 参数恢复到了无碰摩时的水平,碰摩停止时又恢复至接近于零。在两次碰摩过程中 PER 和 NER 没有出现明显的异常。

## 6 碰摩实验之二:轴频实验

### 6.1 实验条件

由于在转子实验台上很难实现模拟碰摩并周期性产生磨粒,采用如图12所示的简化方案进行实验,目的是证明利用轴频参数识别周期碰摩的可能性。将一根硬铁丝的中点处固定在一部调速电机的轴上,在铁丝的两端各固定一小块相同大小的泡沫塑料,泡沫块极易带电,用于模拟点电荷。将静电传感器置于电机下方,探极与电机轴平行。泡沫块最低点距离探极约10 mm,铁丝长度约1 m,可以近似认为泡沫块在其最低点以直线运动经过探极的敏感空间,而感应电荷量与距离的平方成反比,因此位于远端的泡沫块在探极上感应出的电荷可以忽略不计。这样,电机转速恒定时,带动泡沫塑料以相同的速度和方向掠过探极附近,模拟周期性点电荷,采样频率1 000 Hz。

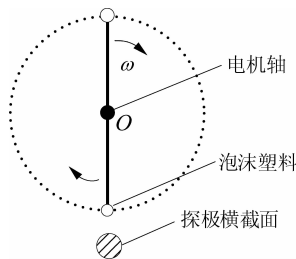


图12 轴频验证实验方案

Fig. 12 Experiment scheme to prove periodical rub detecting method

### 6.2 实验结果及分析

图13是电机以恒速约2 600 r/min旋转时监测到的静电感应信号。以 $r$ 表示转速,碰摩频率为

$$f_r = \frac{2r}{60} \quad (13)$$

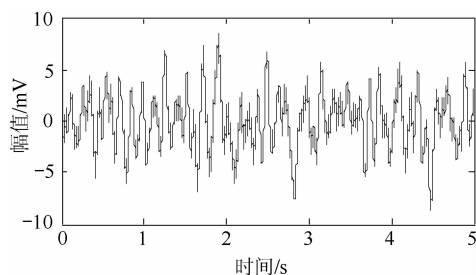


图13 轴频验证实验信号

Fig. 13 Output signal of experiment to prove periodical rub detecting method

式(13)中乘以2是因为每旋转一周带电泡沫块两次经过探极附近。计算碰摩频率为86.7 Hz。从图中并不能看出明显的特征。

图14是信号的功率谱密度。图中出现了4个明显的谱峰,峰值分别为: $f_1 = 50.0$  Hz,  $f_2 = 88.0$  Hz,  $f_3 = 100.0$  Hz,  $f_4 = 176.2$  Hz。其中 $f_1$ 和 $f_3$ 很有可能为电源引入的工频干扰,而 $f_2$ 频率88.0 Hz与碰摩频率86.7 Hz非常接近,考虑到实验误差,可以确定 $f_2$ 就是希望得到的故障特征频率,而 $f_4$ 则对应着碰摩频率的二倍频,并且幅值迅速衰减,符合本文第4节中周期碰摩静电感应理论模型,也证明了利用轴频参数识别周期碰摩故障的可能性。

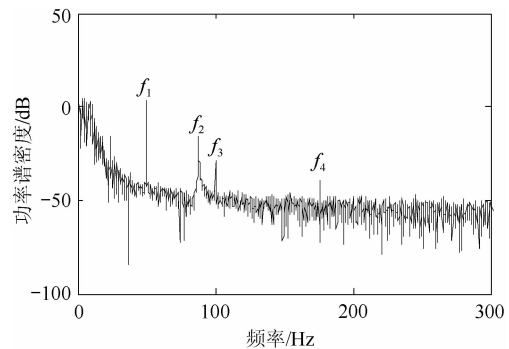


图14 轴频验证实验信号频谱

Fig. 14 Frequency domain of signal in Fig. 13

## 7 结论

在静电传感器理论和点电荷静电感应特征的基础上建立了周期碰摩静电感应理论模型。为验证模型,进行了两组模拟碰摩实验。第1组实验结果表明碰摩产生的颗粒是带静电的,产生的信号电压值在正负值之间迅速振荡,符合静电传感器理论原理。碰摩阶段的时域统计特征、时频域以及活动率水平参数的变化明显。第2组实验的输出信号中出现了碰摩频率及其二倍频,并且二倍频的幅值随着频率的增大迅速衰减,符合模型的输出结果。证明了周期碰摩静电感应理论模型的有效性。

### 参考文献

- [1] Powrie H E G, Mcnicholas K. Gas path condition monitoring during accelerated mission testing of a demonstrator engine[R]. AIAA-1997-2904, 1997.
- [2] Powrie H E G, Fisher C E. Engine health monitoring: towards total prognostics[C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings, 1999.
- [3] Fisher C E. Gas path debris monitoring-a 21st century PHM tool[C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings.

- 2000.
- [4] 文振华, 左洪福, 李耀华. 气路颗粒静电监测技术及实验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2321-2326.  
Wen Zhenhua, Zuo Hongfu, Li Yaohua. Gas path debris electrostatic monitoring technology and experiment [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2321-2326. (in Chinese)
- [5] 文振华, 左洪福, 王华, 等. 航空发动机气路静电监测传感器特性[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(11): 28-31.  
We Zhenhua, Zuo Hongfu, Wang Hua, et al. Characters of sensor for aero-engine gas path electrostatic monitoring [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(11): 28-31. (in Chinese)
- [6] 李耀华, 左洪福, 文振华. 航空发动机气路颗粒静电监测技术模拟实验[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 604-608.  
Li Yaohua, Zuo Hongfu, Wen Zhenhua. Simulated experiment of aircraft engine gas path debris monitoring technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 604-608. (in Chinese)
- [7] 张永振. 材料的干摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
Zhang Yongzhen. Dry tribology of materials[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [8] Chupp R E, Ghasripor F, Moore G D, et al. Applying abradable seals to industrial gas turbines [C] // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Proulion Conference and Exhibit. 2002.
- [9] Kennedy F E Jr. Thermomechanical effects in high-speed seal rubs[R]. NASA-CR-180418, 1987.
- [10] Zhao H, Barber G C, Liu J. Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current [J]. Wear, 2001, 249(5-6): 409-414.
- [11] Novis A, Powrie H E G. PHM sensor implementation in the real world-a status report[C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings. 2006.
- [12] Morris S, Wood R J K, Harvey T J, et al. Use of electrostatic charge monitoring for early detection of adhesive wear in oil lubricated contacts[J]. Journal of Tribology, 2002, 124(2): 288-296.
- [13] Sorokin A, Arnold F. Electrically charged small soot particles in the exhaust of an aircraft gas-turbine engine combustor: comparison of model and experiment[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(17): 2611-2618.
- [14] Lapini G L, Zippo M, Tirone G. The use of electrostatic charge measurements as an earl warning of distress in heavy-duty gas turbines [C] // ASME Turbo Expo Proceedings. 2001.
- [15] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断理论·方法·系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.  
Mei Hongbin. Vibration monitoring and diagnosis theory of rolling element bearing [M]. Beijing: China Machine Press, 1995. (in Chinese)

#### 作者简介:

李耀华(1980—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 发动机状态监测与故障诊断。

Tel: 025-84895772-807

E-mail: liyaohua@nuaa.edu.cn

左洪福(1959—) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 可靠性工程、维修理论、故障诊断与监控等。

Tel: 025-84893550

E-mail: rms@nuaa.edu.cn

(编辑: 赵利)