

基于机匣应变信号的航空发动机转静碰摩部位识别

于明月¹, 陈果^{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, 江苏 南京 210016

2. 中航工业沈阳发动机设计研究所, 辽宁 沈阳 110015

摘要: 为有效识别航空发动机转静碰摩部位, 提出基于机匣应变信号的航空发动机转静碰摩部位识别技术。以应变片为敏感元件, 采用沿机匣轴向、周向粘贴应变片两种实验方案, 利用航空发动机转子试验器模拟大量不同碰摩部位的样本, 采集航空发动机转子试验器机匣上的应变信号, 提取应变的均值特征, 利用支持向量机, 识别不同碰摩位置。结果表明: 沿机匣周向的应变均值特征可有效识别转静碰摩部位, 且鲁棒性较好, 且仅需在机匣的 4 个位置粘贴应变片即可对 4 个不同碰摩部位达到 100% 的识别率。沿机匣轴向的应变均值特征也可识别不同的碰摩部位, 但识别效果不如沿机匣周向效果理想。

关键词: 航空发动机; 碰摩部位识别; 均值特征; 机匣应变; 支持向量机

中图分类号: V2 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2013)06-1474-11

航空发动机转静间碰摩是一种严重故障, 会导致转静间隙增大、轴承磨损、叶片折断直至机械失效。有效识别碰摩部位避免由于碰摩故障而造成的严重事故, 不但具有很大的经济效益, 同时对于发现碰摩原因和改进设计, 提高航空发动机的工作安全性, 防止重大事故的发生, 有着重要的意义。目前对碰摩部位的识别主要有基于声发射技术的方法^[1-4], 基于有限元模型的方法^[5-8], 基于定子振动信号的方法^[9]。但这些方法由于技术不成熟, 未考虑航空发动机的实际情况, 因而难于应用于航空发动机转静碰摩部位的识别之中。

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。

应变片尺寸小、重量轻、安装方便, 不会影响构件的应力状态, 可在各种复杂环境下测量。如高温、低温、高速旋转以及强磁场等环境测量, 因此广泛用于航空发动机的测试技术中。由于现代航空发动机普遍采用薄壁结构, 在碰摩作用下产生一定的变形, 因此本文提出基于应变的测试方法来进行航空发动机的碰摩部位识别。

考虑到实际航空发动机转静碰摩点在机匣整个圆周上均有可能发生, 因此, 本文设定了 4 个均

收稿日期: 2012-05-29; 退修日期: 2012-09-05; 录用日期: 2013-01-24; 网络出版时间: 2013-02-19 14:36

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130219.1436.004.html

基金项目: 国家自然科学基金(61179057); 国家安全重大基础研究项目(613139)

* 通讯作者. Tel.: 025-84891850 E-mail: cgzyx@263.net

引用格式: Yu M Y, Chen G, Liu Y Q, et al. Aero-engine rotor-stator rubbing position identification based on casing strain signals. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(6): 1474-1484. 于明月, 陈果, 刘永泉, 等. 基于机匣应变信号的航空发动机转静碰摩部位识别. 航空学报, 2013, 34(6): 1474-1484.

匀分布的碰摩点和 4 个均匀分布的应变测试点,以期将碰摩部位定位到 4 个方向,并在此基础上进行碰摩实验和碰摩部位识别。由于实际航空发动机碰摩实验很难进行,本文利用在结构上与实际航空发动机接近的转子试验器进行碰摩实验,从转子试验器机匣获取应变信号,提取应变信号的平均值,并利用支持向量机对航空发动机的碰摩部位进行识别及验证。本文采用两种实验方案,并对两种实验方案的效果进行了对比分析。

1 应变测试

1.1 电阻应变计测量应变的原理

应变电测技术适应性强,可在各种复杂环境下进行应力应变的测量,目前广泛应用于机械、国防和化工等领域。在利用应变片测量被测件的受力情况时,当被测件表面有微小的机械变形时,粘贴于被测件表面的应变片敏感栅会随之变形,引起其阻值的变化^[10]。设一金属电阻丝,其长度为 l ,横截面是半径为 r 的圆,其面积 $A = \pi r^2$,电阻率记作 ρ ,设材料的泊松系数为 μ ,当电阻丝未受外力作用时,电阻值 $R = l\rho/A$,当该电阻丝受到拉、压变形时阻值发生变化,其电阻的改变量为

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho \quad (1)$$

根据 $R = l\rho/A$, 则

$$dR = \frac{\rho}{A} dl - \frac{\rho l}{A^2} dA + \frac{l}{A} d\rho \quad (2)$$

由于 $A = \pi r^2$, 故 $dA/A = 2dr/r$, 根据泊松效应 $\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l}$, 则

$$dR = \frac{\rho}{A} (1 + 2\mu) \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3)$$

式中: $\frac{dl}{l} = \epsilon$ 为电阻材料的纵向应变值; $\frac{d\rho}{\rho} = \pi_e E \epsilon$, π_e 为电阻材料的压阻系数, E 为电阻材料的弹性模量。令 $k = (1 + 2\mu) + \pi_e E$, $dR = (1 + 2\mu)\epsilon + \pi_e E \epsilon$, 则

$$\frac{dR}{R} = k\epsilon \quad (4)$$

式中: k 为应变片的灵敏度系数。

1.2 惠斯通电桥原理

由于得到的应变信号较微弱,常需经过电桥电路放大,并转变为电流或电压信号。常用的惠斯通电桥有全桥、半桥及 1/4 桥,全桥电路如图 1 所示^[11],图中 e_x 为电桥的激励电源; e_0 为电桥的输出电压值; R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为各桥臂的原始阻值; ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 和 ΔR_4 为桥臂各阻值的变化。

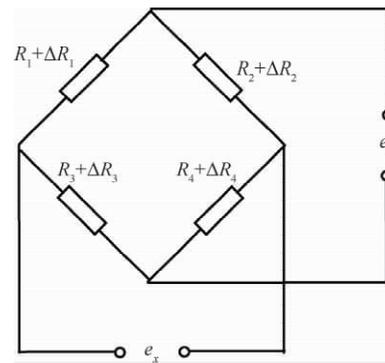


图 1 全桥连接示意图

Fig 1 Schematic of full-bridge connection

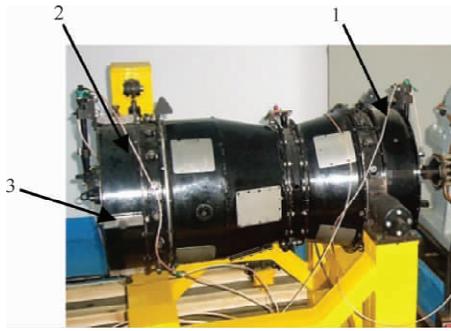
当 4 个桥臂的初始电阻相同时,全桥电路输出电压的近似值为

$$e_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) e_x \quad (5)$$

当选择的桥路为半桥时,式(5)中 ΔR_4 、 ΔR_3 均等于零;当选择的桥路为 1/4 桥时,式(5)中 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 均等于零。

2 碰摩实验

传统的碰摩实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。本文利用中航工业沈阳发动机设计研究所设计研制的航空发动机转子试验器进行碰摩实验,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,尺寸缩小至原来的 1/3;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 2 所示。

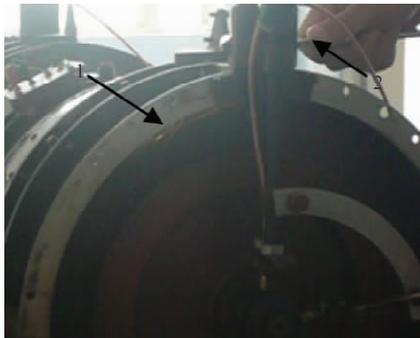


1—Compressor casing; 2—Turbine casing; 3—Rubbing screw

图 2 航空发动机转子试验器示意图

Fig 2 Rotor experiment rig of an aero-engine

该试验器在涡轮机匣处设计了 4 个碰摩螺钉,实验人员可以通过调节碰摩螺钉挤压碰摩环实现不同程度的碰摩。碰摩位置分别为涡轮机匣垂直上、水平右、垂直下和水平左 4 个方向。碰摩实验过程如图 3 所示。



1—Rubbing spark; 2—Rub through spark

图 3 航空发动机转子试验器碰摩实验

Fig 3 Rubbing experiment of the rotor experiment rig of an aero-engine

实验时用扳手拧碰摩环点变形顶螺栓,使碰摩环产生变形,从而与旋转的涡轮叶片产生碰摩,当碰摩严重时,将产生碰摩火花。

2.1 基于应变测试技术的转静碰摩实验

设定上、下、左、右 4 个不同方向的碰摩部位,并在涡轮机匣圆周左上、右上、右下、左下 4 个不同部位粘贴应变片,并将另一应变片作为温度补偿片悬空与所粘贴的应变片相连接;待应变片粘贴牢固后将应变片的引脚与 NI 9237 数据采集卡

相连接,将数据采集卡的另一端与计算机相连接。由于碰摩产生的应变信号属于微弱信号,需经过电桥电路放大,本次实验采用 1/4 Ⅱ桥对应变信号进行放大,并转化为电压信号输出,1/4 Ⅱ桥的连接与半桥的连接方式相同,但该桥路只有一个阻值 ΔR_1 变化, ΔR_2 变化为零,只用于补偿由于温度漂移造成的阻值改变。实验流程图如图 4 所示。

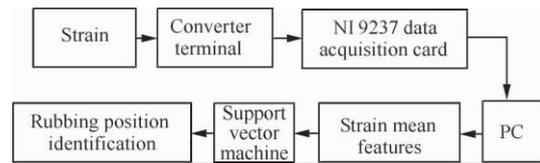


图 4 碰摩部位识别流程图

Fig 4 Flow chart of rubbing position identification

2.2 实验方案

碰摩力的弹性模型理论^[12-14]认为:在静子碰摩过程中的法向力是由静子的弹性变形引起的,切向仅考虑库仑摩擦力。根据该理论本文采用两种实验方案。

方案 1:考虑转静碰摩过程中振动引起的机匣弯曲变形,沿机匣轴向粘贴应变片,其示意图如图 5 所示。



图 5 轴向应变粘贴示意图

Fig 5 Pasting strain foils along casing axial direction

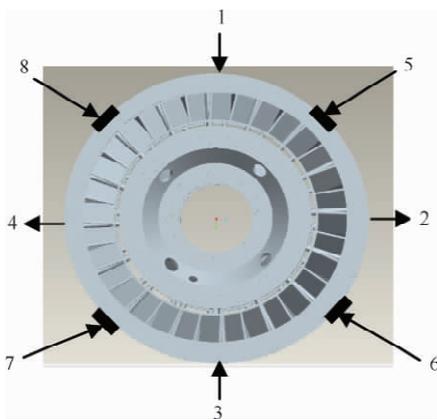
方案 2:考虑转静碰摩过程中切向摩擦力引起的机匣变形,沿机匣周向粘贴应变片,其示意图如图 6 所示。

图 7 为面向涡轮机匣沿顺时针方向应变片的粘贴位置及碰摩位置示意图。



图6 周向应变粘贴示意图

Fig. 6 Pasting strain foils along casing circumference



1—Vertical upper rub; 2—Horizontal right rub; 3—Vertical lower rub; 4—Horizontal left rub; 5—Upper right strain; 6—Lower right strain; 7—Lower left strain; 8—Upper left strain

图7 应变片粘贴位置及碰摩位置示意图

Fig. 7 Schematic of positions of strain foils and rubbings

本文各次实验采样频率为 10 kHz, 桥臂阻值 $R=120\ \Omega$, 应变片的灵敏度系数 $k=2.16$, 内部电源激励 $e_x=2.5\ \text{V}$, 采用机械法进行应变的初始平衡标定, 根据式(4)和式(5)得到应变与电桥输出电压的关系为

$$\varepsilon = \frac{4e_0}{ke_x} \quad (6)$$

本文实验数据来自 6 次独立实验, 如表 1 所示。

表 1 实验数据
Table 1 Experimental data

| Experimental scheme | Experimental date | Experimental speed/(r · min ⁻¹) |
|---------------------|-------------------|---|
| Project 1 | 2012-05-10 | 1 500 |
| | 2012-05-11 | 1 500 |
| | 2012-05-12 | 1 500 |
| Project 2 | 2012-05-15 | 1 500 |
| | 2012-05-16 | 1 500 |
| | 2012-05-17 | 1 500 |
| | 2012-05-17 | 1 500 |

3 基于应变信号的特征提取

3.1 应变均值特征提取

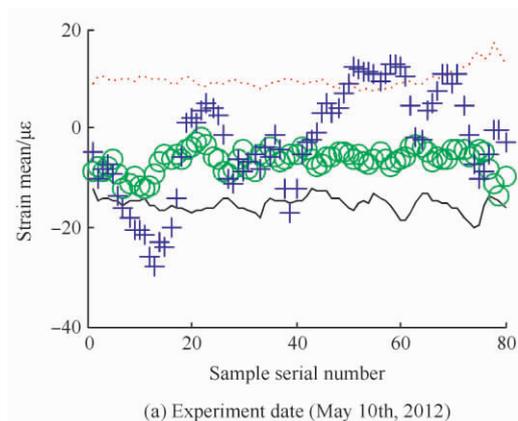
当转子部件发生碰摩的位置不同时, 机匣同一位置的变形不同, 而碰摩位置相同时, 机匣同一位置的变形有一定的一致性, 因此本文提取粘贴于转子试验器 4 个部位应变片应变信号的均值作为特征参数输入至支持向量机中, 其具体实现过程如下: 采集转子试验器正常运转及碰摩位置为涡轮机匣的垂直上、垂直下、水平左、水平右, 实验转速为 1 500 r/min 时机匣 4 个位置所粘贴的应变片的应变值; 提取应变信号的均值特征, 并将转子试验器碰摩状态下的应变均值与正常状态的应变均值对应相减。

3.2 不同碰摩部位的应变特征分析

为说明方法的有效性, 下面对两种实验方案下所采集的应变数据进行对比分析。对每种实验方案随机取三次实验中的两次(例如均取前两次), 碰摩位置为涡轮机匣的垂直上、垂直下、水平左、水平右的数据各 80 组。实验结果如图 8~图 15 所示, 图 8~图 15 的横坐标表示样本序号, 纵坐标表示转子试验器碰摩状态下的应变均值与正常状态的应变均值对应相减后的应变均值。图中“—、…、○、+”为以面向涡轮机匣为标准, 应变片粘贴位置分别为涡轮机匣右上、涡轮机匣右下、涡轮机匣左下、涡轮机匣左上。

1) 实验方案 1-应变特征分析

考虑机匣的弯曲变形, 沿机匣轴向粘贴应变片。其实验结果如图 8~图 11 所示。图 8~图 11



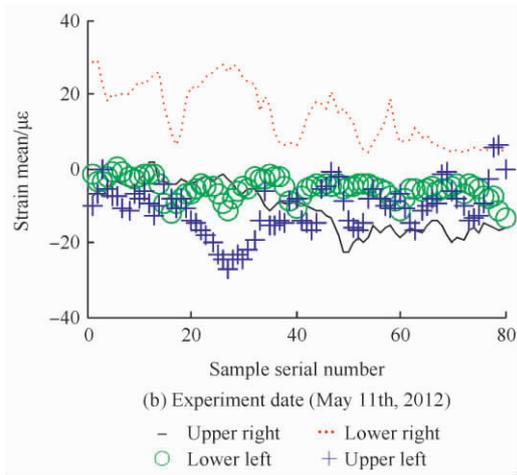


图 8 方案 1 碰涡轮机匣垂直上应变信号平均值

Fig 8 Strain mean of rubbing positions in vertical upper turbine case of Project 1

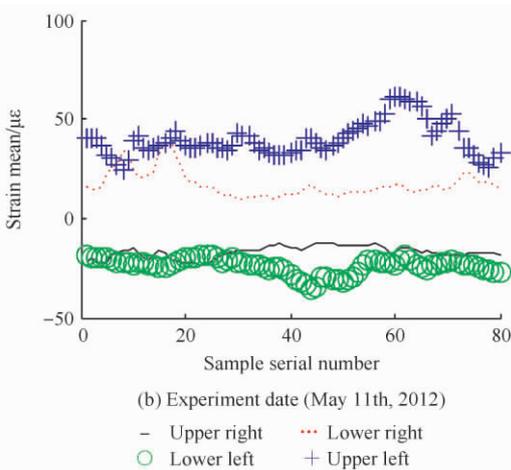
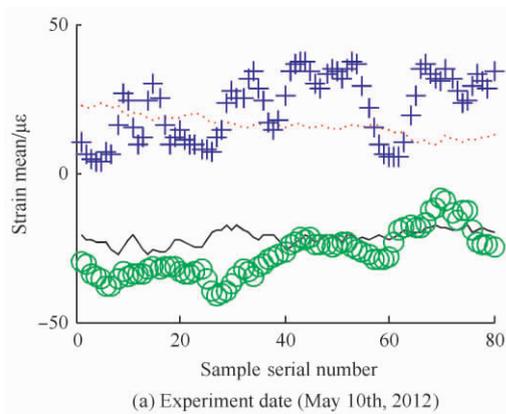


图 9 方案 1 碰涡轮机匣水平右应变信号平均值

Fig 9 Strain mean of rubbing positions in horizontal right turbine case of Project 1

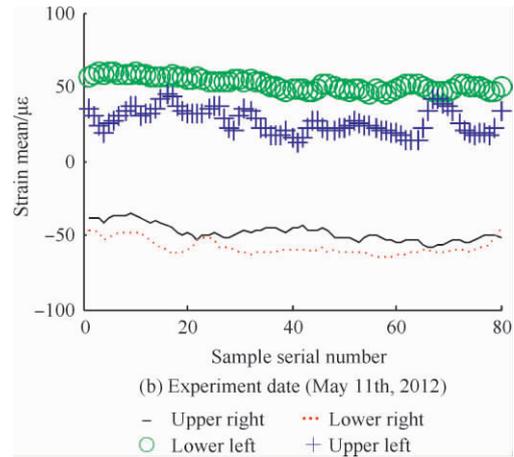
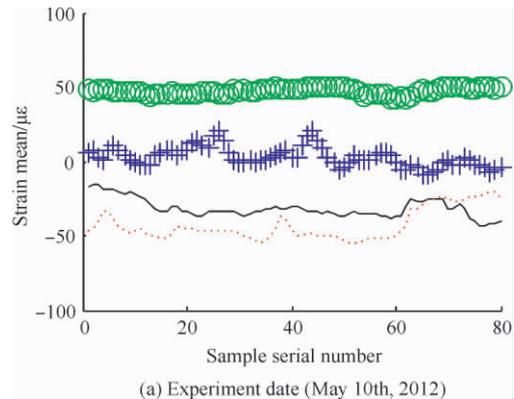
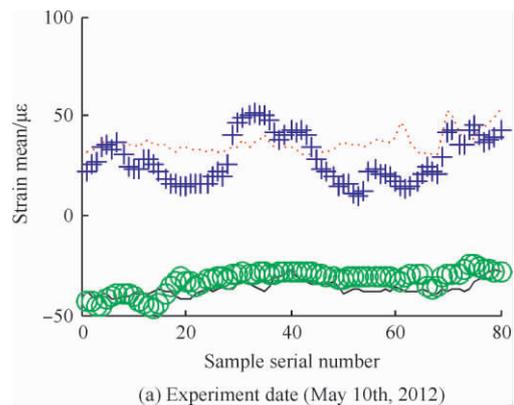


图 10 方案 1 碰涡轮机匣垂直下应变信号平均值

Fig 10 Strain mean of rubbing positions in vertical lower turbine case of Project 1

分别表示碰涡轮机匣垂直上、水平右、垂直下、水平左时 4 个部位应变片应变信号的均值特征。图 8(a)~图 11(a)表示 2012 年 05 月 10 日实验机匣各位置应变信号的均值,图 8(b)~图 11(b)表示 2012 年 05 月 11 日实验机匣各位置应变信号的均值。



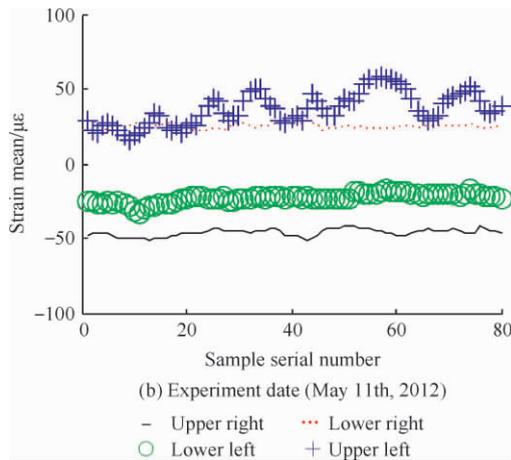


图 11 方案 1 碰涡轮机匣水平左应变信号平均值
Fig. 11 Strain mean of rubbing positions in horizontal left turbine case of Project 1

从图 8~图 11 可以看出沿机匣轴向粘贴应变片的实验方案,当试验器碰摩位置不同时,机匣同一位置的应变信号具有一定的差异性。以该方案的第 1 次实验为例,碰摩位置为涡轮机匣垂直上时,在机匣右下方粘贴的应变片拉伸变形较大(如图 8(a)的“...”),而碰涡轮机匣垂直下时,粘贴于机匣右下方的应变片压缩变形较大(如图 10(a)的“...”)。当碰摩位置相同时同一位置的应变信号也表现出一定的一致性,例如同为碰涡轮机匣垂直下时,均为靠近涡轮左下方应变片受拉伸变形最大,如图 10(a)的“○”及图 10(b)的“○”。但该一致性并不十分稳定,例如同为碰涡轮机匣垂直上时,虽然均为机匣右下方粘贴的应变片拉伸变形最大(如图 8(a)的“...”及图 8(b)的“...”),但应变片变形的程度存在较大变化,其主要原因在于拧紧碰摩螺钉使机匣碰摩环与叶片碰摩时,人为控制的碰摩程度存在差异,从而导致碰摩力波动,使不同时刻测得的机匣变形量存在较大差异。尽管如此,在相同的碰摩部位时,4 个应变片测得的应变值的相对大小规律没有改变。因此,为可靠地识别碰摩部位提供了依据。

2) 实验方案 2-应变特征分析

考虑切向摩擦力引起的机匣变形,沿机匣周向粘贴应变片,其实验结果如图 12~图 15 所示。图 12~图 15 分别表示碰涡轮机匣垂直上、水平右、垂直下、水平左时 4 个位置应变片应变信号的

均值特征。图 12(a)~图 15(a)表示 2012 年 05 月 15 日实验机匣各位置应变信号的均值,图 12(b)~图 15(b)表示 2012 年 05 月 16 日实验机匣各位置应变信号的均值。

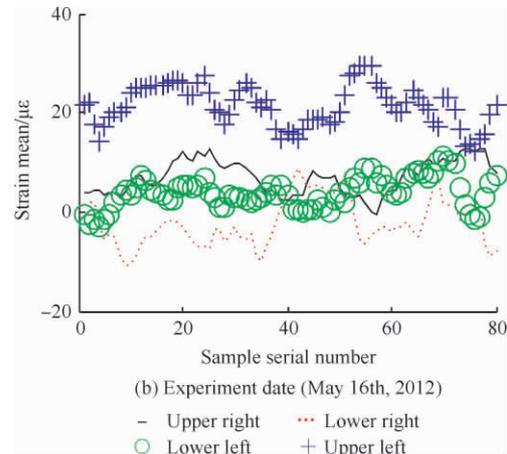
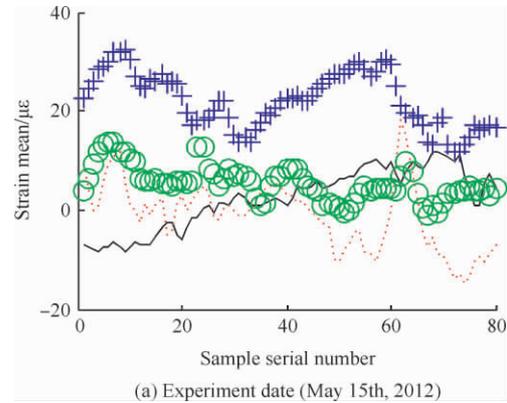
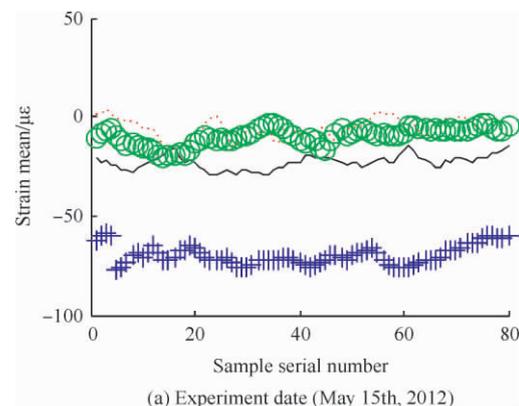


图 12 方案 2 碰涡轮机匣垂直上应变信号平均值
Fig. 12 Strain mean of rubbing positions in vertical upper turbine case of Project 2



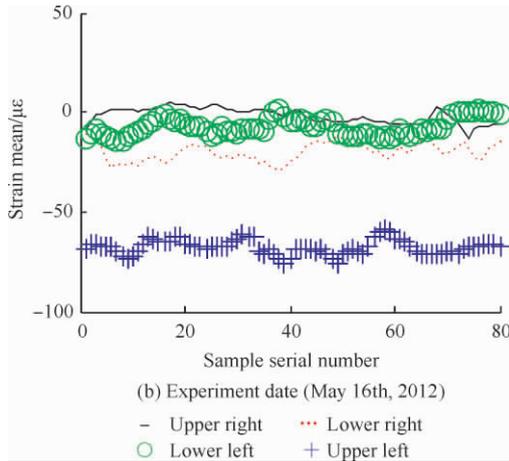


图 13 方案 2 碰涡轮机匣水平右应变信号平均值
Fig 13 Strain mean of rubbing positions in horizontal right turbine case of Project 2

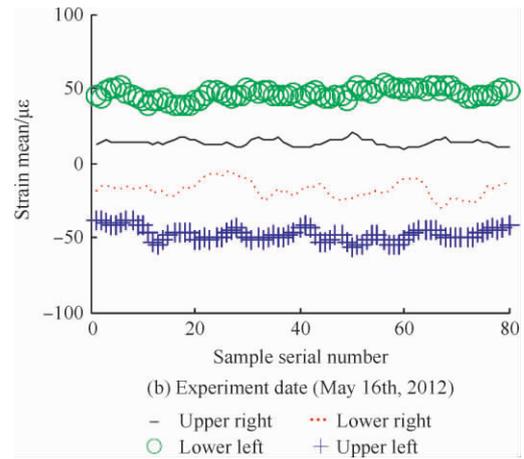
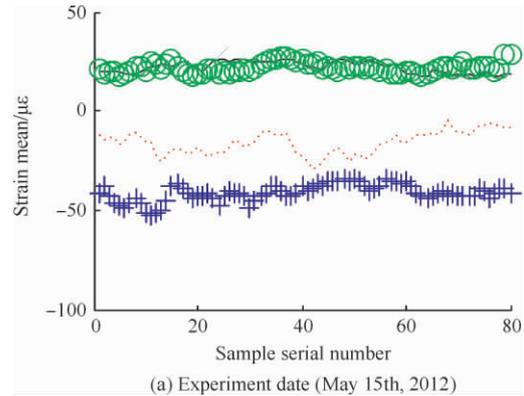


图 15 方案 2 碰涡轮机匣水平左应变信号平均值
Fig 15 Strain mean of rubbing positions in horizontal left turbine case of Project 2

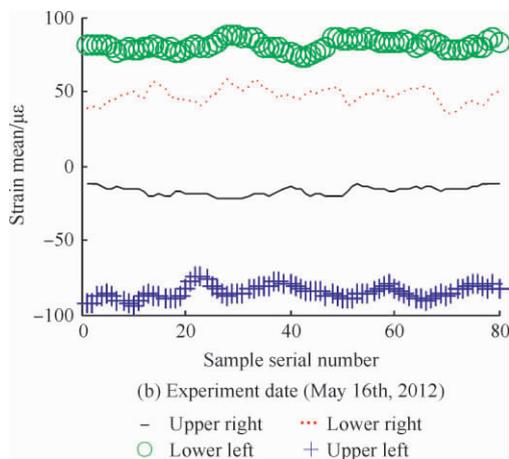
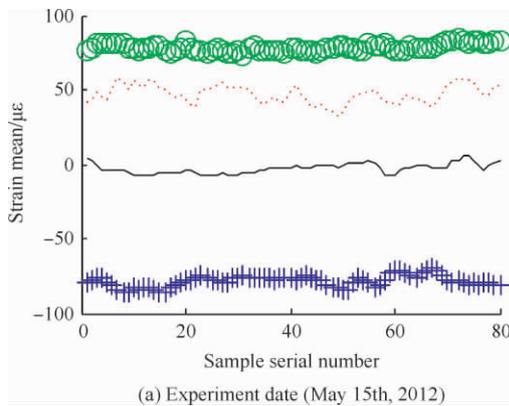


图 14 方案 2 碰涡轮机匣垂直下应变信号平均值
Fig 14 Strain mean of rubbing positions in vertical lower turbine case of Project 2

从图 12~图 15 可以很明显地看出沿机匣周向粘贴应变片的实验方案,当试验器碰摩位置不同时,机匣同一位置的应变信号具有一定的差异性。以该方案的第 1 次实验为例,碰摩位置为涡轮机匣垂直上时,机匣左上方粘贴的应变片拉伸变形较大(如图 12(a)的“+”),而碰涡轮机匣垂直下时,粘贴于机匣左上方的应变片压缩变形最大(如图 14(a)的“+”)。当碰摩位置相同同时同一位置的应变信号也表现出较好的一致性,例如同为碰涡轮机匣垂直下时,均为靠近涡轮左下方应变片受拉伸变形最大,如图 14(a)的“○”及图 14(b)的“○”),且该方案下各次实验的应变值较接近,这些为碰摩部位识别提供了良好的基础。

3.3 支持向量机的碰摩部位识别

采用台湾大学林智仁博士等开发的 LIBSVM

软件包,利用该软件包中解决分类问题的功能以及支持向量机进行碰摩部位识别。其中支持向量机的核函数采用高斯核函数,核函数的参数优化采用10重交叉验证法。LIBSVM软件的应用介绍见文献[15]。

具体实现过程如下:对两种实验方案均采用3种测试方法进行验证分析。

方法A:将第1次实验的样本随机近似两等份,作为训练、测试样本;将第2、3次实验样本作为未知样本,用来测试。

方法B:将第2次实验的样本随机近似两等份,作为训练、测试样本;将第1、3次实验样本作为未知样本,用来测试。

方法C:将第3次实验的样本随机近似两等份,作为训练、测试样本;将第1、2次实验样本作

为未知样本,用来测试。

每种测试方法均将训练样本输入至支持向量机中,根据输入的训练样本采用10重交叉验证法对支持向量机中的高斯核函数的参数进行优化,并根据优化的各参数值对训练、测试样本进行测试;根据优化的支持向量机的参数值对未知样本进行测试。对两种实验方案的识别效果进行对比分析,并验证沿机匣周向粘贴应变片的实验方案相比沿机匣轴向粘贴应变片的实验方案可以更加地有效识别转子系统的碰摩位置。

1) 方案1测试结果

采用实验方案1对样本随机划分,随机连续测试10次,表2中仅列出方案1中3种测试方法的10次随机测试的平均识别率。

表2 方案1应变信号碰摩部位识别平均识别率

Table 2 Rubbing position identification average recognition based on strain signals of Project 1

| Test method | Training sample numbers | Test sample numbers | Unknown sample numbers | Training sample recognition/% | Test sample recognition/% | Unknown sample recognition/% | | |
|-------------|-------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | | | | | The first time experiment | The second time experiment | The third time experiment |
| A | 159 | 161 | 640 | 100 | 99.63 | | 88.84 | 85.74 |
| B | 162 | 158 | 640 | 100 | 99.88 | 97.38 | | 85.99 |
| C | 161 | 159 | 640 | 100 | 100 | 75.31 | 89.52 | |

由表2可以看出,沿机匣轴向粘贴应变片的实验方案,对训练和测试样本有较高的识别率,对未知样本的识别率较低,其主要原因在于,轴向粘贴应变片时,主要测得的是机匣的弯曲变形,而机匣弯曲变形来源于碰摩和转子不平衡的共同作用,因此仅仅依据轴向应变难于解释由于碰摩而导致的机匣变形规律。这也表明了沿机匣轴向粘贴应变片的实验方案存在缺陷,有效的解决方法是改变应变片粘贴方向,改轴

向为周向,因为周向应变感受的主要是来源于碰摩所导致的切向摩擦力所引起的机匣变形,而转子的不平衡等所导致的机匣弯曲变形在周向应变中得不到体现,因此必将能够改善碰摩识别精度。

2) 方案2测试结果

采用实验方案2对样本随机划分,随机连续测试10次,取10次识别率的平均值作为平均识别率,识别结果如表3所示。

表3 方案2应变信号碰摩部位识别平均识别率

Table 3 Rubbing position identification average recognition based on strain signals of Project 2

| Test method | Training sample numbers | Test sample numbers | Unknown sample numbers | Training sample recognition/% | Test sample recognition/% | Unknown sample recognition/% | | |
|-------------|-------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | | | | | The first time experiment | The second time experiment | The third time experiment |
| A | 161 | 159 | 640 | 100 | 100 | | 100 | 100 |
| B | 158 | 162 | 640 | 100 | 100 | 100 | | 100 |
| C | 159 | 161 | 640 | 100 | 100 | 100 | 100 | |

由表 3 可以看出,沿机匣周向粘贴应变片的实验方案,对训练、测试和未知样本的识别率均达到了 100%,这就表明了沿机匣周向粘贴应变片的实验方案可以更好地对转静碰摩部位进行识别,与沿机匣轴向粘贴应变片的实验方案相比,其鲁棒性更强,从而有力地验证了表 2 的分析结果。

4 结 论

1) 根据应变测试在航空发动机中的实用性、通用性,并依据航空发动机发生碰摩部位不同时机匣同一位置变形差别较大,而碰摩位置相同时机匣同一位置变形差别不大的特点,提出了将应变信号的均值特征作为特征参数,并与支持向量机相结合,进行航空发动机转静碰摩部位识别的方法。

2) 由于实际航空发动机普遍表现为机匣碰摩点固定的偏摩现象,考虑机匣的薄壁结构和转子-轮盘-叶片结构,利用与实际航空发动机结构近似的航空发动机转子试验器,在实验中均匀设置 4 个不同的碰摩部位、并沿机匣均匀粘贴 4 个应变片,进行了转静碰摩实验。考虑碰摩故障时机匣的弯曲变形及切向摩擦力的影响,本文实验采取两种实验方案,分别沿机匣轴向、周向粘贴应变片。

3) 为验证方法的有效性,本文实验每种实验方案均取 3 次独立实验的 4 种不同碰摩状态(碰上、碰右、碰下、碰左),实验转速为 1 500 r/min。每种方案下均随机取某次实验的数据作为训练和测试样本,另外两次实验的实验数据作为未知样本,并利用支持向量机进行了识别分析。实验结果表明,沿机匣轴向粘贴应变片的实验方案对训练和测试样本有较好的识别结果,但对未知样本识别效果较差。沿机匣周向粘贴应变片的实验方案识别率更高,对训练、测试和未知样本的识别率均达到了 100%。

4) 利用机匣应变信号的均值特征进行转静碰摩部位识别,而现代航空发动机机匣普遍采用薄壁结构且应变测试在航空发动机测试中广泛使用,这为本文方法的工程应用提供了有利条件。

5) 测试方法在不同机匣厚度和不同转速下的有效性分析仍需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Deng A D, Bao Y Q, Zhao L. Positioning of acoustic emission source by using sub-gradient projection based on energy attenuation model. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(9): 66-72. (in Chinese)
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. *机械工程学报*, 2010, 46(9): 66-72.
- [2] Wang Q, Chu F. Experimental determination of the rubbing location by means of acoustic emission and wavelet transform. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 248(1): 91-103.
- [3] Chu F L, Wang Q Y, Lu W X. Detective of the rub location in a rotor system with AE sensors and wavelet analysis. *Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(3): 139-143. (in Chinese)
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. *机械工程学报*, 2002, 38(3): 139-143.
- [4] He T, Liu Y G, Chen Y N, et al. Method for locating rub fault of rotor-stator based on acoustic emission beam forming. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(10): 2207-2213. (in Chinese)
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. *航空动力学报*, 2011, 26(10): 2207-2213.
- [5] Han Q K, Yu T, Li H, et al. Hybrid model based identification of local rubbing fault in rotor systems. *Key Engineering Materials*, 2005, 293-294: 355-364.
- [6] Bachschmid N, Pennacchi P, Vania A. Identification of multiple faults in rotor systems. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 254(2): 327-366.
- [7] Chu F, Lu W. Determination of the rubbing location in a multi-disk rotor system by means of dynamic stiffness identification. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 248(2): 235-246.
- [8] Kicinski J. *Rotor dynamics*. Gdansk: Institute of Fluid-flow Machinery, 2005.
- [9] Sun Y L, Zhang Y X, Chang H B. Method of rotor rub-impact faults diagnosis based on stator vibration signal. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(4): 391-394. (in Chinese)
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. *机械工程学报*, 2009, 22(4): 391-394.
- [10] Duan S G, Liao M F. Dynamic strain measurement system in signal detection of mechanical vibration. *Machinery De-*

- sign & Manufacture, 2005(11): 97-99. (in Chinese)
段曙光, 廖明夫. 动应变测试系统在机械振动信号检测中的应用. 机械设计与制造, 2005(11): 97-99.
- [11] Wang B X. Measurement technology foundation. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
王伯雄. 测试技术基础. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [12] Liu X D. The research of rotating machinery rotor-stator rubbing fault and diagnosis technology. Beijing: School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, 1996. (in Chinese)
刘献栋. 旋转机械转静碰摩故障及其诊断技术的研究. 北京: 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 1996.
- [13] He T. Research on key issues in diagnosing rub-impact fault of rotating machinery. Beijing: School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, 2008. (in Chinese)
何田. 旋转机械碰摩故障诊断关键问题研究. 北京: 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 2008.
- [14] Wang D Y. The vibration features extracted and theoretical research of engine rotor-stator rubbing. Beijing: School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, 1995. (in Chinese)
王德友. 发动机转静件碰摩振动特性的提取与理论研究. 北京: 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 1995.
- [15] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: a library for support vector machines. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2(3): 27: 1-27: 27.
- 作者简介:
于明月 女, 博士研究生。主要研究方向: 信号处理, 微弱信号检测, 故障诊断。
E-mail: yumingyue211@163.com
- 陈果 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 航空发动机智能诊断及专家系统, 航空发动机整机振动与转子动力学。
Tel: 025-84891850
E-mail: cgzyx@263.net
- 刘永泉 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 航空发动机, 结构强度与振动。
- 姜广义 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 航空发动机, 转子动力学。
- 李成刚 男, 硕士, 研究员。主要研究方向: 航空发动机, 振动测试与诊断。
E-mail: lichenggang606@163.com
- 冯国全 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 转子动力学, 航空发动机整机振动分析。
E-mail: feng2004606@163.com
- 王德友 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 转子动力学, 航空发动机, 振动测试与诊断。
E-mail: saeriem@mail.sy.ln.cn

Aero-engine Rotor-stator Rubbing Position Identification Based on Casing Strain Signals

YU Mingyue¹, CHEN Guo^{1,*}, LIU Yongquan², JIANG Guangyi², LI Chenggang²,
FENG Guoquan², WANG Deyou²

1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
2. AVIC Shenyang Aero-engine Design Institute, Shenyang 110015, China

Abstract: In order to effectively identify aero-engine rotor-stator rubbing positions, an identification method based on casing strain signals is proposed. Two experiment projects are proposed and compared. One is to paste the strain foils along the casing axial direction, the other is to paste them along the casing circumference. A rotor experiment rig of an aero-engine is used to simulate rubbing faults of different radial rubbing positions. The casing strain signals of the rotor experiment rig of the aero-engine is collected and the strain mean features of the two experiment projects are extracted, which are then input into a support vector machine to identify the different rubbing positions. The results show that the strain mean features based on the experiment project which paste strain foils along the casing circumference can effectively identify the rotor-stator rubbing positions of the aero-engine, and the recognition can reach 100%. But the strain mean features based on the project which paste strain foils along the casing axial direction has a lower recognition rate.

Key words: aero-engine; rubbing position identification; mean feature; casing strain; support vector machines

Received: 2012-05-29; Revised: 2012-09-05; Accepted: 2013-01-24; Published online: 2013-02-19 14:36

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130219.1436.004.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61179057); National Basic Research Program of China (613139)

* Corresponding author. Tel.: 025-84891850 E-mail: cgzyx@263.net