

## 转子-滚动轴承耦合系统的转静碰摩故障分析与智能诊断

周海仑, 陈果, 李飞敏

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

**摘要:** 针对航空发动机转静碰摩故障诊断问题, 建立了含不平衡-碰摩故障的转子-滚动轴承耦合系统动力学模型。在模型中, 充分考虑了滚动轴承的间隙、非线性赫兹接触以及变柔性 VC (Varying compliance) 振动。首先运用数值积分获取系统响应, 进行碰摩故障分析, 并得到了大量的碰摩故障仿真样本; 其次利用支持向量机从大量样本中获取碰摩故障知识; 然后利用转子实验器获取碰摩故障实验样本; 最后利用训练好的支持向量机对碰摩故障实验样本进行智能诊断, 最高识别率达到了 91%。

**关键词:** 转子; 滚动轴承; 耦合动力学; 转静碰摩; 智能诊断; 支持向量机 (SVM)

**中图分类号:** O322; TH113.1 **文献标识码:** A

随着对航空发动机高转速、高效率的要求, 转静间隙越来越小, 导致了转子和静子间的摩擦事故经常发生, 目前转静碰摩故障已经成为了航空发动机设计、制造和使用过程中的拦路虎<sup>[1]</sup>。因此, 分析航空发动机转静碰摩故障机理, 提取故障特征, 对碰摩故障诊断具有重要意义。

由于航空发动机普遍采用滚动轴承, 因此, 需要研究滚动轴承支承下的转静碰摩故障。文献 [2] 建立了轴承-转子-定子多自由度系统碰摩故障模型, 研究了具有局部碰摩的滚动轴承-转子-定子系统的非线性特性, 但是该模型滚动轴承建模过于简单; 文献 [3] 和 [4] 建立了具有碰摩耦合故障的转子-滚动轴承-机匣耦合系统动力学模型, 并对滚动轴承进行了详细建模, 考虑了滚动轴承间隙、非线性赫兹接触及变柔性 VC 振动等非线性因素。近年来, 人工智能已被广泛地应用于碰摩故障诊断中, 文献 [5、6] 分别研究了神经网络、支持向量机在碰摩故障诊断中的应用, 但是目前碰摩故障的诊断往往需要大量的故障样本, 而实际的碰摩故障样本获取并不容易, 因此, 如何利用碰摩故障动力学仿真

获取故障样本, 利用学习机器从仿真样本中获取诊断知识具有重要意义, 有望突破碰摩故障诊断的知识获取瓶颈。文献 [7] 和 [8] 对此进行了有益探索, 它们通过建立碰摩故障动力学模型, 利用神经网络对仿真样本进行学习, 又将所学习好的神经网络运用于实际碰摩故障诊断, 结果表明了方法的有效性。本文建立了转子-滚动轴承耦合系统碰摩故障动力学模型, 运用数值积分方法研究了碰摩故障特征, 并获取了大量碰摩故障仿真样本, 同时, 将支持向量机运用于碰摩故障诊断, 研究了支持向量机的参数影响规律。最后对航空发动机转子实验器的碰摩实验样本进行诊断。

## 1 含碰摩故障的转子-滚动轴承耦合系统的动力学模型

图 1 为滚动轴承支承下的含不平衡-碰摩耦合故障的转子动力学模型, 在模型中, 转子圆盘与轴承之间为无质量弹性轴, 转子两端采用对称结构的滚动轴承支承。当转子旋转时, 由于不平衡故障的激励, 可能将激发起转子产生很大的横向弯曲振动, 当振动超过转子

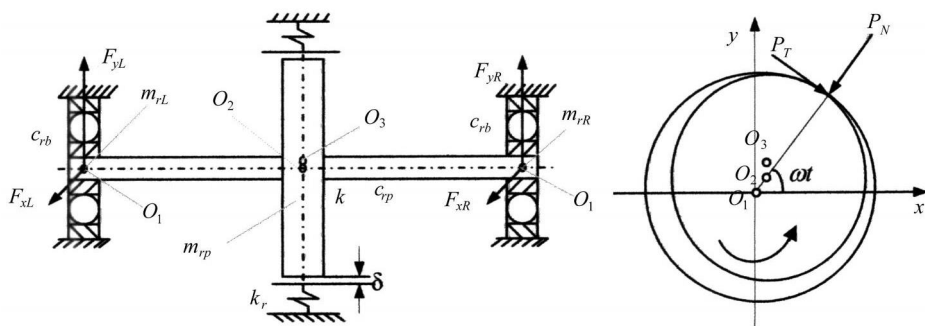


图 1 转子-滚动轴承耦合系统动力学模型

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50705042), 航空科学基金资助项目 (2007ZB52022)

收稿日期: 2008-01-28 修改稿收到日期: 2008-03-31

第一作者 周海仑 男, 硕士生, 1983年生

与定子的间隙时,则转静摩擦故障将产生。 $O_1$ 为轴承几何中心, $O_2$ 为转子几何中心, $O_3$ 为转子质心, $k_r$ 为静子刚度, $k$ 为弹性轴刚度, $\mu$ 为转静间摩擦系数, $c_{rb}$ 为转子在轴承处阻尼系数, $c_{rp}$ 为转子圆盘阻尼系数,为转子圆盘和静子的间隙, $e$ 为质量偏心量。转子在左右端轴承处的集中质量分别为  $m_L$  和  $m_R$ ,在圆盘处的等效集中质量为  $m_p$ ,  $F_{xL}$ ,  $F_{yL}$  分别为左端轴承的  $X$  和  $Y$  方向的支承反力,  $F_{xR}$ ,  $F_{yR}$  分别为右端轴承的  $X$  和  $Y$  方向的支承反力,  $x_p$ ,  $y_p$  分别是圆盘的  $X$  和  $Y$  方向上的位移;  $x_{Ll}$ ,  $y_{Ll}$  分别是左端轴承  $X$  和  $Y$  方向上的位移;  $x_{Rl}$ ,  $y_{Rl}$  分别为右端轴承  $X$  和  $Y$  方向上的位移;  $P_x$ ,  $P_y$  分别为  $X$  和  $Y$  向碰摩力。

由牛顿第二定理,可以得到系统运动微分方程:

$$\begin{cases} m_p \ddot{x}_p + c_{rp} \dot{x}_p + k(x_p - x_R) + k(x_p - x_L) = m_p e^2 \cos(\omega t) + P_x \\ m_p \ddot{y}_p + c_{rp} \dot{y}_p + k(y_p - y_R) + k(y_p - y_L) = m_p e^2 \sin(\omega t) - m_p g + P_y \\ m_R \ddot{x}_R + c_{rb} \dot{x}_R + k(x_R - x_p) = F_{xR} \\ m_R \ddot{y}_R + c_{rb} \dot{y}_R + k(y_R - y_p) = F_{yR} - m_R g \\ m_L \ddot{x}_L + c_{rb} \dot{x}_L + k(x_L - x_p) = F_{xL} \\ m_L \ddot{y}_L + c_{rb} \dot{y}_L + k(y_L - y_p) = F_{yL} - m_L g \end{cases} \quad (1)$$

1) 碰摩力

令  $r$  为转子圆盘的径向位移,  $r = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}$ , 当  $r \geq e$ , 碰摩力分为径向碰撞力  $P_N$  和切向摩擦力  $P_T$ 。假设摩擦符合库仑摩擦定律,将碰摩力分解在  $x$  和  $y$  轴,可以得到  $x$  和  $y$  方向的碰摩力为

$$\begin{cases} P_x = -k_r(1 - e/r)(x_p - \mu \cdot y_p) \\ P_y = -k_r(1 - e/r)(\mu \cdot x_p + y_p) \end{cases} \quad r \geq e \quad (2)$$

其中:  $e$  为转静间隙,  $k_r$  为径向碰摩刚度、 $\mu$  为摩擦系数。

2) 滚动轴承模型及轴承支承力

本文所研究的滚动轴承设定轴承外圈固定在轴承座上,内圈固定在旋转的轴上,如图 2 所示。参考文献 [3, 4], 可以得到滚动轴承作用力为:

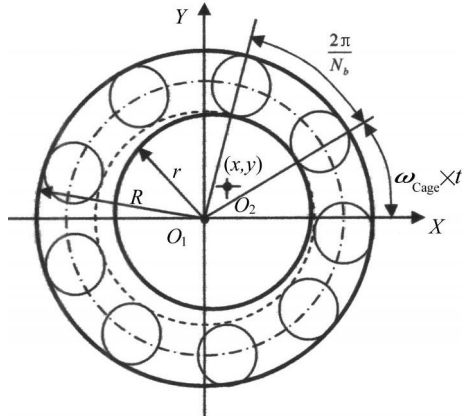


图 2 滚动轴承模型示意图

$$\begin{cases} F_x = \sum_{j=1}^{N_b} C_b (x \cos_j + y \sin_j - e_0)^{3/2} \cdot H(x \cos_j + y \sin_j - e_0) \cos_j \\ F_y = \sum_{j=1}^{N_b} C_b (x \cos_j + y \sin_j - e_0)^{3/2} \cdot H(x \cos_j + y \sin_j - e_0) \sin_j \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $C_b$  为赫兹接触刚度,与相互接触的材料和形状有关。 $H(\cdot)$  为亥维塞函数,当函数变量大于 0 时,函数值为 1,否则为 0。 $\theta_j$  为第  $j$  个滚珠处的角度位置,

$$\theta_j = \theta_{cage} \omega t + \frac{2\pi}{N_b} (j - 1), \quad j = 1, 2, \dots, N_b, \quad N_b \text{ 为滚珠个数。}$$

$\omega_{cage}$  为保持架的旋转速度,设外滚道半径为  $R$ ,内滚道半径为  $r$ ,有  $\omega_{cage} = \omega r / (R + r)$ 。VC 频率即为滚珠通过频率,有  $\omega_{VC} = \omega_{cage} N_b = \omega B_N$ ,  $B_N = N_b \omega r / (R + r)$ , 为 VC 频率与转速频率的比值;  $N_b$  为滚珠个数。

由此可得图 1 中滚动轴承所产生的轴承力: 当  $x = x_R$ ,  $y = y_R$ , 则,  $F_{xR} = F_x$ ,  $F_{yR} = F_y$ ; 当  $x = x_L$ ,  $y = y_L$ , 则,  $F_{xL} = F_x$ ,  $F_{yL} = F_y$ 。

3) 计算参数

本文选取的转子系统的初始参数如下:  $m_R = m_L = 40 \text{ kg}$ ,  $m_p = 32.1 \text{ kg}$ ,  $c_{rb} = 1050 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,  $c_{rp} = 2100 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,  $k = 0.85 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。滚动轴承选取文献 [9] 的 JIS6306 滚动轴承,其参数见表 1 所示。

由于系统具有很强的非线性,本文对微分方程组的求解,采用四阶龙格-库塔法进行数值积分来获取转子响应,然后对得到的非线性时间序列进行特征提取与智能诊断。

表 1 JIS6306 滚动轴承主要计算参数

外圈半径 $R/\text{mm}$	内圈半径 $r/\text{mm}$	滚珠个数 $N_b$	接触刚度 $C_b / (\text{N/m}^{3/2})$	轴承间隙 $e_0 / \mu\text{m}$	$B_N$
63.9	40.1	8	$13.34 \times 10^9$	2	3.08

4) 滚动轴承模型验证

为了验证本文滚动轴承模型,需要进行比较分析,图 3(a)和图 4(a)为在转速为 300 r/min 时,Mevel 在文献 [10] 中计算得到的转盘处  $x$  方向和  $y$  方向的振动位移;图 3(b)和图 4(b)为在转速为 300 r/min 时,本文仿真计算得到的转盘处  $x$  方向和  $y$  方向的振动位移。通过对比,可以发现计算结果非常一致,振动幅值上的区别为不同转子参数所致。

由于滚动轴承支承下的系统具有两方面的激励,即来自不平衡的旋转频率激励和来自轴承变柔性 VC 的参数激励。当转速很低时,不平衡激励比较微弱,此时可以观察到由于轴承内部刚度周期变化所引发的 VC 振动,VC 振动的频率为旋转频率的  $B_N$  倍,在本文,  $B_N = 3.08$  (如表 1 所示)。从图 3(a)、(b)和图 4(a)、

(b)可以看出,  $x$ 方向和  $y$ 方向的运动是周期的,并明显地表现出滚珠的通过频率,当一个滚珠离开载荷区的时候,转子下降,并接触一个新的滚珠,使颤振迅速出现和消失。从信号频谱上可以看出,如图 3(c)和图 4

(c),振动表现出 VC 频率(滚珠通过频率)及其谐波。Fukata<sup>[9]</sup>的研究也表明,当转速在远离  $x$ 和  $y$ 方向两个临界转速时,运动是周期的,表现出滚珠的转动频率和它的谐波。显然本文计算结果与此吻合。

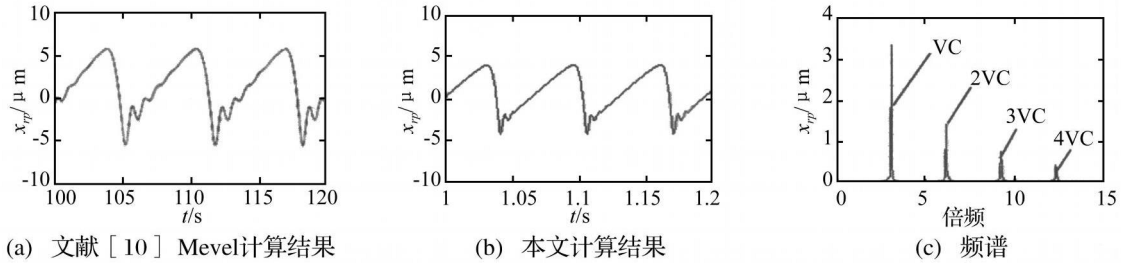


图 3 转子圆盘处  $x$ 向响应(转速为 300r/min)

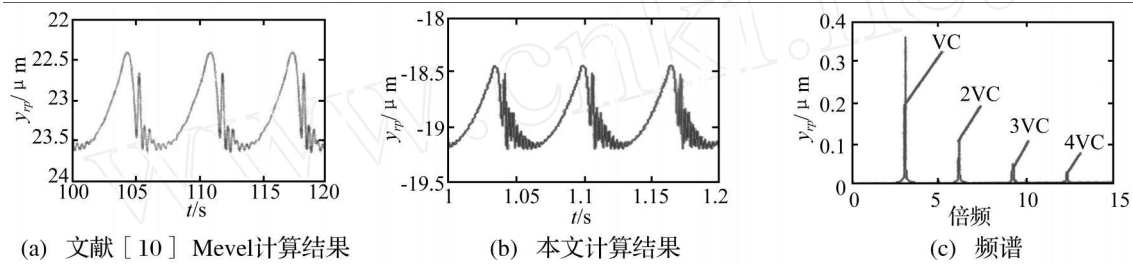


图 4 转子圆盘处  $y$ 向响应(转速为 300r/min)

## 2 转静碰摩故障特征分析

### 2.1 仿真转静碰摩故障特征分析

本文利用数值积分方法得到了在各种参数下的转静碰摩故障样本,图 5为转子响应瀑布图,其计算参数分别为:  $\delta_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $k_r = 0 \text{ N/m}$ ,  $k = 0.39 \times 10^7 \text{ N/m}$  和  $\delta_0 = 2\mu\text{m}$ ,  $k_r = 3.5 \times 10^7 \text{ N/m}$ ,  $\mu = 0.2$ ,  $\nu = 0.02 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $e = 0.05 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,  $k = 0.39 \times 10^7 \text{ N/m}$ ,其中  $k_r = 0 \text{ N/m}$ 代表碰摩刚度为 0,这时不管参数  $\delta_0$ 和  $\mu$ 为何值,碰

摩力均为 0,即该组数据代表不碰摩数据。

从仿真计算结果可以发现,在临界转速以下,发生碰摩比不发生碰摩含有更为丰富的 2倍、3倍等高频成分,而分频现象不明显。在高转速范围内,碰摩后,分频成分大量出现,而 2倍、3倍等高频成分则不明显。该结论与文献[11]基本一致。而碰摩实验由于转速在临界以下,因此,碰摩故障主要以倍频大量出现为特征。由此可见,本文的动力学仿真模型真实再现了碰摩故障的特征,因此可以据此进行碰摩故障诊断。

### 2.2 航空发动机转静碰摩故障特征分析

为了与真实的航空发动机接近,本文的试验器为由沈阳航空发动机设计研究所设计制造的航空发动机转子故障试验器,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;叶片简化为斜置平面形状;封严齿为可拆卸的;轴为实心按刚性设计,最大工作转速为 7 000 r/min。压气机盘与轴、涡轮盘与轴、接手与轴的连接采用圆锥形配合面和 180 双键连接,便于装卸、减少配合面的磨损、延长使用寿命、保证对中性、减少转子系统本身的不平衡量;采用电机驱动,取消了火焰筒,即得到一个单转子系统模型。该试验器的真实图片如图 6(a)所示,剖面图如图 6(b)所示。

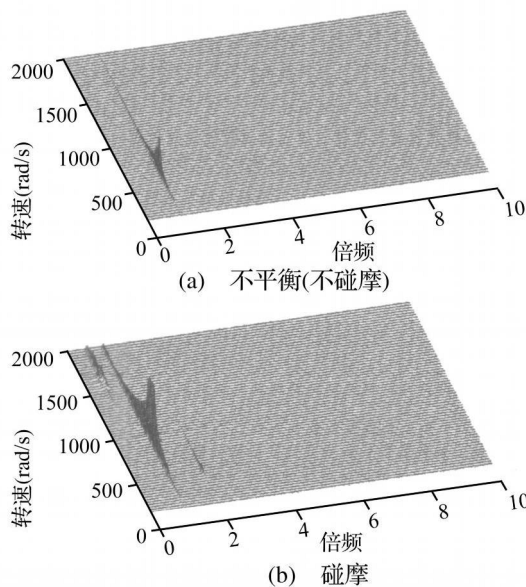
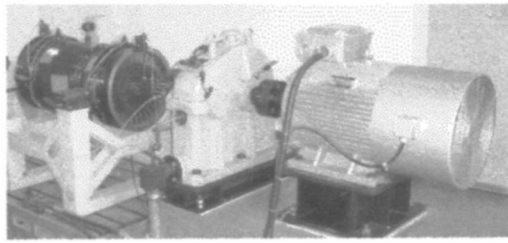
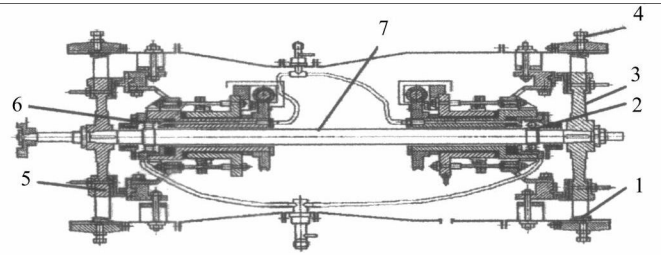


图 5 转子仿真样本  $y$ 向位移的三维谱图



(a) 航空发动机转子实验器实物图



(b) 航空发动机转子试验器剖面图

1 碰摩环, 2 球轴承, 3 涡轮盘, 4 碰摩环点变形顶螺栓, 5 压气机轮盘, 6 滚珠轴承, 7 轴

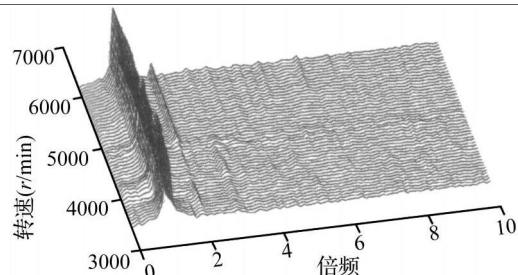
图 6 转子试验器实物图与剖面图

表 2 仿真样本参数选取

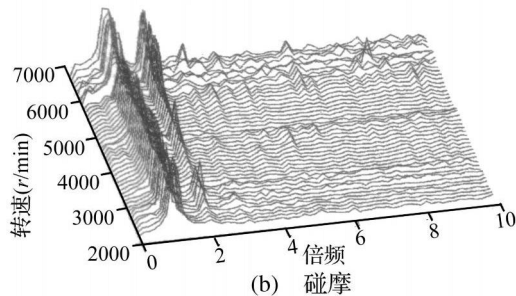
转速 ( )	模型参数					样本情况	
	$k_r /$ (N/m)	$e /$ (mm)	$e /$ (mm)	$\mu$	$k$ (N/m)	碰摩 (是 否)	数目
200 ~ 800	$3.7 \times 10^7$	0.02	0.05	0.10	$85 \times 10^7$	是	36
200 ~ 800	$4.0 \times 10^7$	0.02	0.05	0.10	$85 \times 10^7$	是	36
200 ~ 800	$3.7 \times 10^7$	0.025	0.05	0.10	$85 \times 10^7$	是	36
200 ~ 800	$3.7 \times 10^7$	0.025	0.05	0.090	$85 \times 10^7$	是	36
200 ~ 800	$3.7 \times 10^7$	0.025	0.05	0.080	$85 \times 10^7$	是	36
200 ~ 800	$3.7 \times 10^7$	0.025	0.05	0.070	$85 \times 10^7$	是	36
200 ~ 800	$3.7 \times 10^7$	0.025	0.06	0.10	$85 \times 10^7$	是	36
200 ~ 800	$3.7 \times 10^7$	0.025	0.04	0.10	$85 \times 10^7$	是	36
200 ~ 800	$3.7 \times 10^7$	0.025	0.05	0.10	$86 \times 10^7$	是	36
200 ~ 800	$0 \times 10^7$	—	0.04	—	$85 \times 10^7$	否	80
200 ~ 800	$0 \times 10^7$	—	0.045	—	$85 \times 10^7$	否	80
200 ~ 800	$0 \times 10^7$	—	0.05	—	$85 \times 10^7$	否	80

该转子试验器主要由演示模型、安装台架、电机、基础平台及润滑系统组成。试验器可以演示和模拟发动机中可能出现的几种典型故障：涡轮叶片与机匣封严间隙处的碰摩（可能实现点碰摩、局部碰摩、轻度或重度碰摩）；封严齿间的碰摩；轴承损坏；前后支承不同心；支承刚度的变化对振动特性的影响。

利用航空发动机转子故障试验器获取的碰摩故障实验样本瀑布图如图 7 所示。其中转速从 2 000 r/min 到 7 000 r/min, 不碰摩样本 50 个, 碰摩样本 50 个。为了更加清楚的表现出倍频和分频成分, 本文对实验数据进行了归一化处理。



(a) 不平衡(不碰摩)



(b) 碰摩

图 7 转子实验样本 y 向位移的三维谱图

为了使仿真与实验达到的定性一致性, 滚动轴承支承下碰摩转子系统非线性动力学仿真模型的参数选取如表 2 所示。在表中, 本文通过改变转静碰摩刚度  $k_r$ 、碰摩间隙  $e$ 、摩擦系数  $\mu$  和不平衡  $e$  等参数使仿真模型更具有代表性, 表中参数所得到的仿真瀑布图基本达到了与实验瀑布图定性的一致性。  $k_r = 0 \text{ N/m}$  代表碰摩刚度为 0, 这时不管参数  $e$  和  $\mu$  为何值, 碰摩力均为 0, 即该组数据代表不碰摩数据。

通过分析, 选取频段特征向量为  $F = [1.0 \times 2.0 \times 3.0 \times 4.0 \times 5.0 \times \dots]$ 。按表 2 参数对应的模型进行仿真计算, 取特征向量中的每个频率值的  $\pm 0.05$  范围内的幅值最大值作为特征, 并且经过归一化处理, 最后得到 324 个碰摩和 240 个不碰摩样本。随机选取碰摩和不碰摩状态样本的一半作为训练样本和测试样本。

### 3 基于支持向量机的转静碰摩故障智能诊断

基于统计学习理论的支持向量机 (Support Vector Machine, 简称 SVM) [12] 建立在结构化风险最小化原则 (Structural Risk Minimization, SRM) 基础上, 理论上比建立在经验风险最小化原则 (Empirical Risk Minimization, ERM) 基础上的神经网络模型更加完善, 学习机器的泛化能力能够得到充分保障, 因此是继神经网络之后的研究热点, 目前已经广泛运用于模式识别和故障诊断等领域。

#### 3.1 支持向量机原理

支持向量机 SVM 是从线性可分情况下的最优分类面提出的。所谓最优分类线就是要求分类线不但能将两类正确分开 (训练错误率为 0), 而且使分类间隔

最大,前者是保证经验风险最小(为0),而使分类间隔最大就是使推广性的界中置信范围最小,从而使真实风险最小,也是对推广能力的控制。推广到高维空间,最优分类线就成为最优分类面。设线性可分样本集  $(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n)$ ,  $\mathbf{x} \in R^d, y \in \{-1, +1\}$  是类别标号。d维线性空间中线性判别函数的一般形式为  $g(\mathbf{x}) = \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b$ , 最优分类线方程为  $\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b = 0$ 。

对样本归一化后,使得对线性可分的样本集满足  $|g(\mathbf{x})| \geq 1$ , 即使离最优分类面最近的样本的  $|g(\mathbf{x})| = 1$ , 这样分类间隔为  $\frac{2}{\|\mathbf{w}\|}$ , 因此使间隔最大等价于使  $\|\mathbf{w}\|$  (或  $\|\mathbf{w}\|^2$ ) 最小;而要求分类线对所有样本正确分类,就是要求它满足

$$y_i [\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b] - 1 \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

因此满足上述条件且使  $\|\mathbf{w}\|^2$  最小的分类面就是最优分类面。显然,过两类样本中离分类面最近的点就是式(4)中使等号成立的那些样本,这些样本被叫做支持向量。因为他们支撑了最优分类面。

最优分类面的求解可以表示成如下约束优化问题,即在式(4)的约束下,求函数

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \quad \text{s.t.} \quad y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

的最小值。在线性不可分的情况下,就是某些训练样本不能满足式(4)的条件,可以通过在条件中增加一个松弛项  $\xi_i \geq 0$ , 变为:

$$y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) - 1 + \xi_i \geq 0 \quad (6)$$

最小化  $\sum_{i=1}^n \xi_i$  就可以使错分样本最小,则此时优化问题为:

$$\min \left\{ \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \right\} \quad \text{s.t.} \quad y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) - 1 + \xi_i \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \xi_i \geq 0 \quad (7)$$

其中 C 为某个指定的常数,它实际上其控制对错分样本惩罚的程度的作用,实现在错分样本的比例与算法复杂度之间的折中。对式(7)取偏导并令其为0,得到如下的对偶优化问题:

$$Q(\alpha) = \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) \quad \text{s.t.} \quad \sum_i \alpha_i y_i = 0, \quad 0 \leq \alpha_i \leq C \quad (8)$$

求解上述问题后得到的最优分类函数如下:

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left\{ \left( \sum_i \alpha_i^* \mathbf{x}_i \right) \cdot \mathbf{x} + b^* \right\} = \text{sgn} \left\{ \sum_i \alpha_i^* y_i (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}) + b^* \right\} \quad (9)$$

用核函数  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$  代替最优分类面中的内积,这样就相当于把原特征空间变换到了某一新的特征空间,此

时式(8)的优化问题和式(9)的最优分类函数只需用  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$  代替内积即可。

采用不同的核函数将导致不同的支持向量机算法,本文采用高斯核函数,即  $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp \left\{ -\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2}{2} \right\}$ 。

### 3.2 基于支持向量机的碰摩故障诊断

本文讨论 SVM 在碰摩故障诊断中的应用。其基本思路是:首先将仿真样本随机选择一半作为训练样本,剩余的作为测试样本,用训练样本训练支持向量机,再用测试样本对训练好的 SVM 进行测试,得到对仿真样本的识别率,同时用训练好的 SVM 进行碰摩实验样本的识别,得到对实验样本的识别率。表 3 为具有高斯核函数的不同参数下的 SVM 对碰摩故障的智能诊断结果。从表中可以看出, SVM 对碰摩故障样本达到了较高的识别率,其中在  $\gamma = 0.1, C = 1, 10, 100, 1000$  时,对转子试验器的碰摩故障样本识别率均达到 91%, 其他参数下也在 81% 以上,由此可见, SVM 的参数对识别结果影响远较神经网络小,对于转子碰摩故障的诊断具有更大的工程实用价值。

表 3 支持向量机智能诊断结果

核参数 ( )	样本	惩罚系数 (c)				
		0.5	1	10	100	1000
0.1	仿真样本	1.000 0	1.000 0	0.985 8	0.985 8	0.985 8
	实验样本	0.880 0	0.910 0	0.910 0	0.910 0	0.910 0
0.5	仿真样本	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	实验样本	0.860 0	0.870 0	0.830 0	0.840 0	0.840 0
1	仿真样本	0.975 2	0.996 5	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	实验样本	0.890 0	0.870 0	0.880 0	0.840 0	0.850 0
1.5	仿真样本	0.968 1	0.975 2	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	实验样本	0.910 0	0.880 0	0.870 0	0.820 0	0.810 0

## 4 结 论

通过建立滚动轴承支承下的含不平衡碰摩耦合故障转子动力学模型,运用数值积分得到了反映不同状态的碰摩故障样本,进行了故障信号特征提取,利用仿真样本对 SVM 进行训练和测试,最后用训练好的 SVM 对从航空发动机转子故障试验器上采集的碰摩实验数据进行诊断,最高识别率达到了 91%。本文中,尽管支持向量机的训练样本来源于转子滚动轴承耦合系统动力学仿真,但是对实验数据仍然得到了很高的识别精度,一方面说明了转子滚动轴承耦合系统碰摩故障动力学模型的正确性,另一方面,也为利用动力学模型的故障机理分析来进行故障智能诊断提供了新的思路。

(下转第 114页)

3.47%, Itakura失真测度 0.56;无论从能量还是相似度上,新系统的性能指标都要优于传统 ANC系统。采用 CRANC预处理技术的 ANC系统的输出信噪比为 14.7 dB,因此系统处理增益为 14.2 dB,系统前后的信噪比得到显著提高;由于传统 ANC系统信号失真度太大,几乎没有信噪比提高意义,这里不做计算。

### 3 结论

通过上面的理论分析和仿真实验,我们可以看出 CRANC技术用于 ANC系统的参考输入预处理,可以较为显著地提高信号存在情况下的 ANC系统性能。

当然,这是在“信号和噪声并不总是同时存在”的假设前提下得到的结论,而这一假设在水下军事对抗中也许并不总是合理的,因为战场环境的瞬息万变,该时刻是否存在信号,很难判断;但是,在信号和噪声是否存在能够被确知的某些应用中是合理可行的。例如水下通信,通信编码信号是否存在是确知的,编码未被接收时接收机接收到的任何数据都可认为是干扰噪声,这时即为“噪声存在,信号不存在”时刻;而接收机接收到编码信号的时刻可以被认为是“信号和噪声同时存在”的时刻。

较之文献[10]所提出时域独立成分分析(ICA)预处理 ANC系统,本文的系统不仅具有同样的信号背景下噪声抵消能力,而且不再依赖于 ICA对复杂混叠信号的分离效果,许多成熟的自适应信号处理技术可以使用来达到提高系统性能的目的。事实上,信号和噪声本身无所谓谁先谁后,只要略微改变结构,该系统同样具有时域 ICA预处理 ANC系统所具备的选择性降噪能力。

### 参考文献

- [1] Kuo SM, Morgan D R. Active Noise Control Systems: Algorithm and DSP Implementations [M]. New York: Wiley, 1996.
- [2] M Ayala Botto, J M C Sousa, J M G S áda Costa. Intelligent active noise control applied to a laboratory railway coach model[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13: 473—484.
- [3] Jing Yuan. A hybrid active noise controller for finite ducts [J]. Applied Acoustics, 2004, 65: 45—57.
- [4] 鲍雪山,徐新盛,吴英姿. 具有信噪比处理增益的有源降噪系统性能分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(7): 152—155, 163.
- [5] Zeng Qingning, Waleed H. Abdulla. Speech enhancement by multi-channel crosstalk resistant adaptive noise cancellation [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006 ICASSP, 2006, 1: 1—485—488.
- [6] Snyder SD, Hansen C H. The effect of transfer function estimation error on the filtered-X LMS algorithm [J]. IEEE Trans On signal Processing, 1994, 42(4): 950—953.
- [7] Robert J. Urick. Principles of Underwater Sound [M]. 3<sup>rd</sup> ed. California U. S.: Peninsula Pub, 1996: 328—351.
- [8] Burgess J C. Active adaptive sound control in a duct: a computer simulation [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1981: 70(3): 714—726.
- [9] Andres Buzo, Federico Kuhmann, Carlos Rivera. Rate-distortion bounds for quotient-based distortions with application to Itakura-Saito distortion measures [J]. IEEE transactions on information theory, 1986, 32(2): 141—147.
- [10] 鲍雪山,徐新盛,吴英姿. 一种新的具有信噪比处理增益的前馈型 ANC系统设计[J]. 振动与冲击, 2007, 26(11): 36—40.

(上接第 94页)

### 参考文献

- [1] 王德友. 发动机转静子碰摩振动特性的提取与理论研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1995.
- [2] 袁惠群, 闻邦椿, 王德友, 等. 滚动轴承转子-定子系统的碰摩故障分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 244—247.
- [3] 陈果. 带碰摩耦合故障的转子-滚动轴承-机匣耦合动力学模型[J]. 振动工程学报, 2007, 20(4): 361—368.
- [4] 陈果. 转子-滚动轴承-机匣耦合系统的不平衡碰摩耦合故障非线性动力学响应分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1771—1778.
- [5] Menderes Kalkat, Sahin Yildirim, Ibrahim Uzunay. Artificial neural networks design for fault identification in a rotor-bearing system [J]. Mechatronics, 2005, 15: 573—588.
- [6] Yuan Sheng-Fa, Chu Fu-Lei. Support vector machines-based fault diagnosis for turbo-pump rotor[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20: 939—952.
- [7] 侯佑平, 陈果. 利用转子故障耦合动力学系统模型识别油膜涡动下的碰摩故障[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(11): 1447—1453.
- [8] 李飞敏, 陈果, 侯佑平. 滚动轴承支承下的转子碰摩故障动力分析、特征提取与智能诊断[J]. 航空动力学报, 22(11): 1879—1885.
- [9] Fukata S, Gad E H, Kondou T, et al. On the radial vibration of ball bearings (computer simulation) [J]. Bulletin of the JSME, 1985, 28: 899—904.
- [10] Mevel B, Guyader J L. Routes to chaos in ball bearing [J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 162(3): 471—487.
- [11] 陈予恕, 田家玉, 金宗武, 等. 非线性动力学理论与大型火电机组振动故障综合治理技术[J]. 中国机械工程, 1999, 10(9): 1063—1067.
- [12] Vapnik V. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. Springer-Verlag, New York, 1995.

reliably, adaptively and robustly in airplane cockpit voice background

**Key words:** speech endpoint detection; statistical model; non-linear Kalman filter; backward estimation; robust  
(pp: 83 - 86)

## DESIGN OF SAFE PROTECTION FOR A IMPACT TEST MACHINE

CHEN Wei<sup>1</sup>, GUO Kong-hui<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, SHAN Shu-mei<sup>2</sup>

(1. College of Automobile Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. Department of Electrical and Mechanical, Changchun Automotive Industry Institute, Changchun 130011, China)

**Abstract:** Impact tests have certain risk, their safety is the problem to be considered first. The pneumatic technique is induced into a perpendicular impact test machine, with electro-mechanical integration technique, a new type of impact test machine is designed. More than 10 methods are adopted to acquire safe protection and avoid various possible incidents. So, this impact test machine is safe and reliable.

**Key words:** impact; safe; method  
(pp: 87 - 89)

## DYNAMIC ANALYSIS AND INTELLIGENT DIAGNOSIS FOR RUBBING FAULT OF A ROTOR-BALL BEARING COUPLED SYSTEM

ZHOU Hai-lun, CHEN Guo, LI Fei-ming

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

**Abstract:** Here, in order to diagnose rotor-to-station element impact-rub fault in an aero-engine, a dynamic model of an unbalanced and rubbing rotor supported on ball bearings is established. In the model, clearance of bearing, nonlinear Hertzian contact force between balls and races and varying compliance vibration are considered fully. Firstly, the numerical integration method is employed to obtain the system's responses and many simulation samples of rubbing fault are obtained. Secondly, the simulation samples are employed to train a SVM. Then, the experimental samples can be obtained using the aero-engine tester. Finally, the intelligent diagnosis of rubbing fault using the trained SVM is performed and the highest recognition rate reaches 91%.

**Key words:** rotor; ball bearings; coupling dynamics; rubbing; intelligent diagnosis; support vector machine (SVM)  
(pp: 90 - 94, 114)

## A SIMPLIFIED MODEL FOR SHIP'S RADIATED NOISE SOURCES

MENG Chun-xia<sup>1,2</sup>, YANG Shi-e<sup>1</sup>, LI Gui-juan<sup>2</sup>

(1. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Dalian Scientific Test and Control Technology Institute, Dalian 116013, China)

**Abstract:** Underwater radiated noise of a ship possesses complex spatial intensity distribution. In order to accurately analyze the characteristic of underwater radiated noise of a ship, a simplified model of the ship's noise sources composed of several multi-pole sources is established. After proving the validity of the model, the target's source parameters are inverted using an optimized algorithm through processing the noise data of the ship in different trips, then the sound pressure in another trip is calculated using multi-pole coefficients obtained from inversions. A comparison between the simulation results of the sound pressure of the ship noise using this method and the theoretical results shows that this simplified model is effective.

**Key words:** ship; radiated noise; noise source model  
(pp: 95 - 97)