



侯佑平

## 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

侯佑平, 陈 果

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

**摘要:** 转子碰摩故障通常为不平衡、不对中以及油膜涡动等故障引发的二次故障, 其信号通常具有周期、拟周期和混沌这3种复杂的非线性特征。本文针对油膜涡动下的转子碰摩故障诊断问题, 建立了含不平衡、油膜涡动以及碰摩故障耦合动力学模型, 利用数值仿真研究了转子系统在油膜涡动下的碰摩故障频谱特征, 提取了反映耦合故障的特征信息。为了准确的对碰摩故障进行诊断, 通过不断改变系统参数获取了包括各种状态下的耦合故障样本。最后构造了结构自适应神经网络, 利用一半样本对神经网络进行训练, 再用另一半样本对训练好的神经网络进行测试, 识别率达到了94%以上。计算结果充分表明了本文方法对于识别油膜涡动和碰摩耦合故障的有效性。

**关键词:** 转子动力学; 故障诊断; 油膜涡动; 碰摩; 神经网络

中图分类号: O322; TH113.1

文献标识码: A

文章编号: 1003-8728(2007)11-1447-07

## On Rub Recognition in Oil Whirling Using Rotor Dynamic Model with Coupling Faults

Hou Youping, Chen Guo

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

**Abstract:** Rub is usually the second fault which results from unbalance, misalignment and oil whirl and so on. Its signal output usually has three characteristics: periodic, quasi-periodic, and chaos; and it has complicated nonlinear characteristics. In this paper, we first establish a dynamic model for rotor with coupling faults, considering nonlinear oil whirl force. The model includes three faults: mass unbalance, oil whirl and rubbing. Then we study the frequency domain characteristics of rotor response using numerical integration, and analyze the characteristics information of the coupling faults. In order to diagnose the rotor rubbing faults accurately, enough rubbing samples in various states are needed. Finally, we construct a structural self-adaptive neural network, and use half of the samples to train the net, and other samples to test the net. The recognition rate of over 94 percent demonstrates the effectiveness of this method for recognizing rub faults in oil whirling.

**Key words:** rotor dynamics; fault diagnosis; oil whirl; rub fault recognition rate; neural network

旋转机械(例如:航空发动机、压缩机、汽轮机等)是工业部门中应用最为广泛的一类机械设备,这类设备经常出现各种故障,其中转静碰摩已成为最常见的故障之一。随着对旋转机械高速高效率的需求,转子与静子的间隙越来越小,导致转子和静子间的碰摩事故经常发生,带有碰摩故障的转子系统具有丰富的非线性动力学现象。如何判断旋转机械是否发生了转静碰

摩,对机械设备安全可靠的运行,具有十分重要的意义。目前对转子的研究有两个领域,即碰摩故障机理研究和碰摩故障智能诊断。

在碰摩故障机理研究中,文献[1]研究了考虑油膜力作用的碰摩转子系统的动力学特性,考虑了静子刚度、激励频率、偏心量、阻尼比及摩擦系数等因素对转子系统的影响。通过建立转子-轴承动力学系统模型和数值积分,根据频谱图、

收稿日期:2006-06-16

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

作者简介:侯佑平(1981-),男(汉),安徽,硕士研究生, egzyx@263.net

轴心轨迹图、分岔图、Poincaré图、Lyapunov指数图等来研究转子的动力学特性。支承轴承参数直接决定着油膜力的大小,而油膜力势必会影响转子的振动特性,轴承参数包括轴承的长度、半径、间隙和油的粘度等,文献[2]还考虑了Sommerfeld修正系数对转子系统响应的影响。文献[3]对转子非线性碰摩行为进行数值仿真,获得了各种响应形态,分析了拟周期进入混沌路径和混沌运动突发到周期运动路径,并对碰摩故障的振动特征进行了总结并提出了相应的辨识方法。文献[4]运用时域波形、轴心轨迹以及Poincaré图等方法研究了转静整周碰摩故障的非线性特性。文献[5]详细研究了电机转子发生周期碰摩时,其非线性特性和分岔特性,并进行了试验验证。

在碰摩故障智能诊断中,有很多的国内外学者将人工神经网络应用在转子故障诊断上。文献[6]考虑了最简单的Jeffcott转子,利用LVQ神经网络对转子碰摩模型的非线性混沌时间序列进行分类识别,实现对混沌信号和其它响应信号数据的聚类;文献[7]通过在实际的转子试验台中获取特征信号,讨论了神经网络结构对诊断精度的影响。

碰摩故障通常是不平衡、不对中、油膜涡动等故障所引发的二次故障,具有典型的耦合故障特征,是一个典型的多重故障诊断问题。但是应该看到,目前基于转子耦合故障动力学模型中,对耦合故障的特征分析较少,还远不能达到实用的目的,在碰摩故障识别中,基于实验的故障样本获取困难而且代表性较差,因此导致多重故障诊断一直是一个难题。

本文针对油膜涡动下的碰摩故障识别问题,将故障机理分析和转子故障智能诊断结合起来,首先建立含不平衡-油膜涡动-碰摩的耦合转子动力学模型,利用数值仿真分析耦合故障机理,提取油膜涡动下的碰摩故障特征,然后,运用系统分岔图,通过改变系统参数,通过数值仿真获取大量的故障样本,形成样本库,最后建立结构自适应神经网络模型对耦合故障进行识别。

### 1 用转子多故障耦合动力学模型进行油膜涡动下的碰摩故障诊断流程

图1为利用转子多故障耦合动力学模型进行油膜涡动下的碰摩故障诊断流程。整个流程分为4部分,即信号获取层、特征获取层、知识获取层及智能诊断层。在信号获取层,利用转子多故障耦合动力

学模型获取具有不同特征的碰摩信号,即在现有的转子动力学研究基础上,建立转子不平衡-油膜涡动-碰摩故障仿真动力学模型,通过控制转子运行参数(如:激励频率、转子弯曲刚度、偏心距等)得到周期、拟周期、混沌状态下的所有碰摩样本。在特征获取层中,本文仅仅考虑利用频谱特征进行诊断,因此通过对故障样本进行傅立叶变换,并将频谱特征分成若干个频段即可得到故障样本的频段特征。研究仅仅存在油膜涡动时与在油膜涡动下碰摩故障的频谱特征的区别,从而进行特征选取。在知识获取层中,对故障样本进行特征提取后通过数值仿真得到故障,用一部分样本作为训练样本,另一部分作为测试样本对神经网络训练和检验,从而获取碰摩故障的诊断知识,其知识存储于神经网络的连接权值与阈值。在智能诊断层中,用训练好的神经网络对待识别样本进行识别,即得到碰摩故障的诊断结果。

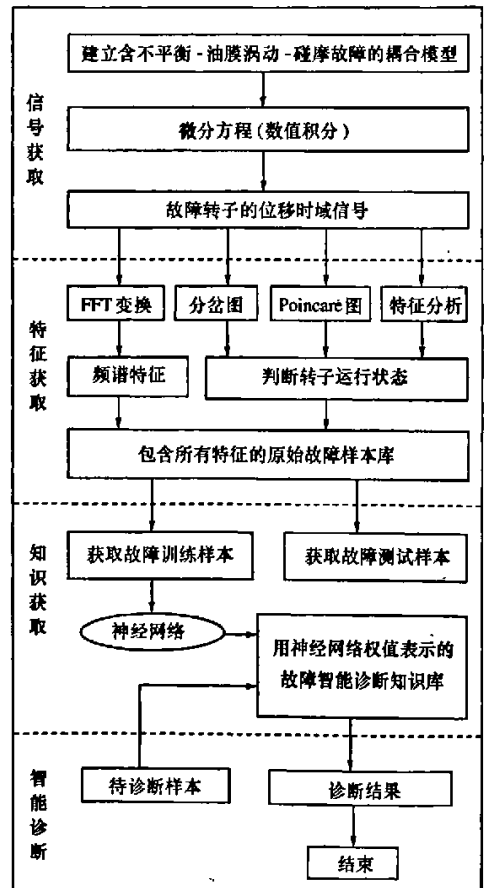


图1 利用转子多故障耦合动力学模型进行油膜涡动下的碰摩故障诊断流程

2 含不平衡-油膜涡动-碰摩的转子多故障耦合动力学模型

图 2 为含不平衡-油膜涡动-碰摩的转子多故障耦合动力学模型。

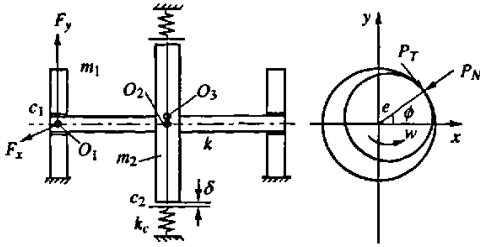


图 2 转子多故障耦合动力学模型

在模型中,转子两端采用对称结构的滑动轴承支承, \$O\_1\$ 为轴瓦几何中心, \$O\_2\$ 为转子几何中心, \$O\_3\$ 为转子质心, \$k\_c\$ 为静子刚度, \$k\$ 为弹性轴刚度, \$c\_1\$ 为转子在轴承处阻尼系数, \$c\_2\$ 为转子圆盘阻尼系数, \$\delta\$ 为转子圆盘和静子的间隙, \$e\$ 为质量偏心量。转子在轴承处集中质量为 \$m\_1\$, 在圆盘处的等效集中质量为 \$m\_2\$, 转子

圆盘与轴承之间为无质量弹性轴, 轴承半径为 \$R\$, 轴承长度为 \$L\$。

在复平面内, 设 \$z = x + iy\$, \$c\$ 为阻尼系数, \$k\$ 为刚度系数, \$F(z)\$ 为合外力, 则有动力学方程为

$$mz'' + cz' + kz = F(z) \quad (1)$$

(1) 碰摩力

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\$ 轴上, 并且无量纲化:

$$x = \frac{x}{\sigma}, y = \frac{y}{\sigma}, b = \frac{e}{\sigma}, \sigma \text{ 为平均油膜厚度, 可以}$$

得到在 \$x\$ 和 \$y\$ 方向的碰摩力分别为

$$\begin{cases} P_x = -k_c \sigma \left(1 - \frac{\delta}{r}\right) (x - f \cdot y) \\ P_y = -k_c \sigma \left(1 - \frac{\delta}{r}\right) (f \cdot x + y) \end{cases} \quad (r \geq \delta) \quad (2)$$

式中: \$\delta\$ 为转静间隙 (无量纲); \$k\_c\$ 为静子径向刚度; \$f\$ 为摩擦系数; \$r\$ 为转子圆盘的径向位移。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

(2) 无量纲非线性油膜力

$$\begin{cases} f_x = - \frac{[(x - 2y')^2 + (y + 2x')^2]^{1/2}}{1 - x^2 - y^2} \times 3x \cdot V(x, y, \alpha) - \sin \alpha \cdot G(x, y, \alpha) \\ f_y = - \frac{[(x - 2y')^2 + (y + 2x')^2]^{1/2}}{1 - x^2 - y^2} \times 3y \cdot V(x, y, \alpha) + \cos \alpha \cdot G(x, y, \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$V(x, y, \alpha) = \frac{2 + (y \cos \alpha - x \sin \alpha) G(x, y, \alpha)}{1 - x^2 - y^2} \quad (4)$$

$$S(x, y, \alpha) = \frac{x \cos \alpha + y \sin \alpha}{1 - (x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2} \quad (5)$$

$$G(x, y, \alpha) = \frac{2}{1 - x^2 - y^2} \left[ \frac{\pi}{2} + \arctan \frac{y \cos \alpha - x \sin \alpha}{\sqrt{1 - x^2 - y^2}} \right] \quad (6)$$

$$\alpha = \arctan \frac{y + 2x'}{x - 2y'} - \frac{\pi}{2} \text{sign} \left( \frac{y + 2x'}{x - 2y'} \right) - \frac{\pi}{2} \text{sign}(y + 2x') \quad (7)$$

(3) 令 \$\tau = \omega t\$, 无量纲化后微分方程为

$$\begin{cases} x_1'' + \frac{c_1}{\omega m_1} x_1' + \frac{k}{\omega^2 m_1} (x_1 - x_2) = \frac{sM}{m_1 \omega^2 \sigma} f_x(x_1, y_1, x_1', y_1') \\ y_1'' + \frac{c_1}{\omega m_1} y_1' + \frac{k}{\omega^2 m_1} (y_1 - y_2) = \frac{sM}{m_1 \omega^2 \sigma} f_y(x_1, y_1, x_1', y_1') - G \\ x_2'' + \frac{c_2}{\omega m_2} x_2' + \frac{2k}{\omega^2 m_2} (x_2 - x_1) = \frac{P_x(x_2, y_2)}{m_2 \omega^2 \sigma} + b \cos \tau \\ y_2'' + \frac{c_2}{\omega m_2} y_2' + \frac{2k}{\omega^2 m_2} (y_2 - y_1) = \frac{P_y(x_2, y_2)}{m_2 \omega^2 \sigma} + b \sin \tau - G \end{cases} \quad (8)$$

式中: \$m\_1 = 4.0 \text{ kg}\$, \$m\_2 = 32.1 \text{ kg}\$, \$R = 25 \text{ mm}\$, \$L = 12 \text{ mm}\$, \$\sigma = 0.11 \text{ mm}\$, \$u = 0.018 \text{ Pa} \cdot \text{s}\$, \$c\_1 = 1050 \text{ N} \cdot \text{s/m}\$, \$c\_2 = 2100 \text{ N} \cdot \text{s/m}\$, \$k\_c = 3.5 \times 10^6 \text{ N/m}\$, \$k\$

\$= 2.5 \times 10^7 \text{ N/m}\$。\$s\$ 为 Sommerfeld 修正系数, \$s = \frac{u \omega R L}{M} \left( \frac{R}{\sigma} \right)^2 \left( \frac{L}{2R} \right)^2\$, \$u\$ 为润滑油黏度, \$M\$ 为转子圆盘重量的一半, \$G\$ 为无量纲重力, \$G = \frac{g}{(\omega^2 \sigma)}\$。

本文对微分方程组的求解采用 4 阶变步长龙格-库塔法进行数值积分, 通过控制转静间隙 \$\delta\$ 获取转子碰摩和不碰摩的时域信号。

3 转子在油膜涡动下的碰摩故障特征分析

3.1 特征分析

取转静间隙 \$\delta = 0.02\$ 时, 此时转子处于碰摩状态。分别将静子刚度和激励频率作为连续参数, 针对每一个取值对系统进行计算, 按周期延拓法取转子幅值作分岔图的纵坐标, 而该参数为横坐标, 从而得到如图 3 所示的分岔图。

由图 3(a) 知: 当静子刚度较小时, 碰摩力小于油膜力, 系统处于混沌状态, 随着碰摩力的增大接近并超过油膜力, 系统出现倒分岔现象, 逐渐转化为周期运动。可见, 碰摩对油膜涡动下的转子运动状态影响很大。由图 3(b) 知: 随着激励频率不断的变化, 转子处于不同的运动状态, 运动形式由周期、拟

周期和混沌不断交替,但不能区分拟周期和混沌状态,这需用 Poincaré 图来识别。显然,随着系统某一参数改变时,系统会出现不同运动形式,故可通过改变参数来获取同一故障下的多个故障样本,并以此作为故障诊断的依据。

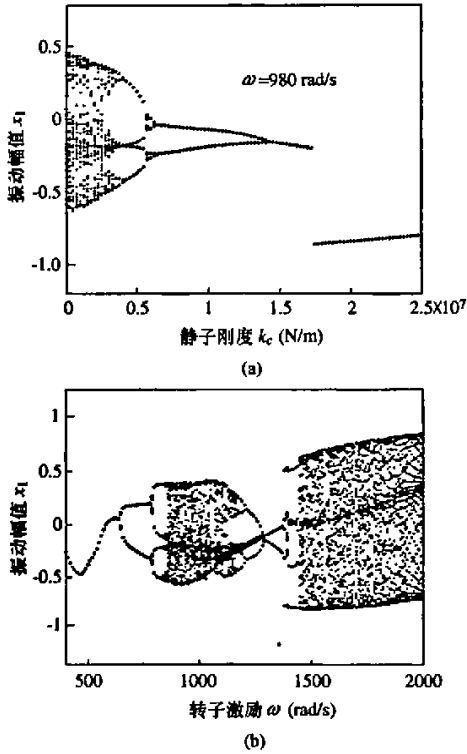


图3 转子按不同变化参数所得到的分岔图

再在不同的激励下对转子响应作傅立叶变换,得到三维谱图,见图4。从图4可看出:在  $\omega = 750$  rad/s 时,系统开始出现半速涡动,当  $\omega = 1400$  rad/s 时,频率锁在 700 rad/s 左右,且振幅保持在较大水平,表现为油膜振荡运动形式。由此可见,该模型正确反映了油膜涡动下的转子运动状态,故可以此进行油膜涡动和碰摩耦合故障的机理分析。

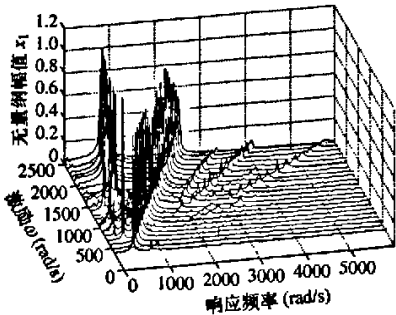


图4 转子随激励频率变化的三维谱图

### 3.2 频率特征提取

图5所示为涡动和碰摩的频谱比较。图5所示分别为转子在激励  $\omega = 800$  rad/s、静转间隙  $\delta = 0.60$  和  $\delta = 0.02$  时涡动和碰摩的阶次谱图。从图5可以看出,转子在不碰摩和碰摩时在1倍频以下的低频时的区别很大,将阶次谱分成如下14个频段:  $[0.1 \times, 0.2 \times, 0.3 \times, 0.4 \times, 0.5 \times, 0.6 \times, 0.7 \times, 0.8 \times, 0.9 \times, 1.0 \times, 2.0 \times, 3.0 \times, 4.0 \times, 10.0 \times]$ , 为能体现低频部分差别,将低频部分分得较细。取每个频段内的幅值最大值作为特征,并且经过归一化处理,这样就获得频段特征。设  $x_i, \hat{x}_i (i = 1, 2, \dots, 14)$  分别为归一化前和后的各频段内所取的值,  $x_{max}, x_{min}$  分别为归一化前频段的最大值和最小值,则

$$\hat{x}_i = (x_i - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \quad (9)$$

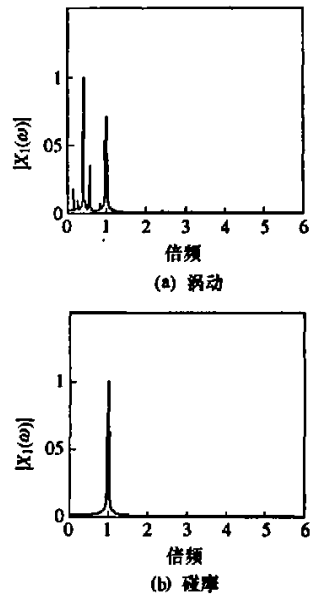


图5 涡动和碰摩的频谱比较

考虑油膜涡动下不碰摩和碰摩状态,提取频段特征后进行比较。图6(a)~图6(c)为转速  $\omega = 1000$  rad/s 下,静子刚度  $k_c$  改变的比较,图6(d)~图6(f)为激励  $\omega$  改变,其它参数不变比较。横坐标的数字所代表的频段(倍频)区间为:“1”——“0.1 x”、“2”——“0.2 x”、“3”——“0.3 x”、“4”——“0.4 x”、“5”——“0.5 x”、“6”——“0.6 x”、“7”——“0.7 x”、“8”——“0.8 x”、“9”——“0.9 x”、“10”——“1.0 x”、“11”——“2.0 x”、“12”——“3.0 x”、“13”——“4.0 x”、“14”——“10.0 x”。

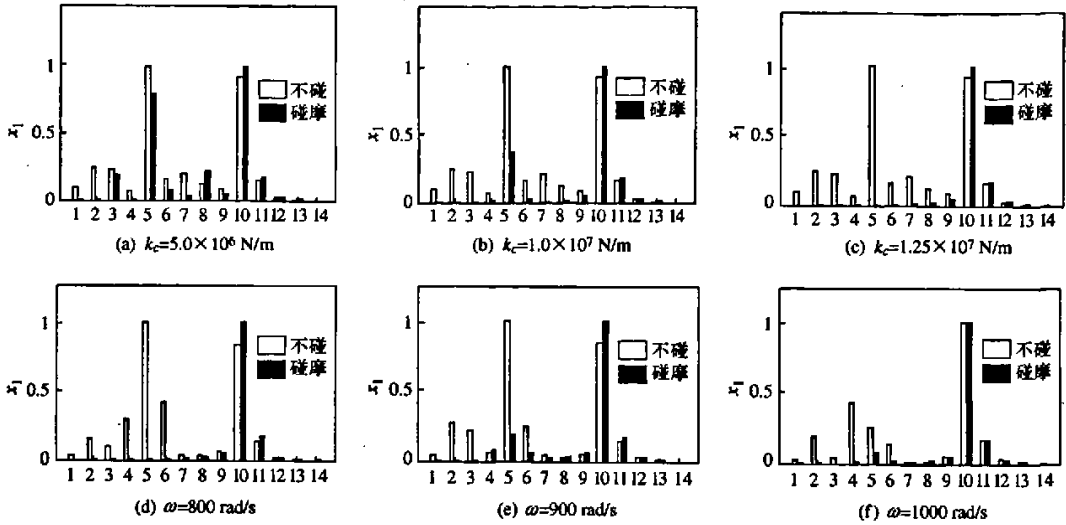


图 6 转子在不碰和碰摩时各频段的特征值对比

由此得出以下结论:

(1) 转子不碰摩时,代表油膜涡动的 0.5 倍频很大,当改变转静间隙使转子碰摩时,0.5 倍频受到很大的抑制甚至消失;碰摩后,1 倍频相对增加,为主要振动频率,取代油膜涡动的主要振动频率 0.5 倍频,图 6(a)~图 6(e)均有此特点。

(2) 转子碰摩后,低频分量能量减少,频谱由连续变为相对离散和集中,正好体现了碰摩对油膜涡动所导致的混沌现象的抑制效果,此特点在图 6(c),图 6(d),图 6(f)表现很明显;高频分量也有所增加,但变化相对较小。

#### 4 转子碰摩故障样本的获取

为了使训练样本遍历所有碰摩状态,保证样本质量,在数值仿真计算中需要计算碰摩过程中所发生的周期、拟周期和混沌现象。随激励频率  $\omega$  等参数的改变,转子运动出现分岔和(或)倒分岔现象。因此,本文根据转子运动的分岔理论,选取对转子动力学特性影响较大的参数:激励频率  $\omega$ 、静子弯曲刚度  $k_c$ 、偏心量  $e$  和摩擦系数  $f$ ,通过不断改变参数进行数值积分获取在碰摩时,不同状态的时域信号,并进行频段特征提取。

##### (1) 获取样本

(a) 改变系统参数:激励频率  $\omega$ 、静子弯曲刚度  $k_c$ 、偏心量  $e$ 、摩擦系数  $f$ ,具体方法见表 1。

表 1 仿真样本获取

变化参数		不变化的参数				数据个数	
参数	范围	$\omega$	$k_c$	$e$	$f$	不碰摩	碰摩
激励频率 $\omega$	750 ~ 1300	—	$3.5 \times 10^6$	0.03	0.05	60	60
静子刚度 $k_c$	$(0 \sim 2.5) \times 10^7$	1000	—	0.05	0.1	100	100
偏心量 $e$	0.030 ~ 0.080	1200	$3.5 \times 10^6$	—	0.1	50	50
摩擦系数 $f$	0.03 ~ 0.35	900	$3.5 \times 10^6$	0.05	—	30	30

(b) 进行碰摩状态识别,作为目标向量。根据碰摩力大小判断是否发生碰摩,若碰摩力为零,则表示不碰,用 0 表示;若碰摩力有非零,则表示碰摩,用 1 表示。

##### (2) 样本分析

由获取样本共得到 240 个碰摩和 240 个不碰摩数据,共计 480 个样本,各取碰摩和不碰摩一半样本

作为训练样本和测试样本。样本中含有周期、拟周期、混沌这 3 种状态。表 2 中样本 2 代表碰摩故障下的拟周期状态,如图 7(b)所示,表 3 中样本 2 和样本 1 代表周期和混沌状态如图 7(a),图 7(c)所示。

表2 以激励频率 $\omega$ 为变化参数的频谱特征(部分)

样本序号	激励 (rad/s)	频段(倍频)特征														状态
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	800	0.0162	0.0241	0.3520	0.0489	1.0000	0.0992	0.0496	0.3988	0.0611	0.9311	0.1505	0.0121	0.0175	0.0000	0
		0.0000	0.0026	0.0069	0.0176	0.6486	0.0535	0.0028	0.0142	0.0442	1.0000	0.1770	0.0138	0.0270	0.0025	1
2	1000	0.0967	0.2445	0.2240	0.0683	1.0000	0.1598	0.2020	0.1260	0.0899	0.9217	0.1569	0.0220	0.0086	0.0000	0
		0.0313	0.0549	0.2544	0.0316	0.8984	0.0962	0.0637	0.2279	0.0550	1.0000	0.1681	0.0247	0.0124	0.0000	1
3	1200	0.0000	0.0055	0.2885	0.0156	1.0000	0.0996	0.0276	0.1507	0.0451	0.7648	0.1259	0.0369	0.0060	0.0008	0
		0.0000	0.0045	0.2190	0.0141	1.0000	0.0999	0.0281	0.1448	0.0545	0.9417	0.1565	0.0377	0.0051	0.0000	1

表3 以静子刚度 $k_s$ 为变化参数的频谱特征(部分)

样本序号	静子刚度 (N/m)	频段(倍频)特征														状态
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	$2.5 \times 10^6$	0.0967	0.2445	0.2240	0.0683	1.0000	0.1598	0.2020	0.1260	0.0899	0.9217	0.1569	0.0220	0.0086	0.0000	0
		0.0530	0.1108	0.2353	0.0762	0.9705	0.1092	0.0892	0.1903	0.0829	1.0000	0.1708	0.0229	0.0093	0.0000	1
2	$5.0 \times 10^6$	0.0967	0.2445	0.2240	0.0683	1.0000	0.1598	0.2020	0.1260	0.0899	0.9217	0.1569	0.0220	0.0086	0.0000	0
		0.0010	0.0053	0.1943	0.0086	0.7927	0.0807	0.0316	0.2153	0.0541	1.0000	0.1682	0.0237	0.0151	0.0000	1
3	$1.0 \times 10^7$	0.0967	0.2445	0.2240	0.0683	1.0000	0.1598	0.2020	0.1260	0.0899	0.9217	0.1569	0.0220	0.0086	0.0000	0
		0.0010	0.0025	0.0052	0.0118	0.3687	0.0255	0.0064	0.0174	0.0469	1.0000	0.1755	0.0262	0.0109	0.0000	1

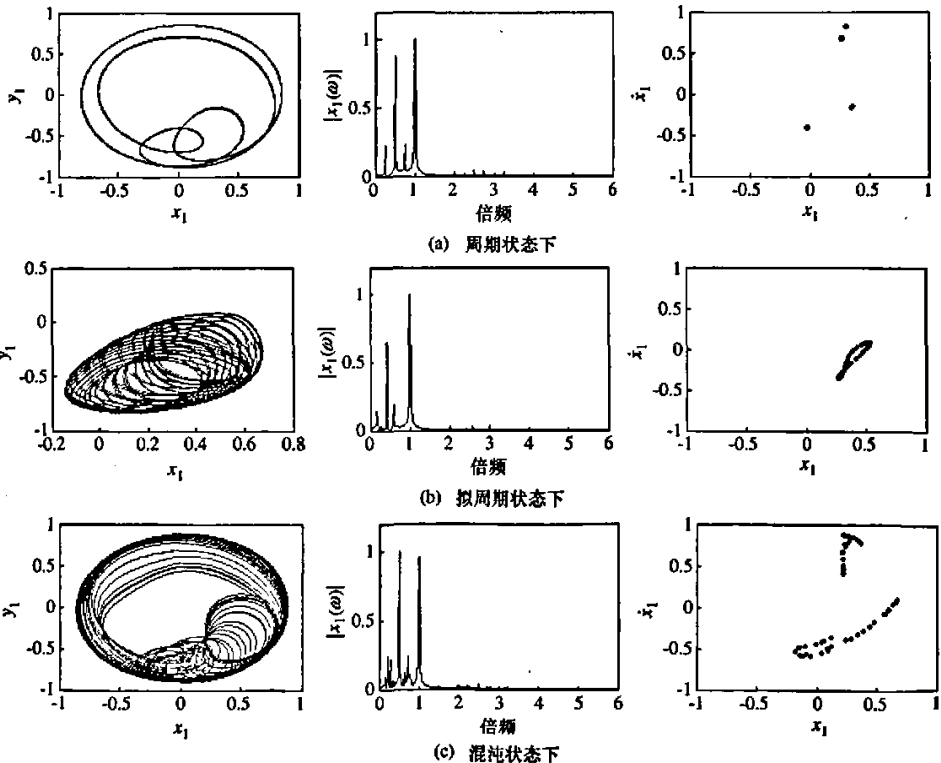


图7 转子碰摩响应的轴心轨迹图、频谱图及Poincaré图

## 5 基于神经网络的碰摩故障智能诊断

神经网络具有超强的非线性映射能力,在智能诊断和模式识别中得到了广泛的应用,本文选择 3 层 BP 神经网络来对训练样本进行学习,从而对碰摩故障进行识别。在神经网络的结构设计中,输入层为 14 个频段特征参数,输出层为碰摩两个状态:未碰摩和碰摩,分别用 0 和 1 表示,则:输入层神经元个数  $n_1 = 14$ ,输出层神经元个数  $n_2 = 1$ 。运用 Matlab 进行神经网络建模,网络的输入层和隐含层神经元传递函数均采用 S 型对数传递函数  $\text{logsig}$ ,训练函数采用  $\text{trainlm}$ 。而隐层节点数和训练允许误差与神经网络的泛化能力有很大的关系。

为了获得具有最大泛化能力的神经网络结构和

参数,本文利用文献[8]提出的结构自适应神经网络来自动获取最佳的网络结构参数。其基本思想是:将故障样本随机选择一半作为训练样本,剩余的作为测试样本,用训练样本训练网络,再用测试样本对训练好的网络测试,用所产生的测试误差构造遗传算法的适应度函数,利用遗传算法的全局搜索能力自动获取测试误差最小,且具有最佳泛化能力的网络结构参数。利用文献[8]的方法自动获取最佳的网络结构和参数为:隐层节点数为 10,允许训练误差为  $10^{-4}$ 。

在获得最佳神经网络后,利用由神经网络权值和阈值表示的故障智能诊断知识库对仿真故障样本进行诊断,识别结果如表 4 所示。

表 4 神经网络对仿真数据的识别率

数据来源	转子耦合故障动力学模型仿真数据(涡动下不碰摩及涡动下碰摩数据各一半)			
数据个数	按激励 $\omega$	按刚度 $k_r$	按偏心量 $e$	按摩擦系数 $f$
		60	100	50
正确识别数	56	95	49	27
总识别率	94.58%			

从表 4 中可以看出用训练样本训练得到的神经网络对仿真数据得到满意的诊断结果,识别率达到 94.58%。

## 6 结束语

通过建立含不平衡-油膜涡动-碰摩耦合故障动力学模型,进行了油膜涡动下的故障信号特征分析和提取,通过数值积分仿真得到了反映不同状态的耦合故障样本,利用结构自适应神经网络算法合理选取了 BP 神经网络结构,利用所得到的样本对神经网络进行训练并验证后,识别率达到了很高的水平,充分表明了本文方法的有效性,所研究的油膜涡动-碰摩耦合故障特征是有效的,能够很好地对耦合故障转子系统进行在油膜涡动下的碰摩故障诊断。

## [参考文献]

- [1] 闻邦椿,武新华,丁千,韩清凯. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M]. 北京:科学出版社,2004
- [2] 万方义,许庆余,张小龙,许清源. 油膜支承转子系统动静件碰摩特征分析[J]. 应用力学学报,2002,(6)
- [3] 胡芑庆,温熙森. 转子碰摩故障振动特征的数值分析与辨识方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(12)
- [4] Chu F L, Lu W X. Experimental observation of nonlinear vibrations in a rub-impact rotor system[J]. Journal of Sound and Vibration,2005,283:621-643
- [5] Liu Q S, Liu Q H, Twizell E H. The existence of periodic motions in rub-impact rotor systems[J]. Journal of Sound and Vibration,2003,264:1127-1137
- [6] 任辉. 基于 LVQ 神经网络的混沌时间序列分类识别[J]. 机械科学与技术,2001,20(6)
- [7] Kalkat M, Yildirim S, Uzunay L. Artificial neural networks design for fault identification in a rotor-bearing system[J]. Mechatronics,2005,15: 573-588
- [8] 陈果. 神经网络模型的预测精度影响因素分析及其优化[J]. 模式识别与人工智能,2005,18(5):528-534