

文章编号:1000-8055(2013)10-2161-06

基于融合信息熵距的转子裂纹-碰摩耦合故障诊断方法

艾延廷, 付 琪, 田 晶, 陈潮龙

(沈阳航空航天大学 航空航天工程学部

辽宁省航空推进系统先进测试技术重点实验室, 沈阳 110136)

摘 要: 针对转子系统的裂纹-碰摩耦合故障,提出了一种基于融合信息熵距的转子振动故障诊断方法.利用转子实验台模拟转子系统裂纹故障、碰摩故障及裂纹-碰摩耦合故障,并采集三种典型故障的振动加速度信号.利用时域的奇异谱熵、频域的功率谱熵、时-频域的小波能谱熵以及小波空间特征谱熵,计算融合信息熵距实现故障诊断.实例研究表明:这四种信息熵形成了综合评价转子振动状态的特征指标,多测点、多转速下的信息熵距曲线较好地区分了单一故障和耦合故障,有效地提高了转子振动故障诊断的准确性.测试信号与其对应的振动故障之间的信息熵距最小,信息熵距曲线位于坐标轴的最下方,达到了诊断单一故障和耦合故障的目的.

关 键 词: 裂纹-碰摩耦合故障; 信息熵; 信息融合; 信息熵距; 故障诊断

中图分类号: V231.92; TH165⁺.3

文献标志码: A

Diagnosis method for crack-rubbing coupled fault in rotor system based on integration of information entropy distance

AI Yan-ting, FU Qi, TIAN Jing, CHEN Chao-long

(Liaoning Key Laboratory of Advanced Test Technology for Aeronautical Propulsion System,
Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University,
Shenyang 110136, China)

Abstract: For the crack-rubbing coupled fault in rotor system, a fault diagnosis method was proposed. Firstly, the rubbing fault, crack fault and crack-rubbing coupled fault were simulated on rotor test rig. The acceleration signals of each fault were collected. The integration of information entropy distance was calculated for fault diagnosis using singular spectrum entropy in time-domain, power spectrum entropy in frequency domain, wavelet energy entropy and wavelet spatial characteristics spectral entropy in frequency-time domain. The case study showed that these four information entropies could evaluate rotor vibration state comprehensively. Information entropy distance curves in multiple points and multiple speeds can effectively improve the accuracy and distinguish single and coupled faults. The information entropy distance between the test signal and its corresponding fault is the least and the information entropy distance curve is located in the bottom of the axis, so its fault category can be diagnosed.

收稿日期:2012-10-01

网络出版地址:

基金项目:航空科学基金(2008ZB54006)

作者简介:艾延廷(1963—),男,辽宁葫芦岛人,教授、硕士生导师,博士,主要研究方向为航空发动机结构强度、振动分析与故障诊断.

E-mail: ytai@163.com

Key words: crack-rubbing coupled fault; information entropy; integration of information; information entropy distance; faults diagnosis

碰摩故障和裂纹故障是转子系统中的两种常见故障. 裂纹故障早期不容易被发现,而故障加重时又会产生严重的后果. 裂纹故障通常是由于转子长时间的工作或者转子材料存在缺陷所导致,是旋转机械工作存在的巨大安全隐患. 碰摩故障一般是由于局部摩擦没有被及时发现,随着转子的不断工作导致摩擦加剧出现了整周的摩擦,从而使得旋转机械产生剧烈的振动,甚至无法正常工作. 目前,对于转子系统故障诊断的方法研究较多,但大多数都是针对裂纹和碰摩单一故障进行的^[1-3]. 然而,转子系统中很有可能会出现耦合故障的情况. 因此,研究裂纹-碰摩耦合故障的诊断方法具有一定的意义.

耦合故障的动力学特性比较复杂,对其故障的诊断也比单一故障困难. 目前,国内外的许多学者都对转子系统的耦合故障进行了研究,并且取得了一些研究成果. 在国外,Muszynska 研究了转子松动-碰摩耦合故障的非线性动力学问题^[4]; Tejas 等探讨了呼吸裂纹对转子系统振动特性的影响,并且建立了动静碰摩的裂纹转子-机匣系统模型^[5]. 在国内,罗跃纲等利用分岔图和最大 Lyapunov 指数图对含有支座松动-碰摩耦合故障的转子系统的非线性振动特性进行了分析^[6]; 万方义等指出在耦合故障检测和诊断时,应充分考虑各个非线性因素,而不是简单的单一故障线性叠加,这样才能取得更合理的结果^[7].

为了更好地诊断出转子的振动故障,本文全面的融合了转子振动故障特征,提出了转子振动故障的信息熵距诊断方法. 信息熵近几年来常被用作故障诊断的特征向量,由于它可以对转子振动状态的复杂程度进行直观的描述. 本文采用信息熵特征提取和融合分析方法,对转子系统裂纹、碰摩及裂纹-碰摩耦合故障的实测信号进行了分析,分别提取其时域、频域及时-频域的信息熵特征,在此基础上通过计算信息熵距实现故障的分类^[8].

1 振动信号的信息熵特征

1.1 信息熵的基本概念

信息熵是信息论中用于度量信息量的一个量. 系统越是有序,信息熵就越低;系统越是混乱,信息熵越高. 因此,信息熵可以作为系统混乱程度

的一种度量. 其数学定义为:假设 M 是由一个可测集合 H 生成的勒贝格空间,其测度为 μ ,且 $\mu(M) = 1$. 且空间 M 可表示为其有限划分 $A = (A_i)$ 中互不相容集合的形式,即: $M = \bigcup_{i=1}^n A_i$, 且 $A_i \cap A_j = \emptyset, \forall i \neq j$, 则对于该划分 A 的信息熵为

$$S(A) = - \sum_{i=1}^n \mu(A_i) \ln \mu(A_i) \tag{1}$$

其中 $\mu(A_i) = A_i/M$ 为任意子集 A_i 的测度, $i = 1, 2, \dots, n$.

1.2 振动信号的时域信息熵特征

设任意一个测点的振动信号为 $\{x_i\}, i = 1, 2, \dots, N$, 其中 N 为采样点数. 利用时延嵌陷技术^[9], 选择常数为 K , 时延常数为 1 的分析模式窗口, 可以将原始振动信号划分为 $N-K$ 个模式数据, 得到重构空间 A , 即

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_K \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-K} & x_{N-K+1} & \cdots & x_N \end{bmatrix}$$

对 A 进行奇异值分解可得该振动信号的奇异值谱 $\{\delta_i\}, 1 \leq i \leq K$. 振动信号的奇异值谱 $\{\delta_i\}$ 是对该信号时域的一种有效划分, $p_i = \delta_i / \sum_{i=1}^K \delta_i$ 表示在此种划分下任意一个奇异值所占整个谱的比例. 由此, 可以定义奇异谱熵为

$$H_t = - \sum_{i=1}^K p_i \ln p_i \tag{2}$$

其中下标 t 表示时域.

在所有信号当中, 白噪声信号的奇异谱熵为 $H_{t, \max} = \ln K$ 最大. 因此, 可以将振动信号的奇异谱熵除以白噪声信号的奇异谱熵 $\ln K$ 对其进行归一化处理, 以便分析与比较. 式(2)可被修正为

$$H_t = \frac{- \sum_{i=1}^K p_i \ln p_i}{\ln K} \tag{3}$$

振动信号的奇异谱熵反映了该信号在奇异谱划分下的不确定性. 振动信号的能量越均匀分布于所有奇异谱中, 说明该信号就越复杂、不确定性就越大, 相应的奇异谱熵也就越大; 相反, 如果振动信号的能量集中于少数几个奇异谱熵中, 说明信号简单、不确定性小, 相应地奇异谱熵也就越小.

1.3 振动信号的频域信息熵特征

转子振动信号的功率谱定义为

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi N} |X(\omega)|^2 \quad (4)$$

式中 $X(\omega)$ 为某一测点振动信号 $x(t)$ 的离散傅里叶变换. 振动信号从时域变换到频域的过程中, 能量保持不变. 即

$$\sum x^2(t) \Delta t = \sum |X(\omega)|^2 \Delta \omega \quad (5)$$

因此, $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ 可以看作是振动信号在频域中的一种有效划分, 由此, 可以定义其功率谱熵(记作 H_f , 下标 f 表示频域)为

$$H_f = - \sum_{i=1}^N q_i \ln q_i \quad (6)$$

式(6)中第 i 个频谱所占的比例为

$$q_i = S_i / \sum_{i=1}^N S_i$$

白噪声信号的功率谱熵最大, $H_{f, \max} = \ln N$. 因此, 可以将振动信号的功率谱熵进行归一化处理, 于是, 可以将式(6)修正为

$$H_f = \frac{- \sum_{i=1}^N q_i \ln q_i}{\ln N} \quad (7)$$

功率谱熵反映了振动信号频谱的能量集中程度. 振动信号的能量越集中于少数几个频率上, 说明振动信号越简单、不确定性越小, 相对应的功率谱熵 H_f 就越小; 如果振动信号的能量均匀分布于整个频谱熵, 说明振动信号复杂、不确定性大, 相对应的功率谱熵 H_f 也就越大. 因此, 振动信号的频域能量分布情况, 可以用功率谱熵定量的表示, 可以将其作为特征向量^[10].

1.4 振动信号的时-频域信息熵特征

设有限能量的函数 $f(t)$ 在小波变换前后能量是守恒的

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{c_\psi} \int_0^\infty a^{-2} E(a) da \quad (8)$$

$$c_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega \quad (9)$$

$$E(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (10)$$

其中 $E(a)$ 为函数 $f(t)$ 在尺度为 a 时的能量, 因此 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ 为信号 $f(t)$ 在 n 个尺度下的小波能谱. $q_i = E_i / \sum_{i=1}^n E_i$ 为任意尺度下的小波能谱 E_i 占整个谱能量的比例. 因此, 可以定义振动信号的小波能谱熵为

$$H_{we} = - \sum_{i=1}^n q_i \ln q_i \quad (11)$$

由于 $W = \left[\frac{|W_f(a, b)|^2}{C_\psi a^2} \right]$ 反映了振动信号能量在二维小波空间中的分布情况, 因此, 可以对矩阵 W 进行奇异值分解得到奇异值谱 $\{\delta_i\}, i = 1, 2, \dots, n$, 进而得到任意一个奇异值谱 δ_i 占整个奇异值谱的比例 $p_i = \delta_i / \sum_{i=1}^n \delta_i$. 因此, 可以定义小波空间特征谱熵为

$$H_{ws} = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (12)$$

由于小波形成的基函数之间存在着某种联系, 并不是线性无关的, 因此, 小波能谱熵和小波空间特征谱熵可以同时反映振动信号时域和频域上的能量分布情况^[11].

2 基于信息熵距的故障诊断方法

2.1 信息熵距的概念

通过第一部分对四种信息熵的分析可知, 每一种信息熵都能够反映出振动信号的复杂性和不确定性, 只是反映的领域不同而已. 因此, 综合考虑振动信号的奇异谱熵、功率谱熵、小波能谱熵和小波空间特征谱熵对其进行分析, 可使故障诊断的准确度提高^[12]. 如果将每种信息熵看作一个维度, 那么四种信息熵就可以组成一个四维的特征向量. 对于任意一种故障而言, 都可以根据式(3)、式(7)、式(11)和式(12)计算其四种信息熵: (S_1, S_2, S_3, S_4) , 即四维空间里的一个点.

通过模拟转子振动故障实验, 得到每种故障的大量振动信号, 利用式(3)、式(7)、式(11)、式(12)计算每种信息熵得到故障的信息熵带. 每种故障的信息熵带都在一个较大幅度内变化, 通过计算熵带的平均值, 就可以得到每种故障的信息熵中心, 称为信息熵点. 如表 1 所示, 为碰摩、裂纹及裂纹-碰摩耦合故障的信息熵点.

在故障诊断的过程中, 将裂纹故障、碰摩故障和裂纹-碰摩耦合故障看作是转子系统的故障域, 记作 $U = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}$. μ_1, μ_2, μ_3 分别代表此故障域的子集. 对于未知故障的诊断, 只需判断其振动信号的信息熵点与故障域中哪个故障的熵点更接近, 即属于哪个子集.

设未知故障的熵点 μ_a 与第 i 种故障的熵点 μ_i 之间的距离 d_i 为信息熵距, 具体定义为

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (S_{aj} - S_{ij})^2} \quad (13)$$

其中 i 表示故障类别 ($i = 1, 2, 3$); j 表示信息熵类别 ($j = 1, 2, 3, 4$); S_{aj} 表示待测故障 μ_a 的第 j 种信息熵值; S_{ij} 表示第 i 种故障熵点 μ_i 的第 j 种信息熵值.

表 1 转子振动故障信息熵点
Table. 1 Information entropy point of rotor vibration faults

故障类型	奇异谱熵	功率谱熵	小波能谱熵	小波空间特征谱熵
裂纹	78.442	77.978	73.211	31.140
碰摩	57.090	68.733	56.551	32.226
裂纹-碰摩耦合	70.170	72.454	72.454	30.125

对未知故障进行诊断时,首先,求解未知故障的信息熵点与每种故障的信息熵点之间的距离,即信息熵距;其次,通过求取信息熵距的最小值来判断待诊断对象属于何种故障.

2.2 多转速下的信息熵距曲线

在转子振动故障模拟实验中,每一次升降速实验都是按照一定的转速间隔来采集转子的振动信号,进而得到多转速下的信息熵距.为了便于对比,将多转速下的信息熵距图形化,得到多转速下的信息熵距曲线.多转速下的信息熵距曲线反映了转子振动故障的过程变化规律,是一个过程量,不是一个状态量,因此,具有更高的诊断准确度.

通过上述分析可知,在故障诊断过程中,利用式(13)可以得到待诊断对象的振动信号与碰摩故障、裂纹故障、碰摩-裂纹耦合故障的振动信号的信息熵距曲线.最靠近横坐标的信息熵距曲线的信息熵距值最小,说明待诊断对象的振动信号的信息熵点与该故障的信息熵点之间的距离最接近,由此,可以得到待诊断对象属于该故障,反之亦然.

3 故障诊断实例

3.1 转子故障模拟实验

转子的振动形态与转速、测点密切相关,不同的转速和测点,所对应的振动形态都是不一样的^[13-15].转子系统在故障状态下工作时,任意时刻的振动形态并不能很好地体现出转子振动故障的特征,但是其故障特征规律却能够较好地体现在转子升速和降速的过程中体现出来,该规律是进行故障诊断的关键.因此,本次实验模拟了多转速、多

测点的转子单一振动故障和耦合振动故障.

转子实验台和实验测量系统如图 1 所示.在转子实验台上分别模拟了碰摩故障、裂纹故障和裂纹-碰摩耦合故障.模拟裂纹故障时,裂纹位置在转子中间,裂纹深度为 0.4 mm,碰摩故障为中度碰摩.模拟耦合故障时两种故障的严重程度不变.转子系统上分布了 6 个加速度传感器,相当于每次升降速实验可以得到 6 个测点的振动加速度信号.由于实例计算需要大量的多转速下的振动加速度信号,因此,每种故障都进行了多次升降速实验,转速范围限定在 1000 r/min 到 3600 r/min,每隔 200 r/min 进行一次采样.综上所述,每完成一次升速或者降速实验,6 个测点总共可以得到 84 组振动加速度信号.

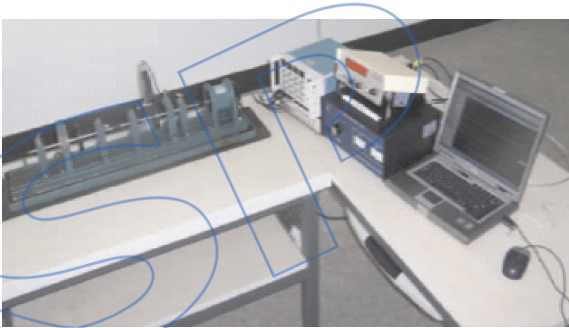


图 1 转子实验台及其测试系统
Fig.1 Rotor test station and test system

3.2 转子振动故障诊断

通过对转子振动故障的实验模拟,得到了大量的裂纹、碰摩、裂纹-碰摩耦合故障的振动加速度信号.在软件 MATLAB 环境下,利用所得到的这三种典型故障的振动加速度信号,应用式(3)、式(7)、式(11)、式(12)可以得到每种故障在多转速下的信息熵值.结合表 1 所示的三种典型故障的信息熵点,应用式(13)可以得到每种故障的信息熵距曲线,如图 2~图 4 所示.

图 2 中的 3 条信息熵距曲线是模拟转子碰摩故障得到的信息熵点分别与裂纹故障、碰摩故障、裂纹-碰摩耦合故障的信息熵点之间的距离曲线,即信息熵距曲线.图 3、图 4 和图 2 相类似,分别是模拟裂纹故障、裂纹-碰摩耦合故障所得到的实测信号与这三种典型故障的信息熵距曲线.

由图 2~图 4 中曲线的大致走势可以看出,待诊断对象所属的故障,其信息熵距值越小,越接近于横坐标轴;反之,其信息熵距值越大,越远离横坐标轴.但是在低转速时,信息熵距值却相差

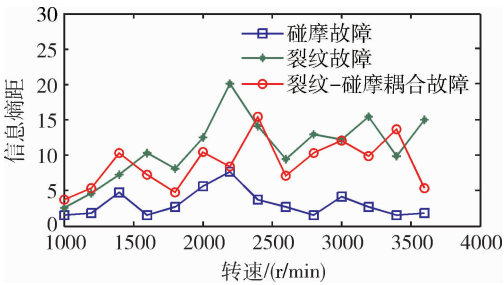


图 2 碰摩故障的信息熵距图

Fig. 2 Information entropy distance of rubbing fault

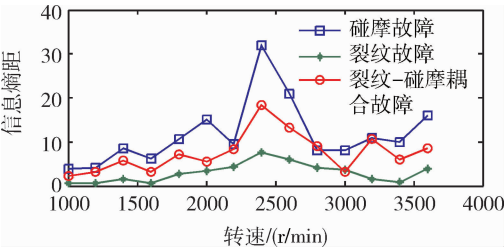


图 3 裂纹故障的信息熵距图

Fig. 3 Information entropy distance of crack fault

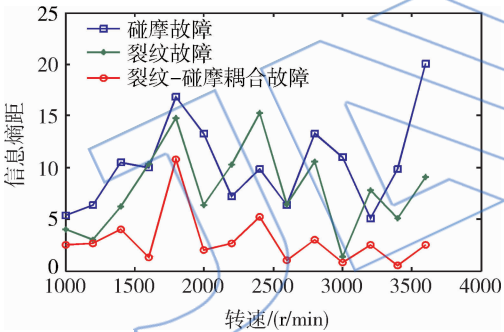


图 4 裂纹-碰摩耦合故障的信息熵距图

Fig. 4 Information entropy distance of crack-rubbing coupled fault

多,这是由于低转速时,转子的振动还没有被完全激发出来,相对应地振动故障特征还不够明显导致的.随着转子转速的提高,转子振动的故障特征逐渐明显,相对应的信息熵距曲线之间的差别也就显示出来了.

图 2 是对碰摩故障进行诊断,从中可以看出:该故障与裂纹故障的信息熵距曲线相对远离横坐标轴,而碰摩故障的信息熵距曲线和裂纹-碰摩耦合故障的信息熵距曲线却在 1800 r/min 和 2200 r/min 转速之间出现了靠近和重叠的现象.这是由于耦合故障中也存在碰摩故障的振动故障特征导致的.类似,在图 3 进行裂纹故障诊断时,该故障与碰摩故障的信息熵距曲线相对远离横坐标

轴,而与裂纹-碰摩耦合故障的信息熵距曲线也接近于裂纹故障的信息熵距曲线.图 4 是对裂纹-碰摩耦合故障的诊断结果,从中可以看出,该故障与裂纹故障、碰摩故障、裂纹-碰摩耦合故障都有一定的重叠,相对于单一故障而言更加难以诊断.但是,从图 4 中也可以明显看出,该故障与裂纹-碰摩耦合故障的信息熵距曲线更加接近于横坐标轴.

实例计算结果表明:基于信息熵距的转子振动故障诊断方法可以较好地诊断出裂纹故障、碰摩故障以及裂纹-碰摩耦合故障.同时,采用多转速下的信息熵距曲线,使得诊断过程更加清晰和直观.

4 结 论

1) 本文从信息融合的角度出发,针对裂纹-碰摩耦合故障诊断,分别提取了振动信号的奇异谱熵、功率谱熵、小波能谱熵及小波空间特征谱熵这四种信息熵特征.实例计算结果表明,信息熵在显示信号的复杂性和不确定性方面有很强的能力.尤其是融合多转速、多测点下的信息熵,能更全面的反映振动过程的变化规律,作为故障诊断的指标是非常合适的.

2) 实例计算表明:相对于目前常用的转子振动故障诊断方法而言,融合信息熵距的转子振动故障诊断方法具有诊断过程清晰、简单、直观等优点.只需要观察故障的信息熵距曲线图,即可以达到故障诊断的目的.实例计算结果表明,多转速下的信息熵距曲线具有较高的诊断准确率,能够很好的区分耦合故障和单一故障.

参考文献:

[1] 刘献栋,李其汉,王德有.转子系统动静件碰摩故障信号处理方法的研究[J]. 振动工程学报,2000,13(1):71-77.
LIU Xiandong, LI Qihan, WANG Deyou. Study of signal's processing method for rubbing faults in rotor system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(1): 71-77. (in Chinese)
[2] Hu N Q, Wen X S. The application of duffing oscillator in characteristic signal detection of early fault[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 268(5): 917-931.
[3] 艾延廷,费成巍,王志. 基于改进模糊 SVM 的转子振动故障诊断技术[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 1118-1123.
AI Yanting, FEI Chengwei, WANG Zhi. Technique for diagnosing fault of rotor vibration based on improved fuzzy SVM[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1118-1123. (in Chinese)
[4] Muszynska A. Partial lateral rotor to stator rub[C] //

Third International Conference on Vibration in Rotating Machinery. England; Mechanical Engineering Publications, 1984;327-335.

[5] Tejas H,Patela B,Ashish K. Vibration response of cracked rotor in presence of rotor-stator rub[J]. Journal of Sound and Vibration,2008,317(3):841-865.

[6] 罗跃纲,曾海泉,李振平,等. 基础松动-碰磨转子系统的混沌特性研究[J]. 振动工程学报,2003,16(2):184-188.
LUO Yuegang,ZENG Haiquan,LI Zhenping,et al. Study on chaos behaviors of rotor systems with local rubbing and pedestal looseness faults [J]. Journal of Vibration Engineering,2003,16(2):184-188. (in Chinese)

[7] 万方义,许庆余,李松涛. 谐波小波变换在转子-轴承系统多故障监测中的应用[J]. 工程力学,2004,21(1):102-106.
WAN Fangyi,XU Qingyu,LI Songtao. Application of harmonic wavelet transform to detecting multifaults of rotor bearing systems [J]. Engineering Mechanics,2004,21(1):102-106. (in Chinese)

[8] 谢平,杜义浩,黄双峰. 基于信息熵的复杂机械系统非线性特征提取方法研究[J]. 振动与冲击,2008,27(7):135-137.
XIE Ping,DU Yihao,HUANG Shuangfeng. Study on nonlinear feature extraction methods of complex mechanical systems based on information entropy [J]. Journal of Vibration and Shock,2008,27(7):135-137. (in Chinese)

[9] 刘献栋,杨绍普,申永军,等. 基于奇异值分解的突变信息检测新方法及其应用[J]. 机械工程学报,2002,38(6):102-105.
LIU Xiandong,YANG Shaopu,SHEN Yongjun,et al. New method of detecting abrupt information based on singularity value decomposition and its application [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2002,38(6):102-105. (in Chinese)

[10] 费成巍,白广忱,李晓颖. 基于过程功率谱熵 SVM 的转子振动故障诊断方法[J]. 推进技术,2012,33(2):293-298.
FEI Chengwei,BAI Guangchen,LI Xiaoying. Method of rotor vibration fault diagnosis from process power spectrum entropy and SVM[J]. Journal of Propulsion Technology,2012,33(2):293-298. (in Chinese)

[11] 申骏,黄树红,韩守木. 旋转机械振动信号的信息熵特征[J]. 机械工程学报,2001,37(6):94-98.
SHEN Tao,HUANG Shuhong,HAN Shoumu. Extracting information entropy features for rotating machinery vibration signals [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2001,37(6):94-98. (in Chinese)

[12] 陈非,黄树红,张燕平,等. 基于信息熵距的旋转机械振动故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断,2008,28(1):9-13.
CHEN Fei,HUANG Shuhong,ZHANG Yanping,et al. Rotating machinery vibration faults' diagnosis method based on information entropy distance [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2008,28(1):9-13. (in Chinese)

[13] 罗跃纲,张松鹤,闻邦椿. 转子-轴承系统裂纹-碰磨耦合故障的非线性特性研究[J]. 振动与冲击,2005,24(3):43-46.
LUO Yuegang,ZHANG Songhe,WEN Bangchun. Study on nonlinear characteristics of rotor-bearing system with coupling faults of crack and rub-impact[J]. Journal of Vibration and Shock,2005,24(3):43-46. (in Chinese)

[14] Bachschmid N,Pennacchi P,Tanzi E,et al. Identification of transverse crack position and depth in rotor system[J]. Meccanica,2000,35(6):563-582.

[15] Meng G. The nonlinear influences of whirl speed on the stability and response of a cracked rotor[J]. Journal of Machine Vibration,1992,4(2):216-230.