



王美令

## 转子碰摩严重程度量化检测方法研究

王美令, 陈 果

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

**摘 要:**基于分形理论、熵理论及小波变换方法,提出用关联维数和小波能量谱熵对转子系统不同碰摩程度进行量化检测的方法。首先,利用转子碰摩模型仿真了不同碰摩程度下的振动信号,并计算了信号的关联维数和小波能量谱熵,研究了关联维数和小波能量谱熵随转子不同碰摩程度的变化规律,发现这两种特征量与转子碰摩程度之间存在良好的相关性,表明其可以作为转子碰摩程度量化检测的重要特征量。最后,利用 ZT-3 多功能转子实验器,模拟了不同碰摩状态的振动信号,对该方法进行实验验证。结果表明:关联维数和小波能量谱熵对转子碰摩严重程度量化检测的有效性。

**关 键 词:**转子系统;关联维数;小波能量谱熵;碰摩程度;定量检测

**中图分类号:** V231.96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-8728(2010)05-0578-06

## On Quantitative Detection of Rotor Rubbing Intensity

Wang Meiling, Chen Guo

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

**Abstract:** Based on the fractal and entropy theory and the wavelet transform method, a quantitative detection method for rubbing intensity of rotor system by use of correlation dimension and wavelet energy spectrum entropy is proposed in this paper. First, we calculate the correlation dimension and wavelet energy spectrum entropy of the vibration signals which are simulated by use of the rub-impact rotor model with different rubbing intensity. Then, we study the change law of the correlation dimension and wavelet energy spectrum entropy with different rubbing intensity. It is found that the two features are well correlated with the rubbing intensity of the rotor, which indicates that the two features can be used as the important characteristic quantities for quantitative detection of rubbing intensity. Finally, we calculate the correlation dimension and wavelet energy spectrum entropy of the vibration signals which are simulated by use of the ZT-3 multi-function rotor test rig with different rubbing intensity. Results verify the above method, and show that it is effective to quantitatively detect the rubbing intensity of the rotor system by use of the correlation dimension and wavelet energy spectrum entropy.

**Key words:** rotor system; correlation dimension; wavelet energy spectrum entropy; rubbing intensity; quantitative detection

航空发动机转静碰摩是非常严重和频发的故障,尽早地将碰摩故障检测出来,对于提高发动机性能效

率,保证发动机安全和可靠的运行具有重要意义<sup>[1]</sup>。

通常碰摩发生时,振动响应表现出丰富的倍频和分频特征,因此频谱特征一直是作为碰摩故障诊断的重要特征量,然而,由于碰摩故障的非线性和非平稳特征,近年来,许多时频分析方法和分形方法不断地被应用于碰摩故障诊断。文献[2]利用连续小波变换得到的尺度谱,分析了轻微碰摩和严重碰摩在小波尺度谱上的区别。文献[3]利用小波变换对转静子

收稿日期: 2009 - 04 - 15

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: 王美令(1984 - ), 硕士研究生,研究方向为转子动力学与航空发动机整机振动、状态监测与故障诊断, meilingcc@163.com; 陈 果(联系人), 教授, 博士生导师, cgzyx@263.net

早期碰摩故障进行诊断,发现小波变换不仅对早期碰摩进行准确诊断,而且还可准确诊断进入、脱离碰摩的位置。文献 [4] 提出了运用小波包分解方法提取碰摩故障特征的方法。文献 [5] 提出了随机共振原理来检测微弱的特征信号的新方法,给出了检测模型并将其用于转子碰摩的早期检测中。文献 [6] 提出了运用高阶谱分析方法提取碰摩故障特征。文献 [7] 提出了用经验模态分解 BMD 和分形的方法来提取碰摩故障的特征。文献 [8] 针对目前混沌特征参数计算无法自动实现的问题,提出了非线性时间序列混沌特征参数的自动计算方法和流程,并用仿真数据和转子实验台实测数据进行了验证。

以上方法均针对碰摩故障的特征提取和故障诊断,对碰摩状态的发生和发展过程及碰摩故障的严重程度只是作出了定性的判断,关于碰摩程度的量化检测研究相对较少。鉴于此,笔者提出两种量化检测碰摩程度的方法:(1) 基于非线性分形理论,依据不同碰摩程度的振动信号将具有不同的运动轨迹和关联维数,提出用相关维数来定量确定碰摩严重程度的方法;(2) 基于熵的理论,根据能量熵是能量分布集中

和分散的重要判据,运用小波分解得到的不同频带的信号,计算出小波能量谱熵。论文首先运用转子碰摩动力学模型仿真得出不同程度的碰摩故障样本,然后研究了关联维数和小波能量谱熵与转子碰摩碰度的相关性,最后利用 ZT-3 多功能转子实验台对方法进行了验证分析,表明了方法的正确有效性。

### 1 不同碰摩程度的样本仿真

笔者利用文献 [9] 中的转子碰摩动力学模型,仿真了不同碰摩程度的故障样本。由文献 [9] 得知,随着碰摩间隙的变化,转子系统碰摩程度也发生相应的变化,转子系统响应也发生复杂多变的动力学行为。笔者针对该模型,设置系统参数如下:轴承间隙  $k_b = 5 \mu\text{m}$ ,碰摩刚度  $k_r = 6 \times 10^7 \text{ N/m}$ ,摩擦系数  $\mu = 0.1$ ,不平衡量  $e = 0.01 \text{ mm}$ ,转轴刚度  $k = 0.85 \times 10^7 \text{ N/m}$ ,旋转速度  $\omega = 600 \text{ rad/s}$ 。笔者针对不同的碰摩间隙进行了大量计算,得到了不同碰摩程度的故障样本。图 1~图 3 分别为碰摩间隙  $\delta = 0.008 \text{ mm}$ ,  $\delta = 0.0038 \text{ mm}$ ,  $\delta = 0.002 \text{ mm}$  时的时域波形图、轴心轨迹图及频谱图。

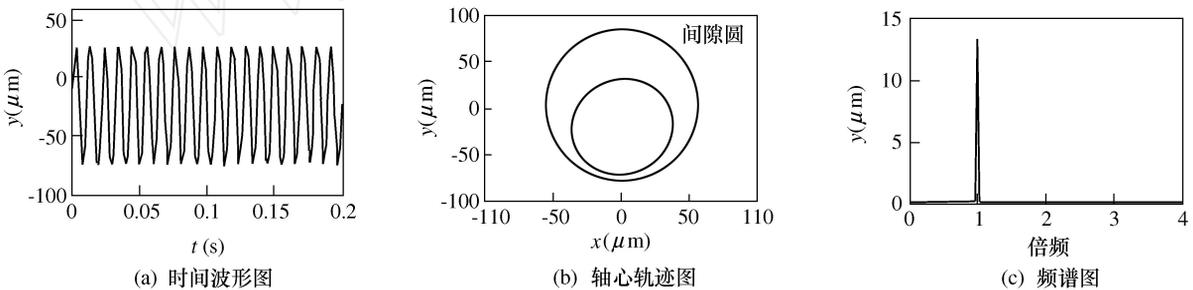


图 1  $\delta = 0.008 \text{ mm}$  时转子系统响应

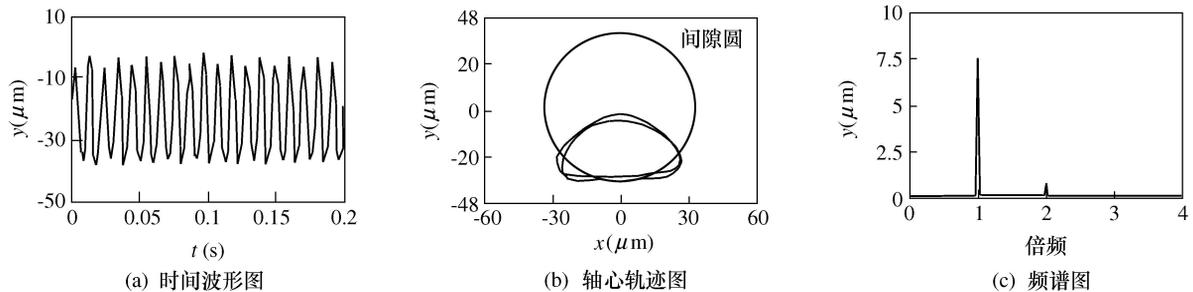


图 2  $\delta = 0.0038 \text{ mm}$  时转子系统响应

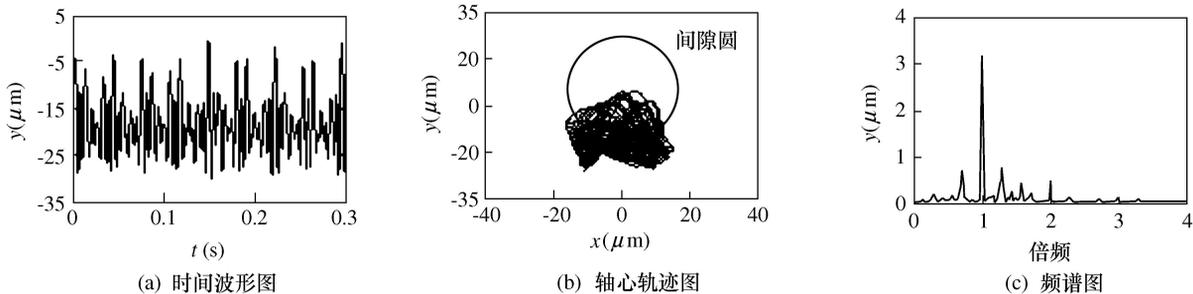


图 3  $\delta = 0.002 \text{ mm}$  时转子系统响应

由不同碰摩程度转子系统响应图 1、图 2 及图 3 可以看出,当  $\delta = 0.008 \text{ mm}$  时,时域波形为标准的简谐信号波形,转子轴心轨迹为一个圆,且在间隙圆之内,表明此时未发生碰摩,振动频率表现为单一的 1 倍频(即转子的转动频率)。当  $\delta = 0.0038 \text{ mm}$  时,时域波形图中开始变得不规则,轴心轨迹发生了畸变,局部超出了间隙圆,表明此时发生了轻微局部碰摩;频谱图中表现出了碰摩故障典型特征,其主要频率为一倍频和 2 倍频以及少量的分频成分。当  $\delta = 0.002 \text{ mm}$  时,其轴心轨迹变得混乱无序、完全没有规则,且大部分超出间隙圆,说明此时发生严重局部碰摩;时域波形变得更加没有规则,频谱图表现出了很大的倍频和分频成分,甚至出现了连续谱线,表明此时运动已经开始陷入了混沌状态。

由此可见,转子碰摩故障在频谱图上表现出了明显的倍频和分频特征,具有典型的非线性特征,其产生和发展需要经历一个从不碰到轻微碰摩再到严重碰摩的过程,因此准确判断出碰摩故障所处的状态,尤其是早期碰摩状态,对于预防严重碰摩故障产生和灾难性事故的发生具有及其重要的意义。但是,目前对于早期碰故障的检测通常是通过定性的人为判断方法,难于实现定量化和实时化处理。有鉴于此,笔者基于分形理论、熵理论及小波变换方法,提出两种实现碰摩故障状态量化检测的方法。

## 2 碰摩状态量化检测方法

### 2.1 关联维数方法

分形维数是在状态空间中刻画非线性系统行为的一个十分重要的参数,利用分形维数可以对非线性系统的运动状态进行量化<sup>[10]</sup>。关联维数是分形维数的一种,由于其计算简单,所以得到广泛应用<sup>[10]</sup>。计算关联维数的方法有很多,但几乎均需要人工干预才能获取特征参数。笔者引用文献[8]的关联维数的自动计算方法来实现关联维数的自动计算。其计算步骤为

设观测的时间序列为  $\{x_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 其采样时间间隔为  $t$ , 建立一个  $m$  维嵌入空间, 将  $\{x_i\}$  映射到该嵌入空间中, 这时可对  $\{x_i\}$  进行延时采样, 延迟时间为  $\tau$ , 为  $t$  的整数倍, 即  $\tau = J t$  ( $J$  为整数), 将得到若干新的时间序列。

$$V_i = (x_i, x_{i+J}, x_{i+2J}, \dots, x_{i+(m-1)J}) \\ i = 1, 2, \dots, N - (m-1)J \quad (1)$$

$V_i$  对应于  $m$  维相空间的一个点,  $N - (m-1)J$  个点形成了相空间中一条动力学轨道。由此可见, 嵌入维数和延迟时间的选择和确定是需要首先考虑

的问题。

#### (1) 自相关法自动确定时间延迟

由自相关方法选取时间延迟  $\tau$ , 先对时间序列作出自相关函数关于时间  $\tau$  的函数图像。根据数值试验结果, 当自相关函数下降到初始值的  $1 - \frac{1}{e}$  时, 所得的时间  $\tau$  即为重构相空间的时间延迟。

#### (2) 自动计算关联维数

在延迟时间  $\tau$  已经确定的情况下, 自动计算最佳嵌入维数和对应关联维数的方法。具体步骤如下:

Step 1 从嵌入维数  $m = 1$  开始。

Step 2 按式 (1) 重构相空间, 得到新的时间序列  $V_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N - (m-1)J$ )。

Step 3 在重构相空间中, 计算任意两点  $V_i$  和  $V_j$  间的欧氏距离  $l_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (V_{ik} - V_{jk})^2}$ , 同时将  $l_{ij}$  归一化, 变换为 0 到 1 之间的值。

Step 4 按  $(i) = e^{-i \times \tau / IP}$ ,  $i = 1, 2, \dots, IP$ ,  $IP$  为计算的点数, 按式 (2) 计算  $C(i)$ 。经过大量计算发现: 在  $\ln$  等于  $[-3, -2]$  的范围内, 能够充分保证  $\ln(C)$  与  $\ln$  之间的线性关系。由最小二乘法计算  $\ln(C) - \ln$  图上的斜率从而得到相关维数  $D(m)$ 。

$$C = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N (l_{ij})^s = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N H(s - l_{ij}) \\ H(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ 0 & s < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Step 5 计算嵌入维数为  $m$  时的  $\ln(C) - \ln$  曲线与嵌入维数  $m-1$  时  $\ln(C) - \ln$  曲线之间的间隔。

$$\text{Interval}(m) = \frac{1}{IP} \sqrt{\sum_{i=1}^{IP} [\ln(C_{(m)}) - \ln(C_{(m-1)})]^2} \quad (3)$$

Step 6 计算  $\text{Interval}(m)$  与  $\text{Interval}(m-1)$  的比值  $d\text{Inv}$ 。如果  $d\text{Inv} < 0.3$ , 则判断此时曲线  $\ln(C) - \ln$  曲线已经饱和, 确定最佳嵌入维数为  $m-1$ , 对应的相关维数为  $D(m-1)$ , 计算停止; 否则, 则判断曲线  $\ln(C) - \ln$  曲线未饱和,  $m = m+1$  转到 Step 2 继续计算。

### 2.2 小波能量谱熵方法

目前采用小波分析技术提取转子故障信号各频带能量特征多数是在确定的转速和采样频率下进行的, 但是, 转速或采样频率一旦发生变化, 而小波变换的分解层数不变, 则同一故障所提取出的能量特征将大不相同, 即小波能量特征的物理意义将随着转速和采样频率的变化而变化。为有效解决上述问

题,笔者采用基于尺度变换的能量特征提取新方法<sup>[11]</sup>计算各个频带的能量。

设采用上述能量特征提取方法对振动信号  $x(t)$  进行分解后得到在  $m$  个尺度上的小波能谱为  $[E_1, E_2, \dots, E_m]$  这样就形成了对信号时-频域上能量的一种划分。信号总能量  $E$  等于各分量能量  $E_j$  之和,

即  $E = \sum_{j=1}^m E_j$ 。设  $q_i = E_i/E$  表示尺度  $i$  的能量在总能量中所占的比例,则  $\sum_{i=1}^m q_i = 1$ , 于是定义相应的小波能量谱熵为

$$s(q) = - \sum_{i=1}^m q_i \ln q_i \quad (4)$$

由于小波变换是等距地将一维信号映射到二维小波空间上,小波函数在频域与时域上具有一定的支撑区间,而且此支撑区间具有速降、可自适应变化的特点,因此小波能量谱熵实现了在尺度空间上对信号能量的划分,同时也反映了信号在时域与频域

上的能量分布特征。式(4)定义的小波能量谱熵能够反映转子系统振动信号在时域与频域上的能量分布特征。振动信号能量分布的不确定性越大  $q_i$  分布越均匀,小波能量谱熵值  $s(q)$  越大,反之小波能量谱熵值  $s(q)$  越小。

### 3 基于仿真样本的碰摩状态量化检测方法验证与分析

为了分析碰摩严重程度量化检测方法的可靠性,需要研究关联维数和小波能量谱熵与碰摩程度之间的相关程度,即研究随着碰摩程度的变化,这两个特征量的变化规律和趋势。

为此,笔者首先运用仿真样本进行计算分析,分别取不同碰摩间隙  $\delta = 0.008 \text{ mm}$ ,  $\delta = 0.0038 \text{ mm}$ ,  $\delta = 0.002 \text{ mm}$  下振动信号的 12 组不同数据段,并分别计算关联维数和小波能量谱熵,计算结果如表 1 所示。

表 1 不同碰摩间隙下关联维数和小波能量谱熵的计算结果

组数	$\delta = 0.008 \text{ mm}$ (不碰)		$\delta = 0.0038 \text{ mm}$ (轻碰)		$\delta = 0.002 \text{ mm}$ (严重碰)	
	关联维数	能量谱熵	关联维数	能量谱熵	关联维数	能量谱熵
1	1.0826	0.4908	1.3865	0.7785	2.4616	1.0983
2	1.0833	0.5079	1.3875	0.7789	2.4444	1.1271
3	1.0812	0.4716	1.3710	0.8068	2.5104	1.1412
4	1.0906	0.6130	1.3588	0.8259	2.4310	1.0920
5	1.0825	0.6255	1.3731	0.7490	2.4624	1.1033
6	1.0898	0.6256	1.3912	0.8053	2.5074	1.2329
7	1.0834	0.5890	1.3627	0.7668	2.6408	1.2163
8	1.0919	0.6166	1.3618	0.7908	2.6973	1.3120
9	1.1023	0.6490	1.3847	0.8079	2.6298	1.2755
10	1.0864	0.5503	1.3891	0.8016	2.6096	1.2231
11	1.0966	0.6241	1.3718	0.7861	2.5637	1.2064
12	1.0825	0.5893	1.3601	0.7503	2.5355	1.1144

表 1 的结果表明,转子振动信号的关联维数和小波能量谱熵在不同碰摩程度下明显不同。当为发生碰摩 ( $\delta = 0.008 \text{ mm}$ ) 时,关联维数接近 1,其小波能量谱熵也比较小;当减小碰摩间隙至  $\delta = 0.0038 \text{ mm}$  轻

微局部碰摩时,关联维数和小波能量谱熵均增大;进一步减小间隙至  $\delta = 0.002 \text{ mm}$  发生严重局部碰摩时,关联维数和小波能量谱熵进一步增大。随碰摩程度的加剧,关联维数和能量谱熵呈增大的趋势。

从表 1 中的计算结果可以发现关联维数与小波能量谱熵的计算结果与碰摩故障的发生、发展过程密切相关。不碰摩时,系统不具有碰摩故障非线性,非线性分形维数最低,接近于“1”。响应信号频率成分单一,小波频带能量集中,小波能量谱熵很低;当发生轻微碰摩时,系统具有较强的非线性,非线性分形维数出现增加趋势,均大于“1”。响应信号频率成分出现了更多的倍频和分频成分,小波频带能量较为分散,小波能量谱熵增加;当发展成为严重碰摩时,系统具有很强的非线性,其关联维数大大增加。响应信号频率成分出现了大量的倍频和分频成分,小波频带能量更为分散,小波能量谱熵值进一步增加。显然,关联维数与小波能量谱熵可以作为定

量检测碰摩状态的特征量。

#### 4 实验验证

笔者的实测碰摩转子振动信号是从 ZT-3 多功能转子故障模拟实验台得到的,通过调整碰摩装置来模拟不同程度的碰摩故障。碰摩装置由摩擦块、支撑摩擦块的支架组成。实验采用的摩擦块选用质地较软的铜制作成的螺丝钉,目的是实验时轮盘不被损坏,支架的底边用螺栓固定在实验台的底座上。初始时,螺丝钉与转轴不接触,当转子转动起来后,通过手动旋转螺丝钉调整它与转轴的间隙来施加摩擦力。

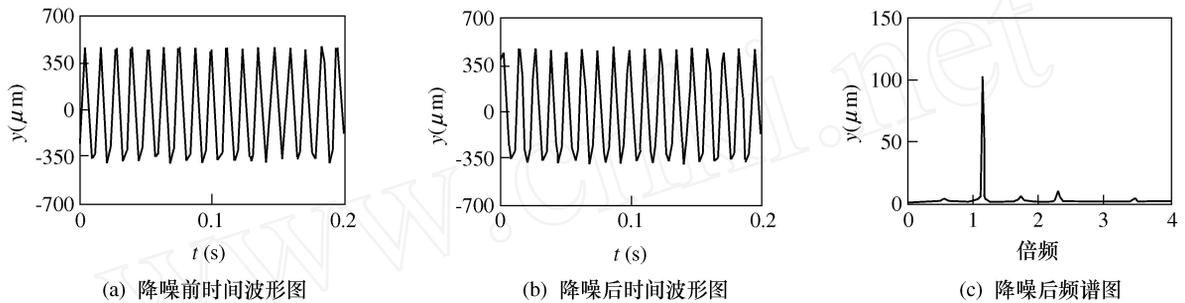


图 4 无碰摩时转子系统响应

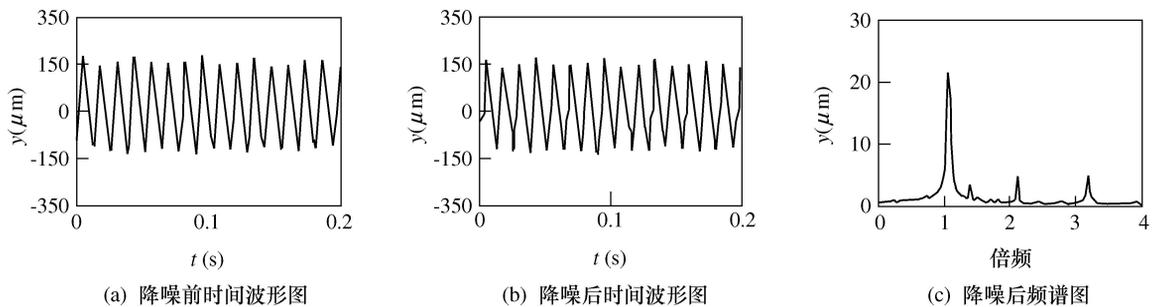


图 5 轻微局部碰摩时转子系统响应

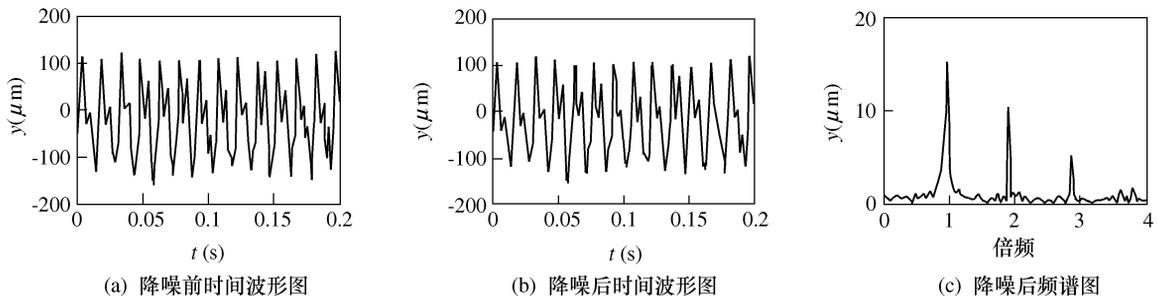


图 6 严重局部碰摩时转子系统响应

为了能够对碰摩故障进行系统的分析,在本论文中分别对转子在无碰摩、轻微局部碰摩和严重局

部碰摩 3 种情况下进行了模拟实验。由于实验数据均具有不同程度的噪声,因此在计算相关维数和小波

能量谱熵之前需进行降噪处理,笔者采用文献 [12] 提出的基于尺度变换的小波降噪算法来实现降噪处理。图 4~图 6 分别为无碰摩 (转速 4972 r/min)、轻微碰摩 (转速 4613 r/min) 及严重碰摩 (转速 4013 r/min)

状态下的原始信号、降噪后的信号以及降噪后的信号频谱。

取不同碰摩程度下振动信号的五组数据,并分别计算关联和小波能量谱熵,计算结果如表 2 所示。

表 2 不同碰摩程度下关联维数和小波能量谱熵的计算结果

组数	无碰摩		轻微局部碰摩		严重局部碰摩	
	关联维数	能量谱熵	关联维数	能量谱熵	关联维数	能量谱熵
1	1.2065	0.7640	1.6030	0.8116	2.0145	0.9204
2	1.2171	0.7789	1.4162	0.8130	1.8399	0.9614
3	1.2266	0.7051	1.5272	0.8564	1.8555	0.9231
4	1.1535	0.7490	1.5958	0.8819	1.9225	0.9814
5	1.2175	0.7380	1.4345	0.8434	2.1069	0.9197
均值	1.2042	0.7470	1.5153	0.8413	1.9478	0.9412

表 2 的结果表明,实测的转子振动信号的关联维数和小波能量谱熵在不同碰摩程度下明显不同。当不碰摩时,关联维数在 1.2 左右,转子是规则的周期运动,小波能量谱熵比较小,转子振动信号能量主要分布在工作频率段;当发生轻微碰摩时,关联维数增大其均值在 1.5 左右,发生轻微碰摩时的转子运动形态发生改变,由于碰撞引起冲击,转子振动信号能量分布分散、不确定性相对增加其小波能量谱熵也比不发生碰摩时增大;随着碰摩的进一步加重至严重碰摩时,转子系统响应表现出混沌特性,关联维数均值接近 2,随碰摩程度的加剧,能量分布在丰富的倍频、低频频带,故小波能量谱熵也随之增大。

由此可见随碰摩程度的加剧,关联维数和小波能量谱熵呈增大的趋势,这与仿真结果相吻合。实验结果进一步表明了本文基于关联维数和小波能量谱熵的碰摩状态量化检测方法的有效性。

### 5 结论

笔者提出利用关联维数和小波能量谱熵描述转子系统不同碰摩程度下的动力学特征,以给出碰摩状态检测的定量判据。针对不同碰摩程度下的仿真数据和实测实验数据分别计算其关联维数和小波能量谱熵,仿真结果和实验结果都表明随碰摩程度的加剧,关联维数和小波能量谱熵都将增大。因此可以将关联维数和小波能量谱熵作为定量检测转子不同碰摩程度的重要依据。笔者研究对于提高碰摩故障诊断的定量化和自动化程度具有重要意义。

### [参考文献]

- [1] 王德友. 发动机转静件碰摩振动特征的提取与理论研究 [D]. 北京:北京航空航天大学, 1995
- [2] Peng Z, He Y, Lu Q, et al. Feature extraction of the rub-impact rotor system by means of wavelet analysis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 259(4): 1000 ~ 1010
- [3] 刘献栋,李其汉. 小波变换在转子系统动静态件早期碰摩故障诊断中的应用 [J]. *航空学报*, 1999, 20(3): 220 ~ 223
- [4] 宋友,柳重堪,李其汉. 基于小波变换的转子动静态件碰摩故障诊断研究 [J]. *振动工程学报*, 2002, 15(3): 319 ~ 322
- [5] 胡芑庆,陈敏,温熙森. 随机共振理论在转子碰摩故障早期检测中的应用 [J]. *机械工程学报*, 2001, 37(9)
- [6] 杨江天,陈家骥,曾子平. 基于高阶谱的旋转机械故障征兆提取 [J]. *振动工程学报*, 2001, 14(1): 13 ~ 17
- [7] 程军圣,于德介,杨宇. 基于 EMD 和分形维数的转子系统故障诊断 [J]. *中国机械工程*, 2005, 16(12): 1088 ~ 1091
- [8] Chen G. Auto-extracting technique of dynamic chaos features for nonlinear time series[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 19(4): 524 ~ 529
- [9] 李飞敏,陈果. 碰摩故障转子滚动轴承耦合系统非线性动力学研究 [J]. *机械科学与技术*, 2008, 27(1): 58 ~ 64
- [10] Logan D. Using the correlation dimensional for vibration fault diagnosis of rolling element bearings-basic concepts[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1996, 10(3): 241 ~ 250
- [11] 邓堰,陈果. 转子故障信号的小波能量特征自动提取 [J]. *应用科学学报*, 2007, 25(5): 510 ~ 515
- [12] 陈果. 一种转子故障信号的小波降噪新方法 [J]. *振动工程学报*, 2007, 20(3): 283 ~ 290