第49卷第1期
2009年1月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 49, No. 1
Jan. 2009

文章编号：1000-8608(2009)01-0077-05

基于局域波和混沌的转子系统早期故障诊断

王凤利*[1,2]，赵德有[2]，马孝江[3]

（1. 大连海事大学 轮机工程学院，辽宁 大连 116026；
2. 大连理工大学 船舶工程学院，辽宁 大连 116024；
3. 大连理工大学 机械工程学院，辽宁 大连 116024）

摘要： 针对转子系统早期微弱故障诊断问题，提出了一种基于局域波分析和混沌相结合的故障诊断新方法. 分析了 Duffing 混沌振子的混沌运动，说明混沌振子的非平衡相变对微弱信号的敏感性和对白噪声的免疫力. 可以通过混沌振子由混沌运动到大周期运动的相变识别微弱信号的特征频率成分. 由于实际检测信号为多分量信号，若直接输入 Duffing 振子达不到检测识别目的. 为了消除其他成分的干扰，利用局域波分解，任何复杂的信号都可以分解为有限的并且具有不同的基本模式分量，每个分量是单一成分信号，实现了信噪分离. 将局域波分量输入所设计的混沌振子，通过混沌振子系统行为由混沌状态变为大周期运动状态，表明检测信号中含有特征成分，实现了利用混沌振子对低信噪比微弱信号的检测识别. 对转子系统早期不对中故障信号进行检测结果证明了方法的有效性.

关键词： 局域波法；混沌；微弱故障；转子系统

中图分类号： TP306　　**文献标志码：** A

0 引　言

转子系统在运行状态下实测信号的频率成分比较复杂. 由于在现场受干扰下采集振动信号时混有的噪声信号是宽频带的随机噪声，振动信号中含有能量较大的、与转速有关的背景信号，在转子系统的故障早期故障特征信号由于微弱，通常被其他能量相对较大的频率成分和噪声淹没，能否正确分析振动信号并提取故障特征直接关系到故障诊断的准确性和早期预报的可靠性.

混沌理论应用于工程系统中的信息处理受到广大学者的极大关注. 由于混沌运动系统对参数的变化比较敏感，混沌系统的非平衡相变对小信号的敏感性以及对噪声具有免疫力，使其在微弱信号的检测中具有非常重要的作用[1,2]. 然而当待检测信号为多分量信号时，由于其他成分的干扰，直接输入 Duffing 振子达不到正确检测识别目的，限制了在工程中的实际应用.

局域波法能够将振动响应信号做自适应的、不需预先确定基函数的分解，从而简化了系统特征信息间的干涉或耦合，通过局域波分解得到的分量是单一成分信号，将分解得到的局域波分量输入混沌振子进行检测，可以准确识别信号中是否含有故障特征成分，使得利用混沌振子对低信噪比的微弱信号检测更具可行性.

1 基本原理

1.1 Duffing 振子的混沌特性及微弱信号的检测

Homels 型 Duffing 方程是典型的具有非线性恢复力的强迫振动系统，其表达式为

$$\ddot{x} + c\dot{x} - x + x^3 = f\cos\omega t \tag{1}$$

式中：c 为阻尼系数，$f\cos\omega t$ 为周期策动力.

若方程中除周期策动力振幅 f 是可变控制参数外，其余参数值固定，也就是 f 为系统的分岔参数. 当 f 从 0 逐渐增加时，系统的解在相空间中按

收稿日期： 2007-03-04；　**修回日期：** 2008-01-04.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(50475155).
作者简介： 王凤利*(1970-)，男，大连理工大学 2003 届博士，E-mail：wangfl@newmail.dlmu.edu.cn；赵德有(1935-)，男，教授，博士生导师.

外加周期力的周期或其倍周期振荡；当 f 进一步增加到某一临界值时，就会出现同宿轨迹，产生斯梅尔马蹄变换意义下的混沌运动；当 f 再进一步增加到某一临界值 f_0 时，系统发生非平衡相变，由混沌进入大尺度的周期振荡[3].

设定 $c=0.5$，$\omega=1$，识别出混沌运动转变到大周期运动的分岔临界参数：f_0 取为 0.824 5[4].

Duffing 振子非平衡相变对小信号的敏感性以及对噪声的免疫力，即Duffing方程的解状态对频率为 ω 的信号敏感，因此可用于对频率为 ω 的微弱信号进行检测.

对于不同频率信号的检测，令 $t=\omega\tau$，Duffing 方程在时间尺度上缩放为

$$\ddot{x}+0.5\omega\dot{x}-\omega^2x+\omega^2x^3=\omega^2f\cos\omega t \quad (2)$$

系统的非平衡相变的分岔参数值不变.

利用混沌振子检测微弱特征信号的方法是：使方程解的状态处于混沌与大周期解的交界状态，将被检测的信号 $N(t)$ 作为周期策动力的摄动参数并入 Duffing 振子，即

$$\ddot{x}+0.5\omega\dot{x}-\omega^2x+\omega^2x^3=\omega^2(f\cos\omega t+N(t)) \quad (3)$$

噪声对系统状态的变化无影响，当被检测的信号中有微弱的特征信号时，系统发生相变，由混沌进入大周期解状态. 通过检查系统的定性状态是否发生改变，达到检测微弱特征信号的目的.

1.2 局域波分解

由于转子系统的非线性和外界环境的变化，尤其是故障状态，其振动信号通常是非平稳的，任一时刻都可能包含多个振荡模式，当待检测信号为多分量信号时，由于其他成分的干扰，直接输入 Duffing 振子达不到正确检测识别目的. 因此必须对信号进行有效的分解，得到一系列单一成分信号的分量. 为此引入一个新的非线性非平稳信号分析方法，把复杂的信号分解为有限个单一成分信号的局域波分量，该分解方法称为局域波分解[4~6].

局域波分解认为，信号由不同的局域波分量组成，每个分量不论是线性的还是非线性的，都具有相同数量的极值点和过零点，在相邻的两个过零点之间只有一个极值点，任何两个局域波分量之间是相互独立的，这样对于一个复杂的信号通过局域波分解都可以得到有限个局域波分量之和，每个局域波分量满足以下两个条件：一是在整个数据段内，极值点的数量与过零点的数量必须相等，或最多相差一个；二是在任一时间点上，局部最大值和局部最小值定义的包络均值为零.

应用局域波法最终将信号分解成 n 个局域波分量和一个剩余分量 r_n，分量 $C_1,\cdots,C_n$ 分别包含了信号从高到低不同频率段的成分，剩余分量 r_n 或者是一个平均趋势或者是一个常数，即原始数据经过局域波分解后可以表示成

$$X(t)=\sum_{j=1}^{n}C_j(t)+r_n(t) \quad (4)$$

式中：$C_j(t)$ 为第 j 个局域波分量；$r_n(t)$ 为剩余分量.

在信号的局域波分解方法中，基函数是不确定的，它在分解过程中依赖于信号本身，也就是自适应的. 它不同于由一系列恒定频率的正余弦波组成的傅里叶谱分析基函数，也不同于需要预先选定的小波变换基函数或短时傅里叶变换窗函数，对于不同的信号，基函数是不同的. 需要强调的是，局域波分解去除了局部的叠加波，以及局部的不对称性，对于得到的每一个局域波分量，其瞬时频率可以被随处定义. 由于单分量信号在任意时刻都只有一个频率，该频率称为信号的瞬时频率. 因此，通过局域波分解得到的每一个局域波分量也就是相应的单分量，从而消除了其他成分的干扰，实现了系统状态特征的分离，同时有效去除了信号的噪声，提高了信噪比.

2 基于局域波和混沌的微弱信号的检测方法

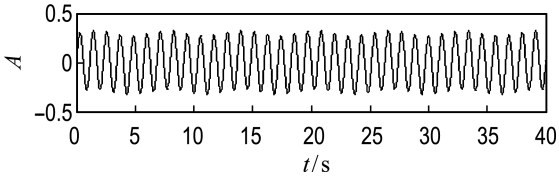
首先，对实测信号进行局域波分解，由式(4)可以得到各个瞬时频率上的单分量 $C_j(t)$，$j=1,2,3,\cdots,n$.

然后，将各分量 $C_j(t)$ 作为周期策动力的摄动参数并入式(3)的 Duffing 振子. 若混沌振子发生相变，由混沌进入大周期解状态，表明被检测的信号中含有特征频率成分，从而实现了对微弱特征信号的检测.

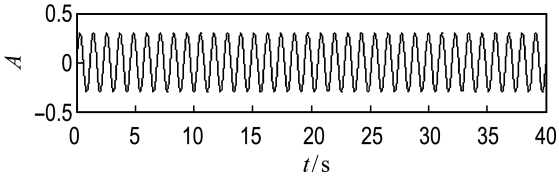
3 仿真算例

仿真信号为 $0.025\sin t+0.3\sin(5.5t)$，时域

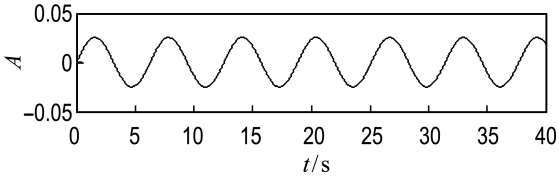
波形如图 1 所示. 要检测信号中的 $\omega=1$ 成分，信号的信噪比为 -21.59 dB. 将仿真信号作为周期策动力的摄动参数直接输入到式(3)的混沌振子 Duffing 方程中，则 Duffing 振子方程解的相图如图 2(a)所示，可以看出，信号输入后，由于受到其他信号成分的干扰，混沌振子仍然保持混沌状态，这样直接输入 Duffing 振子未能检测出仿真信号中含有的频率成分.



(a) O



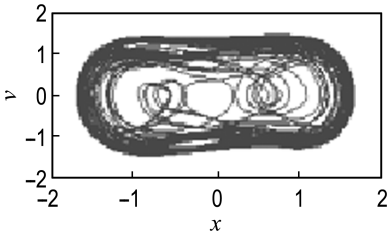
(b) C_1



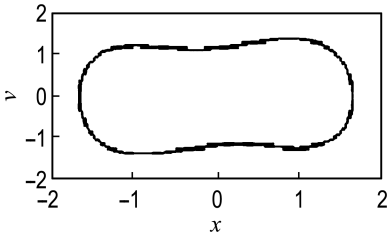
(c) C_2

图 1　仿真信号及其局域波分解

Fig. 1　The time series and its intrinsic mode functions



(a) 仿真信号直接输入后振子相图



(b) C_2 输入后振子相图

图 2　Duffing 振子检测仿真信号的结果

Fig. 2　The result of Duffing oscillator detecting signal

将仿真信号先进行局域波分解，得到分解后的局域波分量 C_1、C_2，如图 1 所示，其中分量 C_2 是检测的 $\omega=1$ 低频成分，将 C_2 作为周期策动力的摄动参数分别输入到式(3) 的混沌振子 Duffing 方程中，分量 C_2 输入后的 Duffing 振子方程解的相图分别如图 2(b)所示，可以看出，混沌振子系统行为由混沌状态变为大周期运动状态，表明检测信号中含有特征成分. 实现了利用混沌振子对低信噪比的微弱信号的有效检测.

4　应用验证

不对中故障是转子系统最为常见的故障之一，转子系统故障中 60% 的故障与不对中有关. 不对中可分为转子不对中和轴承不对中两种情况. 转子不对中故障包括平行不对中、偏角不对中、平行偏角不对中[7]. 转子系统出现不对中后，在其工作过程中将产生一系列的不利于设备运行的动态效应，危害极大. 如何在故障的早期发展阶段及时发现故障，避免更大的损失，是故障诊断工作者一直研究的问题.

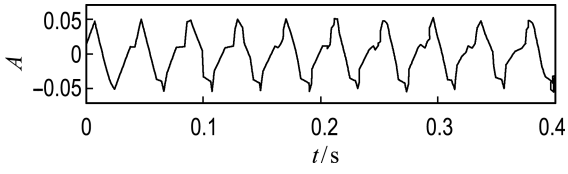
由不对中引起的振动，其频谱特征是径向振动出现 1 倍频和 2 倍频分量，不对中越严重，2 倍频分量越大.

在故障早期特征信号微弱，通常被其他能量相对较大的频率成分强烈的背景噪声淹没，故障特征在频谱图上难以显示出来，以下用基于局域波和混沌的微弱信号检测方法对早期不对中故障的试验信号进行分析.

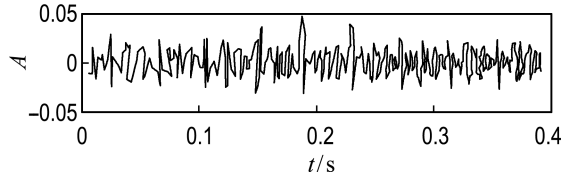
早期不对中故障信号是在转子试验台上进行模拟测试的，使用大连理工大学振动研究所开发的 PDM2000 采集仪系统. 使用位移传感器，在转子早期轻微不对中故障状态下测取了转子水平方向的振动信号. 转子的工作转速为 2 440 r/min，采样频率为 2 560 Hz，采样数据长度 1 024. 转子早期不对中振动信号及其局域波分解如图 3 所示，不对中振动信号比较复杂. 通过局域波分解，可以有效地将不对中振动信号的故障特征信息以及噪声或背景信号进行分离. 转子早期不对中振

动信号的频谱如图 4 所示，可以看出只有 1 倍频分量清晰地显示出来.

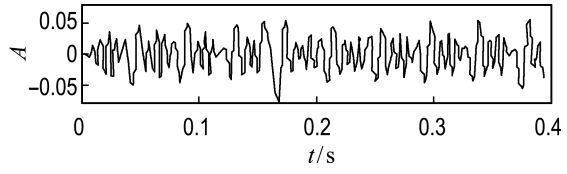
对于工频为 24 Hz 的转子系统振动信号，要检测 2 倍频分量信号，其角频率为 $\omega_f = 48 \times 2\pi$，因此设计 Duffing 振子的参考频率 $\omega = 48 \times 2\pi$，选取 f 使方程解的状态处于混沌与大周期解的交界状态. 系统未加入被检测信号时，混沌振子的相图如图 5(a)所示，系统处于混沌状态. 将局域波分量 C_2 作为周期策动力的摄动并入 Duffing 振子时，其相图如图 5(b)所示，可以看到 Duffing 振子系统的行为由混沌状态进入到大周期解状态，因此可以断定被检测信号中有 2 倍频特征成分，从而为转子系统早期不对中故障的检测和诊断提供了有效的依据.



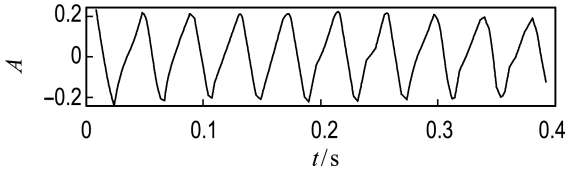
(a) O



(b) C_1



(c) C_2



(d) C_3

图 3 不对中故障振动信号及其局域波分解

Fig. 3 The misalignment fault signal and its intrinsic mode functions

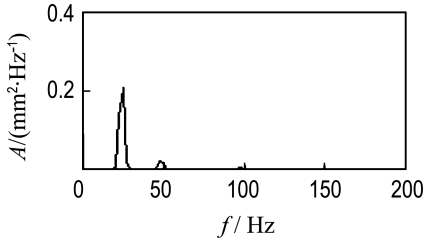
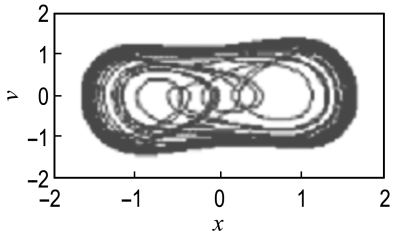
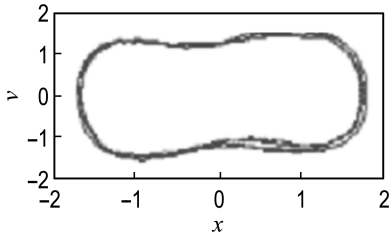


图 4 不对中故障信号的频谱

Fig. 4 The spectral diagram of misalignment fault signal



(a) 无外界信号扰动的振子相图



(b) 加入检测信号后的振子相图

图 5 Duffing 振子检测不对中故障信号的结果

Fig. 5 The result of Duffing oscillator detecting misalignment fault signal

5 结 论

混沌振子的非平衡相变对微弱信号的敏感性、对白噪声的免疫力，使其在微弱信号的检测中具有非常重要的作用. 然而当检测信号为多分量信号时，由于其他成分的干扰，直接输入 Duffing 振子达不到检测识别目的；通过局域波分解得到的单一成分的局域波分量，消除了其他成分的干扰，将局域波分量输入所设计的混沌振子进行检测，就可以实现对低信噪比的微弱信号检测的目的. 将其应用于转子系统早期不对中故障检测，实验结果验证了方法的可行性和有效性，并且可以应用于转子系统其他以特征频率表示的早期故障诊断中.

参考文献：

[1] DONALD L B. Chaotic oscillators and CMFFNS for signal detection in noise environments [C] // **IEEE International Joint Conference on Neural Networks.** Houston:IEEE, 1997: 1196-1199

[2] WANG Guan-yu. The application of chaotic oscillators to weak signal detection [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1999, **2**: 1182-1185

[3] WIGGINS S. **Introduction to Nonlinear Dynamical Systems and Chaos** [M]. New York: Springer-Verlag, 1990

[4] 王凤利. 基于局域波法的转子系统非线性动态特性及应用研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2003

[5] 马孝江, 余　泊, 张志新. 一种新的时频分析方法——局域波法[J]. 振动工程学报, 2000, **13**(s): 219-224

[6] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear nonstationary time series analysis [J]. **Proceedings of the Royal Society of London**, 1998, **454**(A):903-995

[7] 夏松波, 张新江, 刘占生, 等. 旋转机械不对中故障研究综述[J]. 振动、测试与诊断, 1998, **18**(3):157-162

Early fault diagnosis of rotor system based on local wave and chaos

WANG Feng-li*[1,2], ZHAO De-you[2], MA Xiao-jiang[3]

(1. School of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
2. Department of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to accurately make out early fault diagnosis of rotor system with weak signal, a new fault diagnosis method based on local wave analysis associated with chaos oscillator was presented. The chaos motions of Duffing oscillator were analyzed. It is stated that the oscillator phase transform is sensitive to the weak signal and immune against the random noise. The characteristic frequency can be identified by the oscillator phase transform from chaos to large-scale periodic states. As the actual signals involve more than one components, it can't be identified by direct input. Local wave method is proposed to avoid component interference, and weak fault signal is divided into finite local wave components with different simple-intrinsic modes, so that signal was separated from noise. The components were inputted into chaos oscillator, and were transformed from chaotic states to large-scale periodic states, so that weak signal can be identified under low signal-noise ratio through distinguishing the characteristic frequency of signal. Fault diagnosis result shows that the method is feasible, and can accurately make out early fault diagnosis of rotor system.

Key words: local wave analysis; chaos; weak fault; rotor system