

文章编号: 1001-2486 (2001) 01-0036-04

混沌振子在转子系统早期碰摩故障检测中的应用*

陈敏, 胡萋庆, 温熙森

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 根据 Duffing 方程解的特性设计出混沌振子, 利用混沌振子对噪声的免疫力和对小信号的敏感性对微弱信号进行检测, 并将此方法应用于转子系统早期碰摩故障检测中, 结果表明此方法简单、可行。

关键词: 混沌振子; 微弱信号检测; 转子碰摩; 故障检测

中图分类号: TP277, TH17, TH113 **文献标识码:** A

The Application of Chaotic Oscillators in Early Detecting Rub - impact Fault of Rotor System

CHEN Min, HU Niao-qing, WEN Xi-sen

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. Of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: On the basis of the characteristics of the Duffing equation's solutions, the chaotic oscillators are designed. This kind of oscillators can present the properties of sensitive dependence on weak signal and immunity to noise, so they can be used to detect the weak signals. This method can also be used in early detecting rub - impact fault of rotor system. The result shows that this method is simple and feasible.

Key words: chaotic oscillators; weak signal detection; rotor rub - impact; fault detection

转子系统是代表一类具有广泛应用背景的复杂机械的关键部分, 它的工作状态正常与否直接影响到整个机械系统的工作状态。如在转子系统的故障传播还未到达危险水平之前将其检测出来, 将会大大减少由此带来的损失。在故障发生早期, 由于故障信号非常微弱, 常被强烈的背景噪声所淹没, 故要实现早期故障检测, 实际上就是实现在强噪声背景下的微弱信号检测。

长期以来, 国内外学者在微弱信号检测这一领域作了大量的工作, 并提出了一些分析实验方法。其中, 频谱分析和小波分析方法比较常用。但是, 这两种方法所能检测到的微弱信号的信噪比有限, 当背景噪声比较强烈而所检测信号比较微弱时, 它们不能很好地完成信号检测的任务。近年来, 随着混沌理论不断发展, 一些学者将混沌振子应用于对强噪声背景条件下的微弱信号进行检测。Donald. L. Bix 在这一方面作了一定的工作^[1]。屈梁生教授利用差分方程原理成功地设计出了混沌振子^[2], 并在检测微弱信号时有良好的可视性。浙江大学的王冠宇等人则利用 Duffing 方程的解特性设计出了混沌振子, 能达到的信噪比为 -26dB^[3]。本文采取利用 Duffing 方程设计出的混沌振子进行微弱信号检测, 并将其应用于转子系统早期碰摩故障检测, 取得了良好的效果。

1 检测原理

Duffing 方程是一类典型的非线性振动方程^[4,5], 其表达式为:

$$u'' + \epsilon \delta u' + u^3 - u = \epsilon \gamma \cos \omega t$$

将 Duffing 方程写成系统表达式为:

$$\dot{u} = v, \quad \dot{v} = u - u^3 + \epsilon(\gamma \cos \omega t - \delta v) \quad (1)$$

其中激励的幅值 γ 、频率 ω 、阻尼 δ 为可变参数, ϵ 是一个小的无量纲参数。对 $\epsilon = 0$, 系统具有中心点 (u, v)

* 收稿日期: 2000-10-11
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59775025)
作者简介: 陈敏 (1976-), 女, 硕士生。

$v) = (\pm 1, 0)$ 和双曲鞍点 $(0, 0)$ 。能量集

$$H(u, v) = \frac{v^2}{2} - \frac{u^2}{2} + \frac{u^4}{4} = 0 \tag{2}$$

由两个同宿轨道 Γ_+ , Γ_- 和点 $p_0 = (0, 0)$ 组成(如图 1)。

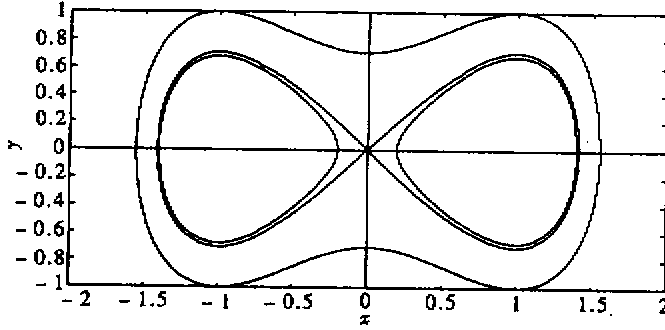


图 1 无外界激励振子的相平面图

Fig.1 Oscillators' phase plain drawing without outers stimulating

未摄动同宿轨道给定为

$$q_+^0(t - t_0) = [\sqrt{2}\text{sech}(t - t_0), -\sqrt{2}\text{sech}(T - T_0)\text{tanh}(t - t_0)], \quad q_-^0 = -q_+^0 \tag{3}$$

注意到同宿轨道环 Γ_{\pm}^0 内外皆存在周期轨道, 由于在此检测方法中利用了其外部周期轨道的分叉特性, 故在此对外部周期轨道进行说明。

在 $\Gamma_+^0 \cup \{(0, 0)\} \cup \Gamma_-^0$ 之外的轨道为

$$\hat{q}^k(t - t_0) = \left[\sqrt{\frac{2k^2}{2k^2 - 1}} \text{cn}\left(\frac{t - t_0}{\sqrt{2k^2 - 1}}, k\right), -\frac{\sqrt{2}k}{2k^2 - 1} \text{sn}\left(\frac{t - t_0}{\sqrt{2k^2 - 1}}, k\right) \text{dn}\left(\frac{t - t_0}{\sqrt{2k^2 - 1}}, k\right) \right] \tag{4}$$

其中 sn , cn , dn 是 Jacobi 椭圆函数, k 是椭圆模数。 $k \in (1/\sqrt{2}, 1)$, 当 $k \rightarrow 1$, $\hat{q}^k \rightarrow q_+^0 \cup \{(0, 0)\} \cup q_-^0$; 当 $k \rightarrow 1/\sqrt{2}$, \hat{q}^k 变为无界。其 Melnikov 函数为

$$\hat{M}^{m/n}(t_0, \gamma, \delta, \omega) = -\delta \hat{J}_1(m, n) - \gamma \hat{J}_2(m, n, \omega) \sin \omega t_0 \tag{5}$$

其中

$$\hat{J}_1(m, n) = \frac{2}{3} \frac{[2k^2(m, n) - 1] E(k(m, n)) + 4k'^2(m, n) K(m, n)}{[2k^2(m, n) - 1]^{3/2}}$$

$$\hat{J}_2(m, n, \omega) = \begin{cases} 0, & n \neq 1, m \text{ even}, \\ 2\sqrt{2}\pi\omega \text{sech}\left(\frac{m\pi K'(m, 1)}{2K(m, 1)}\right), & n = 1, m \text{ odd} \end{cases}$$

这里 $K(k)$ 是第一类椭圆积分, $E(k)$ 是第二类椭圆积分, k' 是椭圆函数的补模数 $k'^2 = 1 - k^2$ 。

在这种情形下, 可获得一系列分叉曲线在 $\gamma = R^0(\omega)\delta$ 上进行堆积。

$$\gamma = \frac{\hat{J}_1(m, 1)\delta}{\hat{J}_2(m, 1, \omega)} \stackrel{\text{def}}{=} \hat{R}^m(\omega)\delta$$

且 $k(m, n)$ 是下面共振关系的唯一解

$$\hat{T}_k = 4K(k)\sqrt{2k^2 - 1} = \frac{2\pi m}{\omega n} \tag{6}$$

Duffing 方程中^[6], 当 γ/δ 的值由小于 $R^m(\omega)$ 变化到大于 $R^m(\omega)$ 时, 方程的解由混沌解状态进入到大周期解状态, 这表明 $R^m(\omega)$ 值是方程出现混沌解与大周期解的分界点。由于混沌振子具有对小信号的敏感性以及对噪声的免疫力, 也就是说, 振子的解状态对频率为 ω 信号敏感。因此, 可以利用这一特性, 对频率为 ω 的微弱信号进行检测。

利用 Duffing 方程的解特性，确定检测思路为：先让方程的解状态处于混沌与大周期的交界状态，再将待检信号作为 Duffing 方程周期策动力的扰动，噪声虽然强烈，但对系统状态的改变无影响，而一旦带有特定频率的信号，即使幅值较小，也会使系统发生相变。计算机通过辨识系统状态，可清楚地检测出特定信号是否存在。

2 混沌振子的设计

从以上分析可知，要设计混沌振子，关键是要求出阈值 $R^m(\omega)$ 。确定 $\delta = 0.5, \omega = 1$ ，利用 Melnikov 方法^[6]可以求出此时的阈值 $R^m(\omega) = 1.67796183381779$ ，由于 δ 是已知的，可求出激励幅值 γ 的阈值为 0.83898091690890。实际的混沌振子中，由于求解 Duffing 方程过程中采用四阶龙格-库塔法对系统进行了离散化，所取的 γ 阈值稍小于计算所得的 γ 值，通过实验验证，实际取值为 0.8275。当 γ 值小于 0.8275 时，方程解的相图成混沌状态（由图 2(a) 所示）；当 γ 值大于 0.8275 时，相图成大周期解状态（由图 2(b) 所示）。

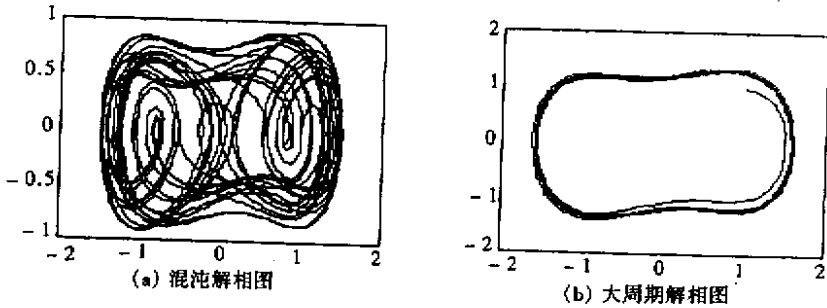


图 2 Duffing 方程解的相图

Fig.2 Phase drawing of Duffing equation solutions

针对 $\delta = 0.5, \omega = 1$ 实际设计出的混沌振子为：

$$u'' + 0.5u' + u^3 - u = 0.8275\cos\omega t$$

对其它频率成分的信号，只要令 $t = \omega\tau$ ，Duffing 方程可以在时间尺度上缩放为：

$$\begin{cases} \dot{u} = \omega v \\ \dot{v} = \omega(-\delta v + u - u^3 + \gamma\cos(\omega\tau)) \end{cases}$$

其有关阈值不会发生变化。

3 实验验证

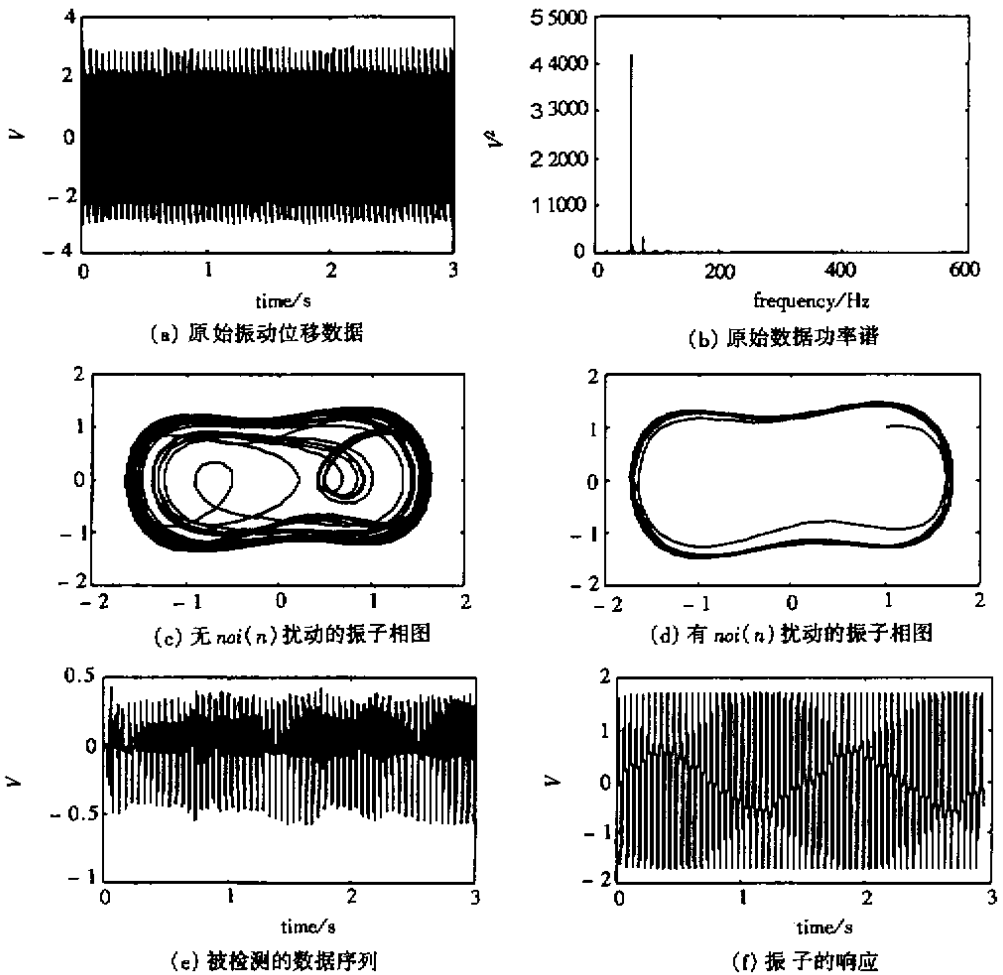
通过转子系统模拟碰摩故障实验，总结出转子系统发生早期碰摩时有 1/3、2/3 工频分量稳定存在这一特征^[7]，但幅值微弱，在实际的工作环境中很难将其检测出来。针对工频为 60Hz 的转子信号，要检测其中是否含有 1/3 分频信号，即可利用 Duffing 方程

$$\begin{cases} \dot{u} = \omega v \\ \dot{v} = \omega(-\delta v + u - u^3 + \gamma\cos(\omega\tau)) \end{cases}$$

设计出混沌振子，其中 $\omega = 2 * \pi * 20$ ， $\delta = 0.5$ ， $\gamma = 0.8275$ 。加入待检信号后方程变为

$$\begin{cases} \dot{u} = \omega v \\ \dot{v} = \omega(-\delta v + u - u^3 + \gamma\cos(\omega\tau) + noi(\tau)) \end{cases}$$

其中 $noi(\tau)$ 表示待检信号。利用所设计的混沌振子对微弱的 1/3 分频信号进行检测，从而判断转子系统是否出现早期碰摩故障。图 3 是利用混沌振子进行转子系统早期碰摩故障检测过程的具体描述，由于实验数据是在理想环境中获得的，故从 (b) 中可以隐约见到表征碰摩故障的微弱特征，如在现场的旋转机械运行环境中，这样微弱的特征信号将被背景噪声所淹没。从 (d)、(f) 两图可以清楚地

图3 混沌振子检测碰摩转子 $1/3$ 工频弱信号的结果Fig.3 The result of the chaotic oscillators detecting rub-impact rotor's $1/3$ working-frequency signals

看到系统加入待检信号后相图和时域图都发生了改变,从混沌状态进入到大周期解状态,从而判断出待检信号中存在 $1/3$ 工频信号,为转子系统早期碰摩故障检测提供依据。

4 结论与展望

本文阐述了混沌振子应用于微弱信号检测的基本原理,利用其对固定频率成分微弱信号的敏感性,提出将其应用于机械系统特别是转子系统的早期故障检测中。以对转子系统早期碰摩故障的检测说明此方法的可行性,并且可以将其应用于转子系统其它一些以特征频率表示的早期故障检测中。

另外,在工程实践中,经常需要对一些定频微弱信号进行检测,在传统的检测方法不能满足要求时,此方法有较大的发展潜力。

参考文献:

- [1] Donald L. Bix. Chaotic oscillators and CMFFNS for signal detection in noisy environments [A]. IEEE International Joint Conference on neural networks [C]. 1992, 881 - 888.
- [2] Qu Liangsheng, Lin Jing. A difference resonator for detecting weak signals [J]. J. Measurement, 1999, 26, 69 - 77.
- [3] 王冠宇等. 混沌振子在强噪声背景信号检测中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 1997, 18 (2): 209 - 212.
- [4] 陈予恕等. 非线性动力学中的现代分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [5] Greenspan B D, Holms P J. Nonlinear Dynamics and Turbulence [M]. Pitman: London, 1983.
- [6] 刘曾荣. 混沌的微扰判据 [M]. 上海: 科技教育出版社, 1994.
- [7] 胡芑庆等. 转子系统动静件间尖锐碰摩时的振动特征实验研究 [J]. 中国机械工程, 已录用。

