

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G01M 19/00 (2006.01)

G01H 17/00 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200910082043.8

[43] 公开日 2009年9月16日

[11] 公开号 CN 101532920A

[22] 申请日 2009.4.22

[21] 申请号 200910082043.8

[71] 申请人 北京工业大学

地址 100124 北京市朝阳区平乐园 100 号

[72] 发明人 胥永刚 何金群 高立新 马海龙
宫能春 张建宇 李建设 苏善斌
张飞斌 叶辉 周兵

[74] 专利代理机构 北京思海天达知识产权代理有限公司
代理人 张慧

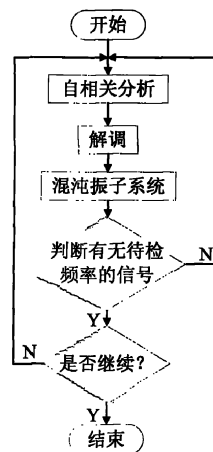
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 4 页

[54] 发明名称

一种基于混沌的低速重载设备微弱信号检测方法

[57] 摘要

本发明是一种基于混沌的低速重载设备微弱信号检测方法，用于检测已知频率的微弱信号。该方法通过振动传感器提取低速重载设备的早期微弱故障特征信号，将信号放大滤波之后由模数转换器将模拟信号转换为数字信号，对数字信号进行自相关和解调处理，将处理后的信号去均值并归一化后加入到预先设置好的混沌振子系统中，利用计算机参考 Hu 氏不变矩指标来自动判别系统输出的相位图变化情况，从而判别信号中是否包含已知频率的微弱故障特征信号。其优点是可以利用混沌振子检测微弱调制信号，计算机可自动判别混沌振子相位图的变化，从而判断待测信号中是否包含待测的微弱特征信号，能够检查出低速重载设备中的早期微弱故障特征信号，提早发现故障隐患。



1、一种基于混沌的低速重载设备微弱信号检测方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

1) 根据被测系统传动结构确定被测调制信号中可能包括的故障特征频率，建立相应的混沌振子系统；

2) 根据步骤 1) 中的故障特征频率，参考 Hu 氏不变矩确定出所述的混沌振子系统输出的相位图由混沌状态变为大尺度周期状态的 Hu 氏不变矩阈值和对应的参考信号的幅值阈值，然后将混沌振子系统参考信号的幅值设为小于参考信号的幅值阈值时的混沌状态，此时混沌振子系统中只有参考信号；

3) 通过振动传感器提取低速重载设备的早期微弱故障特征信号，将该信号放大滤波之后由模数转换器转换为数字信号，对数字信号进行自相关处理，再对自相关后的信号进行解调分析，然后对解调后的信号进行去均值和归一化处理并将处理后的信号加入到步骤 2) 中设置好的混沌振子系统中，如果混沌振子系统输出的相位图变成大尺度状态，则振动传感器提取的信号中存在待测的故障特征频率信号，如果混沌振子系统输出的相位图仍处于混沌状态，则振动传感器提取的信号中不存在待测的故障特征频率信号；

步骤 3) 中判断混沌振子系统输出的相位图处于大尺度状态或混沌状态的方法为：采用 Hu 氏不变矩作为识别混沌振子系统输出相位图变化的一个量化指标，当混沌振子系统 Hu 氏不变矩数值高于步骤 2) 所确定的 Hu 氏不变矩阈值时，混沌振子系统处于大尺度周期状态；当混沌振子系统 Hu 氏不变矩数值低于或等于步骤 2) 所确定的 Hu 氏不变矩阈值时，则混沌振子系统处于混沌状态。

一种基于混沌的低速重载设备微弱信号检测方法

技术领域

本发明涉及一种基于混沌理论的低速重载设备微弱信号检测方法，该方法主要用于检测已知频率的微弱信号。

背景技术

在钢铁、冶金等重型设备中，低速重载齿轮是重要动力传动部件。这些设备在生产的连续运输和循环作业中扮演着重要的角色。然而，由于这些设备工况恶劣，短时超载严重，冲击大，轮齿处于边界润滑状态，齿轮出现故障的机率大，一旦出现齿轮损坏，将影响到生产中的连续运输和循环作业，造成严重的后果和经济损失。同时，由于设计不当，如刚度不好或材质不均及安装误差，会使齿轮在运转中产生冲击振动。当齿轮运转时，由于齿轮受交变载荷及齿面的相对滑动交替变化，也会引起振动。对于低速重载齿轮来说，其常见故障一般为齿轮均匀磨损、点蚀、齿面胶合、轮齿塑性变形和断齿。这些典型故障更会引起异常振动，并随着齿面情况的恶化振幅不断扩大。因此，各种原因产生的振动，都有某种特征频率。

在对低速重载设备进行故障诊断的过程中，由于低速轴的转频一般为零点几赫兹到几赫兹，低速级的啮合频率一般为几十赫兹，导致每次故障冲击的间隔时间较长，在低速轴上很难检测到故障信号，需要对故障进行全面的故障分析。

在信噪比较低的环境中，对低速重载设备进行故障诊断，低频微弱信号往往被噪声所淹没，给低速轴上的齿轮或轴承故障特征提取带来了一定的困难和麻烦。

利用混沌振子系统检测噪声中淹没的有用信号，就是将待测信号作为混沌振子系统周期策动力的摄动，噪声虽然强烈，但对系统状态的改变没有影响，而一旦有特定的信号，由于混沌系统对周期小信号的敏感性，即使幅值较小，也会使系统发生相变，通过辨识系统状态，可判定信号是否存在，从而达到将强背景噪声下微弱周期小信号检测出来的目的。混沌振子系统之所以能检测微弱的周期信号，就是因为它对与系统策动力频率相近的微小信号极其敏感，相

反，对噪声却有很强的免疫力。

然而，目前基于混沌振子的微弱信号检测，在判断相位图变化时大多都是人眼识别，计算机自动化程度差。另外，对于微弱的调制信号，仅使用解调方法进行处理，通常情况下效果并不好。

发明内容

本发明的目的在于克服了现有的检测方法的上述缺陷，提出了一种基于混沌的低速重载设备微弱信号检测方法，该方法不仅可以自动识别混沌振子系统输出的相位图状态，而且还结合其它相关信号处理方法能够检测出微弱调制信号。

为了实现上述目的，本发明采取了如下技术方案：

本发明中的低速重载设备微弱信号检测方法包括以下步骤：

1) 根据被测系统传动结构确定被测调制信号中可能包括的故障特征频率，建立相应的混沌振子系统；

2) 根据步骤 1) 中的故障特征频率，参考 Hu 氏不变矩确定出所述的混沌振子系统输出的相位图由混沌状态变为大尺度周期状态的 Hu 氏不变矩阈值和对应的参考信号的幅值阈值，然后将混沌振子系统内的参考信号的幅值设为小于参考信号的幅值阈值时的混沌状态，此时混沌振子系统中只有参考信号；

3) 通过振动传感器提取低速重载设备的早期微弱故障特征信号，将该信号放大滤波之后由模数转换器转换为数字信号，对数字信号进行自相关处理，再对自相关后的信号进行解调分析，然后对解调后的信号进行去均值和归一化处理并将处理后的信号加入到步骤 2) 中设置好的混沌振子系统中，如果混沌振子系统输出的相位图变成大尺度状态，则说明振动传感器提取的信号中存在待测的故障特征频率信号，如果混沌振子系统输出的相位图仍处于混沌状态，则说明振动传感器提取的信号中不存在待测的故障特征频率信号；

步骤 3) 中判断混沌振子系统输出的相位图处于大尺度状态或混沌状态的方法为：采用 Hu 氏不变矩作为识别混沌振子系统输出相位图变化的一个量化指标，当混沌振子系统内的 Hu 氏不变矩数值高于步骤 2) 确定的 Hu 氏不变矩阈值时，混沌振子系统处于大尺度周期状态；当混沌振子系统内的 Hu 氏不变矩数值低于或等于步骤 2) 所确定的 Hu 氏不变矩阈值时，则混沌振子系统处

于混沌状态。

与现有的检测方法相比，本发明具有以下优点：

本发明可以检测早期的频率已知的微弱故障特征信号，并通过 Hu 氏不变矩指标可自动识别混沌振子系统输出的相位图变化情况。

附图说明

图 1 本发明的工作原理图

图 2 是基于混沌振子和其它理论的检测微弱信号的信号处理算法流程图

图 3 本发明的工作流程图

图 4 (a) 本发明实现的轴承损坏信号（原始信号）的时域图

图 4 (b) 本发明实现的轴承损坏信号（原始信号）的幅值谱

图 5 本发明实现的 Hu 氏不变矩变化趋势图

图 6 (a) 本发明实现的未加入原始信号时的混沌振子系统输出的时间历程图

图 6 (b) 本发明实现的未加入原始信号时的混沌振子系统输出的相位图

图 7 (a) 是本发明实现的对原始信号进行自相关处理后的时域图

图 7 (b) 是本发明实现的对原始信号进行自相关处理后的幅值谱

图 8 (a) 本发明实现的对自相关后的信号进行 Hilbert 解调后的时域图

图 8 (b) 本发明实现的对自相关后的信号进行 Hilbert 解调后的幅值谱

图 9 (a) 本发明实现的将图 7 中 Hilbert 解调信号去均值并归一化后作为待检信号输入到混沌振子系统中，此时该系统输出的时间历程图

图 9 (b) 是本发明实现的将图 7 中 Hilbert 解调信号去均值并归一化后作为待检信号输入到混沌振子系统中，此时该系统输出的相位图

具体实施方式

下面结合附图对本发明作进一步说明：

本实施例中的数据采集过程及前期处理如图 1 所示，混沌振子系统的内部信号处理算法流程如图 2 所示。首先根据被测系统传动结构确定待测信号中可能包括哪个故障特征频率，建立相应的混沌振子系统。然后根据该故障特征频率，参考 Hu 氏不变矩确定出所述混沌振子系统输出的相位图由混沌状态变为大尺度周期状态的 Hu 氏不变矩阈值和对应的参考信号的幅值阈值，将混沌振子系统中的参考信号的幅值设为稍小于参考信号的幅值阈值时的混沌状态，此

时混沌振子系统中只有参考信号。然后将振动信号进行自相关处理，再对自相关处理后的信号进行解调分析，具体实施实例中采取的是 Hilbert (希尔伯特) 解调方法。之后，对解调后的信号进行去均值和归一化处理，将处理的信号加入到之前设置好的混沌振子系统中，如果系统输出的相位图变成大尺度状态，则说明信号中存在待测的故障特征频率信号，如果相位图仍处于混沌状态，则说明不存在。同时可以参照 Hu 氏不变矩指标来让计算机自动识别系统是否从混沌状态变为大尺度周期状态。

应用本方法进行低速重载设备的微弱信号检测方案如图 3 所示，主要解决提高信噪比、定量识别混沌相位图变化、调制信号分析等问题。对信号进行自相关处理可以突出故障特征信号，提高信噪比。采用 Hu 氏不变矩作为识别混沌相位图变化的一个量化指标，当混沌振子系统对应的 Hu 氏不变矩高于该混沌振子系统的 Hu 氏不变矩阈值时，相位图处于大尺度周期状态，低于该阈值时，则处于混沌状态。在采集的信号中，往往存在调制信号，为了便于混沌振子系统分析，先使用 Hilbert 等解调方法对信号进行处理，然后对解调后得到的数据进行去均值和归一化处理，将处理后的信号加入到混沌振子系统中。

以某高线棒材厂的轴承损坏数据为例，使用的数据是故障发生前将近 20 天的数据，采样频率为 10kHz，采样点数为 2048，计算得到的轴承内圈故障特征频率为 116.619Hz，原始信号的波形图和幅值谱如图 4 所示。建立如下混沌振子系统：

$$\begin{cases} \dot{x} = 2\pi f_0 y \\ \dot{y} = 2\pi f_0 (-cy + x - x^3 + F_0 \cos(2\pi f_0 t) + n(t)) \end{cases} \quad (1)$$

式中： f_0 为混沌振子系统内部周期摄动力的频率， c 为为阻尼系数， $F_0 \cos(2\pi f_0 t)$ 为参考信号， $n(t)$ 为待检信号， F_0 为参考信号的幅值， $-x + x^3$ 为非线性恢复力， $2\pi f_0 y$ 为 x 的微分， y 是一个中间变量。

对于二值图像，在 R^2 平面上的 $p+q$ 阶矩为：

$$m_{pq} = \sum_y \sum_x f(x, y) x^p y^q \quad (2)$$

式中， $f(x, y)$ 为图像在坐标点 (x, y) 上的灰度。

m_{pq} 依赖于图像在坐标中的位置，不具备平移不变性， $p+q$ 阶中心矩 μ_{pq} 满

足平移不变性，其定义为

$$\mu_{pq} = \sum_y \sum_x (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y), \quad (3)$$

式中 (\bar{x}, \bar{y}) 代表图像的质心：
$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \\ \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \end{cases}。$$

对 μ_{pq} 进行正规化处理得到 η_{pq} 的表达式为

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{\frac{1+p+q}{2}}}, \quad p+q \geq 2 \quad (4)$$

η_{pq} 满足了平移和伸缩不变性，但不满足旋转不变性，Hu通过研究分析得到了7个完备的2阶和3阶不变矩 $\varphi_1 \sim \varphi_7$ ：

$$\varphi_1 = \eta_{20} + \eta_{02}$$

$$\varphi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2$$

$$\varphi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2$$

$$\varphi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2$$

$$\varphi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]$$

$$\varphi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03})$$

$$\varphi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2]$$

φ_1 表示图像发散程度的度量指标，图像的发散程度越大，则 φ_1 越大； φ_2 表示图像对称性的度量指标，图像对称性越好，则 φ_2 越小。

根据矩的各种特性，本发明选用 φ_1 不变矩作为自动识别相位图的量化指标，通过大量仿真发现，相位图在不同的状态具有不同的 φ_1 ，并且其变化具有一定的规律性，是在混沌状态下和大尺度周期下的 φ_1 区别很明显，从而可以定量识别相位图的状态，达到自动识别的目的。

对于混沌相位图这样的二值图像，在计算不变矩时，可以认为 R^2 平面上相位图经过的各坐标点的灰度都相同（ $f(x,y)=1$ ），相位图没有经过的各坐标点的灰度为0（即 $f(x,y)=0$ ），然后代入式（2）~（4）中，计算混沌相位图的不变矩 φ_1 。

对于式（1），初始设置混沌振子系统时，该系统中无待检信号，即 $n(t)$ 为0。令阻尼系数 $c=0.5$ ，将参考信号频率 r 设为轴承的计算故障特征频率116.619Hz，点数为 $N=2048$ ， F_0 的初始值是0.42， F_0 的变化步长是0.01，终止值是0.92，Duffing振子的计算步长 $h=0.0001$ ，采用4阶Runge-Kutta算法进行求解，初始值 $x(0)=0$ ， $y(0)=0$ ，得到的不变矩 φ_1 趋势如图5所示。

从图5中可以看出，该混沌振子系统输出的相位图由混沌状态变为大尺度周期状态的Hu氏不变矩阈值 φ_1 约为2.3，对应的参考信号的幅值阈值 F_b 约为0.65。于是调节 F_0 使得混沌振子系统处于稍小于阈值 F_b 的状态，本实例中的 F_0 设为0.628，此时输出的相平面轨迹处于混沌状态，如图6所示。对原始信号先进行自相关处理，自相关后的时域图和幅值谱如图7所示。再对自相关后的信号进行Hilbert解调，解调后的时域图和局部放大的幅值谱如图8所示。然后对解调后的信号进行去均值和归一化处理，最后把处理后的信号作为待检信号输入到该混沌振子系统中，此时得到的Hu氏不变矩为2.339，大于Hu氏不变矩阈值2.3，说明该待检信号中包含有待检频率的信号，即包含故障特征频率116.619Hz的信号，同时该混沌振子系统输出的状态如图9所示，其中的相位图确实处于大尺度周期状态。

从图7可以看出，振动信号经过自相关处理之后，能稍微看出一些微弱故障特征信号的冲击现象，从对应的幅值谱中看不出特征频率；再对信号进行Hilbert解调之后，对应的幅值谱中也看不出微弱特征频率。于是将解调后的信号去均值并归一化后作为待测信号输入到混沌振子系统中。未加入待测信号之前，混沌振子系统的输出如图6所示，系统处于混沌状态，加入待检测信号之后，混沌振子系统的输出产生很大变化，由混沌态变为大尺度周期状态，如图9所示，说明待测信号中含有所要检测的微弱故障特征信号。

本发明首先提出用混沌振子系统来检测微弱调制信号，解决了低速重载设

备中的微弱调制信号的检测问题。结合 Hu 氏不变矩作为量化指标来识别相位图的变化，使用自相关方法提高信噪比，通过计算机来自动判别微弱特征信号是否存在。

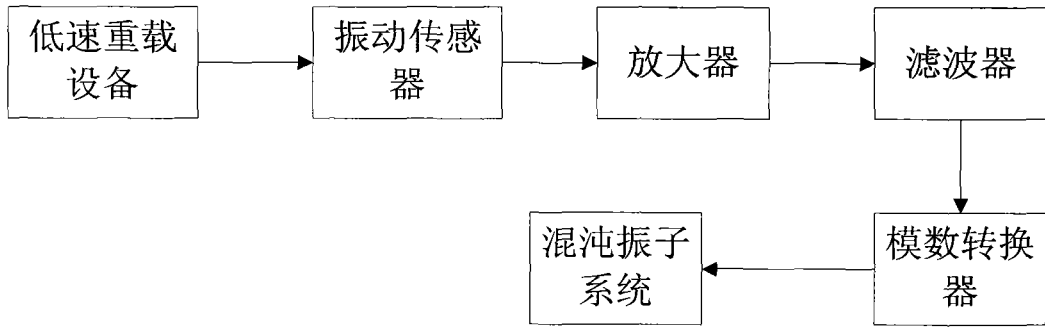


图 1

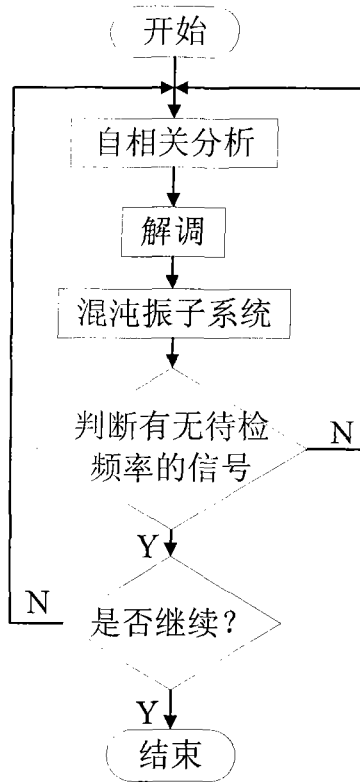


图 2

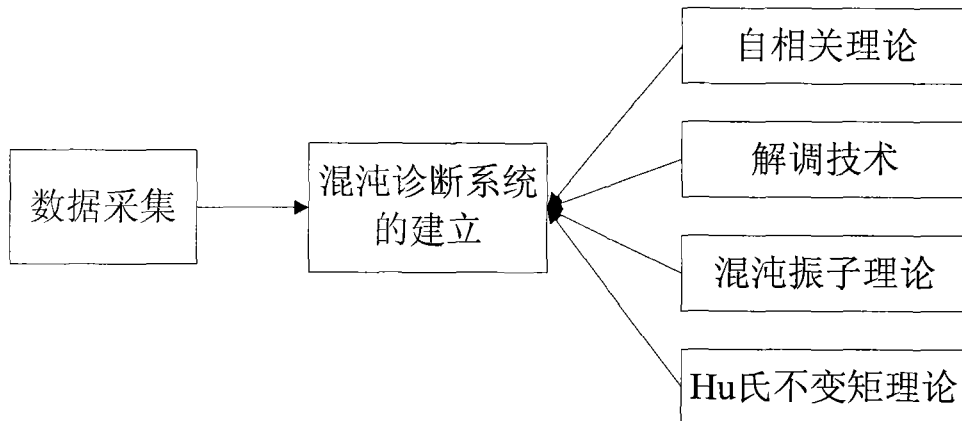


图 3

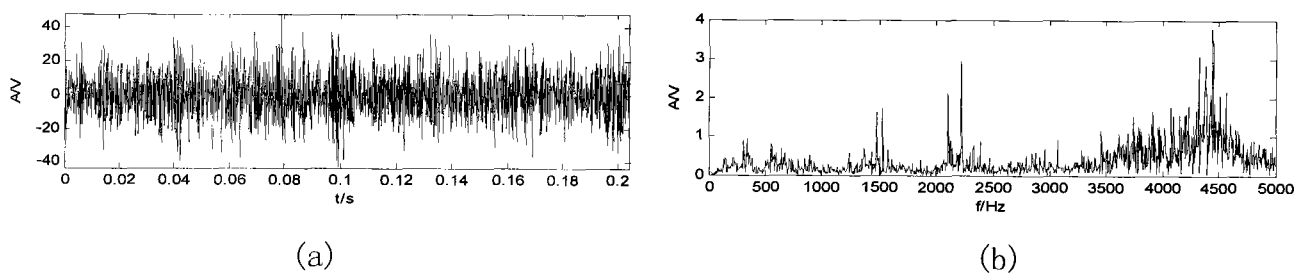


图4

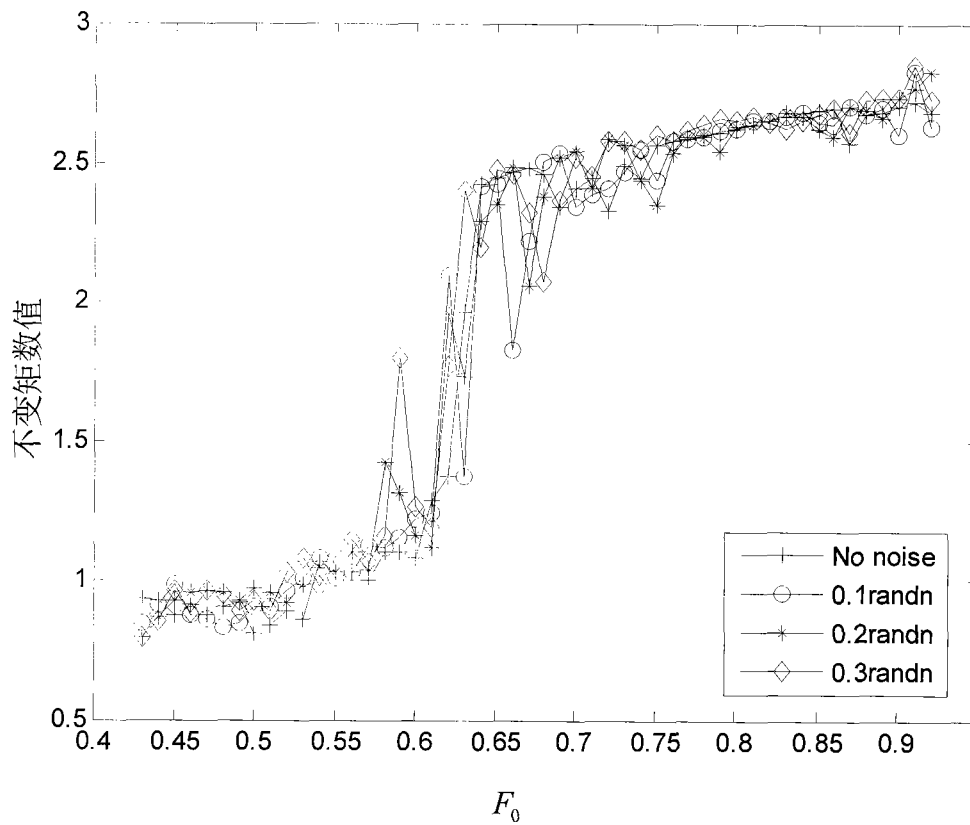


图5

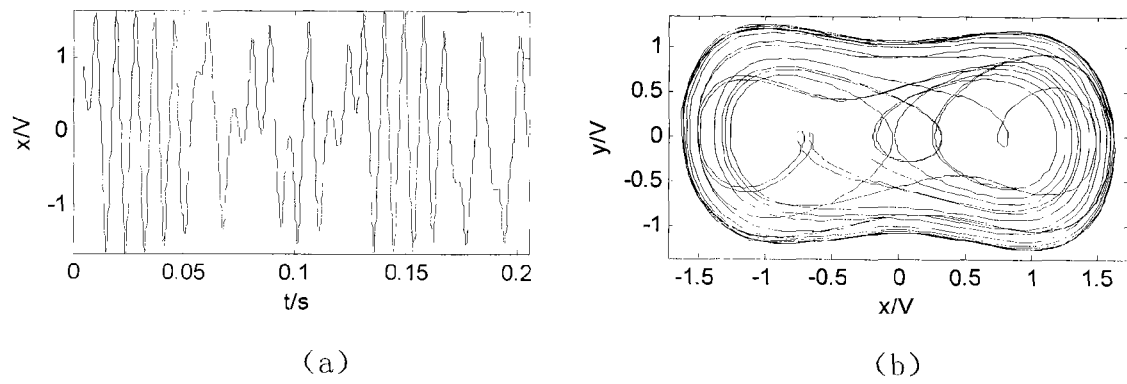


图6

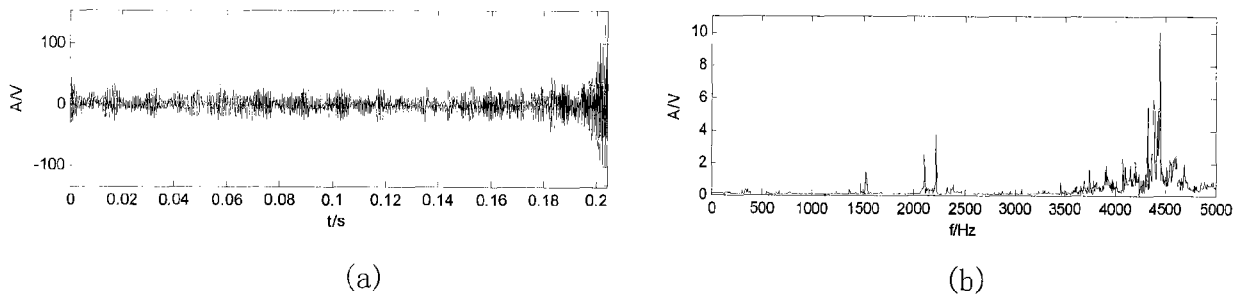


图7

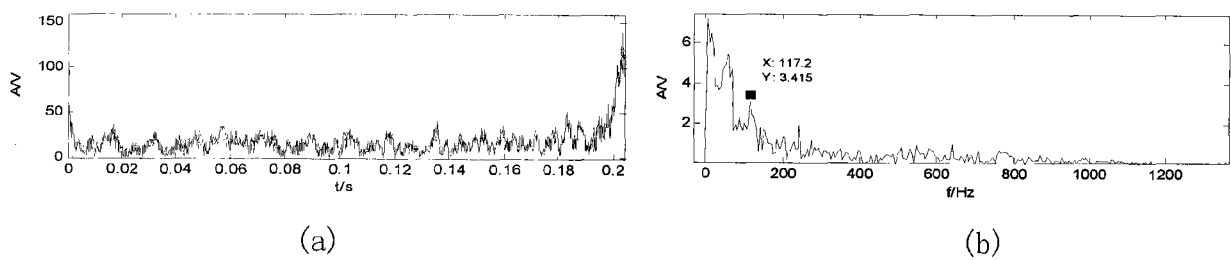


图8

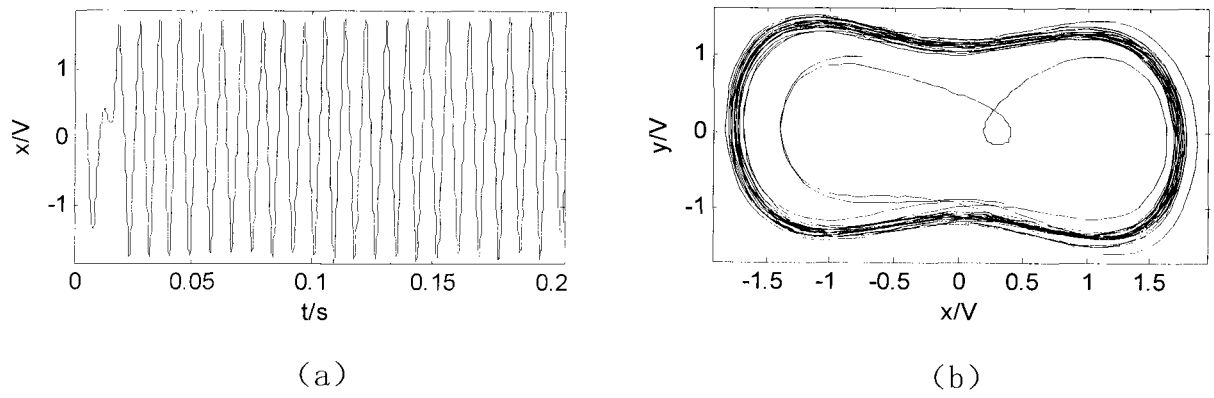


图 9