

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01H 17/00 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200810018114.3

[43] 公开日 2008 年 10 月 29 日

[11] 公开号 CN 101294845A

[22] 申请日 2008.5.5

[21] 申请号 200810018114.3

[71] 申请人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市友谊西路 127 号

[72] 发明人 郭阳明 马捷中 翟正军

[74] 专利代理机构 西北工业大学专利中心

代理人 顾潮琪

权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 3 页

[54] 发明名称

转子早期故障的多频率微弱信号检测方法

[57] 摘要

本发明公开了一种转子早期故障的多频率微弱信号检测方法，采相关方法进行前期去噪，采混沌振子阵列扫描的方法，实现同一故障所表征的多个频率微弱信号的同时检测，即含噪信号经过互相关计算去噪后，将相关函数送入到混沌振子检测阵列中，让其作为混沌系统周期策动力的一部分，通过混沌系统相轨迹变化便可检测出待检信号的微弱周期信号了。本发明提高了待测信号的信噪比，然后通过辨识 Duffing 振子的状态、即相轨迹图形的变化来完成多特征微弱信号的检测。因此，该方法简单、直观，物理意义明确，检测信噪比高，可完成多已知频率的信号微弱检测，且易于工程实现，有较大的发展潜力。

1、转子早期故障的多频率微弱信号检测方法，其特征在于包括下述步骤：

- (a) 结合转子系统报故的情况，判断待测信号中可能含有的不同正弦信号的频率；
- (b) 选取与待测信号频率相同的信号作为参考信号；
- (c) 根据可能含有的频率构建各自频率的杜芬振子方程，将这些方程组合建立对微弱正弦信号敏感的混沌振子阵列；
- (d) 通过 Melnikov 方法求得杜芬振子方程的相轨迹从临界周期状态到大尺度周期状态阈值；
- (e) 采集待测信号，将待测信号和参考信号做互相关运算；
- (f) 将经过互相关计算去噪后的相关函数作为杜芬振子的输入，送到混沌振子检测阵列中，让其作为混沌系统周期策动力的一部分；
- (g) 通过杜芬混沌振子相轨迹变化，判定待测信号中是否含有可能的周期信号，若杜芬混沌振子相轨迹由临界周期状态到大尺度周期状态变化，则表明含有相应频率的周期信号，就可以确定相应故障的存在；若杜芬混沌振子相轨迹保持临界周期状态，则表明不含有相应频率的周期信号，没有相应故障的存在。

2、根据权利要求 1 的转子早期故障的多频率微弱信号检测方法，其特征在于：

所述的 Duffing 方程是一类典型非线性振动方程，表达式是

$$x'' + \omega kx' + \omega^2(x^3 - x) = \omega\gamma \cos(\omega t)$$

其中， x 为 Duffing 振子对窄带随机激励的位移响应， k 为阻尼比， α 、 β 为实数因子， γ 、 ω 为周期策动力的幅值和频率。

转子早期故障的多频率微弱信号检测方法

技术领域

本发明属电子技术领域，涉及微弱信号的检测方法。

背景技术

微弱信号检测学是研究从噪声中提取信息的方法及技术的科学。研究噪声中的微弱信号检测的原理及方法，是测量技术中的综合技术和尖端领域。运用这种技术可以测量到传统观念认为不能测量的微弱量（如弱光、小位移、微振动等），使微弱信号测量精度得到很大地提高。因此，它是发展高新技术，探索及发现新的自然规律的重要测量手段，对推动科技及生产发展均有重要价值。

微弱信号检测技术在与人类相关的各领域都有应用。例如强海洋噪声背景下的微弱信号检测是水声信号处理的一项重要研究内容，它在目标探测识别、水声通信、遥控、遥测及海洋勘探等领域都有广泛的应用，还如石油、天然气的管道泄漏监测、煤矿瓦斯气体浓度监测、大型机械设备早期故障检测与诊断、化学计量中的近红外光谱分析技术等等中都要用到微弱信号检测技术。

微弱信号检测的方法根据微弱信号检测的对象主要有两个发展方向，一个方向主要是从时域上分析信号，主要针对时域上比较敏感的信号检测，应用场合包括波形去噪、奇异点检测等。微弱信号检测另外一个发展方向主要是从频域上分析信号，应用场合包括频率检测、信号跟踪等。

微弱信号检测在时域上的方法主要有以下几种方法：

(1) 相关法，通过自相关或者互相关分析信号的一些时域上的特征，优点在于实现简单，可以找到信号的一些主要的特征；不足之处在于，输出的信号只是代表微弱信号的幅值和相位信息的直流电压，波形几乎无法恢复；现在这种方法的使用已经不多。

(2) 压缩带宽法，通过压缩信号通过的带宽，强行将一些信号带完全抑制，以达到抑制噪声的目的，其缺点在抑制噪声的同时有用信号也基本丧失，而且对不确定性的谐波干扰几乎不能抑制；

(3) 能量积累法，基于四阶累积量矩和最小范数 TLS 方法可以有效地抑制各信道间互不相关的和相关的噪声。在混合色噪声和低信噪比条件下具有很高的谱估计

精度和稳定性,其缺点需要较长的时间进行能量积累,一般需要秒级甚至更长时间的采样,从而增加算法运算量,导致适用场合十分有限。

(4) 随机共振法,在特定的非线性系统中,额外大小的噪声事实上可以帮助而不是阻碍信号检测的性能,这就是随机共振现象。基于随机共振的微弱信号检测技术是新近发展起来的一种新的信号处理技术,与各种抑噪方法相比,它不是消除噪声而是充分利用噪声来增强弱信号以提高信噪比达到识别弱信号的目的。随机共振最初是由Benzi等人提出,他们根据随机共振原理设计了一个地球动力学模型以解释地球气候的变化规律。当时及随后一段时间,并未引起人们广泛的关注,直到在一次双稳环激光器的关键实验中展示了随机共振现象。这种方法在微弱信号检测中非常具有潜力。

(5) 基于混沌理论的方法,它利用混沌系统对初值条件的极度敏感性,当将被检测信号注入混沌系统后,就可导致此混沌系统的动力学行为发生很大变化,根据这种变化,通过适当信号处理,从而测出被检信号的各种参数。西安交通大学的屈梁生院士提出的利用差分振子,通过系统相同变化来判断待测信号中是否包含周期成份的方法,成功地应用于机械系统的故障信号检测。

此外,时域上的微弱信号检测方法还有同步迭加法、双路消噪法、取样积分法等。

微弱信号检测在频域上的方法主要有以下几种方法:

(1) 神经网络遗传算法,主要采用 BP 遗传算法,通过对信号的训练,识别信号和噪声的特征,识别后进行频域滤波处理,达到去噪效果;其局限性在于只适合低频率的信号检测,而且一旦噪声信号改变则需要重新进行训练;使得算法的实时性降低,而且随着噪声的增大,其BP遗传算法需要的时间增大;

(2) 现代互谱Levinson方法和Pisarenko方法以及Music方法,现代互谱Levinson方法比之传统的FFT方法和互周期图法能更有效地提高互谱估计的谱分辨率和谱光滑性,互谱Pisarenko方法在理论上可以完全克服互不相关的有色噪声对真实信号频率估计的影响,互谱MUSIC方法有优良的谱估计的分辨率和谱估计的稳定性,而且随着信噪比的下降,其谱估计性能变化不大,基于互谱理论的这些方法对于互不相关的有色噪声有很强的抑制能力,但对于相关噪声抑制能力很差。MUSIC等方法对高斯色噪声的信噪比下限已经达到了 -10dB 的水平,并且具有相当高的谱分辨率。针对各信道间相互独立的色噪声情况,可采用现代互谱估计方法,其信噪比工作下限甚至达到了 -30dB

的水平，并且已实际应用到 1nV微弱正弦信号测量。

(3) 窄带滤波法，主要是使用窄带滤波器实现对信号频段之外噪声的消除，对一些确定性的噪声，高频或低频处的谐波抑制效果明显，对白噪声有一定的滤波效果。其不足之处在于很多时候需要在线设计滤波器，计算时间比较长。其次该方法对信号也有一定程度的抑制，靠近信号频率成分的谐波对信号检测影响较大。

除了以上所述方法外，近年来，各种微弱特征信号检测方法如不断涌现，如小波分析、独立量分析、经验模式分解等等。

此外，也出现了将两种或两种以上方法综合起来用于微弱特征信号检测，如有研究者综合了小波分析与分形方法，对弱磁异常中的噪声和误差进行了分析评价，对弱磁异常进行了有效识别。有研究者提出将自相关方法和混沌理论相结合共同检测微弱正选信号的方案，可以检测更低信噪比的正弦信号。有研究者将小波方法和频谱分析方法相结合，也取得了较好的检测效果。

转子部件（系统）是机械设备中的一种常见部件，该部件（系统）的正常运行对于设备的正常工作有着非常重要意义。但是，在使用过程中，该部件（系统）常常会出现转子质量不平衡、转子不对中、转子动静件碰撞、轴承松动等等故障。在设备报故后却往往不能对该故障进行准确判断，严重影响了设备的维修和使用，同时也增加了设备维修和使用的费用。我们知道，转子部件（系统）若发生故障，就会引起转子振动的异常变化，因此通过对振动信号的分析，发现这些异常变化，同时转子部件的一种故障往往通过多个特征频率的信号来表征，如转子发生早期碰撞时 1/3、2/3 等工频分量会同时存在。所以，通过对多个特征频率信号的同时检测来确诊该故障是否真的存在。

近年来，将混沌理论应用于微弱信号检测的研究取得了许多成果。但是，这些方法的检测信噪比有限，检测信号频率单一。特别是在众多的早期故障检测的应用中，远远大于微弱故障信号的强噪声会使混沌检测系统的无序增加，会使系统状态转变门限值提高，亦即系统状态发生转变的周期信号的最低幅度提高，甚至造成系统检测性能严重下降，进而不能很好地完成检测任务。同时，早期故障往往是一种故障表征为多个特征信号，同一特征信号还可能反映了不同的故障。为了提高故障检测的准确性和有效性，往往需要同时检测表征同一故障的多个特征频率的微弱信号。因此，利用

单一混沌振子进行单一微弱信号的检测已不能满足要求。

发明内容

为了克服现有技术检测信噪比有限，且检测信号频率单一，不能满足多个特征信号同时检测的不足，本发明提供了一种提高转子早期故障检测准确性的多频率微弱信号检测方法。

本发明解决其技术问题所采用的技术方案包括以下步骤：

- 1、结合转子系统报故的情况，判断待测信号中可能含有的不同正弦信号的频率。
- 2、选取与待测信号频率相同的信号作为参考信号。
- 3、根据可能含有的频率构建各自频率的杜芬（Duffing）振子方程，将这些方程组合建立对微弱正弦信号敏感的混沌振子阵列。
- 4、通过 Melnikov 方法求得 Duffing 振子方程的相轨迹从临界周期状态到大尺度周期状态阈值。
- 5、采集待测信号，将待测信号和参考信号做互相关运算。
- 6、将经过互相关计算去噪后的相关函数作为 Duffing 振子的输入，送到混沌振子检测阵列中，让其作为混沌系统周期策动力的一部分。
- 7、通过 Duffing 混沌振子相轨迹变化，判定待测信号中是否含有可能的周期信号，若 Duffing 混沌振子相轨迹由临界周期状态到大尺度周期状态变化，则表明含有相应频率的周期信号，就可以确定相应故障的存在；若 Duffing 混沌振子相轨迹保持临界周期状态，则表明不含有相应频率的周期信号，没有相应故障的存在。

所述的 Duffing 方程是一类典型非线性振动方程，在周期外来策动力下的表达式是

$$x'' + kx' + \alpha x^3 + \beta x = \gamma \cos(\omega t)$$

x 为 Duffing 振子对窄带随机激励的位移响应， k 为阻尼比， α 、 β 为实数因子， γ 、 ω 为周期策动力的幅值和频率。

本发明中的 Duffing 方程形式如下：

$$x'' + \omega kx' + \omega^2(x^3 - x) = \omega\gamma \cos(\omega t)$$

在 k 固定的情况下，系统的状态将随 γ 的变化，经历同宿轨道、分叉、混沌、临界混沌和大尺度周期等状态。

本发明的有益效果是：由于采用相关计算，本发明提高了待测信号的信噪比，然后通过辨识 Duffing 振子的状态、即相轨迹图形的变化来完成多特征微弱信号的检测。

因此，该方法简单、直观，物理意义明确，检测信噪比高，可完成多已知频率的信号微弱检测，且易于工程实现，有较大的发展潜力。

通过仿真实验测得，当取被测信号的幅值均 $10^{-7}V$ ，高斯白噪声的平均功率为 $10^{-5}W$ 时，检测阵列中各个振子的相轨迹依然发生了改变，即够检测到了信号的存在。此时，系统的信噪比为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\text{周期信号功率}}{\text{噪声平均功率}} = 10 \lg \left[\frac{0.5 \times (10^{-7})^2}{10^{-5}} \right] = -93 \text{dB}$$

仿真实验说明，相关处理能较好地提高微弱信号的检测信噪比。而且，在被测信号频率相差较大时，构建混沌检测阵列可以有效实现多频率叠加信号的同时检测。而当前微弱信号的检测方法大多都是在信噪比为 -30dB 的水平。

下面结合附图和实施例对本发明进一步说明。

附图说明

图 1 是本发明的流程图。

图 2 用 Matlab 构建的本发明的检测模型图。

图 3 是实施例所述的原始信号波形图。

图 4 是实施例所述的原始信号的功率谱图。

图 5 是实施例所述的原始信号相关计算后的功率谱图。

图 6 是实施例所述的信号信号加入前 ω_1 检测振子和 ω_2 检测振子的相轨迹。

图 7 是实施例所述的信号加入后 ω_1 检测振子检测后的相轨迹。

图 8 是实施例所述的信号加入后 ω_2 检测振子检测后的相轨迹。

具体实施方式

工程应用发现，转子系统发生早期碰擦时有 $1/3$ 、 $2/3$ 工频分量稳定存在这一特征，但幅值微弱，在实际工况下很难将其检测出来。本实施例采用本发明所述的方法在飞机转子系统模拟实验台上对工频为 60Hz 的转子进行早期碰擦故障模拟实验，检测其中是否含有 $1/3$ 和 $2/3$ 分频信号，包含以下步骤：

步骤一、判断待测信号中可能含有 $1/3$ 和 $2/3$ 分频信号的频率 ω_1 和 ω_2 。

步骤二、选取参考信号为

$$y(t) = 2(\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t))$$

此时， $1/3$ 分频信号的频率 $\omega_1 = 2 \times \pi \times 20 \text{ rad/s} = 40\pi \text{ rad/s}$ 、 $2/3$ 分频信号的频率 $\omega_2 = 2 \times \pi \times 40 \text{ rad/s} = 80\pi \text{ rad/s}$ 。

步骤三、利用Duffing振子建立 ω_1 和 ω_2 两个频率下的Duffing混沌振子构成检测阵列

$$x'' + 40\pi kx' + 1600\pi^2(x^3 - x) = 40\pi\gamma \cos(40\pi t)$$

$$x'' + 80\pi kx' + 6400\pi^2(x^3 - x) = 80\pi\gamma \cos(80\pi t)$$

式中Duffing振子方程的阻尼比 $k=0.5$ 。

步骤四、确定周期策动力的幅值 γ 的阈值，由Melnikov方法计算可得 $\gamma=0.8261507$ 。将振子阵列调整到临界周期状态到大尺度周期状态的临界状态。

步骤五、选用16位HS-PCI系列高速A/D 数据采集卡将实验台上含噪的信号采入计算机中。设输入为 $x(t) = S_1 + n(t) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cos(\omega_i t) + n(t)$ ， m 为信号的个数。选取参考

信号为 $y(t) = S_2(t) = \lambda \sum_{i=1}^m \cos(\omega_i t)$ ， λ 为可变参数，相关计算公式如下

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t-\tau)dt \\ &= \sum_{i,j=1}^m [R_{s_i s_i}(\tau) + R_{s_i n}(\tau) + R_{s_j n}(\tau)] \end{aligned}$$

$$\text{其中, } i, j = 1 \dots m, i \neq j, R_{s_i s_i}(\tau) = \frac{\lambda \alpha_i}{2} \cos(\omega_i t).$$

图5、图6分别是原始信号的波形图和功率谱图。可以看到，表征碰撞故障的 $1/3$ 和 $2/3$ 分频信号被现场的噪声所淹没，无法识别。

按照以上公式进行相关计算后，从图7所示的功率谱图中看到在 20Hz 和 40Hz 处有毛刺，说明可能有微弱的故障特征存在。

步骤六、将由上式计算得到的 $R(\tau)$ 送入到Duffing振子阵列检测系统中。 ω_1 检测振子和 ω_2 检测振子在信号加入前后的相轨迹如图8、图9、图10所示。

步骤七、由图8、图9、图10可以看出，加入待测信号后，相应检测振子的相轨迹发生了明显的变化，即从混沌状态跳变到了大尺度周期状态，说明本方法有效地检测出待测信号中含有 20Hz 和 40Hz 微弱正弦信号，从而可以更加准确地判断出转子碰撞故障的存在。

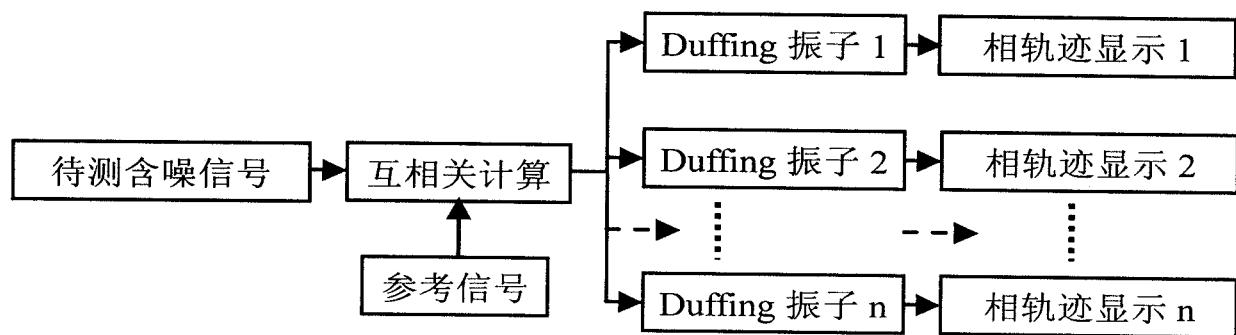


图 1

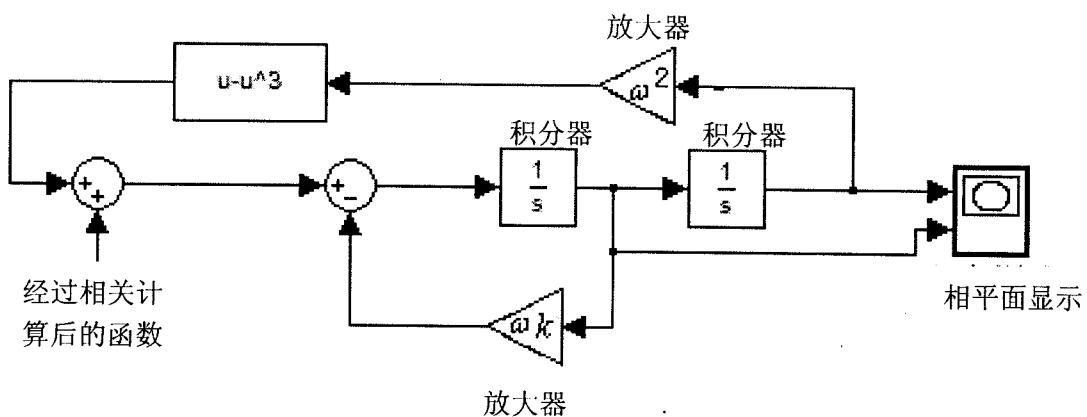


图 2

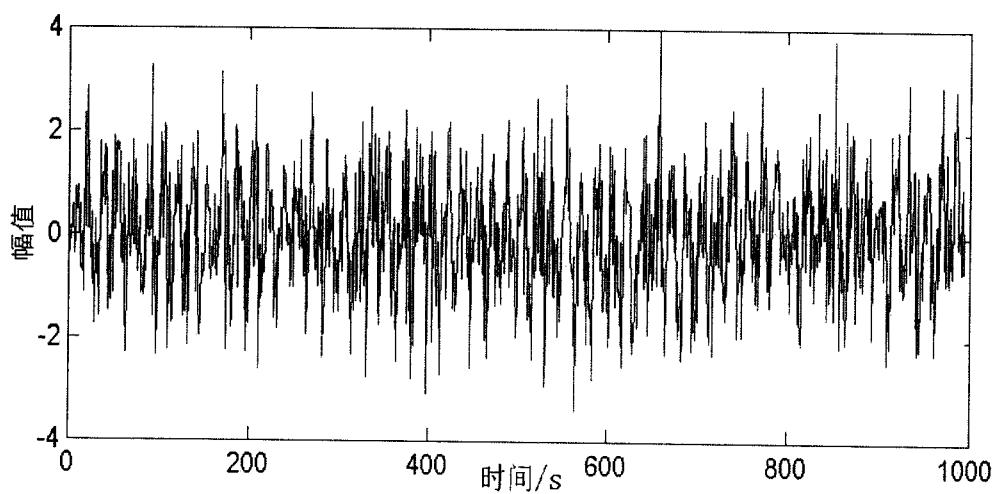


图 3

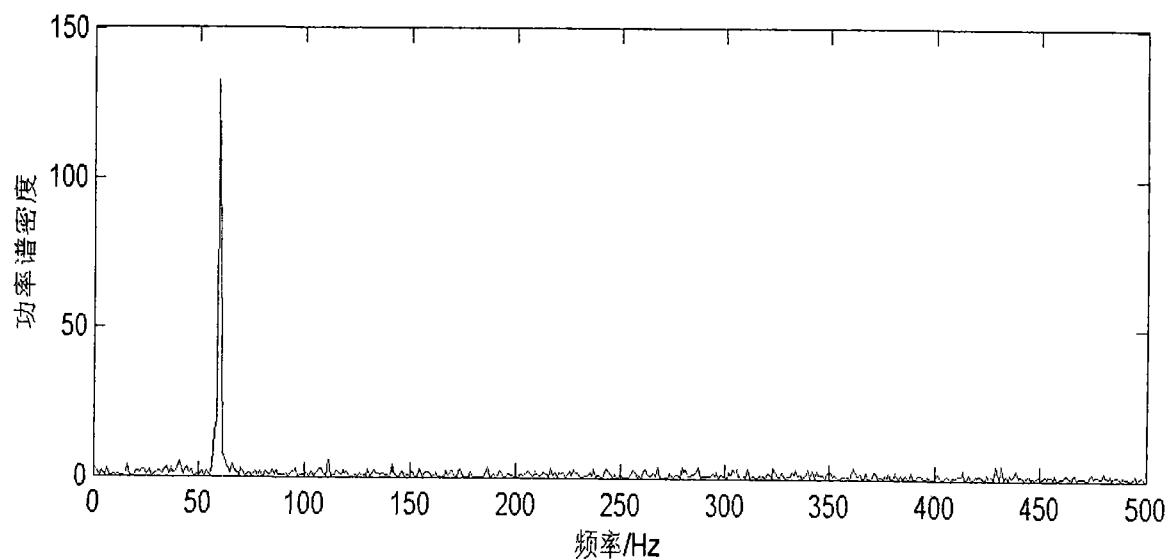


图 4

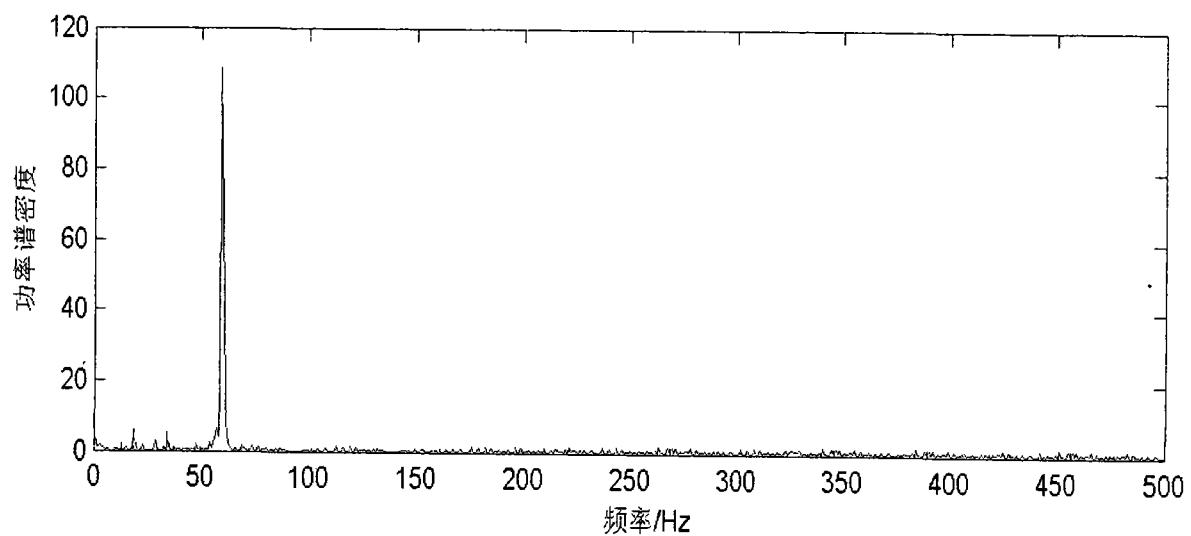


图 5

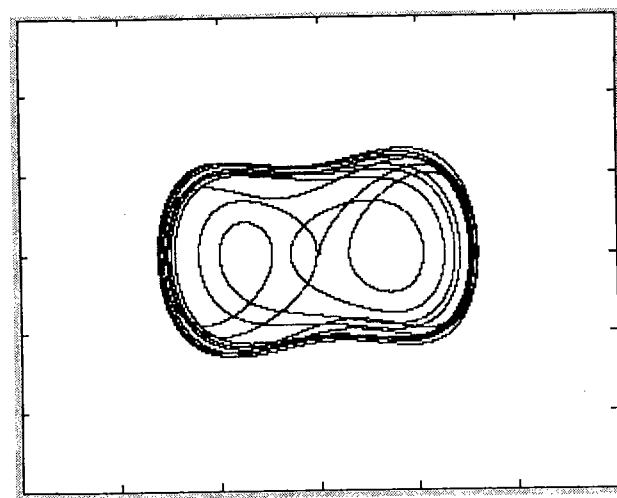


图 6

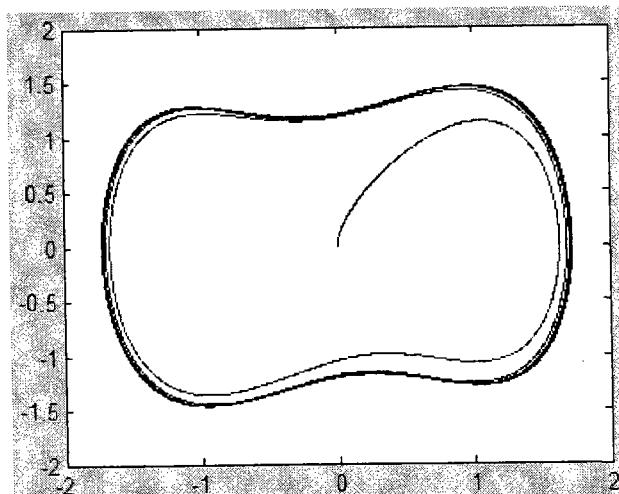


图 7

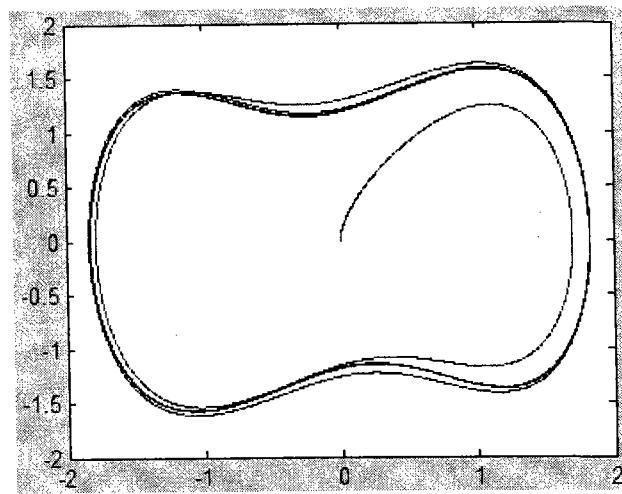


图 8