

# 基于参数可调随机共振的齿轮早期故障检测

孙迎利,刘东升,米双山

(军械工程学院 导弹工程系,河北 石家庄 050003)

**摘要:** 齿轮是机械设备传递运动和动力的通用装置,应用在很多场合,其状态的好坏影响着设备能否顺利运行,因此及时准确地发现齿轮早期故障具有重大意义。文章拟采用参数可调的随机共振方法检测齿轮早期故障。

**关键词:** 随机共振;微弱信号;齿轮早期故障

中图分类号: TH113

文献标识码: A

文章编号: 1006-2394(2009)09-0025-03

## Early Fault Detection for Gear Based on Parameter Tuning Stochastic Resonance

SUN Ying-li, LU Dong-sheng, MI Shuang-shan

(Dept. of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Gear is the universal equipment which passes motion and power. It is used in many ways. Its status decides equipments' situations, so it's very important to find early fault of gear. Parameter tuning stochastic resonance can detect gear's early fault.

**Key words:** stochastic resonance; weak signal; gear's early fault

### 1 随机共振检测微弱信号的原理与模型

“随机共振”描述的是这样一种现象:在一个非线性双稳系统中,当噪声强度从小到大逐渐增强时,输出信噪比非但不降低,反而大幅度增强,并且存在某一最佳输入噪声强度,使系统的输出信噪比达到一个峰值,此时输入信号、噪声以及非线性系统三者之间达到最佳的匹配关系;当噪声强度过高或过低时,输出信噪比都会显著降低。

随机共振系统一般包含3个不可缺少的因素:输入信号  $s(t)$ 、噪声  $\Gamma(t)$  和存在2个或多个稳态的非线性系统,图1所示为随机共振系统的结构框图。通常研究随机共振系统用的模型都是由非线性朗之万(Langevin)方程描述的双稳态系统:

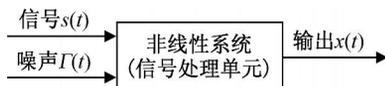


图1 随机共振结构框图

$$\frac{dx}{dt} = ax - bx^3 + A \cos(2ft) + \Gamma(t) \quad (1)$$

$$U(x) = -\frac{a}{2}x^2 + \frac{b}{4}x^4 \quad (2)$$

式中:  $a$ 、 $b$  为大于零的实数,是非线性系统的结构参数;  $A$  为信号幅值;  $f$  为信号频率;  $\Gamma(t)$  为均值为零、强

度为  $D$  的高斯白噪声;  $U(x)$  为非线性双稳态势函数。方程(1)实质上描述了单位质点同时受到外力和噪声驱动时,在双势阱中的过阻尼运动;方程(2)表示的势函数如图2所示。

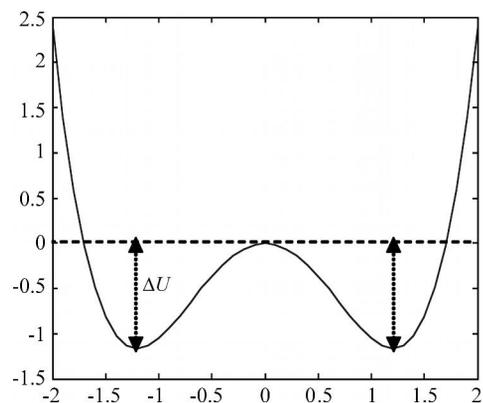


图2 对称双势阱

在没有外力和噪声作用的情况下,势垒高  $U = a^2/4b$ ,势函数在  $x = \pm \sqrt{a/b}$  处取极小值,在  $x = 0$  处取极大值。当只有周期信号激励时,即  $s(t) = A \cos(2ft + \varphi)$ ,  $\Gamma(t) = 0$ ,双稳态势阱按频率  $\omega = 2f$  发生周期倾斜变化,相对垒高交替地上升和下降。信号幅值  $A$  只要处于临界值  $A_c = \sqrt{4a^3/27b}$  以下,质点只能在某一个势阱中以信号频率进行局域的周期性运动,具体在哪一个势阱中,则由初始状态决定。当只有噪

收稿日期: 2009-04

作者简介: 孙迎利(1982—),男,硕士研究生,从事兵器发射控制系统检测与故障诊断研究;刘东升(1965—),男,教授。

声  $s(t)$  作用、不存在周期激励时,质点在 2 个势阱中按 Kramers 跃迁率  $k_k$  进行跃迁切换,  $k_k$  取决于噪声分布和强度:

$$k_k = \frac{a}{\sqrt{2}} \exp\left[-\frac{U}{D}\right] \quad (3)$$

当存在周期激励时,只要引入噪声,即使  $A < A_c$ , 系统也能在势阱间按信号频率作周期运动。外部输入引入的周期变化,有效地对噪声引入的切换进行同步,从而使系统输出中的小周期分量得到加强,提高了输出的信噪比。

## 2 参数可调随机共振

用随机共振进行信号检测时,信号的大小一般是不能改变的,可以改变的只有系统的参数  $a$ 、 $b$  和噪声强度  $D$  的大小,其中  $a$  直接决定了系统输出所能达到的最高跃迁频率, $a$ 、 $b$  的值决定了系统的势垒高度。当  $a$ 、 $b$  的值确定以后,噪声强度值  $D$  可以通过实验确定,当信号和噪声的协同能量克服势垒的阻挡,在 2 个稳态间切换时,系统就达到了随机共振。

随机共振中存在着绝热近似理论和线性响应理论,其要求输入信号的频率  $f \ll 1$ ,即随机共振只适用于小参数信号。但是在齿轮中,故障频率一般都是几十、几百甚至上千赫兹,为了实现大参数的随机共振,引入变步长随机共振。变步长随机共振数值算法通过调整龙格库塔的计算步长,使随机共振理论同时适用于大、小参数条件下的微弱信号特征提取。变步长随机共振通过改变计算步长,使部分噪声能量转移到有用信号上,从而实现了大参数条件下的噪声抑制和有用信号的增强。结合系统参数可调和计算步长可变的特点,本文采用一种改进的龙格库塔算法,其算法如下:

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6} [k_1 + (2 - \sqrt{2})k_2 + (2 + \sqrt{2})k_3 + k_4], n = 1, 2, \dots, N - 1$$

$$k_1 = h(ax_n - bx_n^3 + s_n)$$

$$k_2 = h \left[ a \left( x_n + \frac{k_1}{2} \right) - b \left( x_n + \frac{k_1}{2} \right)^3 + s_n \right]$$

$$k_3 = h \left[ a \left( x_n + \frac{k_2}{2} \right) - b \left( x_n + \frac{\sqrt{2}-1}{2}k_1 + \frac{2-\sqrt{2}}{2}k_2 \right)^3 + s_{n+1} \right]$$

$$k_4 = h \left[ a(x_n + k_3) - b \left( x_n - \frac{\sqrt{2}}{2}k_2 + \frac{2+\sqrt{2}}{2}k_3 \right)^3 + s_{n+1} \right] \quad (4)$$

式中:  $h$  为计算步长,  $a$ 、 $b$  为系统参数,  $s_n$ 、 $x_n$  分别是系统输入  $s(t)$  和系统输出  $x(t)$  的第  $n$  个采样值。 $h$  一般取为采样频率  $f_s$  的倒数,但为了实现大参数信号的检测,取  $h \gg 1/f_s$ ,通过调节  $a$ 、 $b$ 、 $h$  使该算法可以同时适用于大、小参数条件下的随机共振。

下面通过数值仿真验证上述方法。设定输入信号为  $s(t) = 0.05\cos(40t)$ , 噪声强度  $D = 2$ , 采样频率  $f_s = 1500\text{Hz}$ , 采样点数  $N = 1024$ , 设置参数如下:  $a = b = 1$ ,  $h = 1/30\text{s}$ , 初值  $x(1) = 1.3$ 。用改进的龙格库塔算法得到的结果如图 3 所示。

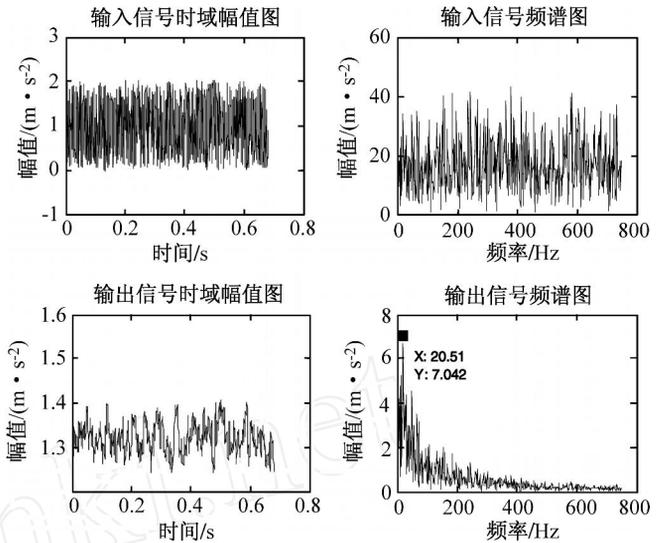


图 3 数值仿真图

从图中可以看出,输入信号频率  $f = 20\text{Hz}$  完全淹没在噪声频谱中,无法从输入信号频谱图中直接得到,经过随机共振系统后可以清楚地从输出信号频谱图中找到一个突出频率  $20.15\text{Hz}$ ,此频率接近输入信号的频率,可以认为此频率即是要检测的输入信号的频率。

但是在实际齿轮故障检测工作中,输入信号是未知的,无法事先知道信号的频率、幅值等,当将未知信号输入随机共振系统进行检测时,系统的初值也是未知的,系统无法正常运行。可以采用试探法进行初值的确定,如上面的数值计算中,当初值取  $x(1) = 1.6$  时,得到的输出信号时域幅值图如图 4 所示,从图中可以看出信号幅值大约在 1.3 上下浮动,所以将初值设为 1.3 较合适。

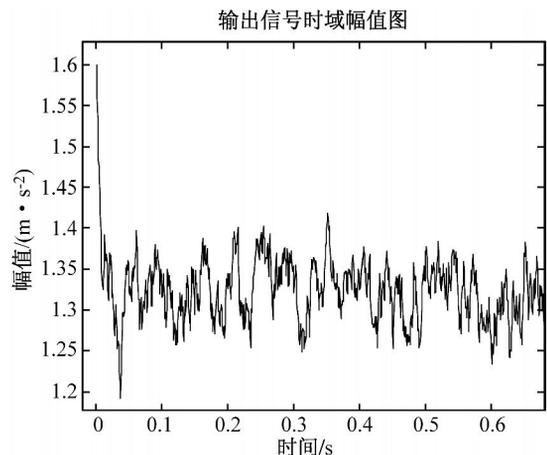


图 4  $x(1) = 1.6$  时输出信号时域幅值图

### 3 实验验证

为验证上述方法,实验以 JZQ250 - 1000型齿轮减速机为研究对象,实验装置如图 5所示,图中所标点为可安装传感器的测点。实验系统由 Y100L - 4型三相异步电动机驱动,电机输出轴与 YCT160 - 4A型电磁调速电动机相连,再由皮带传动,传递动力于减速机。

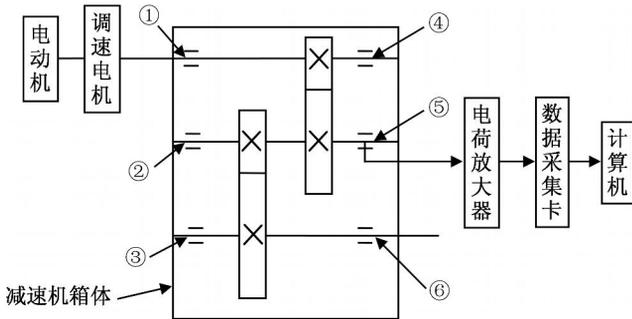


图 5 实验装置结构图

实验时对测点 5取振动信号,实验参数设置为:电动机转速为 547r/m,采样频率  $f_s = 1500\text{Hz}$ ,采样点数  $N = 1024$ 。将采得的信号输入式(4)所设定的系统,系统参数设置为: $a = 0.1$ ,  $b = 0.01$ ,  $h = 0.5$ ,  $x(1) = 3.2$ 。经过计算得到的结果如图 6所示。从输入信号频谱图中看不出明显地突出信号,即特征信号淹没在噪声当中。经过随机共振法后,在输出信号频谱图中可以明显的看到 4.984Hz的特征频率,而减速机中间轴的大齿轮齿数为 64,主动轴上的小齿轮齿数为 35,所以大齿轮所在中间轴的转动频率为  $f = 547 \times 35 \div 64 \div 60 = 4.9857\text{Hz}$ ,这与系统计算得到的突出频率基本相同,由文献[3]可判断,中间轴上的大齿轮存在故障。拆开减速机箱发现,在中间轴大齿轮上确实存在断齿故障,如图 7所示,这就证实了本文方法的正确性。

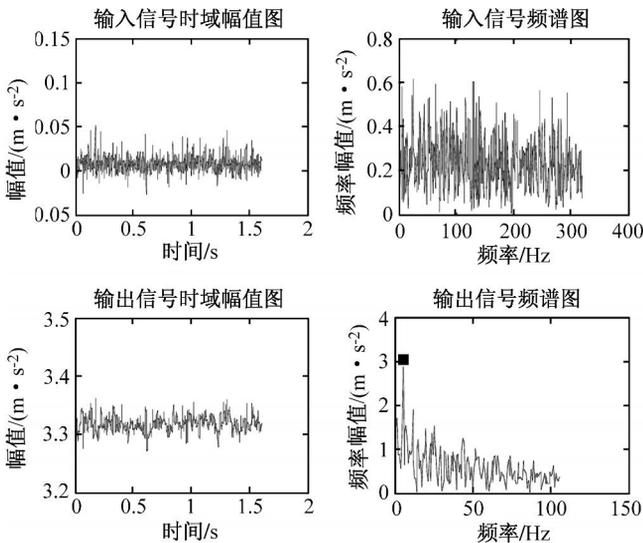


图 6 实验验证数据图

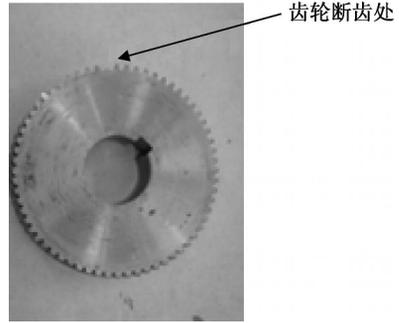


图 7 齿轮断齿

### 4 结论

本文采用参数可调的随机共振法,即调节系统结构参数  $a$ 、 $b$ 和计算步长  $h$ ,用一种改进的龙格库塔公式进行计算,通过数值仿真和实验验证证明了参数可调随机共振方法的正确性。此方法可用于大、小参数条件下的微弱信号检测,对齿轮早期故障的检测具有实际应用价值。

### 参考文献:

- [1] 段江海,宋爱国,王一清. 随机共振理论在微弱信号检测中的应用研究[J]. 信号处理, 2003, 19(6): 569 - 572
- [2] 李永强. 高速旋转机械故障的若干非线性动力学问题及故障诊断方法的研究[D]. 吉林:东北大学, 2003.
- [3] 马学知. 基于虚拟仪器的齿轮故障测试系统[D]. 湖南:湖南大学, 2007.
- [4] 江波. 自适应随机共振系统及小信号检测方法的研究[D]. 浙江:浙江大学, 2003.
- [5] 陈敏,胡芑庆,秦国军,等. 最佳匹配随机共振在微弱信号检测中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2007, 27(4): 270 - 272
- [6] 李强. 非平稳信号特征提取新方法和实用诊断技术的研究[D]. 天津:天津大学, 2005.

(许雪军编发)

(上接第 24 页)

### 参考文献:

- [1] 吴允平,蔡声镇,李汪,等. 一种航标监测系统的设计与实现[J]. 福建师范大学学报, 2004, 20(4): 42 - 45.
- [2] 高志,林玉池. 航标灯工作状态检测电路设计[J]. 海洋技术, 2006, 25(1): 45 - 46
- [3] 周奎,张晓川,杜效农. 航标灯的自动监控[J]. 世界海运, 2007, 30(1): 31 - 32
- [4] 李勇,蒲春森,宋宏洲,等. 航标遥测遥控装置:中国, 200620110833. 4[P]. 2007 - 08 - 22

(丁云编发)