

谐波信号频率的混沌检测方法

李 月 杨宝俊* 邓小英 林红波

(吉林大学信息工程系 长春 130012)

*(吉林大学地球物理系 长春 130026)

摘 要: 该文针对实际中大量存在的未知谐波信号频率, 提出用非线性混沌动力学系统检测的方法; 先从非线性方程理论出发论证系统存在周期解; 然后建立仿真模型, 用定向过零技术计算谐波频率; 经过对计算结果绝对误差与相对误差的分析, 得出该项技术是可行的。同时提出在检测频率后, 进一步检测谐波幅值的可能性。

关键词: 非线性混沌系统, 周期解, 谐波未知频率, 定向过零技术

中图分类号: TN911.23, TM935 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)05-0731-03

The Chaotic Detecting Method for the Frequency of Harmonic Signal

Li Yue Yang Bao-jun* Deng Xiao-ying Lin Hong-bo

(Department of Information Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

*(Department of Geophysics, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract As for a large number of unknown frequencies of harmonic signals existing in the practice, the paper presents the detecting method utilizing the nonlinear chaotic dynamic system. Firstly, the method verifies being the periodic solution originated from the nonlinear equation theory, then finds the simulating model to calculate harmonic frequency using directional crossover technique. The technique is feasible through analyzing the absolute error and relative error of calculating results. At the same time, the paper brings forward the possibility to further detecting harmonic amplitude after detecting frequency.

Key words Nonlinear chaotic system, Periodic solution, Unknown frequency of harmonic, Directional crossover technique

1 引言

将混沌理论用于微弱信号检测是混沌应用技术的前沿课题; 近年来已在国防工业、生物医学、材料探伤、电子通信等领域引起国内外许多学者的关注。1992 年, Birx 提出根据混沌系统对初始条件的敏感依赖性, 将非线性科学中的混沌理论用于微弱信号检测^[1]; 之后国内外诸多学者探讨了用神经网络分离混沌噪声^[2], 多振子同步耦合判别^[3]等。我国学者已对强噪声背景下的谐波和方波的混沌系统幅值检测方面取得一些结果, 其信噪比门限达到约 -60dB ^[4,5]; 这些工作仅限于频率已知的微弱信号检测其存在及幅值的大小。实际中大量存在的谐波信号频率未知, 对这种未知频率的谐波信号判定问题仅见到一种基于锁频 (frequency-locking) 原理的振子组 (array of the oscillators) 检测方法^[6]; 该方法的步骤较繁。本文以谐波信号为例探讨对未知频率进行混沌检测的一种新方法。

2 频率混沌检测原理

考虑 Duffing-Holmes 方程:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = \gamma \cos(\omega t) \quad (1)$$

该方程代表一个非线性混沌系统, 其中 k 为阻尼比, $(x - x^3)$ 为恢复力项, $\gamma \cos(\omega t)$ 为周期策动力, $\gamma = \gamma_d + a$, γ_d 为系统动力学行为进入大尺度周期状态的阈值, a 为待检测微弱信号。设定参数 k 为定值 (这里取为 0.5), 将参数 γ 看成变量, 随着 γ 值的增大, 系统的动力学行为由周期振荡进入混沌状态。当 γ 值足够大, 外加策动力的线性振子完全处于控制地位, 使系统进入大尺度周期状态^[5], 系统运行相态轨迹如图 1 所示。在对微弱谐波信号进行检测时, 将待测谐波信号 $\gamma \cos(\omega t)$ 作为周期策动力加入系统。通过调节 γ , 总可以使系统处于大尺度周期状态, 此时系统动力学行为的轨迹是周期行为, 运动周期 (即系统轨迹运行一周的时间)

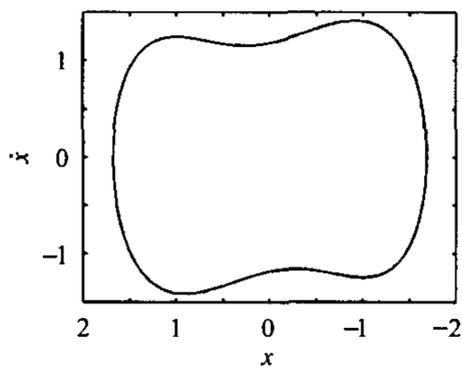


图1 系统处于大尺度周期状态

等于周期策动力 $\gamma \cos(\omega t)$ 的周期, 即 $\omega = 2\pi/T_0$, 其中 ω 为待测信号的角频率, T_0 为大尺度周期状态下系统轨迹运行一周的时间。所以, 我们通过测出周期状态系统轨迹运行一周的时间, 就可以知道待测信号的频率。

对系统周期解为 $T_0 = 1/f = 2\pi/\omega$ 的存在性进行数学解释如下:

根据 Yamaguti-Mizohata 定理^[7]: 考虑方程 $\ddot{x} + f(x)\dot{x} + g(x) = p(t)$, 其中 $f(x), g(x), p(t)$ 分别对所有实 x, t 连续且分别当 $x \rightarrow \pm\infty$ 时, $F(x) = \int_0^x f(s) ds \rightarrow \pm\infty$; 当 $|x| > q$ (q 为正常数), $g(x)\text{sgn}(x) \geq 0$; $p(t + \Omega) = p(t)$ ($\Omega > 0$); $\int_0^\Omega p(t) dt = 0$ 。在上述假定下, 至少有一个以 Ω 为周期的周期解。

对于系统(1) $f(x) = 0.5, g(x) = -x + x^3, p(t) = a \cos(\omega t)$, $F(x) = \int_0^x f(s) ds = 0.5x$, 满足:

当 $x \rightarrow \pm\infty$ 时, $F(x) \rightarrow \pm\infty$;

当 $|x| > 1$, 即 $q = 1$ 时, $g(x)\text{sgn}(x) \geq 0$; $p(t + 2\pi/\omega) = p(t)$,

$$\int_0^{2\pi/\omega} a \cos(\omega t) dt = \frac{a}{\omega} \sin(\omega t) \Big|_0^{2\pi/\omega} = 0$$

上述表明, 系统(1)满足定理的全部条件, 因此本系统存在以 $2\pi/\omega$ 为周期的周期解。

3 仿真实验

由仿真系统的大尺度轨道相态图, 我们无法直接判断它的周期。但是可以通过对数据的处理, 利用程序来验证它的运动周期。具体为: 统计一定时间里轨迹定向穿过零点的次数, 不足一次的按照百分比计算(由于一开始系统处于暂态, 我们时间开始点取 50(采样点), 保证进入周期状态)。为方便起见, 把这种计算称之为定向过零技术。

假定轨迹为椭圆形状, 椭圆轨迹的每个点都是由 (x, \dot{x}) 对应而来, 且按照一定的方向运行。假定为顺时针(参见图2), 假设 t_1, t_2 为两相邻相态点 A_1, A_2 的相应时刻, 可以看出 t_1 时刻, $x_1 < 0$; t_2 时刻, $x_2 > 0$; 即前一时刻的 x 小于 0, 后一时刻的 x 大于 0; 当符合这样的条件时, 计数器会加 1, 即

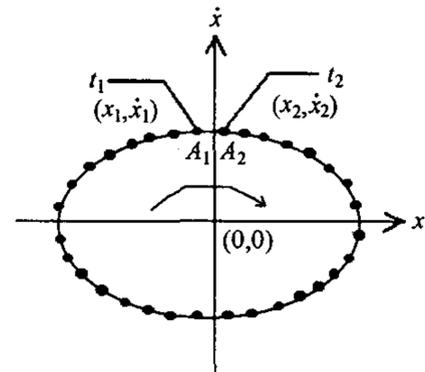


图2 定向过零检测方法示意图

在顺时针考察下, 仅取 $x_{前} < 0, x_{后} > 0$ 计数器加 1, 其中与 $x_{后}$ 和 $x_{前}$ 相应相态轨迹点是相邻的。由固定的仿真时间内得到的周期个数, 确定系统稳定时频率。

根据以上的理论分析, 在系统进入稳定的大尺度周期状态下, 系统的受迫振动是以频率 ω , 振幅为 γ 的振动占控制地位。所以应该让受迫力足够大, 使系统进入大尺度周期的状态, 然后验证最后系统的频率和策动力的频率是否接近一致。利用模拟仿真完成的实验可以分为两个部分。首先, 应用 MATLAB 的仿真功能对方程系统建模, 设定好参数以后运行程序, 我们可以得到与运行时间相对应的一系列的数据, 根据这些数据绘制出系统振荡的时间波形图; 同时也可以绘出在二维平面里的相态轨迹图, 从图上判定系统是否处于大尺度周期状态。在系统处于大尺度周期状态时, 利用对试验过程中得到的数据, 保存成数组的格式, 在 MATLAB 的编程界面里做相应的处理, 就可以得到系统稳定的振荡频率, (由于系统一开始运行会有一个暂态过程, 我们把时间初值选在十几个周期以后, 以增加计算数据的准确性)。仿真实验得到的计算数据如表 1 所示, 并绘制成图 3。

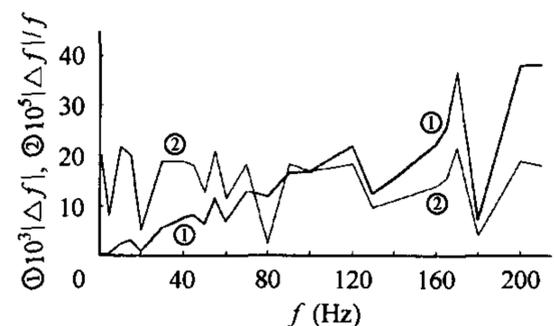


图3 仿真实验结果误差曲线

讨论 由表 1 和图 3 可知

(1) 分析绝对误差(即误差曲线①), 总的趋势是随着频率的增加, 误差增大; 在局部频率范围内, 上述关系并不总存在, 例如对于 $f = 180 \text{ Hz}$ 的绝对误差就比其附近误差小。

(2) 相对误差(②), 总的趋势是随着频率的增加, 相对误差略有减小; 这表明计算结果的优劣, 需要与相对误差相结合去说明。

(3) 总的来说, 计算结果在大于百分位的数位上与待检测频率一致, 表明计算结果是令人满意的。

表1 仿真实验结果与误差

待测频率 f	检测结果 f'	① $10^3 \Delta f $	② $10^5 \Delta f /f$
1	1.0002	0.2	20
5	5.0004	0.4	8
10	10.0022	2.2	22
15	15.0030	3.0	20
20	20.0010	1.0	5
25	25.0032	3.2	12.8
30	30.0057	5.7	19
35	35.0066	6.6	18.9
40	40.0076	7.6	19
45	45.0082	8.2	18.2
50	50.0064	6.4	12.8
55	55.0116	11.6	21.1
60	60.0069	6.9	11.5
70	70.0129	12.9	18.4
80	80.0119	11.9	2.4
90	90.0165	16.5	18.3
100	100.0169	16.9	16.9
120	120.0219	21.9	18.3
130	130.0124	12.4	9.5
140	140.0155	15.5	11.1
160	160.0222	22.2	13.9
165	165.0256	25.6	15.5
170	170.0367	36.7	21.6
180	180.0072	7.2	4
200	200.0379	37.9	19
0	210.0382	38.2	18.2

4 结束语

(1) 对于微弱谐波信号频率的检测, 通过理论分析证明了解的存在性; 仿真实验表明, 使待检测信号通过混沌检

测系统, 在保证系统处于稳定振荡的大尺度周期状态时, 得到振荡输出相态轨迹。用定向过零检测方法可以检测出它的频率值, 亦即输入信号频率值的近似结果。

(2) 在频率检测过程中, 未要求已知谐波信号幅值; 在频率检测后, 可以利用文献[4]中的方法检测谐波幅值。在计数器工作时, 初始和终了时间与相态椭圆轨迹相应位置可能出现小于一个周期的未计时间差, 可能是引起检测频率误差的主要原因。

参考文献

- [1] Birx D I. Chaotic oscillators and CMFFNS for signal detection in noise environments. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, Baltimore, MD USA, 1992, 22: 881 – 888.
- [2] Simon H. Using neural networks to dynamically model chaotic events such as sea clutter. *IEEE SP Magazine*, 1998, 15(2): 66 – 81.
- [3] Schafer C, Rosenblum M G, Kurths J, Abel H-H. Heartbeat synchronized with ventilation. *Nature*, 1998, 392: 239 – 240.
- [4] Li Yue, Yang Baojun. Chaotic system for the detection of periodic signals under the background of strong noise. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(5): 508 – 510.
- [5] 李月, 杨宝俊, 石要武. 色噪声背景下微弱正弦信号的混沌检测. *物理学报*, 2003, 52 (3): 526 – 530.
- [6] Wang Guanyu, Dajun, Lin Jianya, Chen Xing. The application of chaotic oscillators to weak signal detection. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 1999, 46(2): 440 – 444.
- [7] [意] G. 桑森, R. 康蒂著, 黄启昌等译. 非线性微分方程. 北京: 科学出版社, 1983: 432 – 441.

李月: 女, 1958年生, 博士, 教授, 主要研究方向为非线性理论及其应用技术、现代信号处理、微弱信号的混沌检测与提取技术。

杨宝俊: 男, 1943年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字信号处理、算法及应用研究。