

文章编号: 1000-0887(2006) 02_0199_05

基于 EMD 方法的混沌信号中 周期分量的提取*

李鸿光, 孟 光

(上海交通大学 振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200030)

(马兴瑞推荐)

摘要: 提出一种从 Duffing 振子产生的混沌信号中提取谐波分量的方法。依据任何信号由不同的固有简单振动模态组成的概念, 利用经验模式分解(EMD)方法, 将混沌信号分离为不同的内在模态函数(IMF), 并在特定参数下从中分解出单一频率成分的谐波信号, 从而成功地将混沌信号和谐波分量分离。仿真实验都表明该方法非常有效。

关键词: 混沌信号; 信号处理; 周期分量; 经验模式分解(EMD); Duffing 方程

中图分类号: TN911.6 文献标识码: A

引 言

近年来, 混沌信号理论的研究受到广大学者的极大关注。一方面, 自然现象中有许多可观测的混沌信号, 如海杂波信号和心电信号等; 另一方面, 混沌信号也可用于完成某种专门功能, 如保密通信或电子对抗等。混沌中的信号提取在理论与实践中有重要的意义。

在这一领域的研究中, Leung 利用最小相空间体积方法研究了嵌入在混沌噪声中 AR 模型的参数估计^[1]; Haykin 利用人工神经网络的方法研究了在海洋杂波背景下的小目标信号提取^[2]; Short 利用混沌预测的方法考察了混沌通信系统中信号的提取^[3~5]; 汪芙平等依据混沌吸引子固有的几何性质, 借助微分流形切空间的概念, 提出一种从强混沌干扰中提取被掩蔽的谐波信号的方法^[6,7]。然而对强非线性系统产生的混沌信号, 利用传统的信号处理的方法很难检测到其中谐波分量的存在, 自然也难以将谐波分量从混沌信号中分离出来。

一种被称为经验模式分解(EMD)方法于 1998 年由 N. E. Huang 提出来后^[8], 经验证在很多方面的应用效果都优于其它的信号处理方法^[9]。在信号分析中, 时间尺度和随时间尺度分布的能量是信号的最重要的两个参数, EMD 方法基于信号的局部特征时间尺度, 能把复杂的信号函数分解为有限的内在模态函数(intrinsic mode function, 简称 IMF)之和, 每一 IMF 所包含的频率成分不仅与采样频率有关而且最重要的是随信号本身变化而变化, 因此 EMD 方法是自适应的信号处理方法, 非常适于非线性和非平稳过程, 具有很高的信噪比。

* 收稿日期: 2004_02_01; 修订日期: 2005_10_25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10502032; 50335030; 10325209; 50375094)

作者简介: 李鸿光(1972—), 男, 辽宁辽阳人, 副教授, 博士(联系人, Tel: + 86_21_54744990_227; Fax: + 86_21_54747451; E_mail: hgli@sjtu.edu.cn)。

本文基于经验模式分解理论, 依据任何信号由不同的固有简单振动模态组成的概念, 利用经验模式分解(EMD)方法, 将混沌信号分别分离为不同的内在模态函数(IMF), 在某些参数下, 从混沌信号中分解出单一频率成分的谐波信号, 从而成功地将混沌信号和谐波分量分离。

1 EMD 方法简介

EMD 方法假设^[8]: 任何信号或数据由不同的固有简单振动模态组成, 每一模态不论是线性或是非线性的, 都具有相同数量的极值点和零交叉点, 在相邻的两个零交叉点之间只有一个极值点, 任何两个模态之间是相互独立的, 这样任何一个信号就可以被分解为有限个内在模态函数之和, 其中任何一个内在模态函数(IMF)都满足以下条件:

- 1) 整个数据段内, 极值点的个数和零交叉点的个数必须相等或相差最多不能超过 1 个;
- 2) 任何一点, 由局部极大值点形成的包络线和由局部极小值点形成的包络线的平均值为 0, 在实际运用时, 其平均值的绝对值小于某一个很小的数即可。

和简单的单调函数相比, 1 个 IMF 代表了 1 个简单的振动模态, 运用 IMF 可以把任何信号 $x(t)$ 按如下步骤进行分解:

- 1) 确定信号所有的局部极值点, 然后用三次样条插值曲线将所有的局部极大值点连接起来形成上包络线。
- 2) 用三次样条插值曲线将所有的局部极小值点连接起来形成下包络线, 上下包络线应该包络所有的数据点。
- 3) 上下包络线的平均值记为 m_1 , 求出

$$h(t) = x(t) - m_1(t), \quad (1)$$

如果 h_1 是一个 IMF, 那么 h_1 就是 $x(t)$ 的第一个分量。

- 4) 如果 h_1 不满足 IMF 的条件, 把 h_1 作为原始数据, 重复 1)、2)、3), 得到上下包络线的平均值 m_{11} , 再判断 $h_{11} = h_1 - m_{11}$ 是否满足 IMF 的条件, 如不满足, 则重循环 k 次, 得到 $h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}$, 使得 h_{1k} 满足 IMF 的条件。记 $c_1 = h_{1k}$, 则 c_1 为信号 $x(t)$ 的第一个满足 IMF 条件的分量。

- 5) c_1 从 $x(t)$ 中分离出来, 得到

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \quad (2)$$

将 r_1 作为原始数据重复以上过程, 得到 $x(t)$ 的第 2 个满足 IMF 条件的分量 c_2 , 重复循环 n 次, 得到信号 $x(t)$ 的 n 个满足 IMF 条件的分量。当 r_n 成为一个单调函数不能再从中提取满足 IMF 条件的分量时, 循环结束。

因此, 我们可以把任何一个信号 $x(t)$ 分解为 n 个内在模态函数和一个残量 r_n 之和。其中, 分量 c_1, c_2, \dots, c_n 分别包含了信号从高到低不同频率段的成分, 每一频率段所包含的频率成分是不同的, 而且是随信号 $x(t)$ 变化而变化的, 而 r_n 则表示了信号 $x(t)$ 的中心趋势。

2 仿真结果及分析

Duffing 方程是人们所熟悉的具有重要应用背景的非线性振子, 它具有丰富的动力学行为, 这些动力学行为至今还是目前人们研究的重要内容。考虑 Duffing 方程

$$\dot{x} + \alpha x - \omega_0^2 x + dx^3 = P \cos(\omega t), \quad (3)$$

其中, ω_0 为系统固有圆频率, c 为系统阻尼, d 为非线性参数, P 与 ω 分别为外激励幅值和外激

励频率。本文利用经典的四阶 Runge_Kutta 方法对方程(3)进行数值求解,取 $x(0) = 1.0$ 。为了得到理想的数值结果,需要将开始的数百个周期略去,这样才能近似得到不受初始条件影响的混沌时间信号。

2.1 不同激励幅值的影响

取系统参数为 $c = 0.05$, $\omega_0^2 = 0.2$, $d = 1$ 以及 $\omega = 1$, 其中外激励幅值 P 大小待定。采样间隔为 $\Delta t = \pi/400$, 接收信号数据长度 $N = 20\ 000$ 。

图 1 给出了当外激励幅值 P 从 0 变化到 28 的分叉图, 从中可以确定对应不同的混沌区域的外激励幅值 P 。当 $P = 5.1$ 和 27.5 时, 图 2 给出了相应的混沌信号以及通过 EMD 分解出的 3 个内在模态函数 c_1, c_2 和 c_3 。单从这两段混沌信号波形上, 无法觉察到其中隐藏有谐波信号。 c_2 是从这段接收信号中分离出的谐波信号。与混沌信号相比, 幅值有一定的衰减, 其原因可归结为混沌信号中的谐波分量不占主导地位。如果我们定义混沌序列中从某个局部极大值到下一个局部极大值为一个混沌序列的准周期, 则我们可以从图 2 上看

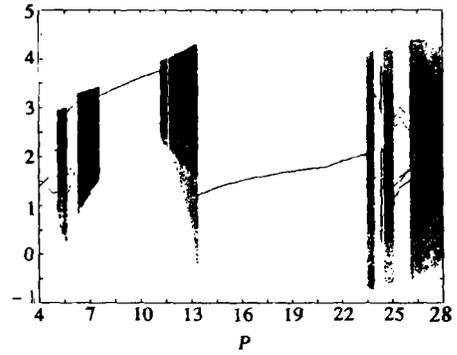
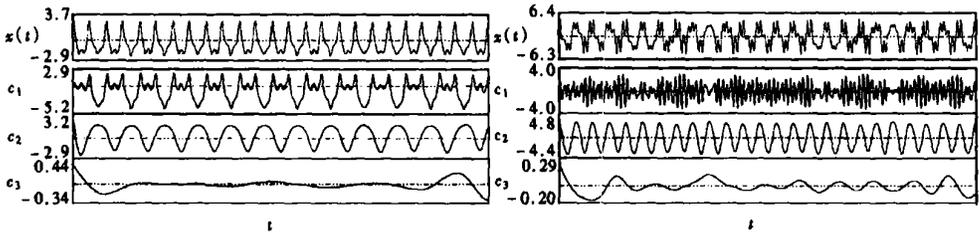


图 1 分叉图(参数 $P = 4.0 \sim 28.0$)



(a) $P = 5.1$

(b) $P = 27.5$

图 2 混沌信号以及内在模态函数 c_1, c_2 和 c_3

出谐波分量的周期为混沌信号准周期的 4 倍, 这是利用经验模式分解得到的谐波分量所具有的特征, 从后面的实验也可以证明这点。

2.2 不同激励频率的影响

取系统参数为 $c = 0.05$, $\omega_0^2 = 0.2$, $d = 1$ 以及 $P = 10$, 其中外激励频率 ω 大小待定。采样间隔为 $\Delta t = \pi/400$, 接收信号数据长度 $N = 20\ 000$ 。

图 3 给出了当外激励频率 ω 从 0.5 到 1.3 变化的分叉图, 从中可以确定对应不同的混沌区域的外激励频率 ω 。

当 $\omega = 0.58$ 和 1.1 时, 图 4 分别给出了相应的混沌信号以及通过 EMD 分解出的 3 个内在模态函数 c_1, c_2 和 c_3 。通过 FFT 变换, 在图 5 中给出了对应的原始信号、 c_1 以及 c_2 的谱图。在图 4(a) 中, 从波形上看, c_2 不具有单一频率的谐波信号的特点, 从图 5(a) 中也可以看出, c_2 不以单一

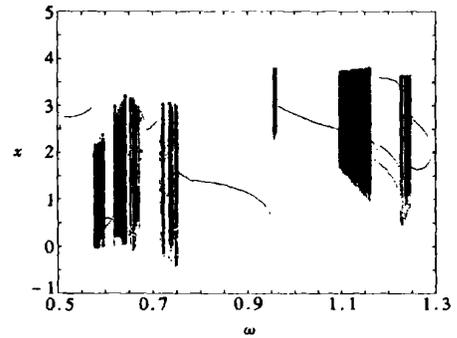
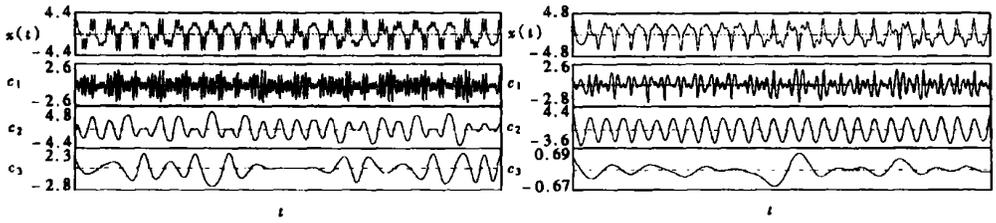


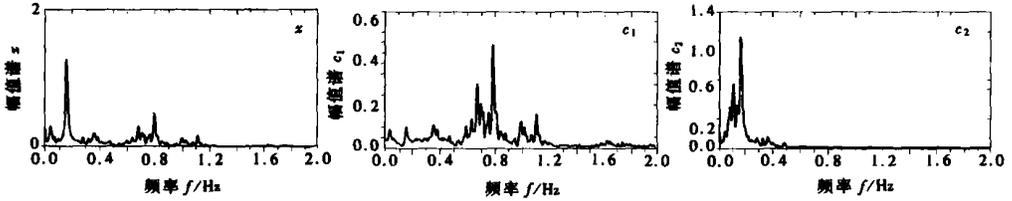
图 3 分叉图(参数 $\omega = 0.5 \sim 1.3$)



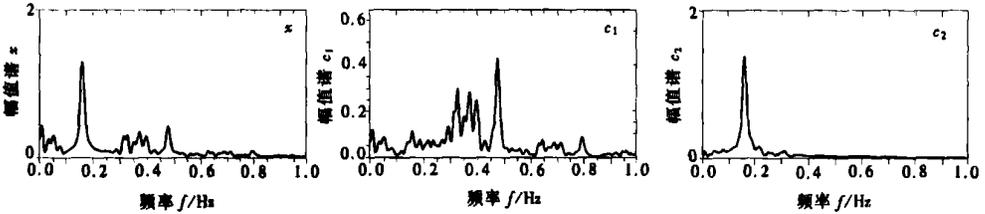
(a) $\omega = 0.58$

(b) $\omega = 1.1$

图 4 混沌信号以及内在模式函数 c_1, c_2 和 c_3



(a) $\omega = 0.58$



(b) $\omega = 1.1$

图 5 幅值谱

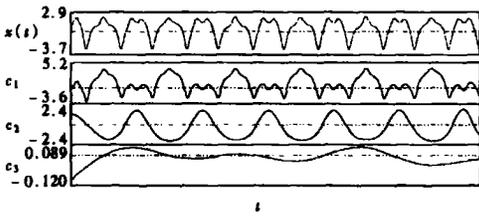


图 6 混沌信号以及内在模式函数 c_1, c_2 和 c_3 (采样间隔 $\Delta t = \pi/800$)

频率的谐波分量为主。而在图 4(b) 和图 5(b) 中, c_2 是个单一成分的谐波信号。与混沌信号相比, 图 4(b) 中的谐波幅值衰减较大, 从图上也可以看出谐波分量周期为混沌信号准周期的 4 倍。

从图 5(b) 也可以观察到, 在谱图的结构上, 原始数据和 c_1 都是混沌信号, 具有连续的谱值, 而 c_2 则是典型的谐波信号。另外, 原始数据的谱值近似地等于 c_1 和 c_2 的和。

2.3 不同采样频率的影响

取系统参数为 $c = 0.05, \omega_0^2 = 0.2, d = 1, \omega = 1$ 以及 $P = 5.1$ 。接收信号数据长度 $N = 20\ 000$ 。由于本算法首先寻找原始信号的局部极值点, 进而求出上下包络线, 如果采样频率发生变化, 则得到的数据的局部极值点的个数会有所不同。

保持其他参数不变, 取采样时间间隔为 $\Delta t = \pi/800$, 图 6 给出了相应的混沌信号以及通过 EMD 分解出的 3 个内在模式函数 c_1, c_2 和 c_3 。从图可见, 尽管采样时间间隔发生了变化, 但没有影响对谐波成分的提取。

3 结 论

本文基于经验模式分解(EMD)理论,依据任何信号由不同的固有简单振动模态组成的概念,研究了从 Duffing 振子产生的混沌信号中提取谐波分量的方法。本文所提出的算法具有实现简单,算法鲁棒的优点。在仿真数据的验证中,应用该方法对 Duffing 振子在不同幅值、不同频率下产生的混沌信号进行谐波分量的提取。研究表明,在特定的参数下,该方法可以将单一频率成分的谐波分量很好地从混沌信号提取出来。从该方法所基于的原理看,它同样适用于其他混沌系统中的谐波信号的提取。

[参 考 文 献]

- [1] Leung H, Huang X P. Parameter estimation in chaotic noise[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1996, **44**(10): 2456—2463.
- [2] Haykin S, Li X B. Detection of signals in chaos[J]. Proceedings of IEEE, 1995, **83**(1): 94—122.
- [3] Short K M. Steps toward unmasking secure communications[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1994, **4**(4): 959—977.
- [4] Short K M. Unmasking a modulated chaotic communications scheme[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1996, **6**(2): 367—375.
- [5] Short K M. Signal extraction from chaotic communications[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1997, **7**(7): 1579—1597.
- [6] 汪英平, 郭静波, 王赞基, 等. 强混沌干扰中的谐波信号提取[J]. 物理学报, 2001, **50**(6): 1019—1023.
- [7] 汪英平, 王赞基, 郭静波. 混沌背景下信号的盲分离[J]. 物理学报, 2002, **51**(3): 474—481.
- [8] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1998, **454**(1971): 903—995.
- [9] 于德介, 程军圣. EMD 方法在齿轮故障诊断中的应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2002, **29**(6): 48—51.

Harmonic Component Extraction From a Chaotic Signal Based on EMD Method

LI Hong-guang, MENG Guang

(State Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, P. R. China)

Abstract: A novel approach of signal extraction of a harmonic component from a chaotic signal generated by a Duffing oscillator is proposed. Based on empirical mode decomposition(EMD) and concept that any signals were composed of a series of the simple intrinsic modes, the harmonic components were extracted from the chaotic signals. Simulation results show the approach is satisfactory.

Key words: chaotic signal; signal processing; harmonic component; empirical mode decomposition (EMD); Duffing function