

光声池中微弱光声信号检测*

许雪梅[†] 戴鹏 杨兵初 尹林子 曹建 丁一鹏 曹燊

(中南大学物理与电子学院, 长沙 410083)

(2013年5月31日收到; 2013年7月18日收到修改稿)

大气中的污染源气体含量很少, 用光声光谱对其进行监测得到的光声信号极其微弱. 本文首先分析微弱信号产生机理, 在分析 Holmes Duffing 方程的基础上, 提出了适合光声池微弱信号检测的变尺度差分方法. 该方法通过对信号进行尺度变换, 再做差分来检测微弱信号. 理论分析和实验表明, 变尺度差分方法能很好地抑制系统相空间的共模噪声, 而且能很好地凸显混沌状态临界值. 变尺度差分方法测出的信号相对误差都小于 5%, 说明其可以用于较高频率、相位和频率都未知的微弱光声信号幅值检测.

关键词: 光声光谱, 微弱信号, 幅值, Duffing

PACS: 43.58.Kr, 43.60.-c, 43.25.Cb, 82.40.Bj

DOI: 10.7498/aps.62.204303

1 引言

污染源气体造成的环境污染越来越严重, 大气中污染源气体的检测需求越来越急迫. 光声光谱技术^[1]是一种理想的无背景噪声信号技术, 利用光声光谱技术检测污染源气体, 具有较高灵敏度和良好选择性. 它的基本原理是: 光源发出特定频率的单色光, 经斩波器调制后, 入射进入光声池; 池内被测气体吸收光能后, 发生光声效应, 即产生与调制频率同周期的声波, 由于声波的幅度很小, 由传声器接收到此光声信号并将其送至信号处理系统进行处理. 光声信号幅度很小, 属于微弱信号, 难以准确检测. 在理想状态下, 检测到的微弱信号频率应该是与调制频率一致的, 但是由于光声池中光路的复杂性及其他因素影响使得产生的信号频率与调制频率有偏差, 但具体偏差却是未知的. 另外由于光声光谱检测污染源气体时, 为了防止外界声频噪声干扰, 调制频率一般都很高; 由于外界噪声的影响, 光声池中待检测信号所含的噪声大小可以与待测信号本身大小相比拟, 甚至更高. 所以, 如何从强噪声背景中有效地提取微弱信号值得深入研究.

目前光声池微弱信号检测方法大多采用基于锁相放大器频谱迁移法^[2,3], 但需要低通滤波器的带宽足够窄, 才能够有效改善信噪比, 而且在滤除噪声的同时也可能会损害有用信号. 基于混沌振子的微弱信号检测方法^[4]能很好地改善这一情况, 它可以探测低信噪比的微弱信号. Duffing 系统^[5]是混沌系统中经常用到的一类非线性系统, 利用它对噪声的免疫特性和对微弱信号的敏感性, 可以对特定的已知信号频率进行检测. 然而 Duffing 振子微弱信号检测方法, 大部分都是已知频率的微弱信号检测, 而且它只能检测低频信号, 因此不能完全排除噪声对信号检测产生的影响.

针对这些问题, 本文对 Holmes Duffing 系统进行了改进, 提出了光声池微弱信号检测的变尺度差分方法, 在待测信号频率比较高以及频率、相位未知的情况下检测出信号幅值, 从而确定信号, 根据光声转换原理进一步推导污染源气体的含量.

2 光声池微弱光声信号检测原理

2.1 光声信号产生机理

光声池^[6]是光声光谱检测的核心部分, 它由聚四氟乙烯加工而成, 内表面光滑, 并用透过率大于

* 国家自然科学基金(批准号: 61172047, 61071025)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: xuxuemei999@126.com

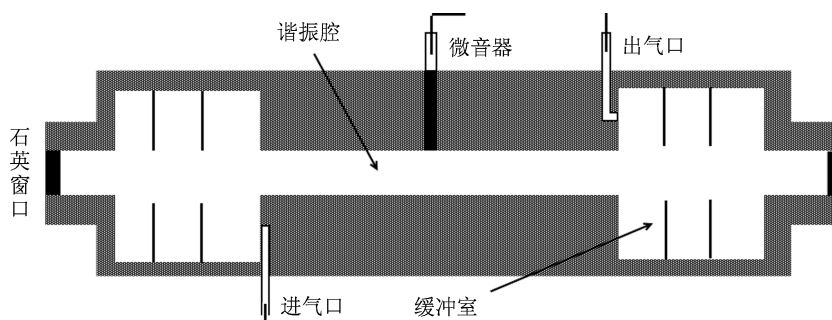


图1 光声池剖面图

90% 的石英窗口密封, 工作模式为纵向谐振. 其剖面如图 1 所示, 谐振腔长 10 cm, 直径 1 cm; 两端腔体为缓冲室, 用来隔离窗口片对光吸收而产生的噪声.

在这个封闭的池内, 试样气体因吸收调制光能而产生热源 $H(r,t)$ ^[7], 会在光声池中激发出光声信号. 光声信号可以用声压 $p(r,t)$ 表示, 其数学模型如下:

$$\nabla^2 p(r,t) - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 p(r,t)}{\partial t^2} = -\frac{\gamma-1}{v^2} \cdot \frac{\partial H(r,t)}{\partial t}, \quad (1)$$

式中, r 为位移矢量, γ 为气体绝热系数, v 为气体中声波的传播速度, $H(r,t)$ 为热功率密度.

在柱坐标系中, 简正模式 j 下的谐振频率 f_j , 振幅 $A_j(w)$ 可表示为

$$f_j = f_{jm} = \frac{w_j}{2\pi} = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{\alpha_{jm}}{R_c}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_c}\right)^2}, \quad (2)$$

$$A_j(w) = -\frac{iw}{w_j^2} \cdot \frac{(\gamma-1)N_{\text{tot}}\sigma P_0 c \int_{V_c} p_j^* g dV}{V_c [1 - w^2/w_j^2 - iw/(w_j Q_j)]}, \quad (3)$$

式中, w_j 为简正模式 j 的谐振角频率, p_j^* 为 p_j 的复共轭, V_c 为光声池谐振管的体积, Q_j 为模式 j 的品质因数, P_0 为激光功率, C 为气体浓度; 积分 $\int_{V_c} p_j^* g dV$ 表示光强分布与简正模式的耦合程度, 用 I_j 表示.

根据以上公式, 使光声池工作在一个简正模式下, 即保证 $w = w_j$ 的谐振条件, 可使得产生声压最强. 得到此时在池中 r_M 处的声压^[8] 为

$$p(r_M, w_j) = -(\gamma-1) \frac{Q_j L_c}{w_j V_c} I_j p_j(r_M) \alpha P_0, \quad (4)$$

式中 $-(\gamma-1) \frac{Q_j L_c}{w_j V_c} I_j p_j(r_M)$ 这部分为光声池的池常数, 池常数反映系统吸收光能转化为声能的能力, 记做 C_{cell} . 本文光声池工作在一阶纵向谐振模式下.

所以其池常数为

$$C_{001} = \frac{4(\gamma-1) Q_{001} L_c^2}{v V_c \pi^2}, \quad (5)$$

式中 Q_{001} 为一阶纵向谐振光声池的品质因数.

故光声信号 S_{PA} 可表示为

$$S_{\text{PA}} = p(r_M, w_j) = C_{\text{cell}} \alpha P_0, \quad (6)$$

上式表明, 光声信号 S_{PA} 与气体吸收系数 α 和光功率 P_0 成正比. (6) 式是进行气体光声光谱检测的基础公式, 后续检测计算会用到.

2.2 Homels Duffing 方程微弱信号检测原理

Holmes 型 Duffing 方程^[9] 如下:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x(t) + x^3(t) = f \cos(\omega t), \quad (7)$$

其中 k 为阻尼系数, $-x(t) + x^3(t)$ 为非线性回复力, f 为驱动力.

其状态方程可以化为

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -ky + x - x^3 + f \cos(\omega t). \end{cases} \quad (8)$$

当 $f = 0$ 时, 可以求出相平面上的三个奇点: 分别为鞍点 $(0, 0)$ 和两个焦点 $(\pm 1, 0)$, 且初始状态不同, 将导致点 (x, y) 最终停在鞍点或两个焦点中的任意一个. 当 f 不为 0 但很小时, 系统线性部分的振荡很弱, 对非线性系统的作用也不强, 相轨迹表现出庞加莱映射意义下的吸引子, 相点围绕两个焦点中的其中一个做周期振动, 相轨迹和 $f = 0$ 时的情况类似. 稍微加大驱动力 f 的值, 系统非线性部分开始影响系统相轨迹, 出现倍周期 (振荡频率固定在外力频率上), 稳定焦点的振荡出现分频 (如图 2(a), (b)). 当驱动力 f 再加大到超过非线性系统的三个

奇点之间的间隔时,系统便呈现出在这些奇点之间来回跃迁振荡,运动变得复杂化,混沌随之出现(如图 2(c)). 进一步增大驱动力 f 的幅值,超过某一临界值后,非线性系统的影响开始减弱,线性振子又开始处于主导地位,这时整个系统又被固定在外加周期驱动力的各分频上,相轨迹表现为大尺度周期状态(如图 2(d)). 之后驱动力 f 的加大对系统的影响几乎不变,线性振子完全处于统治状态,而非线

性部分的作用几乎可以忽略,这时整个系统便按线性系统方式运动,即它被锁在外加周期力的频率上. 由此可以看出,系统处于锁频状态时,线性振子呈现出极弱或极强的状态. 而当非线性系统和线性振子这两个系统强弱均衡时,这两个振荡才相互强烈影响,才会出现复杂的混沌运动. 图 2 是当不加外界信号时,取 $k = 0.5, w = 1 \text{ rad/s}$ 时所得结果.

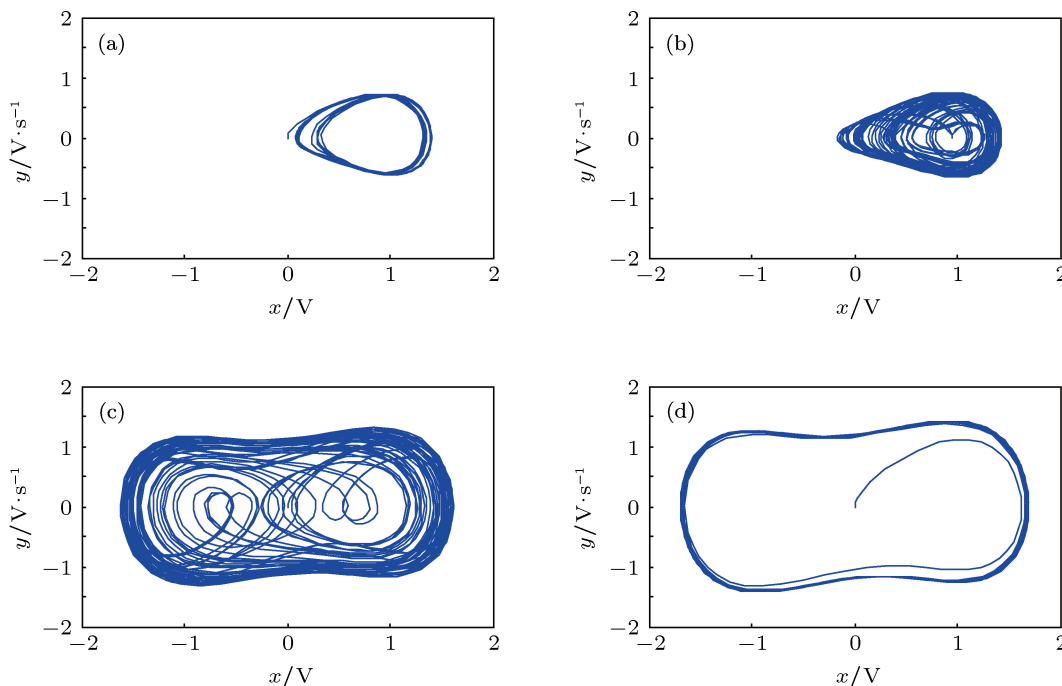


图 2 当 $k = 0.5, w = 1 \text{ rad/s}$ 时,不同 f 下的 Duffing 系统相图 (a) $f = 0.354$ (b) $f = 0.385$; (c) $f = 0.802$; (d) $f = 0.830$

由图 2 可知系统从混沌状态进入大尺度周期状态时的相图变化最为明显,这里定义产生该变化的驱动力幅值为阈值 f_d (该阈值称为分叉值). 这一显著的变化过程被用于信号检测. 除了状态变化显著,在大尺度周期状态时相轨迹尺度最大,利于提高系统的信噪改善比也是选择该过程用来检测微弱信号的原因.

这样我们可以根据系统是否发生相变和相变的程度来检测信号存在与否以及信号的各种参数(如幅值、频率、相位等).

具体检测思路为:先调节系统驱动力 f ,使得系统进入混沌运动状态和大尺度周期运动状态的阈值点,得到阈值 f_d ,再加入频率与系统相同的待测信号,系统进入大尺度周期运动状态,这时调节系统驱动力 f ,使系统再次进入混沌运动状态和大尺度周期运动状态的阈值点,得到此时的驱动力 f_2 . 这样,就可以求得该信号的幅值为 $A = f_d - f_2$.

这种方法是利用 f 值对系统的敏感性来检测微弱信号的,但如果要应用到实际还存在下面几个问题.

1) 系统驱动力大小的阈值受系统参数 k, w 的影响. 如果待测信号频率不一样,那么进入大尺度周期的驱动力的阈值大小不同. 这使得我们在不知道信号频率的情况下,很难测定阈值,需要从大量的仿真相图中判断哪个刚好在临界状态.

2) 现在的 Duffing 系统方程大部分都是对低频率的检测,如果频率太大,会导致系统的动态响应时间变得很差,可能不会出现大尺度周期状态. 而光声池中信号频率一般都是声频范围 (20—20000 Hz),甚至超声波范围 (大于 20000 Hz).

3) 噪声免疫特性是相对的,它是指当系统处于混沌状态时,再大的噪声也不能改变系统的混沌状态. 但由于光声池系统频率都比较高,当噪声很大时,噪声仍然可能使系统状态发生改变. 这就影

响到对信号诱导还是噪声诱导的混沌状态变化的判断.

2.3 光声池变尺度差分法微弱信号检测原理

针对光声池中微弱信号检测中存在的问题, 本文提出了基于 Duffing 方程的变换尺度差分法. 所谓变换尺度差分法, 就是先对信号进行尺度变换 [10,11], 如时序信号是 $As(t)$, 频域是 $AS(w)$; 则信号为 $As(mt)$ 时, 对应的频域为 $(A/m) \cdot S(w/m)$. 这样在时域就将信号压缩为原来的 $1/m$, 在频域就将信号扩展为原来的 m 倍. 所以可通过调整变尺度系数 m , 将高频的信号压缩至低频区以适用于 Duffing 系统检测. 然后构造两个驱动力 f 具有微小差别, 而其他参数相同的 Duffing 系统, 求解的值再在 $[x_1, x_2]$ 之间做差分, 使得系统的共模噪声得到了很好的抑制, 系统的状态变化更加明显, 这样我们就可以准

确地判断阈值.

2.3.1 不含噪声的变尺度差分方法

如果信号不含噪声, 但信号频率又很高的情况下, 只需要采用变尺度方法, 使待测信号频率降至低频区. 而在实际中都是对信号进行采样的, 所以一般通过数值计算的步长来进行变尺度. 假设采样频率为 f_s , 则步长是 $1/f_s$, 引入变尺度系数 m , 则新步长为 m/f_s (即将时间间隔增大了 m 倍, 相应的频率减小为原来 $1/m$).

将不含噪声的待测信号加入到方程 (1) 中:

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x(t) + x^3(t) = f \cos(\omega t) + As(t), \quad (9)$$

式中 $As(t)$ 代表不含噪声的待测信号, $f \cos(\omega t)$ 为系统内置驱动力信号, 取 $k = 0.5$, $\omega = 1 \text{ rad/s}$, $f = 0.8$, 假设采样频率 $T_s = 500 \text{ s}$, $s(t) = 0.3 \cos(25t)$, 用后 450 s 点绘出系统的相轨迹图. 得到变尺度检测结果与没有变尺度检测结果的对比图 (其中由 (8) 式知 y 代表 \dot{x}) 如图 3.

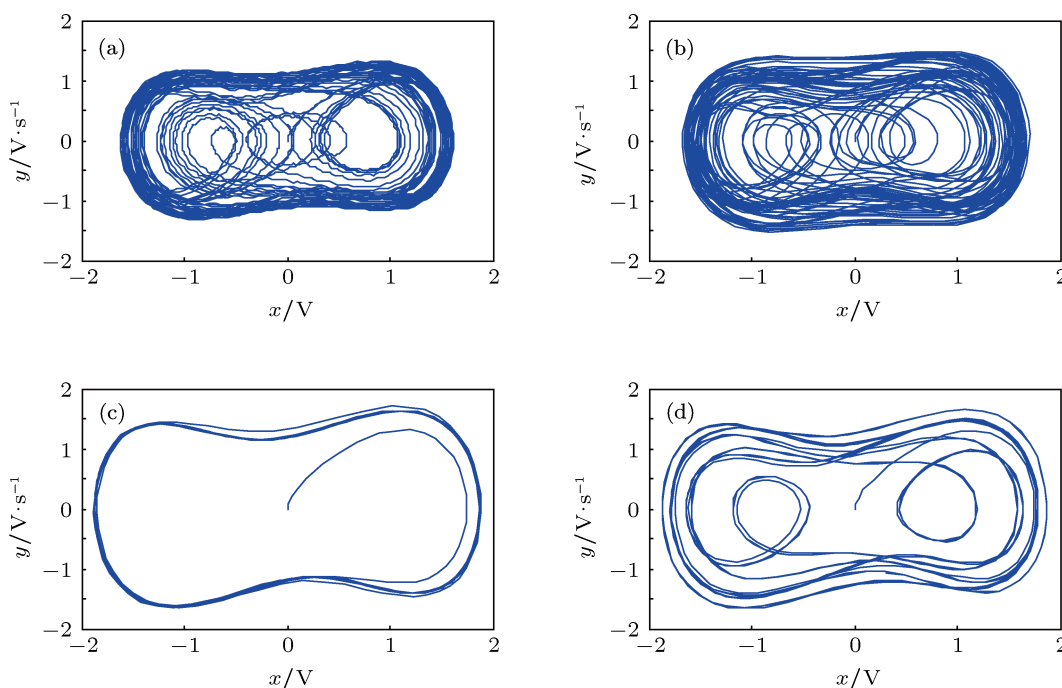


图3 变尺度方法检测待测微弱信号 $s(t) = 0.3 \cos(25t)$ (a) 没有引入变尺度系数, 即 $m = 1$ 时的混沌状态图; (b) 引入变尺度系数 $m = 15$ 时的系统混沌状态图; (c) 引变尺度系数 $m = 25$ 时系统的大尺度周期状态图; (d) 引入变尺度系数 $m = 35$ 时系统混沌状态图

由此可以得出: 当待测信号圆频率和驱动信号圆频率不相等时, 不能引起系统状态发生变化, 仍然为混沌状态; 而当两个圆频率一致时, 系统状态发生改变, 由混沌状态变为大尺度周期状态.

2.3.2 含噪声的变尺度差分方法

噪声存在时, 在一定情况下会使系统状态发生

改变. 比如当驱动力 f 接近阈值, 含有的噪声比较大时, 很可能使系统由临界混沌状态向大尺度周期状态转化, 导致无法判断是否有信号存在 [12]. 为了消除这个影响, 可以大致估计光声池中可能产生的主要噪声. 在光声池中一般采样的是声频范围, 很容易受外界噪声干扰, 在信号较弱的情况下, 噪声

会对检测系统产生较大影响. 因此我们可以首先将待检测信号进行小波去噪^[13,14], 滤除部分噪声, 然后重构出信号. 之后采用变尺度方法, 将信号圆频率变换, 将频率转化为低频. 再采用差分的方法检测信号.

后越能消除噪声, 混沌状态更明显. 由图 2 可知, 当 $f = 0.830$ 时系统处于大尺度周期状态. 分别对比不加噪声和加均值 0, 方差 0.01 的高斯白噪声, $k = 0.5, w_1 = 1, A = 0.3, w_2 = 25$, 进行尺度变换之后 x_1 和 x_2 的相图, 如图 4 和图 5 所示.

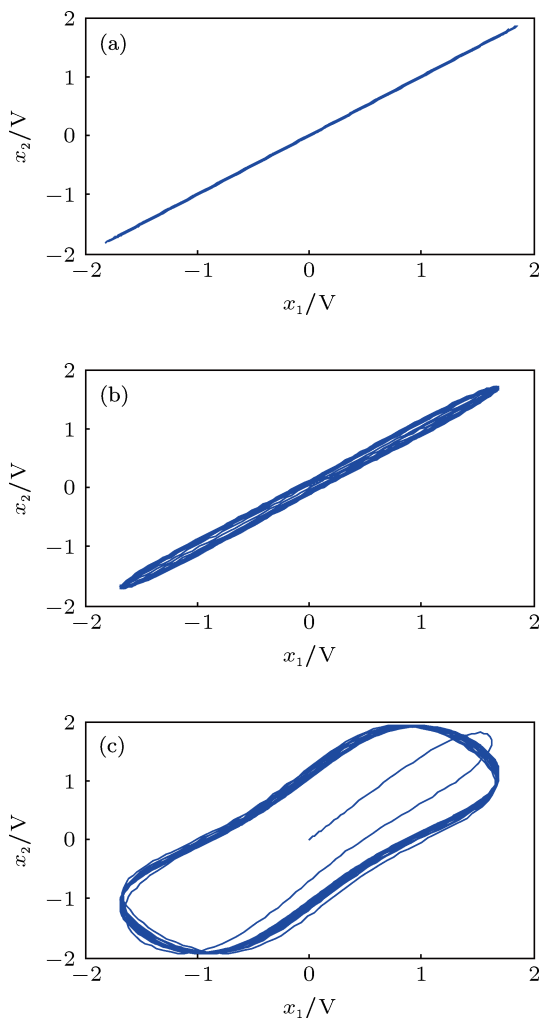


图 4 (a) $f = 0.830, a = 1$, 不加噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图; (b) $f = 0.830, a = 1.01$, 不加噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图; (c) $f = 0.830, a = 1.5$, 不加噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图

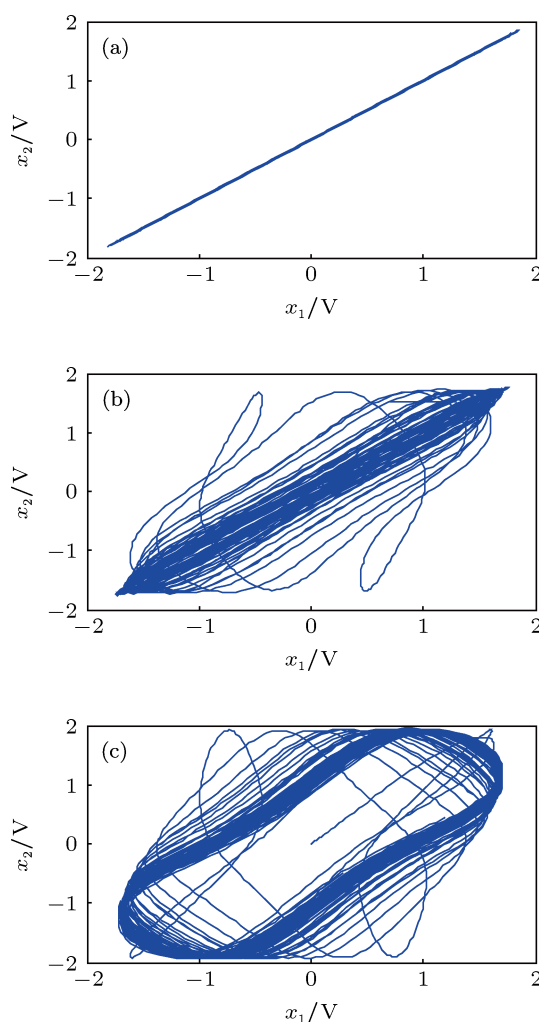


图 5 (a) $f = 0.830, a = 1$, 加入白噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图; (b) $f = 0.830, a = 1.01$, 加入白噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图; (c) $f = 0.830, a = 1.5$, 加入白噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图

差分方法采用的是双振子模式^[15,16], 构造方程如下:

$$\begin{cases} \ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = f \cos(w_1 t) + As(w_2 t) + n(t), \\ \ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = a \cdot f \cos(w_1 t) + As(w_2 t) + n(t). \end{cases} \quad (10)$$

运用龙格库塔法解方程组 (10), 得到 x_1 和 x_2 . 在周期态时, 当 $a = 1$ 时, 两个方程输出是相同的, 只是字母表示不同; 当 $a \neq 1$ 时 ($x_1 - x_2$) 有相位差别, 相图是一条封闭的曲线. 在混沌态时, 表现为不规则曲线. 当 a 越接近 1, 两个振子状态越接近, 差分

图 4 系统未加噪声, 图 4(a) 系统参数 $a = 1$ 时, (10) 式中的两个方程是一样的, 故相图呈现直线关系. 增大系统参数 a , 相图逐渐变化, 一直增大至 1.5, 根据 (8) 和 (10) 式得出系统是处于大尺度周期状态, 而从图 4(b) 和 (c) 可以很清晰地看出系统处于大尺度周期状态, 与 (8) 和 (10) 式得出的结果相符. 同理图 5 系统加入噪声后, 系统参数 $a = 1$ 时, (10) 式中的两方程相同, 故图 5(a) 相图仍是直线关系. 随后改变系统参数, 图 5(b) 和 (c) 可以很清晰地看出系统变为混沌状态, 与 (8) 和 (10) 式得出的结果相符.

由 (8) 式计算得 (或从图 2 可知), 当 $f = 0.5$ 时系统是处于混沌状态的. 为了充分地对比, 分别对比不加噪声和加均值, 方差 0.01 的高斯白噪声, $k = 0.5, w_1 = 1, A = 0.3, w_2 = 25$, 进行尺度变换之后 x_1 和 x_2 的关系相图, 如图 6 和图 7 所示.

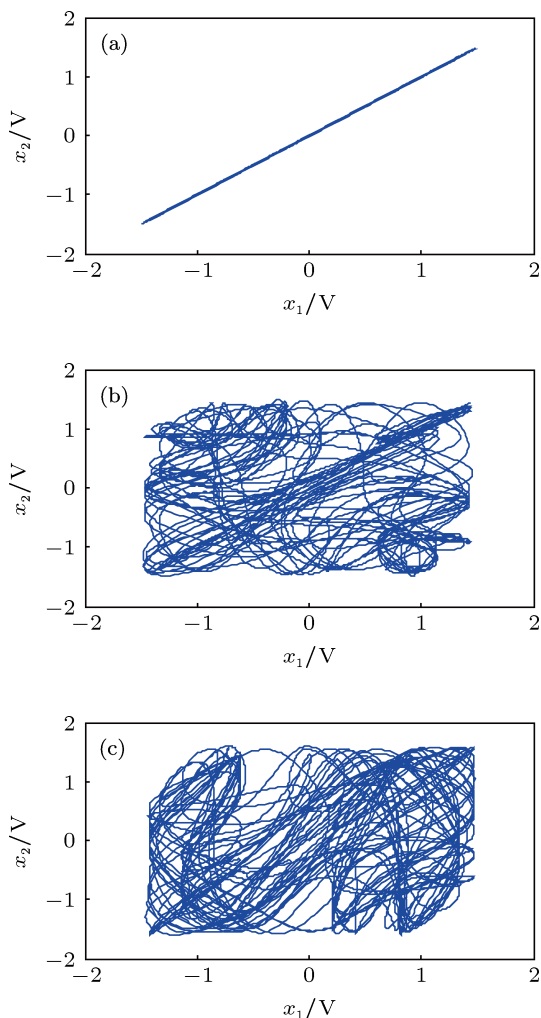


图 6 (a) $f = 0.5, a = 1$, 不加噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图; (b) $f = 0.5, a = 1.01$, 不加噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图; (c) $f = 0.5, a = 1.5$, 不加噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图

图 6 系统未加噪声, 由图 4 分析知系统参数 $a = 1$ 时, 图 6(a) 相图是呈现直线关系. 增大系统参数至 1.01, 从图 6(b) 很清楚地看出系统处于混沌, 继续增大系统参数 a 至 1.5, 由图 6(c) 可以很清晰地看出系统处于混沌状态. 同理图 7 系统加入噪声后, 系统参数 $a = 1$ 时, (10) 式中的两方程相同, 故图 7(a) 相图仍是直线关系. 随后改变系统参数, 由图 7(b) 和 (c) 可以很清晰地看出系统变为混沌状态, 这与 (8) 和 (10) 式计算得出的结果相符.

通过图 4 与图 5、图 6 和图 7 对比, 可知系统的相图与公式的计算结果都是符合的, 这说明判断

变尺度差分系统是否处于大尺度周期状态, 只需要看尺度变换之后 x_1 和 x_2 的关系相图, 省了大量的计算.

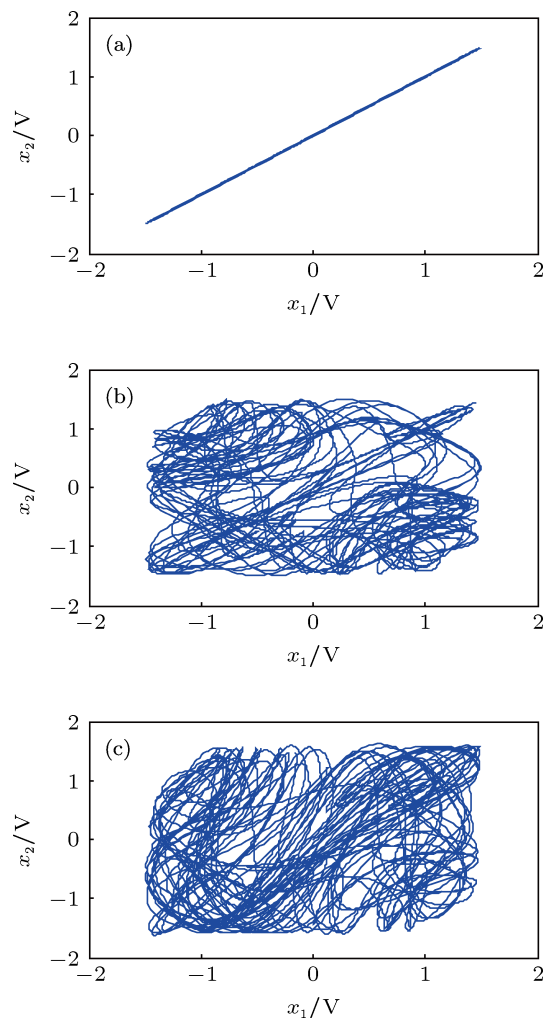


图 7 (a) $f = 0.5, a = 1$, 加入白噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图; (b) $f = 0.5, a = 1.01$, 加入白噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图; (c) $f = 0.5, a = 1.5$, 加入白噪声时差分方程 x_1 和 x_2 相图

差分图可以增强混沌状态的显示, 如图 8 是在 $f = 0.5, a$ 分别等于 1, 1.01, 1.5 时的波形图. 根据 (8) 式计算可知 $f = 0.5$ 时, 系统处于混沌. 图 8(a), (c), (e) 给出了 (10) 式中第一个方程的解 x_1 波形图, 观察可以看出系统混沌情况很不明显, 图 8(b), (d), (f) 给出了 (10) 式中第二个方程的解与第一个方程的解之差的波形图, 即 $x_1 - x_2$ 的差分波形图. 图 8(b) 系统参数 $a = 1$, 方程组 (10) 所得两解相同, 差为零, 故是一直线. 从图 8(d) 和 (f) 可以看出 $x_1 - x_2$ 的差分波形图相当明显地反映了混沌状态. 这表明差分后能消除部分噪声, 使混沌状态明显, 其能量比单一振子中混沌部分的能量强很多. 因此系统在不同状态之间的跃迁变得更加清晰, 这样就可以准

确地判断出 Duffing 系统状态的变化,使其抗噪性能更强.从图 8(d) 和 (f) 还可以清楚地看出系统进入混沌状态时刻,分别是 15 s 和 2 s.此外它们的幅度更反映了系统进入混沌的深度,这对我们判断阈值十分重要.因此,在判断阈值时,要根据混沌的深度来设定门限 R .当进入的混沌深度(即 $x_1 - x_2$)大

于这个门限 R 时,就可认定系统进入了混沌状态.根据方程组 (10) 可以看出,当 a 越小,阈值就越小,很容易导致混沌状态的误判.当 a 值越大,阈值也越大,不利于观察混沌状态,而且分析难度会增加.经过大量的实验发现,一般 a 取 1.001—1.1 之间差分结果最好^[17],本文取的是 1.005.

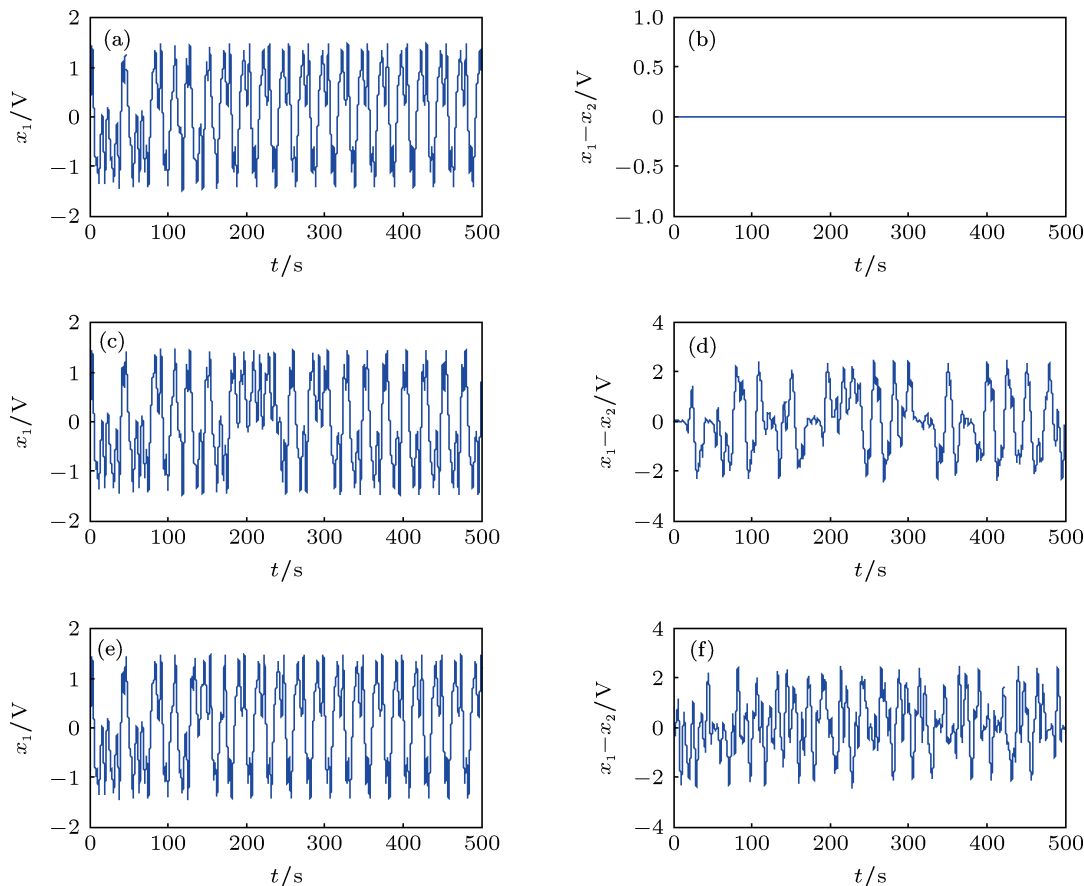


图 8 (a), (c), (e) 分别表示 $a = 1, 1.01, 1.5$ 时 x_1 的波形图; (b), (d), (f) 分别表示 $a = 1, 1.01, 1.5$ 时 x_1 和 x_2 的差分波形图

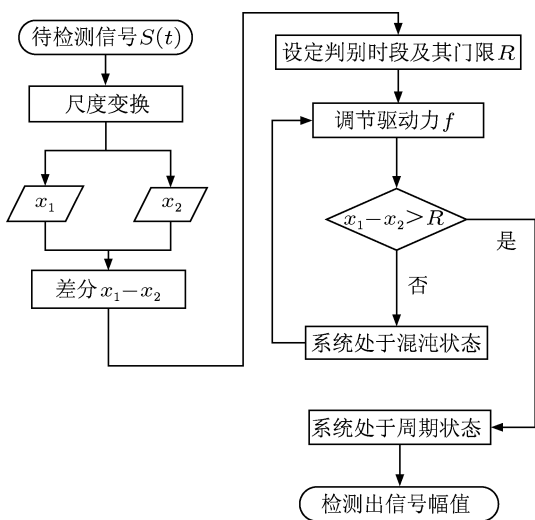


图 9 系统主要流程图

2.4 程序主要流程

程序流程如图 9 所示,假设待检测信号为 $A\cos(\omega t + \varphi) + n(t)$,检测该微弱信号时,先进行尺度变化,再进行差分,然后判定系统所处状态,最后求得幅值.

3 系统仿真与实验结果

光声池变尺度差分原理框图如图 10 所示:由于光声池中信号的频率比较高,加上噪声的影响,在信号检测时候,我们先进行小波去噪,滤除部分噪声;然后进行变尺度,将频率调低;接着进行差分,判断门限;最后得出信号的幅值大小.

为了验证本文方法的准确性, 在不含噪声情况下, 对本文方法和普通方法(单 Duffing 振子)进行了详细对比, 如表 1 所示. 其中华北电力大学的王

冠宇等^[18]已经计算出 f_d 与 k 的比值近似保持为一常数, 且该比值的理论值为 1.677 (相对误差根据这个理论值来计算).

表 1 普通 Duffing 振子方法阈值与采用变尺度差分法阈值对比 ($a = 1.005$)

k	普通方法阈值	f_d/k	相对误差 /%	变尺度差分阈值	f_d/k	相对误差 /%
0.3	0.5427	1.8083	7.83	0.5420	1.8067	7.73
0.4	0.6775	1.6938	1.00	0.6762	1.6905	0.81
0.5	0.8275	1.6375	2.36	0.8261	1.6522	1.48
0.6	0.9757	1.6262	3.03	0.9825	1.6375	2.36
0.7	1.1384	1.6263	3.02	1.1425	1.6321	2.68

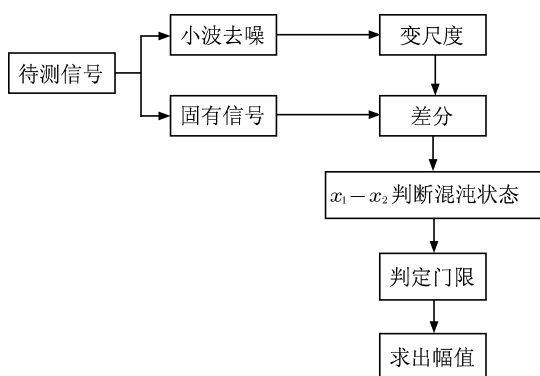


图 10 检测系统系统框图

所以从表 1 中可以很容易地看出, 使用变尺度差分法, 相对误差都很小, 确定的阈值很精确, 这对信号的检测十分重要.

为了进一步衡量两种方法相对于不含噪声系统的偏移度, 利用含噪与不含噪两个系统 $x(t)$ 均方差作为衡量标准, 即

$$\xi = \langle [x_n(t) - x_0(t)]^2 \rangle. \quad (11)$$

取系统运行实际 400 s, 本文所用噪声为高斯白噪声, 均值为 0, 方差 σ 在 0.001—0.1 之间变化. ξ - σ 的关系如图 11 所示.

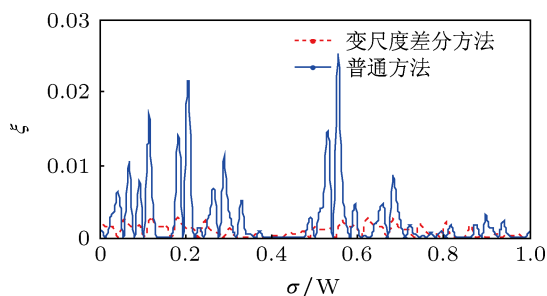


图 11 两种不同方法在不同噪声下 ξ 值的变化曲线

由图 11 可知两种方法在抗噪声性能上都有一

定的限制, 但变尺度差分方法的均方差值基本上小于普通方法的均方差值, 这说明变尺度差分方法抗噪声性能优于普通方法.

最后为了进一步验证本文尺度变换差分法的有效性, 对光声池微弱信号检测系统的现场试验数据进行了处理. 加入噪声, 在不同信噪比下, 待测光声信号理论值、测量值以及相对误差如表 2 所示.

表 2 待测信号理论值与测量值对比

信噪比/dB	待测信号理论值/mV	测量值/mV	相对误差 /%
-5	0.0100	0.00998	0.20
	0.0200	0.01995	0.25
	0.0240	0.02391	0.37
-10	0.0100	0.00995	0.50
	0.0200	0.01985	0.75
	0.0240	0.02391	0.83
-20	0.0100	0.00965	3.50
	0.0200	0.01942	2.90
	0.0240	0.02329	2.96

由此可以看出变尺度差分方法测出的信号相对误差都小于 5%, 说明其有效性, 可以运用在光声池中微弱信号的检测当中.

4 结论

本文在 Duffing 方程的基础上提出了变尺度差分法来检测光声池中的微弱信号. 理论分析和实验表明, 变尺度差分方法能很好地抑制系统相空间的共模噪声, 而且能很好地凸显混沌状态的临界值, 从而容易区分信号与噪声.

由于混沌系统本身的抗噪性能, 该方法有利于检测光声池中的微弱信号. 通过在检测信号前进行去噪处理, 然后再用变尺度差分方法, 不仅使得系统可以检测较高频信号, 而且可以很好地确定阈值. 所用方法思想简单、有效、易于实现, 对光声池的微弱信号检测具有实际意义.

- [1] Meng G, Liu X Y, Yuan C Y, Guo F, Zheng C K, Peng C 2011 *Spectrosc. Spect. Anal.* **31** 1819 (in Chinese) [蒙瑰, 刘先勇, 袁长迎, 郭峰, 郑成坤, 彭琛 2011 光谱学与光谱分析 **31** 1819]
- [2] Li X K, Li T T, Ma T 2011 *J. Vib. Shock.* **30** 225 (in Chinese) [李秀坤, 李婷婷, 马涛 2011 振动与冲击 **30** 225]
- [3] Zhang J L, Wang P, Wang Z B, Li X, Wang Z W 2010 *Spectrosc. Spect. Anal.* **30** 1722 (in Chinese) [张记龙, 王鹏, 王志斌, 李晓, 王智文 2010 光谱学与光谱分析 **30** 1722]
- [4] Deng H G, Cao W H, Yang B C, Mei W P, Ao B Q 2012 *J. Cent. South Univ. (Science and Technology)*. **43** 1773 (in Chinese) [邓宏贵, 曹文晖, 杨兵初, 梅卫平, 敖邦乾 2012 中南大学学报 (自然科学版) **43** 1773]
- [5] Feng J L, Xu W, Niu Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 157 (in Chinese) [冯进钤, 徐伟, 牛玉俊 2010 物理学报 **59** 157]
- [6] Yuan C Y, Liu X Y, Meng G, Zhao L 2010 *Spectrosc. Spect. Anal.* **30** 879 (in Chinese) [袁长迎, 刘先勇, 蒙瑰, 赵亮 2010 光谱学与光谱分析 **30** 879]
- [7] Liu H B, Wu D W, Jin W, Wang Y Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 050501 (in Chinese) [刘海波, 吴德伟, 金伟, 王永庆 2013 物理学报 **62** 050501]
- [8] Gao S L, Zhong S C, Wei J, Ma H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 180501 (in Chinese) [高仕龙, 钟苏川, 韦鸥, 马洪 2012 物理学报 **61** 180501]
- [9] Qin W Y, Su H, Yang Y F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2704 (in Chinese) [秦卫阳, 苏浩, 杨永峰 2008 物理学报 **57** 2704]
- [10] Lai Z H, Leng Y G, Sun J Q, Fan S B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 050503 (in Chinese) [赖志慧, 冷永刚, 孙建桥, 范胜波 2012 物理学报 **61** 050503]
- [11] Wu Y F, Zhang S P, Sun J W 2010 *Chin. J. Sci. Instrum.* **31** 161 (in Chinese) [吴勇峰, 张世平, 孙金玮 2010 仪器仪表学报 **31** 161]
- [12] Yang B J, Li Y, Yuan Y, Liu X H 2007 *Chin. Phys.* **16** 1072
- [13] Deng K, Zhang L, Luo M K 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030506
- [14] Su L Y, Ma Y J, Li J J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 020508
- [15] Wang M, Yan Y, Zhang H F 2010 *J. Circuits. Syst.* **15** 118 (in Chinese) [王玫, 颜勇, 张慧峰 2010 电路与系统学报 **15** 118]
- [16] Yan H, Wei P, Xiao X C 2010 *Chin. Phys. B* **19** 090501
- [17] Zhao H, Yin C Q, Shang Q F, Geng Y J 2006 *Proceedings of the CSEE*. **26** 32 (in Chinese) [赵华, 尹成群, 尚秋峰, 耿玉静 2006 中国电机工程学报 **26** 32]
- [18] Wang G Y, Chen D J, Lin J Y, Chen X 1998 *Chin. J. Electron.* **26** 38 (in Chinese) [王冠宇, 陈大军, 林建亚, 陈行 1998 电子学报 **26** 38]

Weak photoacoustic signal detection in photoacoustic cell*

Xu Xue-Mei[†] Dai Peng Yang Bing-Chu Yin Lin-Zi Cao Jian
Ding Yi-Peng Cao Can

(Department of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China)

(Received 31 May 2013; revised manuscript received 18 July 2013)

Abstract

The content of pollution gas in atmosphere is generally small, so the photoacoustic signal detected by photoacoustic spectroscopy to monitor is very weak. In this paper, on the basis of Holmes Duffing equation, we propose a new method i.e. variable scale difference method which is quite suitable for photoacoustic signal detection. This method can be used to detect weak signal by transforming the size of signal and then subtracting the resulting signal. Theoretical analysis and experimental measurements show that it can well restrain the common-mode noise of system phase space, and it can also highlight the chaos state of critical value. This method has a relative error less than 5%, indicating that it can be effectively used to detect the amplitude of weak photoacoustic signal that has a higher frequency and unknown phase and frequency.

Keywords: photoacoustic cell, weak signal detection, amplitude, duffing

PACS: 43.58.Kr, 43.60.-c, 43.25.Cb, 82.40.Bj

DOI: 10.7498/aps.62.204303

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61172047, 61071025).

[†] Corresponding author. E-mail: xuxuemei999@126.com