

# 基于耦合 Duffing 振子的局部放电信号检测方法研究

吴勇峰<sup>†</sup> 黄绍平 金国彬

(湖南工程学院电气信息学院, 湘潭 411104)

(2013 年 1 月 19 日收到; 2013 年 3 月 26 日收到修改稿)

以双向环形耦合 Duffing 振子系统为对象, 研究脉冲信号激励下耦合振子间动力学行为变化特征时, 发现其与单向环形耦合 Duffing 振子系统类似, 在一定的参数条件下, 脉冲信号能引起其中一个振子与其他振子运动轨迹间出现短暂失同步的现象即瞬态同步突变现象. 基于这种现象, 提出了一种微弱脉冲信号检测的新方法, 用于检测强噪声背景中的局部放电脉冲信号. 实验测试表明, 利用本文方法对不同放电电极的局部放电脉冲信号进行检测时, 在低信噪比条件下可取得良好的检测效果, 进而扩展了现有的 Duffing 振子对非周期信号的检测范围及应用领域.

**关键词:** 耦合 Duffing 振子, 微弱信号检测, 瞬态同步突变, 局部放电脉冲信号

**PACS:** 05.45.Xt

**DOI:** 10.7498/aps.62.130505

## 1 引言

微弱信号检测技术在通信、振动测量、生物医学信号、电力系统故障诊断等领域有着广泛的应用, 一直是国内外学者研究的热点<sup>[1-5]</sup>. Bixr 等<sup>[6]</sup>于 1992 年首次提出利用混沌振子检测微弱周期信号. 之后, 王冠宇、李月<sup>[7-12]</sup>等人进行了大量的研究, 研究了 Duffing 振子对不同类型的微弱周期信号的检测性能以及对不同类型的噪声的抑制能力, 这些研究成果对混沌振子检测方法的迅速发展起到了重要的作用. 目前 Duffing 振子微弱信号检测普遍采用单 Duffing 振子, 其检测机理是利用特定频率的周期扰动使单 Duffing 振子产生共振来进行检测, 因此只适合对微弱周期或准周期信号进行检测, 而实际应用中需要对大量的非周期信号检测, 尤其是对噪声背景中的非周期信号检测, 如局部放电脉冲信号、激光脉冲信号、超声脉冲回波信号等, 这就制约了 Duffing 振子检测方法的进一步发展. 因此, 迫切需要研究 Duffing 振子对非周期信号检测的机理和方法.

2009 年 Yuan 等<sup>[13]</sup>通过研究 Duffing 振子对混沌序列的非线性响应, 发现了序列混沌程度越高,

Duffing 振子的相图越混沌, 并利用这种规律来检测 EEG 信号, 从而首次将 Duffing 振子的检测范围扩展到非周期信号. 之后, 本文作者<sup>[14,15]</sup>在研究单向环形耦合 Duffing 振子动力学行为变化特征时, 发现脉冲信号能激励耦合振子运动轨迹间出现短暂失同步的现象即瞬态同步突变现象, 利用这种现象可以快速检测出强噪声背景中的微弱脉冲信号, 并通过数字仿真证明了该方法的可行性.

本文在前期研究<sup>[14-17]</sup>的基础上, 发现双向环形耦合 Duffing 振子在一定参数条件下, 脉冲信号同样能激发其中一个振子与其他振子运动轨迹间出现短暂失同步的现象即瞬态同步突变现象, 且双向环形耦合 Duffing 振子抗噪性能更强、检测更稳定. 并由此提出了利用瞬态同步突变现象来检测强噪声背景中的局部放电脉冲信号的方法, 建立了局部放电信号检测实验系统, 以验证该方法在实际工程应用中的检测性能, 为该现象在其他工程领域的进一步推广应用提供了实验依据.

## 2 利用 Duffing 振子检测脉冲信号原理

目前利用 Duffing 振子检测微弱信号的研究主要集中在对微弱周期或准周期信号进行检测, 其方

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: vicwu306@163.com

程形式如下:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} + \xi y - x + x^3 &= f \cos \omega t + a \cos \omega t, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\xi$  为阻尼比,  $f \cos \omega t$  为周期策动力,  $a \cos \omega t$  为输入的待测微弱信号. 其检测原理是利用微弱周期信号的扰动引发 Duffing 振子在混沌态和大尺度周期态的相互转换即相变, 通过对相变的判别来检测信号.

### 2.1 检测原理

本文为了研究对脉冲信号的检测, 在分析单一 Duffing 振子检测的基础上, 构造了双向环形耦合 Duffing 振子检测方程

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= y_i, \\ \dot{y}_i + \xi y_i - x_i + x_i^3 &+ k(x_i - x_{i-1}) + k(x_i - x_{i+1}) \\ &= f \cos(\omega t) + m_i \cdot s(t), \\ m_i &= 1, \quad i = 1 \\ m_i &= 0, \quad i = 2, \dots, N, \\ &(i = 1, 2, \dots, N; N \geq 2), \end{aligned} \quad (2)$$

式中脉冲信号  $s(t)$  只输入到其中一个振子中 (本文取第 1 个振子),  $N$  表示振子个数,  $\xi$  为阻尼比,  $f \cos(\omega t)$  为周期策动力. 其中第 1 个振子与第  $N$  个振子通过双向耦合方式构成了整个耦合振子的环形链接, 所有振子间的耦合强度保持一致, 其结构如图 1 所示.

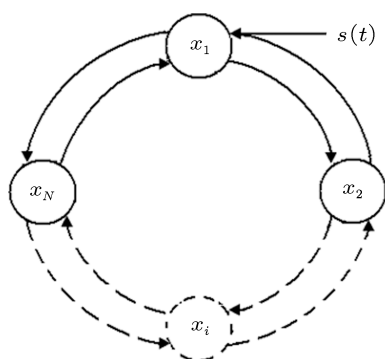


图 1 受脉冲信号激励的双向环形耦合 Duffing 振子的结构图

为了研究双向环形耦合 Duffing 振子在受到脉冲信号激励后振子运动轨迹间的响应, 以三个振子构成的双向环形耦合 Duffing 振子为例. 令  $N = 3$ ,

$\xi = 0.32, \omega = 1, k = 0.1$ , 初始值都小于零, 其检测方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= y_1, \\ \dot{y}_1 + 0.32y_1 - x_1 + x_1^3 &+ 0.1(x_1 - x_3) \\ &+ 0.1(x_1 - x_2) = f \cos(t) + s(t), \\ \dot{x}_2 &= y_2, \\ \dot{y}_2 + 0.32y_2 - x_2 + x_2^3 &+ 0.1(x_2 - x_1) \\ &+ 0.1(x_2 - x_3) = f \cos(t), \\ \dot{x}_3 &= y_3, \\ \dot{y}_3 + 0.32y_3 - x_3 + x_3^3 &+ 0.1(x_3 - x_2) \\ &+ 0.1(x_3 - x_1) = f \cos(t), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $s(t)$  为被检测脉冲信号, 如图 2 所示. 脉冲信号  $s(t)$  只加入到第 1 个振子上.

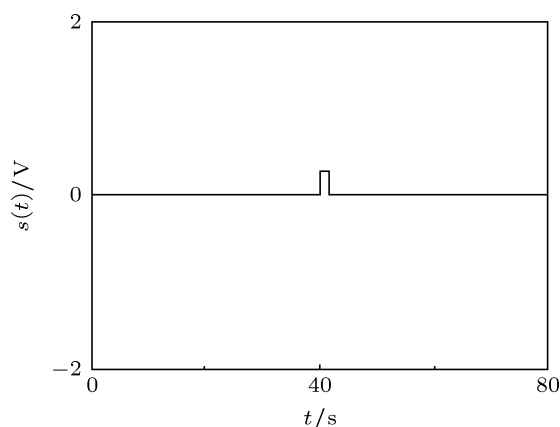


图 2 脉冲信号

同时调节各振子的周期策动力的幅值  $f$ , 使耦合系统分别进入倍周期分岔、混沌态、大尺度周期态, 研究耦合系统处于各状态时, 在脉冲信号激励下振子运动轨迹间的同步变化规律.

研究发现耦合振子处于倍周期分岔态时, 当脉冲信号在  $t = 40$  s 输入时, 会激励第一个振子与其他两个振子运动轨迹间产生短暂失同步的现象如图 3 所示, 当脉冲信号消失后, 振子间又回到同步状态即同步误差为零. 本文将这种由脉冲信号引起的振子运动轨迹间短暂失同步的现象称为瞬态同步突变.

通过计算多个 Duffing 振子所构成的双向环形耦合 Duffing 振子在脉冲激励下的变化规律, 同样可以得到上述瞬态同步突变现象.

因此, 可利用瞬态同步突变现象来检测脉冲信号, 检测时只需通过振子间同步误差判别是否产生

瞬态同步突变,即可实现对微弱脉冲信号的检测.

## 2.2 对比分析

上一节研究表明,与单向环形耦合 Duffing 振子一样,双向环形耦合 Duffing 振子也具有瞬态同步突变现象.

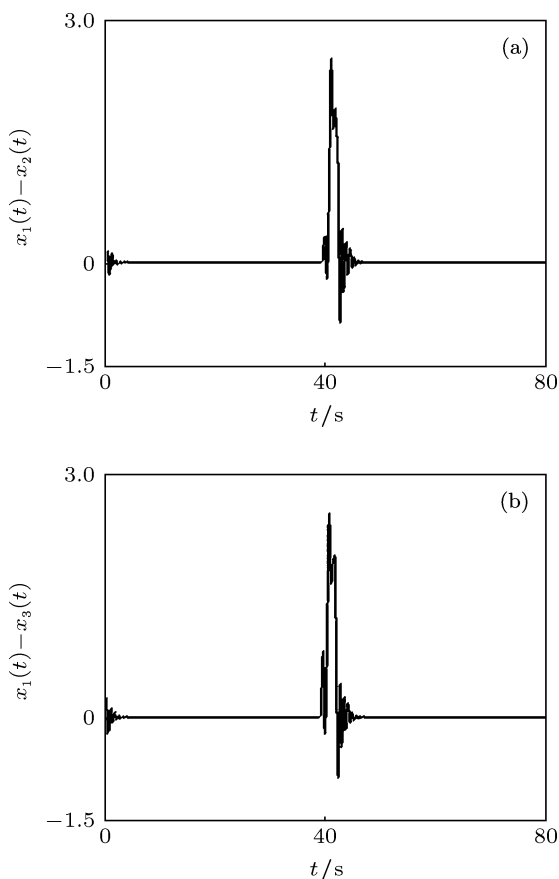


图3 各振子运动轨迹间的同步误差 (a) 第1,2振子间同步误差;(b) 第1,3振子间同步误差

为了对比单向环形耦合 Duffing 振子和双向环形耦合 Duffing 振子对噪声环境中的脉冲信号的检测性能,采用数字仿真研究这两种耦合振子对 1000 个含有白噪声的脉冲信号的检测效果,结果如表 1 所示.

从表 1 可知,在一定参数条件下,单向环形耦合 Duffing 振子和双向环形耦合 Duffing 振子对信噪比在  $-20\text{ dB}$  以上的脉冲信号具有较好的检测效果.相对于单向环形耦合 Duffing 振子,双向环形耦合 Duffing 振子抗噪性能更强、检测更稳定,而单向环形耦合 Duffing 振子检测方程要比双向环形耦合 Duffing 振子检测方程少  $N$  个耦合项的运算量.

表 1 两种耦合振子检测的错误率

| 信噪比/dB | 单向环形耦合       | 双向环形耦合       |
|--------|--------------|--------------|
|        | Duffing 振子/% | Duffing 振子/% |
| -5     | 0.0          | 0.0          |
| -10    | 0.1          | 0.0          |
| -15    | 0.3          | 0.1          |
| -20    | 1.4          | 0.9          |
| -25    | 4.1          | 3.3          |

## 3 实验研究

高压电气设备的局部放电是反映高压电气设备绝缘性能的重要参数之一 [18,19],对早期局部放电进行监测,可以及时杜绝绝缘故障隐患,从而保障系统的安全运行.但早期局部放电是非常微弱的,且设备运行现场存在大量噪声干扰,因此局部放电检测的关键之一是如何从强噪声环境中准确地提取微弱放电脉冲信号.目前常用的微弱脉冲信号检测方法有小波阈值去噪法、数字滤波法、傅里叶频域变换法等,这些方法所能达到的最低检测信噪比为  $-10\text{ dB}$  [20-22],而现场检测时常常会出现更低信噪比的脉冲信号,此时就很难满足信号检测的实际需求了.

本节建立了局部放电信号检测实验系统,采用双向环形耦合 Duffing 振子对不同放电电极的局部放电脉冲信号进行检测,以验证了本文方法对局部放电脉冲信号检测的可行性和有效性.

### 3.1 实验系统

实验系统由放电源和检测端组成,如图 4 所示.放电源用于产生局部放电脉冲,由升压电路和放电电极组成;检测端用于接收和检测局部放电脉冲信号,由超高频传感器、噪声源、数字示波器和上位机组成.

实验步骤:

1) 将升压电路产生的高压加载到放电电极之间产生局部放电,利用超高频传感器捕获局部放电时产生的电磁波脉冲信号.对于单次局部放电,通过超高频传感器包络检波后其输出的脉冲波形基本一致,都是脉宽约为  $300\text{ }\mu\text{s}$  的单极性脉冲信号,如图 5 所示.

2) 由 Tektronix TDS1002 型数字示波器采集超高频传感器输出的放电脉冲信号, 同时由 Agilent 33220A 型信号发生器产生白噪声也输入至示波器, 示波器将局部放电脉冲信号和噪声进行叠加以模

拟现场环境.

3) 上位机读取示波器采集到的含有噪声的局部放电脉冲信号数据, 并用 Matlab 编写的双向环形耦合 Duffing 振子检测程序对脉冲信号进行检测.

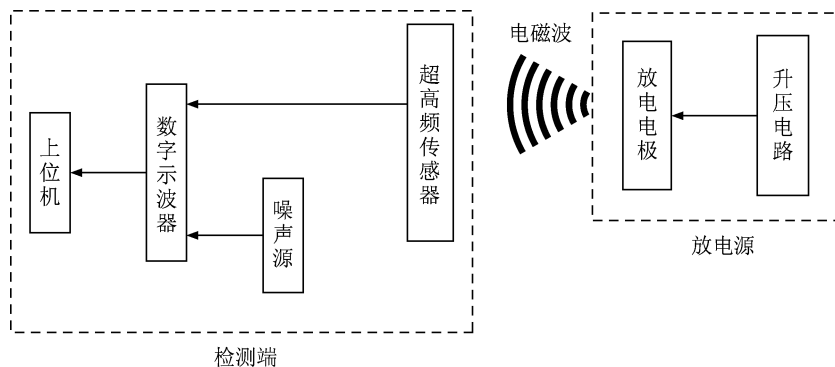


图4 实验系统结构图

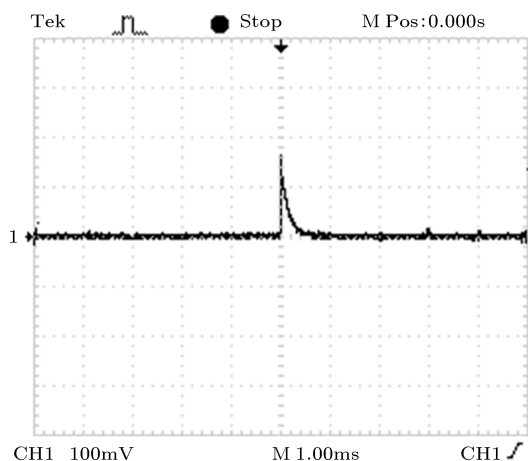


图5 单个局部放电脉冲信号

### 3.2 实验数据与分析

#### 3.2.1 放电脉冲信号检测实验

利用双向环形耦合 Duffing 振子分别对面-面放电电极、球-面放电电极、针-面放电电极产生的局部放电信号进行检测 (振子参数为  $\xi = 0.32$ ,  $\omega = 1$ ,  $k = 0.1$ ,  $N = 2$ ). 放电电极与超高频传感器之间的距离保持为 100 cm, 由噪声源产生有效值约为 70 mV 的噪声加入到局部放电脉冲信号中.

1) 面-面放电, 如图 6(a) 所示. 面-面放电电极间各处电场强度相等, 击穿所需时间短, 分散性小, 击穿电压较高, 放电脉冲幅值较大, 大小基本一致.

加入噪声后, 采用环形耦合 Duffing 振子对放电脉冲信号检测结果如图 6(b) 所示.

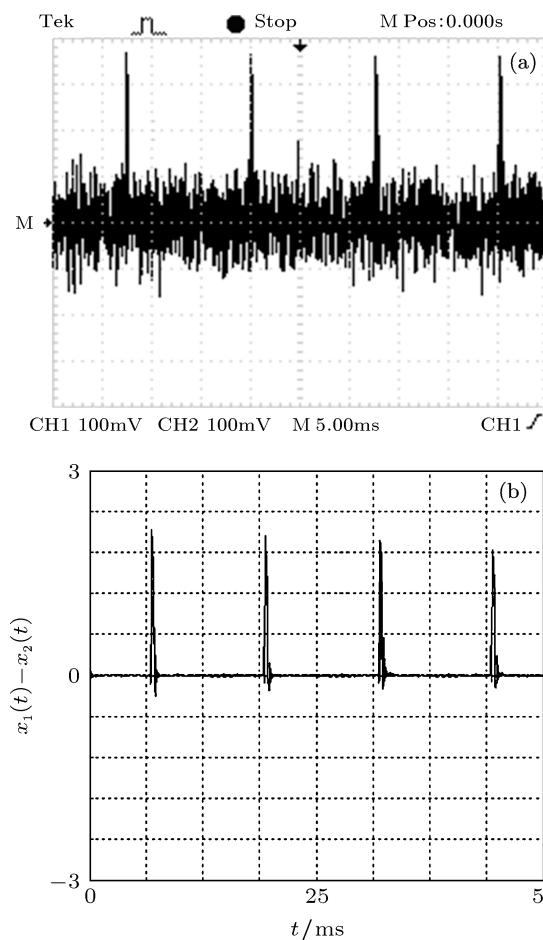


图6 面-面放电信号检测结果 (a) 加入噪声的放电脉冲信号; (b) 检测时两个振子的同步误差

2) 球-面放电, 如图 7(a) 所示. 由于球-面放电电极为稍不均匀电场, 其击穿电压与电场均匀程度关

系较大, 电场分布越均匀处, 击穿电压越高, 极性效应不明显. 当达到击穿电压时, 在球面多个地方出现放电, 其放电脉冲大小有规律地起伏变化.

加入噪声后, 有的放电脉冲幅值比噪声大, 有的放电脉冲几乎被噪声淹没, 对放电脉冲检测结果如图 7(b) 所示.

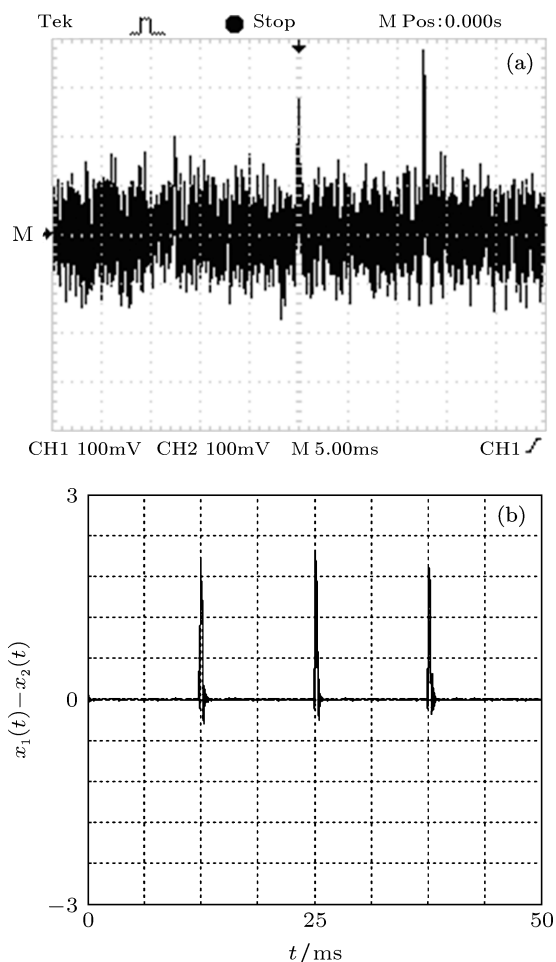


图 7 球-面放电信号检测结果 (a) 加入噪声的放电脉冲信号; (b) 检测时两个振子的同步误差

3) 针-面放电, 如图 8(a) 所示. 由于针-面放电电极的极间距离对击穿电压影响较大, 极性效应明显, 分散性很大, 放电脉冲幅值较小, 无明显变化规律.

加入噪声后, 小脉冲信号被噪声所淹没, 只能看到个别较大的脉冲信号, 其检测结果如图 8(b) 所示.

可以看出, 某些微弱的放电脉冲信号被噪声完全淹没, 但检测时放电脉冲信号仍能激励耦合振子产生瞬态同步突变, 噪声只引起了振子运动轨迹间同步误差的波动, 不影响对瞬态同步突变的判别, 因此仍能准确地将放电脉冲信号检测出来, 如图 8(b) 所示.

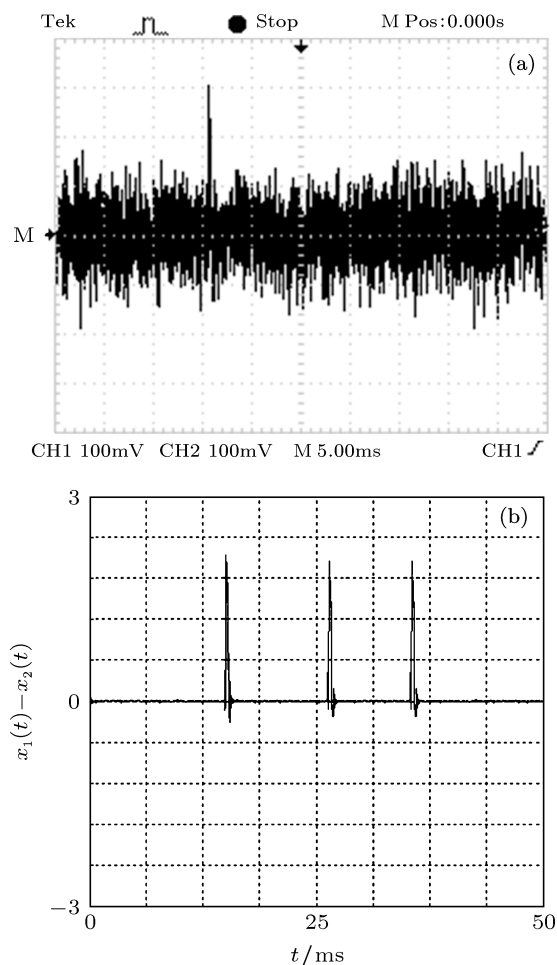


图 8 针-面放电信号检测结果 (a) 加入噪声的放电脉冲信号; (b) 检测时两个振子的同步误差

### 3.2.2 对比实验

目前对于局部放电脉冲信号检测, 常用的方法有小波阈值去噪法、数字滤波等方法. 下面分别采用小波阈值去噪法、数字滤波法、双向环形耦合 Duffing 振子对针-面放电电极所产生的局部放电脉冲信号进行检测.

待检测局部放电脉冲信号的有效值从左往右依次为 105 mV, 224 mV, 26 mV, 45 mV, 加入有效值约为 167 mV 的噪声, 在放电脉宽时间内的信噪比分别为 -4 dB, 2.5 dB, -16 dB, -11 dB, 如图 9 所示.

图 10 为采用小波阈值去噪法的检测结果. 可以看出, 采用 Symlets 小波时, 可将信噪比为 -4 dB, 2.5 dB 的脉冲信号检测出来; 采用双正交小波时, 产生了较大的毛刺, 因此只能将信噪比为 2.5 dB 的脉冲信号检测出来.

图 11 为采用数字滤波法的检测结果. 可以看出, 由于放电脉冲信号具有较宽的频带, 当信噪比低达一定程度后, 调节数字滤波器的通带带宽, 对放电脉冲信号的信噪比改善程度不大.

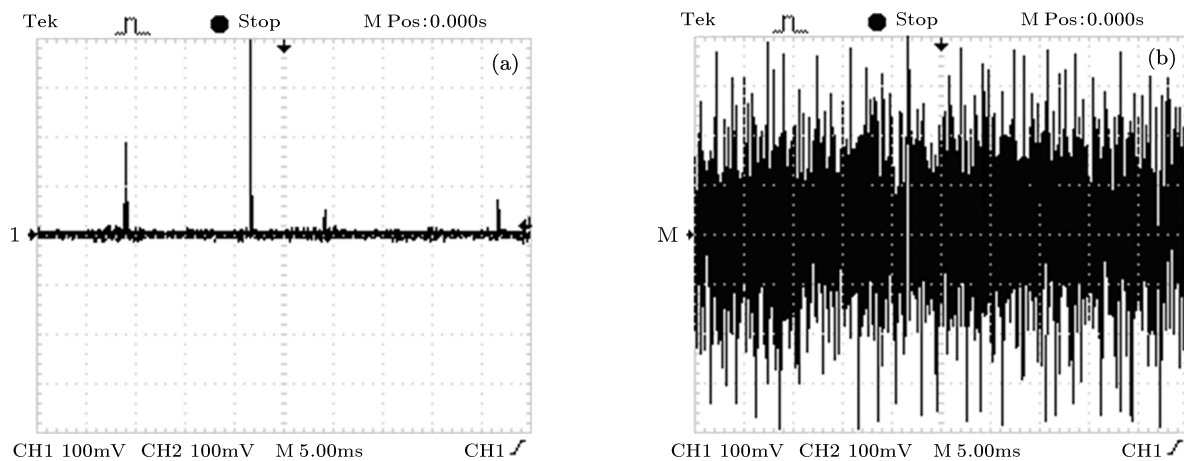


图9 局部放电脉冲信号 (a) 无噪声; (b) 有噪声

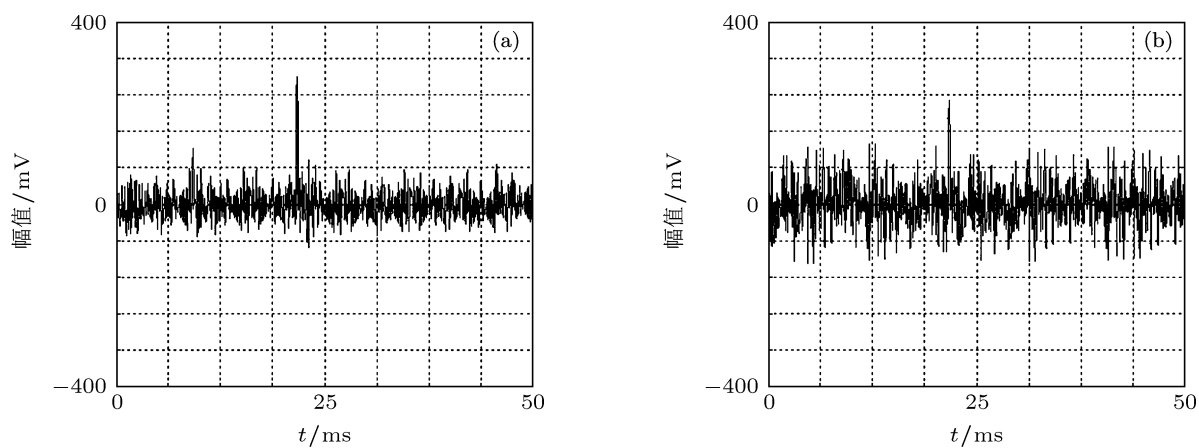


图10 采用小波阈值去噪检测结果 (a) 用 Symlets 小波 sym8 检测结果; (b) 用正交小波 bior3.9 检测结果

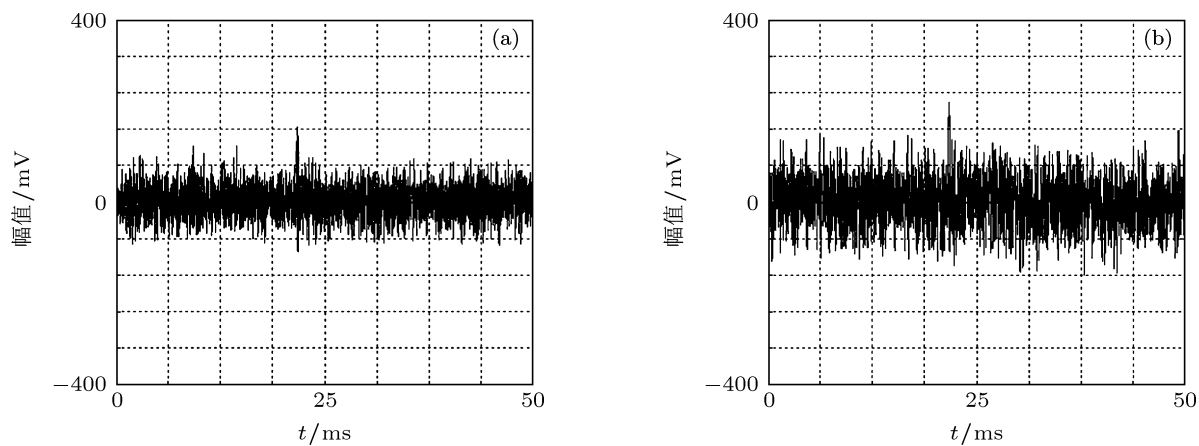


图11 采用数字滤波检测结果 (a) 通带带宽 4 MHz; (b) 通带带宽 7 MHz

图 12 为采用双向环形耦合 Duffing 检测结果. 可以看出, 信噪比为  $-16$  dB 的放电脉冲信号也能激起振子运动轨迹间的瞬态同步突变, 而噪声只引起振子间同步误差的波动, 不影响对脉冲信号到来时刻的判别.

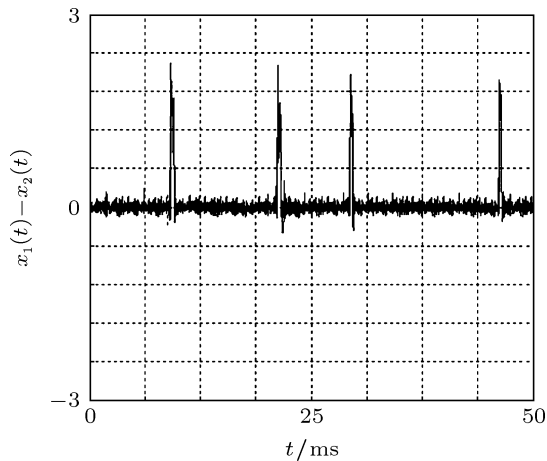


图 12 采用环形耦合 Duffing 振子检测结果

实验研究表明, 常用的检测方法对信噪比在

$-10$  dB 以上的局部放电脉冲信号有较好的检测效果. 而双向环形耦合 Duffing 振子对噪声有较强的抑制能力, 一定强度的噪声不会改变微弱脉冲信号所激发的瞬态同步突变, 该方法在信噪比为  $-20$  dB 以上时, 具有较好的检测效果.

## 4 结论

1. 发现双向环形耦合 Duffing 振子系统受到脉冲信号激励时, 耦合振子运动轨迹间将出现短暂的失同步现象即瞬态同步突变, 且比单向环形耦合 Duffing 振子系统抗噪性能更强、更稳定.

2. 提出利用瞬态同步突变现象检测局部放电脉冲信号的新方法. 该方法对脉冲信号极度敏感性和对噪声有较强的免疫性, 只需计算振子间同步误差, 就能快速检测出强噪声背景中特定的微弱脉冲信号. 实验测试表明, 利用该方法能将信噪比为  $-20$  dB 以上的局部放电脉冲信号准确地检测出来.

由此, 本文进一步补充了现有 Duffing 振子微弱信号检测方法的检测范围及应用领域.

- [1] Li Y, Yang B J, Du L Z, Yuan Y 2003 *Chin. Phys.* **12** 0714
- [2] Wang Y C, Zhao Q C, Wang A B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2373
- [3] Xiang X Q, Shi B C 2010 *Chaos* **20** 013104
- [4] Wang Y S, Jiang W Z, Zhao J J, Fan H D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2053 (in Chinese) [王永生, 姜文志, 赵建军, 范洪达 2008 物理学报 **57** 2053]
- [5] Zhai D Q, Liu C X, Liu Y, Xu Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 816 (in Chinese) [翟笃庆, 刘崇新, 刘尧, 许喆 2010 物理学报 **59** 0816]
- [6] Birx D L, Pipenberg S J 1992 *IEEE Int. Joint Conf. Neural Networks* **22** 881
- [7] Wang G Y, Tao G L, Chen X, Lin J Y 1997 *Chinese Journal of Scientific Instrument* **18** 209 (in Chinese) [王冠宇, 陶国良, 陈行, 林建亚 1997 仪器仪表学报 **18** 209]
- [8] Wang G Y, He S L 2003 *IEEE Trans. Circuits-I* **50** 945
- [9] Li Y, Yang B J, Yuan Y, Liu X H 2007 *Chin. Phys.* **16** 1072
- [10] Li Y, Yang B J, Yuan Y, Zhao X P, Lin H B 2006 *Chin. Sci. Bull.* **51** 3010
- [11] Li Y, Yang B J 2003 *Chin. Sci. Bull.* **48** 19
- [12] Li Y, Lu P, Yang B J, Zhao X P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1672 (in Chinese) [李月, 路鹏, 杨宝俊, 赵雪平 2006 物理学报 **55** 1672]
- [13] Yuan Y, Li Y, Mandic D P, Yang B J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 958
- [14] Wu Y F, Zhang S P, Sun J W, Rolfe P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020511 (in Chinese) [吴勇峰, 张世平, 孙金玮, Peter Rolfe 2011 物理学报 **60** 020511]
- [15] Wu Y F, Zhang S P, Sun J W, Rolfe P, Li Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 100509 (in Chinese) [吴勇峰, 张世平, 孙金玮, Peter Rolfe, 李智 2011 物理学报 **60** 100509]
- [16] Wu Y F, Zhang S P, Sun J W 2010 *Chinese Journal of Scientific Instrument* **31** 161 (in Chinese) [吴勇峰, 张世平, 孙金玮 2010 仪器仪表学报 **31** 161]
- [17] Wu Y F, Zhang S P, Sun J W, Li Z 2011 *Chinese High Technology Letters* **21** 979 (in Chinese) [吴勇峰, 张世平, 孙金玮, 李智 2011 高技术通讯 **21** 979]
- [18] Stone G C 1996 *IEEE Electrical Insulation Magazine* **12** 23
- [19] Gulski E 1995 *IEEE Trans on Dielectric and Electrical Insulation* **2** 822
- [20] Qian Y, Huang C J, Chen C 2007 *Proceedings of the CSEE* **27** 89 (in Chinese) [钱勇, 黄成军, 陈陈 2007 中国电机工程学报 **27** 89]
- [21] Xu J, Huang C J 2004 *Power System Technology* **28** 80 (in Chinese) [徐剑, 黄成军 2004 电网技术 **28** 80]
- [22] Liu W D, Liu S H, Wang L 2007 *High Voltage Engineering* **33** 40 (in Chinese) [刘卫东, 刘尚合, 王雷 2007 高电压技术 **33** 40]

# Study on partial discharge signal detection by coupled Duffing oscillators

Wu Yong-Feng<sup>†</sup> Huang Shao-Ping Jin Guo-Bin

(College of Electrical & Information Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtang 411104, China)

(Received 19 January 2013; revised manuscript received 26 March 2013)

## Abstract

Bidirectional ring-coupled Duffing oscillator has been investigated. A phenomenon is discovered, showing that when one of the oscillators is driven by pulsed signal under certain parameter conditions, this and the other oscillators will suddenly change from synchronization to transient non-synchronization and then rapidly return to synchronization, which is defined as transient synchronization mutation in this paper. This phenomenon is used to accurately detect partial discharge signal in strong noise environments. The experimental tests show that this method achieves good detection effect in low SNR for partial discharge signal of different discharge electrode, which can further extend the weak signal detection range based on Duffing oscillator.

**Keywords:** coupled Duffing oscillator, weak signal detection, transient synchronization mutation, partial discharge pulse signal

**PACS:** 05.45.Xt

**DOI:** 10.7498/aps.62.130505

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: vicwu306@163.com