

DOI: 10.7667/PSPC161840

基于椭圆域分割的触电电流混沌检测方法研究

李春兰, 夏兰兰, 王成斌, 叶豪

(新疆农业大学机械交通学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对从低压电网的总剩余电流中提取触电支路电流的难题, 利用混沌系统对初始条件敏感及对噪声免疫的特性, 提出基于椭圆域分割法的触电电流混沌检测方法。在混沌系统的二维相轨迹图中引入椭圆域分割线, 通过其输出的高低电平表示相轨迹穿越椭圆域分割线的状态, 根据输出的低电平次数定量判别混沌系统所处的状态, 从而实现触电信号的提取。利用待测信号相位和系统状态存在的对应关系, 确定待测信号初相位并修正, 以提高该方法的检测精度。针对 195 组触电信号检测结果表明, 相位修正前、后的检测误差从 32.5% 减小到 4.1%, 检测信噪比由 $[0, -50 \text{ dB}]$ 增加到 $[0, -63 \text{ dB}]$, 所提议的方法能够从包含强噪声的总剩余电流中检测出触电电流, 为新型剩余电流保护装置的开发提供一定的参考价值。

关键词: 混沌振子; 触电信号; 椭圆域分割; 相位检测; 剩余电流保护装置

Study on chaos detection method of electric shock current based on elliptic domain segmentation

LI Chunlan, XIA Lanlan, WANG Chengbin, YE Hao

(College of Mechanical and Traffic, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: It is difficult to exactly detect the electric shock current signal of the human body from the leakage current in the residual current protection of low voltage power network. The chaotic system is sensitive to initial conditions and immune noise. Chaotic detection method based on elliptic domain segmentation method is proposed. Elliptic domain segmentation line is introduced in the two-dimensional phase track diagram of chaos system. The state of the phase trajectory passing through the elliptic domain segmentation line is indicated by the high and low level of the output of the elliptic domain segmentation. According to the number of the low level of the output, the state of the chaotic system is determined quantitatively, so as to realize the extraction of the electric shock signal. According to the relationship between the detecting signal phase and chaos system state, the initial phase of the detecting signal is confirmed and corrected to improve the accuracy of the method. The detection results of 195 groups of electric shock signal show that the detection error of the phase corrected before and after is reduced from 32.5% to 4.1%, SNR range detected is increased from $[0, -50 \text{ dB}]$ to $[0, -63 \text{ dB}]$. Simulation results show that this method can detect weak electric shock current in the summation leakage current containing strong noise. The detecting method is of a certain reference value for developing new generation residual current operation devices.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467021).

Key words: chaotic oscillator; electric shock signal; elliptic domain segmentation; phase detection; residual current protection device

0 引言

在低压电网剩余电流保护中, 剩余电流保护装置在防止人身触电事故或设备漏电事故方面起着重要的作用。但运行实践表明, 当大负荷投入或环境

条件突变时, 剩余电流保护装置常常出现合不上闸或误切电源的现象, 究其根本原因是目前运行的剩余电流保护装置的动作整定值以检测到的总剩余电流(正常漏电电流与故障漏电电流矢量和)达到某一值为依据, 但在一定条件下, 电网漏电事故不一定使总剩余电流增加, 反而会造造成总剩余电流减小, 因此其存在保护动作死区^[1]。为从根本上解决剩余

电流保护装置误切电源和正确投运率低的问题,需开发基于剩余电流和生物体触电电流分量双重动作判据的自适应型剩余电流保护装置,其关键问题是从剩余电流中分离出生物体触电电流。

信息处理和智能技术的发展有力地促进了继电保护的研究^[2-3],也使得触电电流信号检测和识别的研究取得了一定的研究成果。文献[4]利用小波多分辨分析与BP神经网络相结合的方法从剩余电流中分离出触电电流信号,但存在神经元结构过于复杂和BP神经网络训练步数过多等缺陷;文献[5]用RBF神经网络建立了触电信号的检测模型,提高了网络的收敛速度,增强了系统的实时性和稳定性,但神经网络的隐层单元数较难确定、容易陷入局部最优。针对神经网络的这些缺点,文献[6]提出了基于最小二乘支持向量机的触电电流建模方法,减少了训练时间,提高了逼近和泛化能力,但最小二乘支持向量机算法中涉及矩阵求逆,其维数随数据量的增加而增加,增加了算法计算量和内存。文献[7]根据混沌动力学行为具有对小信号敏感,对噪声免疫的特点,提出了基于李雅普诺夫指数的触电电流混沌检测方法,能够检测出触电电流信号,且误差较小,但该方法是根据混沌系统输出的时间序列来估算最大李雅普诺夫指数,计算耗时,导致实时检测性差等问题。上述方法均需要较大的数据量、计算较复杂。针对现有方法的不足,提出一种基于椭圆域分割的触电电流混沌检测方法,该方法利用椭圆域分割器输出的低电平次数判断混沌系统临界状态,从而实现触电电流的检测。

1 基于 Duffing 振子的微弱信号检测方法

1.1 Duffing 振子的数学模型

混沌运动具有遍历性、随机性以及初值敏感的特性^[8-9],Duffing 方程^[10-11]是研究混沌运动常用模型之一,如式(1)。

$$\ddot{x} + \omega k \dot{x} + \omega^2(-x + x^3) = \omega^2 f \cos(\omega t) \quad (1)$$

式中: k 为阻尼比; $-x + x^3$ 为非线性恢复力; f 为混沌系统周期策动力的幅值; ω 为策动力角频率; x 表示混沌信号, \dot{x} 表示混沌信号随时间变化的速率, $x - \dot{x}$ 的关系为混沌系统相轨迹,表征系统随时间运动状态(相)的演变过程^[12]。在参数 k 、 ω 及初始条件固定不变的条件下,随着 f 的逐渐增大,系统相轨迹依次出现同宿轨道、倍周期分岔状态、混沌状态、大尺度周期状态。 f 在一定范围内保持一种状态,其中混沌状态到大尺度周期状态过渡的临界值 f_d 对应的相轨迹称为临界状态。处于临界状态的 Duffing

系统具有对与策动力同频的周期信号敏感和对噪声免疫的特性,利用这种特性可以实现对微弱信号检测^[13]。

1.2 基于 Duffing 振子的微弱信号检测原理

1.2.1 幅值检测方法

设待检测的微弱信号为 $h(t)$ 。

$$h(t) = A \cos((\omega + \Delta\omega)t + \varphi) \quad (2)$$

式中: A 为待测信号的幅值; t 为时间; φ 为待测信号的初相位, $\varphi \in (-180^\circ, 180^\circ)$, 由式(1)可知, φ 也为待测信号与原始策动力的相位差; $\Delta\omega$ 为待测信号与原始策动力的频差。由于生物体触电信号与低压电源频率都为工频 50 Hz, 因此本文中 $\Delta\omega = 0$ 。

将 $h(t)$ 作为新的策动力引入到处于临界状态的原始混沌系统中, 则式(1)演变为

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \omega k \dot{x} + \omega^2(-x + x^3) = \\ \omega^2(f_d \cos(\omega t) + h(t)) = \\ \omega^2 f' \cos(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: f' 为总周期策动力的幅值; θ 为总策动力的初相角。分别如式(4)、式(5)。

$$f' = \sqrt{f_d^2 + A^2 + 2f_d A \cos \varphi} \quad (4)$$

$$\theta = \arctan[A \sin \varphi / (f_d + A \cos \varphi)] \quad (5)$$

由式(4)可知,系统的状态不但与待测信号的幅值有关,还和待测信号与原始策动力间的相位差有关。

(1) 当 $|\varphi| < 90^\circ$ 时,系统从临界状态变为大尺度周期状态,本文称为正向相变。逐渐减小系统内置策动力,使系统从周期状态重新迁移到临界状态,得到策动力幅值 f_{r1} ($f_{r1} < f_d$), 则式(4)变为

$$\sqrt{f_{r1}^2 + A^2 + 2f_{r1} A \cos \varphi} = f_d \quad (6)$$

由式(6)可得

$$A = -f_{r1} \cos \varphi + \sqrt{f_d^2 - f_{r1}^2 \sin^2 \varphi} \quad (7)$$

当 $\varphi = 0^\circ$, 由式(7)可得

$$A_0 = f_d - f_{r1} \quad (8)$$

此时测量误差为

$$e = \frac{A - A_0}{A} \times 100\% = \frac{f_{r1}(1 - \cos \varphi) + \sqrt{f_d^2 - f_{r1}^2 \sin^2 \varphi} - f_d}{-f_{r1} \cos \varphi + \sqrt{f_d^2 - f_{r1}^2 \sin^2 \varphi}} \quad (9)$$

对式(9)关于 $\cos \varphi$ 求导得

$$e' = \frac{f_{r1}(f_d - f_{r1})(f_{r1} \cos \varphi - \sqrt{f_d^2 - f_{r1}^2(1 - \cos^2 \varphi)})}{(-f_{r1} \cos \varphi + \sqrt{f_d^2 - f_{r1}^2(1 - \cos^2 \varphi)})^2 \sqrt{f_d^2 - f_{r1}^2(1 - \cos^2 \varphi)}} \quad (10)$$

分析式(10), 待测信号与系统固有周期策动力的相位差会影响测量误差, 当 $|\varphi| < 90^\circ$ 时, 误差 e 随着 $|\varphi|$ 的增加而增加。

(2) 当 $|\varphi| \geq 90^\circ$ 时, 系统从临界状态进入混沌状态, 称为逆向相变。增大系统内置策动力, 使系统从混沌状态迁移到临界状态, 得到策动力 $f_{r2}(f_{r2} > f_d)$ 。当 $\varphi=180^\circ$, 可得

$$A_0 = f_{r2} - f_d \quad (11)$$

同理推得, 当 $|\varphi| \geq 90^\circ$ 时, 测量误差 e 随着 $|\varphi|$ 的增加而减小。

综上所述, 在检测待测信号幅值时, 若待测信号和系统固有周期策动力相位相同或相反, 则误差最小, 因此在对触电信号检测之前, 应先进行相位修正, 以减小检测误差。

1.2.2 相位检测方法

由式(3)可知, 总周期策动力可看作内置策动力与待测信号的矢量叠加和, 如图1。系统对周期策动力幅度敏感, 显然待测信号与内置策动力的相位差 $|\varphi| < 90^\circ$ 时(图1(a)), 总周期策动力增加, 系统发生正向相变; 当 $|\varphi| \geq 90^\circ$ (图1(b)), 总周期策动力减小, 系统发生逆向相变, 因此可以根据系统相变检测待测信号的相位。

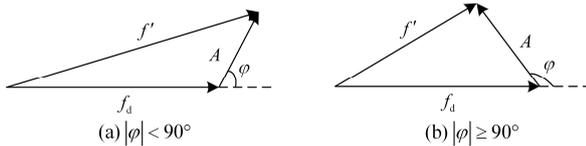


图1 总周期策动力矢量图
Fig. 1 Vector of the total periodic driving force

根据式(4)可知, 可以通过改变待测信号的初相位来改变总策动力的幅值, 当总策动力为 f_d 时, 得到式(12), 系统重新回到临界状态。

$$f_d = \sqrt{f_d^2 + A^2 + 2f_d A \cos \varphi'} \quad (12)$$

由式(12)解得 $\cos \varphi' = -A/(2f_d)$ 。因 $A \ll f_d$ ^[14], 所以 $\varphi' \approx \pm 90^\circ$ 。在策动力与待测信号幅值不变的情况下, 可以将 90° 或 -90° 作为相变的临界点。

相位检测的步骤如下。

(1) 系统发生正向相变, 说明待测信号的初相位 φ 在 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 范围内, 将待测信号的相位逆时针移相, 直到系统发生逆向相变, 记录此时移相增量 $\Delta\varphi$, 如图2(a)中的 φ_1 、 φ_2 , 则 $\varphi_1 = 90^\circ - \Delta\varphi_1$ 、 $\varphi_2 = 90^\circ - \Delta\varphi_2$ 。

(2) 系统发生逆向相变, 说明待测信号的初相位在 $(90^\circ, 180^\circ) \cup (-180^\circ, -90^\circ)$ 范围内, 将待测信号的

相位顺时针移相, 直到系统发生正向相变, 记录移相增量, 如图2(b)中 φ_3 、 φ_4 , 则 $\varphi_3 = 90^\circ + \Delta\varphi_3$ 、 $\varphi_4 = \Delta\varphi_4 - 270^\circ$ 。

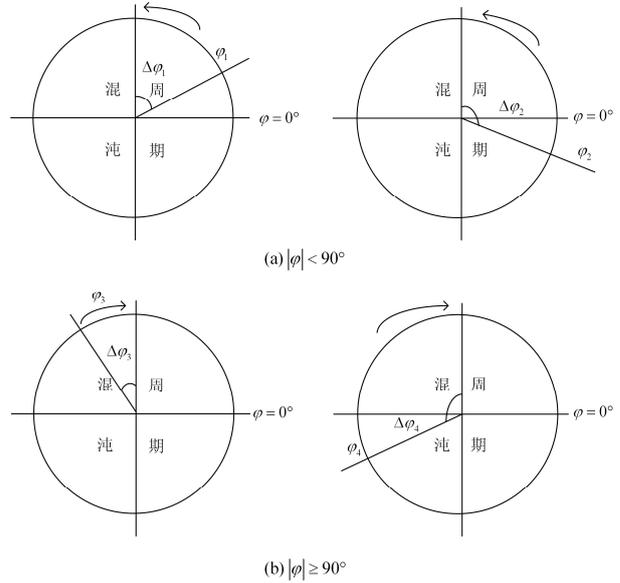


图2 系统状态和信号相位的关系示意图

Fig. 2 Relationship between system state and signal phase

2 基于椭圆域分割的触电信号混沌检测

1.2 节检测触电信号幅值关键在于混沌系统临界状态的正确判别。传统的求取 Duffing 系统临界阈值的方法有: 直接观测的定性法(时序图法和相图法)、Melnikov 函数解析法、Lyapunov 定量法^[15]。直接观测法具有简单直观的优点, 然而光凭肉眼观察, 主观依赖性强, 准确性低且不利于工程实用; Melnikov 方法求解的阈值一般要比实际值小些, 且计算过程复杂, 极易出错^[16-17]; Lyapunov 指数分析法求解算法很多, 各种算法求出的 Lyapunov 指数差别太大, 无法得到其精确值。针对上述三种方法存在的缺陷, 本文提出一种基于椭圆域分割法的阈值求解策略。

2.1 椭圆域分割器及基本思想

针对 Duffing 振子混沌状态和大尺度周期状态的相轨迹特点的截然不同(前者呈杂乱状, 后者呈规则环状), 在 Duffing 振子周期状态时的相轨迹内建立一个尽可能大的与环状轨道不相交的封闭椭圆形区域, 即椭圆域分割器, 将系统相轨迹划分为域内和域外两部分^[18]。椭圆域分割器的输出值反映相轨迹是否穿过椭圆形区域的边界线, 规定用低电平“0”表示 Duffing 振子的相轨迹触及或进入边界线, 反之未进入该边界线的用高电平“1”表示, 则实现了从二维相图到一维时间信号的转换。针对不同的系

统参数及仿真时间, 可以依据椭圆域分割器输出的高低电平次数确定系统的各个状态, 从而实时检测 Duffing 振子是否发生状态迁移。

根据上述思想构建出椭圆区域分割器, 其边界线方程为

$$Out(i) = \begin{cases} 1 & \frac{x_i^2}{a_2} + \frac{y_i^2}{b_2} > 1 \\ 0 & \frac{x_i^2}{a_2} + \frac{y_i^2}{b_2} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: a 为短半轴; b 为长半轴; x_i, y_i 分别为 Duffing 混沌系统的第 i 个采样点的 x 与 \dot{x} 的值, $i=1, 2, \dots, N$, N 为算法数据窗的总采样点数; $Out(i)$ 代表椭圆域分割器的输出。将获得的混沌系统时间序列代入式(13), 通过简单的乘法、加法及比较运算, 便可判别出系统的状态, 相比文献[6]根据系统的时间序列, 应用 C-C 方法进行相空间重构, 再用小数据量法估算系统的最大 Lyapunov 值, 从而判断系统状态, 本文提议的基于椭圆域分割的混沌弱信号检测方法原理简单, 且计算量小。图 3 为椭圆域分割线示意图, 图 4 为椭圆域分割法的判别流程图。

2.2 基于椭圆域分割的混沌判据

根据式(3)、式(13)搭建模型如图 5 所示。

混沌系统参数为: $\omega=100\pi$; $(x, \dot{x}) = (0.5, 0.5)$; $k=0.5$; 策动力幅值迭代步长 $\Delta f=0.0001$; 考虑目前剩余电流保护装置的动作时间不大于 0.1 s, 仿真时间设置为 0.08 s。为了简化椭圆域分割器长、短轴参数的选取, 本文在图 5 中的 \dot{x} 输出增加了 Gain3 模块, 使 \dot{x} 与 x 的取值范围接近。 a, b 的选取原则是在不与环状轨道相交的前提下使椭圆尽可能地大, 本文取 $a=1$; 因 \dot{x} 的值经过模块 Gain3 缩小了 $1/\omega$ 倍, 则 b 也要缩小 $1/\omega$ 倍为 b' , 由图 6 确定 $b'=1$, 得出 $b=134$ 。

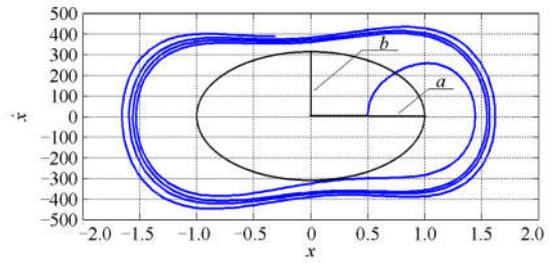


图 3 椭圆域分割线示意图

Fig. 3 Elliptic domain segmentation line

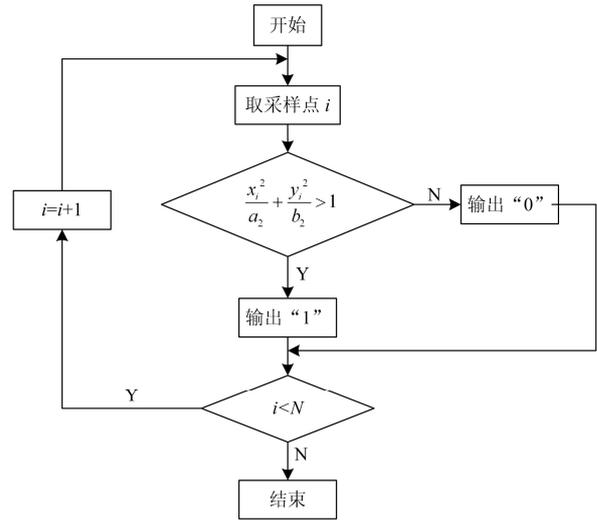


图 4 椭圆域分割器的判别流程图

Fig. 4 Flow chart of the elliptical domain segmentation

原 Duffing 系统在不同状态时椭圆域分割器的输出如图 7。

椭圆域分割器的起始状态为低电平, 不计入低电平的统计中。令 O_l, O_h 分别表示椭圆域分割器输出的低电平次数和高电平次数, 图 8 为系统在不同策动力下, O_l 统计折线图。

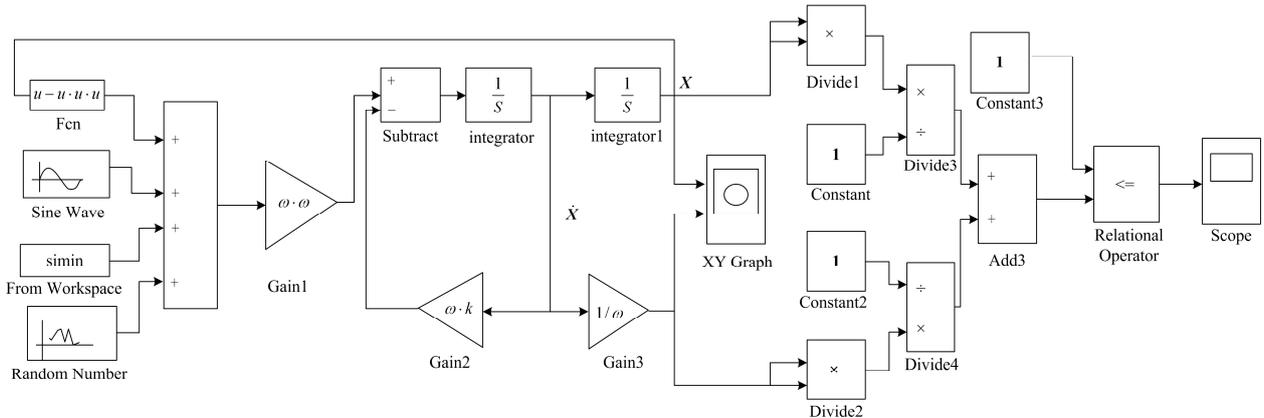


图 5 Duffing 椭圆域分割方法检测系统仿真模型

Fig. 5 Model of detection system based on Duffing elliptical domain segmentation

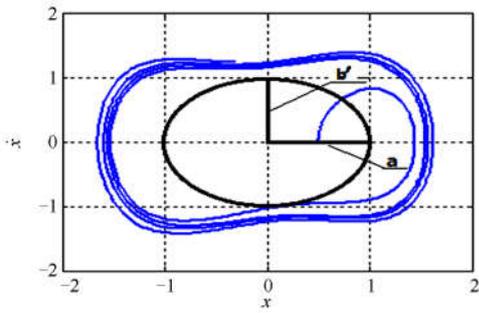
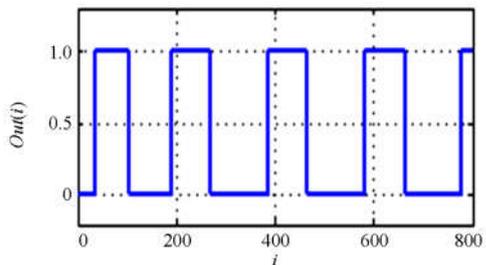
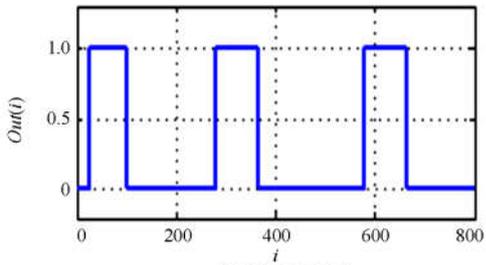


图 6 改进椭圆域分割线

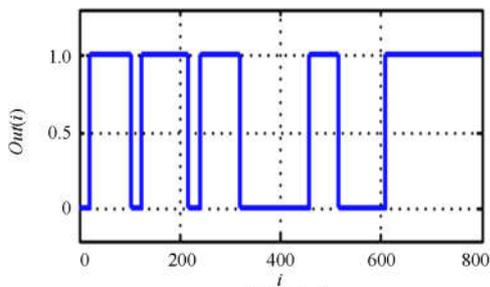
Fig. 6 Suggested elliptic domain segmentation



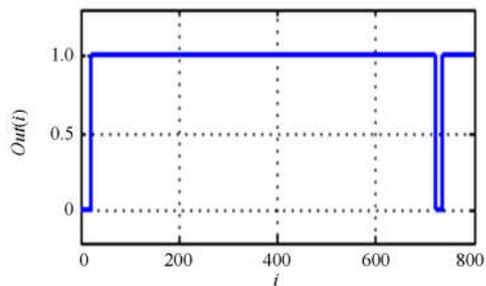
(a) 同宿轨道状态



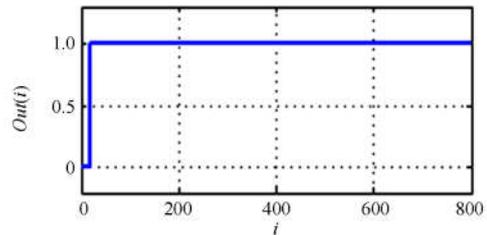
(b) 倍周期分岔状态



(c) 混沌状态



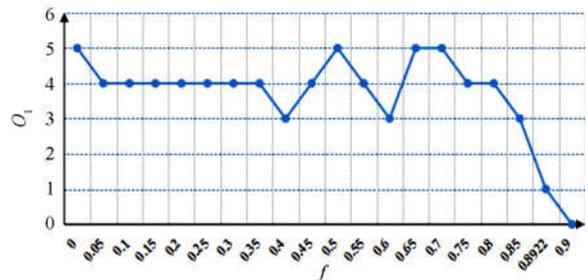
(d) 临界状态



(e) 大尺度周期状态

图 7 系统不同状态下椭圆域分割器的输出

Fig. 7 Output of elliptic domain segmentation under different states of the chaotic system



(注: $0 \leq f < 0.39$, 同宿轨道; $0.39 < f \leq 0.6$, 倍周期分岔; $0.6 < f \leq 0.8921$ 混沌状态; $f = 0.8922$, 临界状态; $f > 0.8923$, 周期状态)

图 8 椭圆域分割器低电平次数统计图

Fig. 8 Statistics on low level of output of elliptic domain segmentation

分析图 7 和图 8 可知:

- (1) 系统在同宿轨道与倍周期分岔状态时, $O_l \geq 2$ 、 $O_h \geq 3$ 。
- (2) 临界状态时, $O_l = 1$ 、 $O_h = 2$ 。
- (3) 大周期状态下, 椭圆域输出为恒定高电平, 无低电平输出即 $O_l = 0$ 、 $O_h = 1$ 。

系统在混沌状态、临界状态和大周期状态对应的椭圆域输出具有不同特征, 因此可以将椭圆域分割器的输出作为混沌状态判据。椭圆域输出的高电平次数与低电平次数均能区分系统的不同状态, 本文以椭圆域输出的低电平次数作为混沌判据标准: $O_l = 0$, 系统为大周期状态; $O_l = 1$, 系统为临界状态; $O_l > 1$, 系统为混沌状态。

2.3 基于椭圆域分割的触电信号混沌检测

本文提议的检测方法的基本思想是: 根据混沌理论, 利用椭圆域分割器输出低电平次数作为判断混沌系统相变的量化依据, 自动识别混沌系统的临界状态、混沌状态、周期状态; 将触电前、后的剩余电流作为新的策动力分别加入到已调整到临界状态的原混沌系统中, 通过相位修正使其与内置策动力的相位相同, 再通过调整内置策动力幅值, 使系统回到临界状态, 记录此时的内置策动力幅值 f'_{t1} 或

f'_{r2} ，利用 f'_{r1} 、 f'_{r2} 即可计算出触电电流的幅值。

具体步骤如下：

(1) 设置原始混沌系统的初始值，利用 2.2 节提议的混沌判据确定临界状态，记录此时的 f ，即为原始混沌系统临界状态的策动力幅值 f_a 。

(2) 将触电前正常剩余电流作为策动力的一部分加入到原始混沌系统中，按照 1.2.2 节的方法，检测出触电前剩余电流初相位，并将之修正为 0° 。

(3) 逐渐减小原始混沌系统的内置策动力幅值，直到 $O_1 = 1$ ，此时的 f 即为原始混沌系统加入低压电网正常剩余电流后临界状态策动力幅值 f'_{r1} 。

(4) 将触电后剩余电流加入到处于临界状态的原始混沌系统中，按照步骤(2)、(3)同样的方法获得系统重新回到临界状态对应的策动力幅值 f'_{r2} 。

(5) 由步骤(3)、(4)的结果计算触电电流的幅值，即 $A = f'_{r1} - f'_{r2}$ 。

3 仿真与验证

3.1 检测样本

选取 195 组触电物理试验获得的猪触电的原始数据作为检测样本。为了比较相位修正对检测结果的影响，取不同初相位的触电信号，选取 0° 、 15° 、 30° 、 \dots 、 180° (间隔 15°)，每种初相位各选取 15 组，并依次编号为 1~195。每组数据中包含的信号有剩余电流、触电电流，截取剩余电流触电前 4 个周期和触电后 4 个周期各 800 个采样点数据。图 9 为几种典型初相角触电情况下剩余电流 $3i_0$ 及相应的触电支路电流 i_t 。

3.2 仿真分析

为了比较触电信号相位修正前、后提议方法的检测结果，将检测样本分别按照 1.2.1 节和 2.3 节提议的检测方法对 195 组触电信号进行检测，结果如表 1 所示。

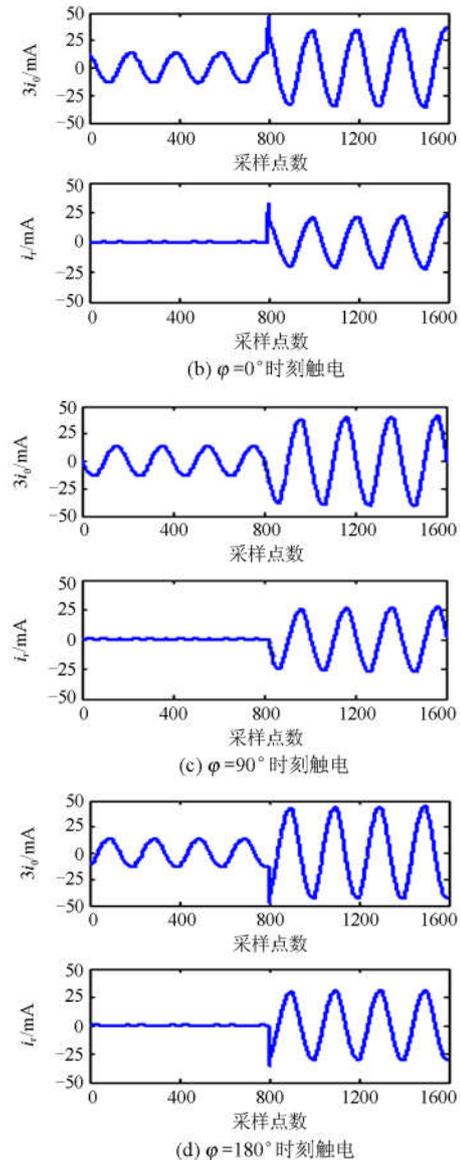
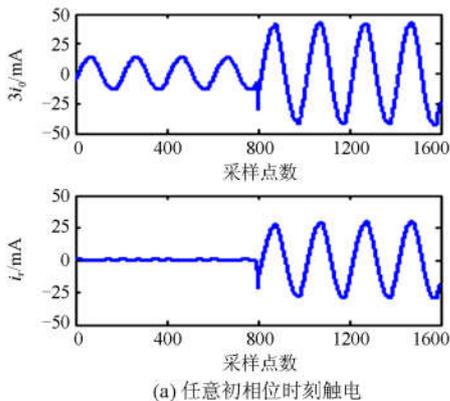


图 9 触电试验原始信号

Fig. 9 Test signal of electric shock

由表 1 可知：

(1) 检测样本不经过相位修正时，检测获得的触电电流幅值的平均检测误差为 32.5%；随着触电时刻初相位与混沌系统内置策动力的相位差的增加，检测误差逐渐增大，检测误差最大可达 97.7%；在触电时刻初相位与混沌系统内置策动力同相或反相时，检测误差很小，平均误差为 0.27%，因此未进行相位修正的检测方法只适用于初相位满足一定条件的触电信号检测。

(2) 经过相位修正后检测获得的触电电流幅值的平均检测误差为 4.1%，每组检测误差均能满足工程计算的要求。

表 1 触电电流幅值检测结果

Table 1 Amplitude of electric shock current detection results

序号	触电时刻 初相位	实际幅 值/mA	相位修正前		相位修正后	
			检测 值/mA	检测误差/% (绝对误差)	检测 值/mA	检测误差/% (绝对误差)
1	0°	35.9	35.8	0.38	34.4	4.2
2	0°	37.8	37.6	0.53	36.3	4.0
3	0°	25.0	24.9	0.40	24.0	4.0
⋮						
46	45°	13.2	7.0	46.97	12.7	3.8
47	45°	32.6	17.6	46.01	31.2	4.3
48	45°	47.1	25.1	46.71	44.6	5.3
⋮						
91	90°	39.1	9.5	75.70	37.6	3.8
92	90°	30.3	7.2	76.23	29.0	4.3
93	90°	29.1	7.8	73.20	27.9	4.1
⋮						
193	180°	38.5	38.6	0.26	36.9	4.2
194	180°	34.9	35.0	0.29	33.5	4.0
195	180°	22.0	22.0	0.00	22.9	4.1

考虑实际剩余电流保护装置安装环境的复杂性,需分析本文提议方法的抗噪能力。按分层抽样的方法,在相同初相位的 15 组数据中随机选取 4 组,则 195 组样本抽取 52 组数据,针对同一幅值的触电电流,加入不同强度的噪声,部分检测结果如表 2 所示。

表 2 不同幅值、不同信噪比情况下触电电流幅值检测结果

Table 2 Electric shock current detection results of the different amplitude and SNR

序号	实际幅 值/mA	信噪比/ dB	相位修正前		相位修正后	
			检测值/ mA	检测 误差/%	检测值/ mA	检测 误差/%
3	25	-5	24.9	0.4	23.9	4.2
		-20	24.7	1.2	23.2	7.4
		-50	24.3	2.8	22.6	9.7
		-63	24.2	3.2	21.9	12.4
46	13.2	-5	6.9	47.7	12.7	3.8
		-20	6.6	50.0	14.1	6.9
		-50	6.2	53.0	11.8	11.0
		-63	*	*	11.5	12.9
91	39.1	-5	9.4	76.0	37.5	4.1
		-20	7.8	80.0	36.7	6.1
		-50	3.3	91.6	34.6	11.5
		-63	*	*	34.4	12.0
194	34.9	-5	34.8	0.3	33.5	4.0
		-20	35.4	1.4	32.9	5.7
		-50	34.1	2.3	31.3	10.3
		-63	34	2.6	30.9	11.5

注: * 表示该信噪比时,检测失效。

由表 2 可知:

(1) 相同幅值情况下,相位修正前后,均是噪声越大检测误差越大。

(2) 检测样本不经过相位修正时,相位是影响检测误差的主要因素,噪声对检测误差的影响较小;检测样本经过相位修正后,在触电电流的强噪声范围内,即[-5 dB, -45 dB],本文提出的方法均能检测出触电电流的幅值。

(3) 本文提出的方法相位修正前适用的信噪比为[0, -50 dB],相位修正后适用的信噪比为[0, -63 dB]。

4 结论

本文提出一种基于椭圆域分割的触电电流混沌检测新方法。利用混沌系统各状态相轨迹与椭圆域分割线的关系构建了基于椭圆域分割的混沌判据,并利用该混沌判据,检测触电电流的初相位、幅值。仿真和计算结果表明:(1) 本文提议的检测方法的平均检测误差为 4.1%,其检测精度及检测速率均能够满足工程计算的要求。(2) 本文提议的检测方法适用于超强噪声背景下的检测,检测信噪比下限为 -63 dB。(3) 本文算法优于文献[6]提出的混沌检测方法,计算简单,计算量小,能实时检测出触电信号。

参考文献

- [1] 蔡志远, 庞佳, 陈廷辉. 基于剩余电流和漏电阻抗的漏电保护方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 61-64.
CAI Zhiyuan, PANG Jia, CHEN Tinghui. Research on method of leakage current protection based on residual current and leakage impedance[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 61-64.
- [2] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 13pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0023-Z
- [3] 王文, 王永刚. 智能电网中故障信号特征的分离采集[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 69-73.
WANG Wen, WANG Yonggang. Separation and acquisition of fault signal characteristics in smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 69-73.
- [4] 李春兰, 苏娟, 杜松怀, 等. 基于小波分析和 BP 神经网络的触电信号检测模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 130-134.
LI Chunlan, SU Juan, DU Songhuai, et al. Detecting model of electric shock signal based on wavelet analysis and BP neural network[J]. Transactions of the CSAE,

- 2010, 26(S2): 130-134.
- [5] 关海鸥, 杜松怀, 李春兰, 等. 基于有限脉冲反应和径向基神经网络的触电信号识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 187-194.
GUAN Haiou, DU Songhuai, LI Chunlan, et al. Recognition of electric shock signal based on FIR filtering and RBF neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 187-194.
- [6] 韩晓慧, 杜松怀, 苏娟, 等. 基于参数优化的最小二乘支持向量机触电流检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 238-245.
HAN Xiaohui, DU Songhuai, SU Juan, et al. Determination method of electric shock current based on parameter-optimized least squares support vector machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 238-245.
- [7] 李春兰, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种新的基于小波变换和混沌理论的触电信号检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 47-52.
LI Chunlan, DU Songhuai, SU Juan, et al. A novel detecting method of electric shock signal based on wavelet transform and chaotic theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 47-52.
- [8] 马迎东, 王文栋, 温强. 基于混沌搜索策略蝙蝠算法的输电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 17-21.
MA Yingdong, WANG Wendong, WEN Qiang. Transmission network planning based on bat algorithm with chaotic search strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 17-21.
- [9] 李兆昉, 刘崇新, 燕并男. 基于混沌理论的电力系统谐波检测[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 18-23.
LI Zhaoyang, LIU Chongxin, YAN Bingnan. Power system harmonic detection based on chaotic theory[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 18-23.
- [10] 李泽彬, 汝改革, 李富强, 等. 基于 Duffing 振子的微弱正弦信号检测[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2015, 30(3): 59-63.
LI Zebin, RU Gaige, LI Fuqiang, et al. Weak sinusoidal signal detecting based on duffing oscillator[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 30(3): 59-63.
- [11] SHI S, XU L Z, GU X M, et al. An innovative detection Method of high frequency BPSK signal with low signal to noise Ratio[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 19(6): 93-99.
- [12] 刘雪峰. 基于混沌理论的弱信号检测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012: 8-10.
LIU Xuefeng. Research on detection of weak signals based on chaos theory[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2012: 8-10.
- [13] 张淑清, 马跃, 李盼, 等. 基于改进的广义谐波小波包分解和混沌振子的小电流接地系统故障选线[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 13-21.
ZHANG Shuqing, MA Yue, LI Pan, et al. Application of improved generalized harmonic wavelet packet decomposition and chaos oscillator to fault line detection in small current grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 13-21.
- [14] 丛超, 胡全义, 王慧武. 一种基于混沌振子的电力系统谐波检测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 7-16.
CONG Chao, HU Quanyi, WANG Huiwu. A new detecting method for harmonics in power system using chaotic oscillator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 7-16.
- [15] 张晓星, 舒娜, 徐晓刚, 等. 基于三维谱图混沌特征的 GIS 局部放电识别[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 249-254.
ZHANG Xiaoxing, SHU Na, XU Xiaogang, et al. GIS partial discharge recognition based on chaos features of the three-dimensional spectra[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 249-254.
- [16] 马东娟, 李玲玲. 接触电阻时间序列的混沌特性识别与预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 57-61.
MA Dongjuan, LI Lingling. Research on chaotic characteristics identification and prediction of contact resistance time series[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 57-61.
- [17] 吴冬梅. 基于达芬振子的微弱信号检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010: 53-57.
WU Dongmei. Research on methodology of weak signal detection based on Duffing oscillator[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010: 53-57.
- [18] 谢永兴, 黄隽, 胡云安, 等. 基于改进圆域分割方法的混沌微弱信号检测[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(6): 511-515.
XIE Yongxing, HUANG Jun, HU Yunan, et al. Chaotic weak signal detection based on improved circle zone partition method[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015, 30(6): 511-515.

收稿日期: 2016-11-05; 修回日期: 2016-11-28

作者简介:

李春兰(1967—), 女, 通信作者, 副教授, 研究生导师, 研究方向为电力系统继电保护、新能源发电及并网技术;

E-mail: lichunlan67@126.com

夏兰兰(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 1542963867@qq.com

(编辑 魏小丽)