

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221929

基于混沌理论的电力系统微弱谐波检测方法研究

孙淑琴^{1,2}, 祁鑫^{1,2}, 袁正海^{1,2}, 李再华³, 唐晓骏³

(1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 地球信息探测仪器教育部重点实验室, 吉林 长春 130026; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 针对微弱谐波信号时频域分析检测方法在宽谱环境噪声较强场景中无法识别目标信号的缺陷, 首先引入混沌系统的随机共振原理, 在信号成分完全未知的情况下, 利用随机噪声增强微弱目标信号进行频率盲检。进一步引入 Duffing 混沌系统, 利用其对特定频率周期信号幅值的极高敏感性和噪声抵抗力, 对检出的各谐波频率分量进行幅值精准检测。在经典随机共振模型的基础上, 通过归一化改进了系统参数。结合 Duffing 混沌系统模型, 设计了实时检测控制策略。通过粒子群寻优算法, 以系统输入输出信号的互相关系数为适应度函数, 寻找最优系统参数。对强随机噪声背景下的多整数谐波与间谐波混叠的谐波信号进行了仿真实验。结果表明, 所提方法能在恶劣的噪声环境中, 实现各谐波分量的无差频率检测与高精度幅值检测。

关键词: 混沌; 归一化随机共振; Duffing 系统; 微弱谐波检测; 噪声

A weak harmonic detection method for a power system based on chaos theory

SUN Shuqin^{1,2}, QI Xin^{1,2}, YUAN Zhenghai^{1,2}, LI Zaihua³, TANG Xiaojun³

(1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. Lab of Geo-Exploration and the Instrumentation Ministry of Education of China, Changchun 130026, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The time-frequency domain analysis and detection method of a weak harmonic signal cannot identify the target signal in a scene which has strong noise in the wide spectrum environment. Thus this paper first introduces a stochastic resonance principle of a chaotic system, and when the signal component is completely unknown, uses random noise to enhance the weak target signal for frequency blind detection. It introduces the Duffing chaotic system further, uses its high sensitivity and noise resistance to the amplitude of specific frequency periodic signals, and accurately detects the amplitude of each harmonic frequency component that has been detected. Using the classical stochastic resonance model, the system parameters are improved by normalization. Combined with the Duffing chaotic system model, a real-time detection control strategy is designed. The particle swarm optimization algorithm is used to find the optimal system parameters by taking the correlation number of input and output signals of the system as the fitness function. Simulation experiments are conducted on harmonic signals with multiple integer harmonics and inter harmonics mixed in a strong random noise background. The results show that the method proposed can achieve accurate frequency detection and high-precision amplitude detection of various harmonic components in harsh noisy environments.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B20109).

Key words: chaos; normalized stochastic resonance; Duffing system; weak harmonic detection; noise

0 引言

当下环境问题与能源危机是困扰人类生活生产

的重大难题, 为此诸如太阳能、风能等清洁能源得以广泛发展。大量清洁能源发电设备接入电网, 在一定程度上减少了传统能源的消耗, 然而也给电网的稳定性带来较大冲击。分布式电源等新能源发电的接入以及电力电子器件的大量应用, 使电力系统的谐波污染问题日益严重^[1]。同时, 电力系统在不

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (U22B20109); 国家电网公司科技项目资助 (5100-202124011A-0-0-00)

对称等非正常状态下运行时, 表征系统故障状态的特征信号通常也表现为多次谐波的混叠形式^[2]。因此, 电力系统中谐波信号的精准检测对治理谐波污染和及时发现系统不正常运行状态具有重要意义。

为将信号处理的多种高效精准算法原理引入到电力系统的谐波处理中, 国内外学者做了多种相关方法的研究工作, 应用最广泛的方法是时频域分析法、小波变换法和希尔伯特-黄(Hilbert-Huang)变换法。经典时频域分析法中, 当微弱故障信号被宽谱强背景噪声淹没时, 频谱重叠现象十分明显, 若对信号信息完全未知, 则滤波器中心频率无法确定, 信号无法提取。而小波变换存在着小波基选取困难、计算量大而难以满足在线监测要求的问题。这些传统的信号检测算法虽然具有严密的算法体系, 但碍于某些宽谱强背景噪声的强混叠现象以及算法本身的复杂度, 在电力系统不断朝综合能源电网方向发展的背景下无法胜任微弱谐波信号检测的任务。

文献[3]以相关检测技术实现自适应正弦滤波来进行微弱谐波检测, 在噪声强度较低时可以实现较高精度的谐波检测, 但当噪声强度增强时, 检测效果急剧降低。文献[4]以改进的新型窗函数和快速傅里叶变换的时频域分析法对电力系统中的微弱谐波检测进行了研究, 实现了谐波幅值、频率较为精准的检测, 但存在窗函数设计繁杂, 频谱重叠严重时无法精准检测的问题。文献[5]提出了基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法, 有效避免了传统希尔伯特-黄变换方法存在的模态混叠问题, 在 20 dB、30 dB 的信噪比下实现了相对误差为 0.057% 的频率识别和相对误差为 3.8% 的幅值识别。文献[6]提出了基于矩阵束和奇异值分解的间谐波检测算法, 实现了较低误差下的间谐波频率检测。文献[7]提出了基于离散傅里叶变换和群组谐波能量回收理论的谐波检测算法, 有效减小了因频谱泄漏而引起的测量误差, 但尚无法消除频率检测误差。在电力系统精准故障诊断以及精密仪器质量检测中, 要求对谐波信号的幅值及频率进行极低误差乃至无差检测, 时频域分析、希尔伯特-黄变换等传统方法的计算精度难以满足检测需求, 经验小波变换等算法在极恶劣信噪比环境下的误差将大幅增大或无法正常计算。

随机共振(stochastic resonance, SR)是意大利学者 Benzi 在 1981 年提出的概念, 该理论指出多稳态非线性系统、微弱周期信号、随机噪声三者达成协同作用时, 随机噪声能使输入信号明显增强^[8]。随机共振原理具有不受噪声频谱分布影响的特点, 在避免设计复杂滤波器的同时, 将噪声这一干扰微弱

信号检测的不利因素转化为增强微弱信号的有利因素, 当系统达成随机共振状态时, 输出频谱的峰值所对应的频率即为目标微弱信号的频率^[9]。同时指出, 随机共振原理可实现单频信号和多频混合信号的盲检^[10]。

Duffing 系统是混沌系统中最为经典的一类系统, 它对特定频率的微弱信号具有超高的敏感性, 对宽谱非周期噪声具有超强的抵抗力, 对周期噪声干扰具有一定的抵抗力^[11]。因此 Duffing 系统凭借其独特的信号处理特征而高度适用于微弱谐波信号的精准识别, 可以胜任在恶劣信噪比下微弱信号的精准识别任务。

本文首次将混沌系统及随机共振原理应用于电力系统微弱谐波信号检测。首先利用随机共振原理在低信噪比背景下对周期信号的敏感性, 无差识别谐波频率。再利用 Duffing 系统对特定频率周期信号幅值的极高敏感性, 对随机共振方法检出的各个谐波频率分量分别进行幅值的精准检测。结果表明, 本文提出的方法可实现谐波频率的无差检测, 并可实现误差不超过 0.08% 的谐波分量幅值检测, 显著提高了电力系统谐波信号识别精度, 大幅降低了可识别的信噪比阈值, 为电力系统微弱谐波检测提供新思路, 也为混沌系统及随机共振原理在电力系统中的应用提供了研究经验。

1 双稳态系统与经典随机共振原理

1.1 经典双稳态系统

双稳态系统拥有两个势阱、两个稳态点及一个不稳定点。在随机共振理论中, 将信号输出抽象为一个粒子在势场和外部作用力下的运动状态, 双稳态系统抽象为人工势场, 输入的含噪信号则抽象为含有随机性的外部作用力。其过程可以描述为一个过阻尼布朗粒子被周期故障信号和噪声信号驱动时, 在非线性系统中的运动^[12]。

双稳态系统在没有信号输入时的非线性对称势函数^[13] $U(x)$ 为布朗粒子所在位置 x 的函数。

$$U(x) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4 \quad (1)$$

式中, a 、 b 均为大于 0 的系统参数。双稳态系统的势函数曲线如图 1 所示。双稳态系统具有两个对称稳定点 $\pm x_m$, x_m 与系统参数 a 、 b 具有如式(2)的关系。

$$x_m = \sqrt{a/b} \quad (2)$$

$x = 0$ 处是双稳态系统的一个不稳定点, 称为垒高, 稳定点与不稳定点之间的势差 ΔU 称为势垒^[13]。

$$\Delta U = a^2/b \quad (3)$$

在信号处理的等效抽象力学模型中, 双稳态系统对信号粒子提供一个非线性外力场 $f(x)$ 。

$$f(x) = -\frac{dU(x)}{dx} = ax - bx^3 \quad (4)$$

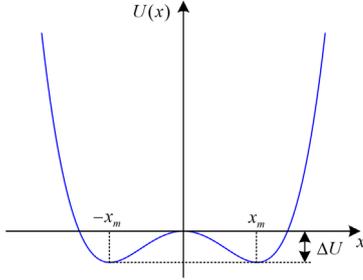


图1 双稳态系统的势函数曲线

Fig. 1 Potential function curve of a bi-stable system

1.2 朗之万方程

受到随机噪声 $n(t)$ 与外部周期驱动力(目标信号) $A \cos \omega_0 t$ 作用的双稳态系统, 其输出特性可以用朗之万方程描述^[13], 如式(5)所示。

$$\frac{dx}{dt} = ax - bx^3 + A \cos \omega_0 t + n(t) \quad (5)$$

式中: A 为周期驱动力幅值; ω_0 为周期驱动力角频率, 且 $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为周期驱动力频率。

由于方程中包含随机噪声项 $n(t)$, 因此朗之万方程是一个非线性随机微分方程, 不存在解析解。

在工程中通常采取四级四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)算法求朗之万方程的数值解^[13], 龙格-库塔算法的计算结果 $x(t)$ 即为通过双稳态系统发生随机共振的输出信号。

四级四阶龙格-库塔方法的迭代格式为

$$\begin{cases} q' = f(p, q) \\ q(p_0) = q_0 \\ q_{n+1} = q_n + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ K_1 = f(p_n, q_n) \\ K_2 = f\left(p_n + \frac{h}{2}, q_n + \frac{h}{2}K_1\right) \\ K_3 = f\left(p_n + \frac{h}{2}, q_n + \frac{h}{2}K_2\right) \\ K_4 = f(p_n + h, q_n + hK_3) \end{cases} \quad (6)$$

式中: h 为龙格-库塔迭代步长; $q' = f(p, q)$ 和 $q(p_0) = q_0$ 为要求解的初值问题; K_1 是时间段开始时的斜率; K_2 是用 K_1 求得的时间段中点的斜率; K_3 是用 K_2 求得的时间段中点的斜率; K_4 是时间段

终点的斜率; q_n 为当前值; q_{n+1} 为下一个迭代值。在本文中, 初值问题为朗之万方程及其初值。

当略去噪声和信号, 得到朗之万宏观方程, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x) \\ f(x) = ax - bx^3 \end{cases} \quad (7)$$

宏观方程中不存在任何随机因素, 对方程取统计平均, 如式(8)所示。

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle = \langle f(x) \rangle = a \langle x \rangle - b \langle x^3 \rangle \neq f(\langle x \rangle) \quad (8)$$

由于 $f(x)$ 为非线性项, 对朗之万方程直接取平均不能得到相对应的宏观方程。因此, 非线性系统同时受噪声和信号的作用时, 会出现无法预测但具有特殊意义的行为, 其中使微弱信号得到增强的现象就是随机共振。

1.3 随机共振效应的解释

在工程中, 通常将宽谱背景噪声建模为均值为 0、强度为 D 的高斯白噪声 $\Gamma(t)$, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} \langle \Gamma(t) \rangle = 0 \\ \langle \Gamma(t) \cdot \Gamma(t + \tau) \rangle = 2D\delta(\tau) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\delta(\tau)$ 为单位冲激函数。

当只有周期信号激励时, 周期信号会影响双稳态系统的势函数, 具体表达式为

$$U(x) = -\frac{1}{2}ax^2 + \frac{1}{4}bx^4 + x[A \cos(\omega_0 t)] \quad (10)$$

双稳态系统的势曲线以信号角频率 ω_0 周期性倾斜, 两个势阱以信号角频率 ω_0 相对于全高周期性上升、下降。此时存在一个双势阱临界幅值 A_c , 如式(11)所示。

$$A_c = \sqrt{\frac{4a^3}{27b}} \quad (11)$$

当 $A > A_c$ 时, 系统无法保持双稳态特征; 当 $A < A_c$ 时, 系统仍保持双稳态特征, 信号粒子只在其中一个势阱中以信号频率 ω_0 做周期运动, 具体在哪个势阱中, 则要视初始条件而定。

当只有随机噪声 $\Gamma(t)$ 激励时, 信号粒子在两个势阱间以 Kramers 逃逸速率 r_k 进行往复跃迁^[14], r_k 由噪声强度和噪声概率分布决定, 如式(12)所示。

$$r_k = \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{a^2}{bD}\right) \quad (12)$$

当噪声与周期信号同时激励双稳态系统时, 系统势阱与信号粒子的运动状态如图 2 所示。双稳态

系统受到微弱周期信号与随机噪声的共同作用, 周期信号引起系统势阱周期性切换, 配合随机噪声引起的粒子周期性跃迁, 使得在 $A < A_c$ 的情况下, 粒子也可以在两个势阱间进行往复跃迁, 并且系统的输出(信号粒子的运动状态)按信号角频率 ω_0 在两势阱间切换(粒子所在位置的周期性切换)。当切换角频率 ω_0 与 Kramers 逃逸速率匹配时, 即满足式(13)时随机噪声引起的系统输出将与微弱周期信号同频, 即随机噪声与微弱周期信号以同周期的形式有序输出, 将噪声的能量转化为微弱周期信号的能量, 使微弱周期信号得到增强, 产生随机共振。

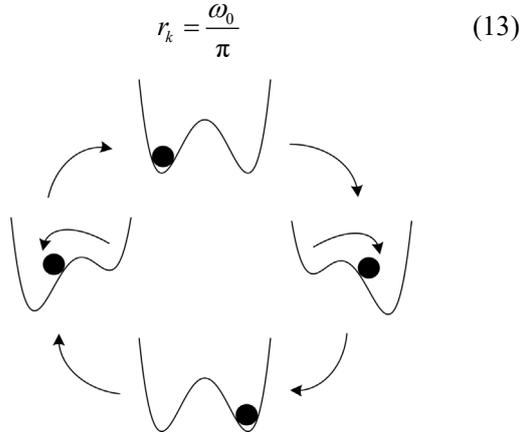


图2 混合信号激励时的系统状态示意图
Fig. 2 Schematic diagram of system state under mixed-signal excitation

2 归一化随机共振算法

经典随机共振算法基于绝热近似理论, 它要求所处理的周期信号频率远小于 Kramers 逃逸速率, 即 $f_0 \ll r_k$, 且周期信号幅值 $A \ll 1$, 同时要求随机噪声强度 $D \ll 1$, 即处理对象必须为低频小参数信号^[15]。然而在电力系统中几乎不存在同时满足低频和小参数的信号, 因此在应用随机共振原理时, 需要对目标信号的幅值和频率进行尺度变换。目前一般采用二次采样与参数归一化两种方法, 二次采样存在采样比难以确定、需设计对应恢复系统等缺点, 无法满足检测系统高效运行的需求, 因此本文采用参数归一化处理方法。

2.1 高频大参数信号归一化方法

对式(5)进行微分变量替换^[16], 即用 z 替换 x , 用 τ 替换 t , 如式(14)所示。

$$\begin{cases} z = \sqrt{\frac{b}{a}}x \\ \tau = at \end{cases} \quad (14)$$

得到归一化参数的朗之万方程, 如式(15)所示。

$$\frac{dz}{d\tau} = z - z^3 + \sqrt{\frac{b}{a^3}} \left[A \cos\left(2\pi \frac{f_0}{a} \tau\right) + \Gamma\left(\frac{\tau}{a}\right) \right] \quad (15)$$

可以看出, 归一化后的信号频率为 f_0/a , 只需要选择一个较大的参数 a 即可将高频信号归一化为低频信号, 再利用随机共振原理进行检测处理。

噪声强度为 D 的高斯白噪声表达式为

$$\Gamma(t) = \sqrt{2D} \xi(t) \quad (16)$$

式中, $\xi(t)$ 为均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声。

对信号进行离散化处理, 实际中零均值白噪声的方差 σ^2 能够从能量角度客观描述白噪声的大小, 而噪声强度 D 受采样步长 λ 的影响, 其关系为

$$D = \frac{\lambda}{2} \cdot \sigma^2 \quad (17)$$

信号原始方差 $\sigma_0^2 = 2D/\lambda$, 归一化后噪声强度为 Db/a^2 , 随着信号频率的降低, 所需采样频率也降低为原来的 $1/a$, 因此归一化后的噪声方差 $\sigma^2 = 2Db/(a^3\lambda)$ 与原始方差存在如式(18)的关系。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{b}{a^3}} \quad (18)$$

可见, 选择合适的参数 a 、 b , 可以使归一化后的信号幅值满足经典随机共振的小参数限制要求。

2.2 针对工况环境的参数范围估计方法

根据工作环境预估目标信号频率与幅值的区间范围, 首先根据信号频率所处区间选择系统参数 a 的取值, 使归一化后的信号频率 f' 满足式(19)。

$$\begin{cases} f' = \frac{f_0}{a} \\ f' \in [0.01, 0.1] \end{cases} \quad (19)$$

在此基础上预估系统参数 b 的取值, 使归一化后的信号幅值 A' 满足式(20)。

$$\begin{cases} A' = \sqrt{\frac{b}{a^3}} \cdot A \\ A' \in [0.1, 1] \end{cases} \quad (20)$$

在对计算精度要求不高的工程环境(如谐波成分均为整次谐波或相邻整次谐波间仅存在一个间谐波)时, 可依靠系统参数的范围可用性, 即 a 取值 100 适用于频率为 1~10 Hz 的目标信号, a 取值 1000 适用于频率为 10~100 Hz 的信号。参数 b 满足式(20)要求的值即可。研究发现, 采用范围估计方法得到的系统参数, 只影响目标信号频谱位置的谱线高低, 不引起频率偏移, 且不影响计算效率, 因此该方法适用于精度要求不高的工程环境。

当工程要求的计算精度很高(如相邻整次谐波间存在多个间谐波或谐波基频低于 10 Hz 使整次谐波间的频率差距较小)时,可采用信号相关性检测理论和寻优算法相结合的策略。通过参数范围估计方法设置初始系统参数,将混沌系统输入信号与输出信号的互相关函数设为寻优的适应性条件,并通过参数范围估计方法给出系统参数的寻优范围,通过执行寻优算法得出针对未知输入信号的最佳系统参数,该参数使混沌系统的输入与输出信号的互相关性达到最大,两个信号的互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 为

$$R_{xy}(\tau) = \langle x(t)y(t+\tau) \rangle \quad (21)$$

为消除信号幅值对互相关函数结果的影响,互相关系数 $\rho_{xy}(\tau)$ 归一化可得

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}} \quad (22)$$

式中, R_{xx} 和 R_{yy} 分别是 x 和 y 的自相关函数。

实际应用中,输入信号中目标谐波信号的频率往往是未知的且为多个,无法计算输出信噪比,同时混杂的通常是随机噪声,互相关函数能够较好地表达输入信号和输出信号之间的波形匹配关系,完全适用于单频及多频未知谐波信号的检测。

2.3 归一化随机共振算法流程

归一化随机共振算法的流程如图 3 所示,首先根据信号环境,采用参数范围估计方法设置系统参数 a 、 b ,将原始信号输入到系统,并进行 $\sqrt{a^3/b}$ 倍的比例缩放,形成朗之万方程。根据信号频率、幅值所在区间的大小及对运算精度的要求,设置龙格-库塔迭代步长,对朗之万方程进行求解得到随机共振处理后的输出信号。

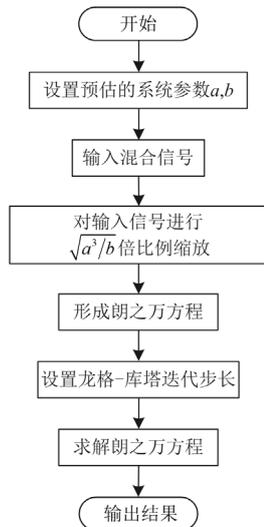


图 3 归一化随机共振算法流程图

Fig. 3 Flowchart of normalized stochastic resonance algorithm

3 Duffing 振子微弱信号检测算法

3.1 Duffing 振子的非线性动力学特性

Duffing 振子是典型的非线性弹簧振子,具有振荡、混沌的典型非线性特征,经典 Duffing 方程描述了 Duffing 振子的运动特性^[17],如式(23)所示。

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + k \frac{d\phi}{dt} - m\phi + n\phi^3 = F \cos \omega_D t \quad (23)$$

式中: ϕ 为振子所处位置; k 为阻尼系数; 非线性项 $-m\phi + n\phi^3$ 为非线性恢复力, m 、 n 为非线性恢复力系数; $F \cos \omega_D t$ 为系统外加线性驱动力, F 为幅值, ω_D 为角频率,且 $\omega_D = 2\pi f_D$, f_D 为频率。

Duffing 系统由非线性与线性两部分组成,其运动状态是非线性力与线性驱动力的博弈过程。在非线形动力学中以“速度-位移”关系描述混沌振子的运动状态,对应的曲线图为相图。

外加驱动力幅值从 0 开始增加, Duffing 振子的相图依次经过小周期运动、分岔、混沌、大周期运动 4 个状态。值得注意的是, Duffing 振子由混沌态向大周期运动态的转化,存在一个驱动力阈值 F_0 ,当驱动力幅值超过阈值时, Duffing 振子会立即进入大周期运动状态,这也是利用 Duffing 振子进行微弱信号检测的关键特征^[17]。

3.2 用于微弱信号检测的 Duffing 方程

相关研究指出, Duffing 振子对噪声具有很强的抵抗力,对与驱动力同频的微弱信号具有极高的灵敏度。Duffing 系统的驱动力混沌阈值 F_0 由系统结构参数 k 、 m 、 n 决定。通常 Duffing 系统的结构参数确定后,通过试验确定驱动力阈值,将驱动力幅值设定为略小于阈值的值,使振子处于混沌态,此时只要有与驱动力同频的微弱信号扰动输入, Duffing 振子就会进入大周期运动态,依据相图形状的转变,确定输入信号中有无与驱动力同频的微弱信号。

由于 Duffing 振子依靠驱动力频率来检测与之同频的微弱信号,因此噪声中任何其他频率的成分都会对检测造成影响。考虑到周期噪声的影响,将 Duffing 方程中驱动力幅值设定为混沌阈值,并采用更高阶的非线性恢复力 $-m\phi^3 + n\phi^5$,进一步提高对目标频率信号的检测灵敏度。改进后的 Duffing 方程如式(24)所示,其中 $S(t)$ 为混合输入信号。

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + k \frac{d\phi}{dt} - m\phi^3 + n\phi^5 = F_0 \cos(\omega_D t) + S(t) \quad (24)$$

3.3 Duffing 方程的物理解释

Duffing 方程的本质是一个受力平衡方程或能量守恒方程,质量惯性项 $d^2\phi/dt^2$ 为牛顿力学中的

质量加速度之积, 即系统所受合力, 表征整个系统的机械能。 $k \cdot (d\phi/dt)$ 为非线性弹簧的弹力, 属于系统内部的弹簧保守力, 表征 Duffing 系统储存的弹性势能。 $-m\phi^3 + n\phi^5$ 为非线性双稳态恢复力, 是系统的位移性保守力, 表征系统的位置势能。 $F_0 \cos \omega_D t$ 为外部对系统施加的临界周期驱动力, 为系统提供周期性的动能。 $S(t)$ 为外部对系统的混合输入力, 遵循外力做功改变动能的牛顿经典力学原理, 为系统提供部分与驱动力同频率的周期驱动力和部分噪声形式的非周期驱动力, 改变系统动能。

Duffing 系统的原理是: 在宏观系统具有确定运动状态的前提下, 一个具有内部保守力的系统在不受外力作用时, 系统的运动状态是由内部保守力作用的结果。随着驱动力的逐渐增大, 驱动力逐渐掌握系统运动的控制权, 混沌临界状态即驱动力完全取得系统运动控制权的临界状态。进入大周期态后, 驱动力将保守力束缚, 强迫其产生与驱动力相同的作用, 此时驱动力以外的力所提供能量的表现形式与驱动力提供的动能相同, 完成了能量形式的转化, 即随机共振现象发生。

3.4 基于 Duffing 振子原理的微弱信号检测算法流程

基于 Duffing 振子原理微弱信号检测算法的流程如图 4 所示。

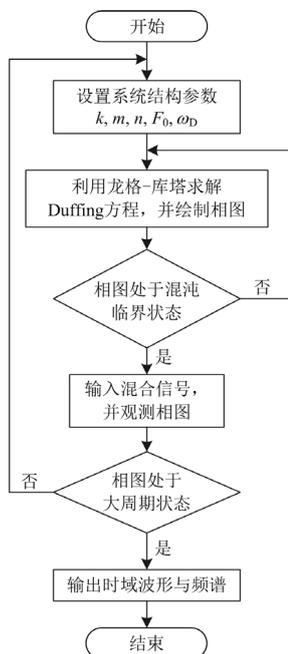


图 4 基于 Duffing 振子原理的微弱信号检测算法流程图
Fig. 4 Flow diagram of weak signal detection algorithm based on Duffing oscillator principle

3.5 实时检测控制策略

为消除运算时间对算法实时性的影响和检测的

真空期, 设计双检测通道, 通过时间戳机制控制各通道错时检测, 两个通道的检测时间覆盖完整的时间线, 消除了检测真空期。

设置合适且固定的信号采集片段, 在通道 1 执行检测算法的同时, 通道 2 继续保持对信号的采集, 通道 1 检测完毕后立刻开始对下一信号片段进行采集, 同时通道 2 开始对通道 1 执行算法期间采集的信号片段进行检测。重复这一过程, 便可消除运算时间对算法实时性的影响, 该控制策略的原理流程如图 5 所示。

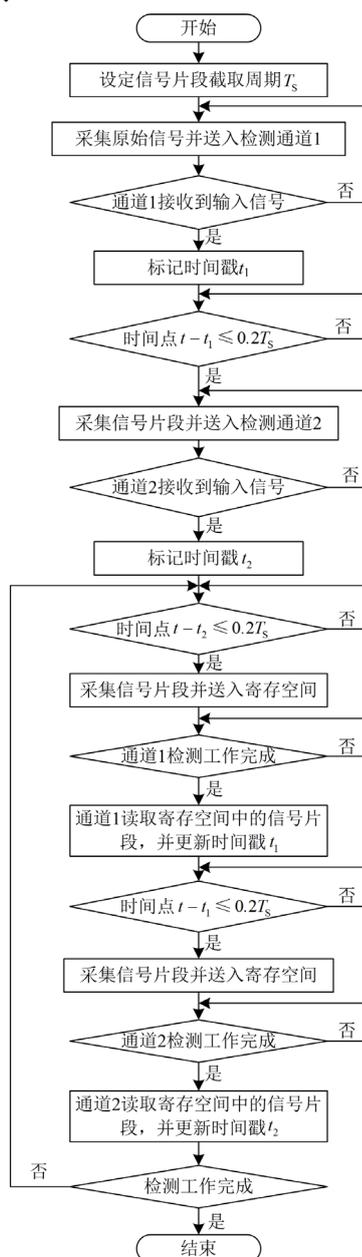


图 5 检测系统的实时检测控制策略流程图
Fig. 5 Flow chart of real-time detection control strategy of detection system

4 仿真分析

4.1 微弱谐波信号的频率检测仿真结果

采用文献[5]中的电力系统微弱谐波信号 $x(t)$ 作为目标信号, 其中角频率 $\omega = 2\pi f$, 基波分量频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 。

$$x(t) = \sin(\omega t) + 0.15 \sin(2.2\omega t) + 0.25 \sin(3\omega t) + 0.2 \sin(5\omega t) + 0.1 \sin(7\omega t)$$

由信噪比 S_{NR} 与信号方差 $V_{ar}(x)$ 确定高斯白噪声的噪声强度 D , 如式(25)所示。

$$D = \sqrt{\frac{V_{ar}(x)}{10^{S_{NR}/10}}} \quad (25)$$

采用信噪比为 -20 dB 、对应噪声强度 D 为 7.5351 的噪声环境。无噪谐波信号时域波形及幅频谱图如图 6 所示。目标谐波信号的波形及频谱分布情况为: 基频信号的能量占据大部分, 7 次谐波成分占据的能量最小。

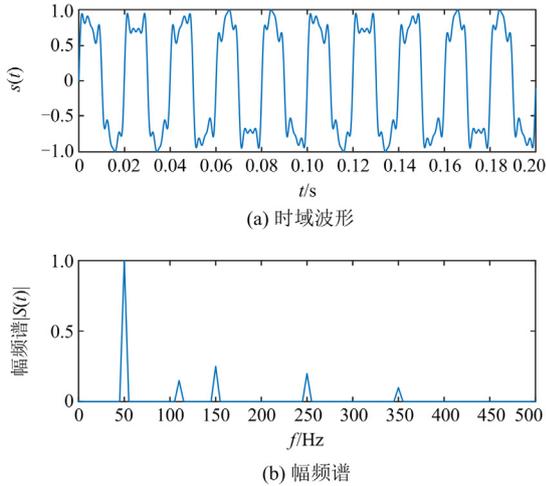


图 6 无噪谐波信号的时域波形与幅频谱

Fig. 6 Time domain waveform and amplitude spectrum of noiseless harmonic signal

引入噪声后的谐波信号时域波形及幅频谱如图 7 所示。在 -20 dB 噪声水平下, 信号的频率成分无法辨别, 小波变换的方法无法应对。信号的频率成分均为高频, 需使用归一化随机共振方法处理。

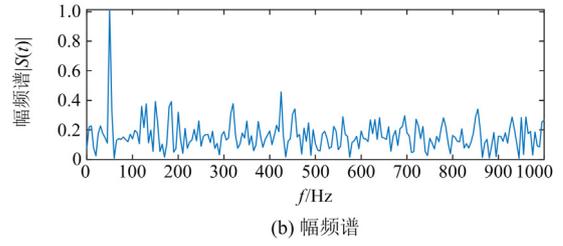
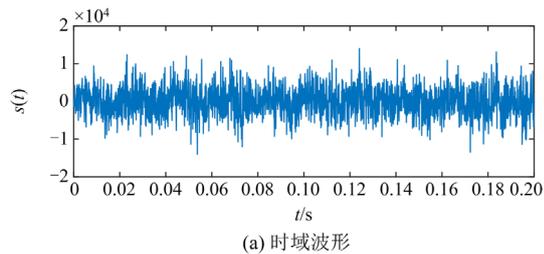


图 7 含噪谐波信号的时域波形与幅频谱

Fig. 7 Time domain waveform and amplitude spectrum of noisy harmonic signals

利用粒子群优化算法^[18], 将输入输出信号的互相关系数作为适应度函数^[19], 得到随机共振系统参数 $a = 1361.8$, $b = 1552.7$, 归一化随机共振方法输出信号的波形及幅频响应如图 8 所示, 信号时域波形得到了较大程度还原, 且经随机共振处理后信号的基频及各次谐波频率清晰可辨, 分别为 50 、 110 、 150 、 250 、 350 Hz 。

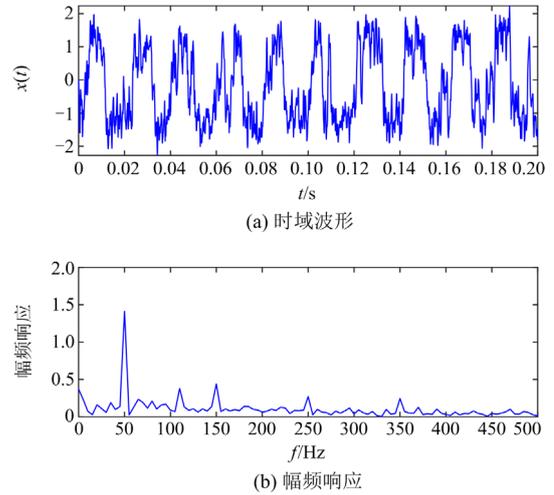


图 8 归一化随机共振处理后的谐波信号波形与幅频响应
Fig. 8 Normalize the waveform and amplitude-frequency response of harmonic signals after stochastic resonance processing

分别在信噪比为 -10 dB 、 -20 dB 的情况下, 对本文方法的噪声鲁棒性进行分析, 不同信噪比下稳态谐波的频率检测结果如表 1 所示。

表 1 稳态谐波频率检测结果

Table 1 Steady-state harmonic frequency detection results

谐波次数	频率				
	理论值/ Hz	SNR 为 -10 dB		SNR 为 -20 dB	
		检测值/Hz	误差/%	检测值/Hz	误差/%
基波	50	50	0	50	0
2.2	110	110	0	110	0
3	150	150	0	150	0
5	250	250	0	250	0
7	350	350	0	350	0

可以看出, 本文方法可做到稳态谐波频率的无差检测, 具有极强的噪声鲁棒性, 相较于文献[5]的经验小波变换方法, 可极大地提高谐波频率的检测精度, 同时可适应更恶劣的噪声环境, 保证了谐波频率的可靠检出, 弥补了电力系统中微弱谐波信号频率检测方法的不足。

4.2 微弱谐波信号的幅值检测仿真结果

随机共振原理在检出微弱周期信号的同时, 将部分噪声能量转化为信号的能量, 会导致信号幅值失真^[20]。因此通过归一化随机共振处理后, 若要得到各谐波分量的幅值, 需要借助 Duffing 混沌系统。

Duffing 系统进行信号检测前须进行混沌调试, 将其驱动力幅值 F 从 0 开始增加, 各方程系数取 $k=0.5$, $m=n=1$, 系统的位移、速度初值设定为 $\phi_0=1$, $\phi'=1$, 将驱动力频率分别设定为各次谐波频率。

当 $F=0$ 时, Duffing 系统处于小周期运动态, 系统相图如图 9 所示。

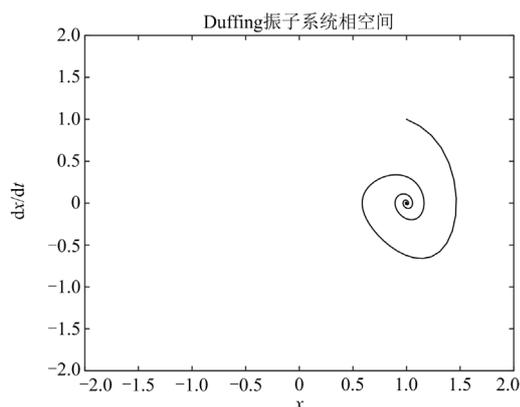


图 9 $F=0$ 时的小周期运动态相图

Fig. 9 Phase diagram of the small period motion state at $F=0$

当 $F=0.38$ 时, Duffing 系统处于分岔运动态, 系统相图如图 10 所示。

当 $F=0.5137$ 时, Duffing 系统开始进入混沌运动态, 系统相图如图 11 所示。

经实验测试, 当 $F=0.827608$ 时, Duffing 系统处于混沌临界态, 相图如图 12 所示, 此时的 Duffing 系统具有 10^{-6} 的检测精度。

Duffing 混沌系统对白噪声等类型的非周期噪声抵抗力较强, 对周期干扰的抵抗力稍弱^[21], 但 Duffing 混沌系统的检测精度很高, 在信号强度很低的情况下依旧能够可靠检出, 因此将信号进行 1000 倍的线性比例缩放后, 作为扰动输入, Duffing 系统相轨迹进入大周期运动态。

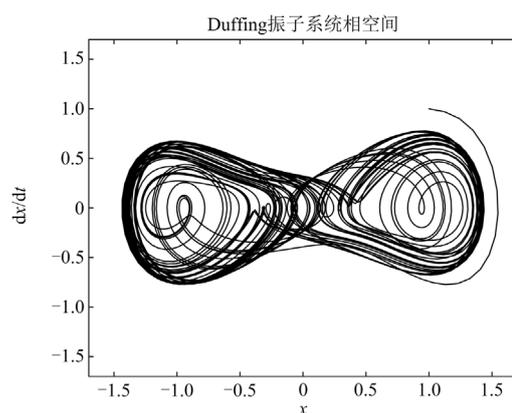


图 10 $F=0.38$ 时的分岔运动态相图

Fig. 10 Phase diagram of the bifurcation motion state at $F=0.38$

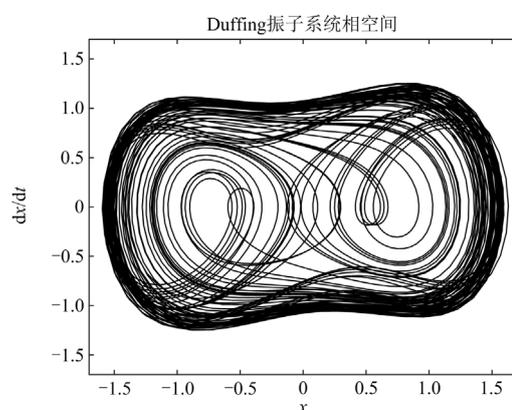


图 11 $F=0.5137$ 时的混沌运动态相图

Fig. 11 Phase diagram of the chaotic motion state at $F=0.5137$

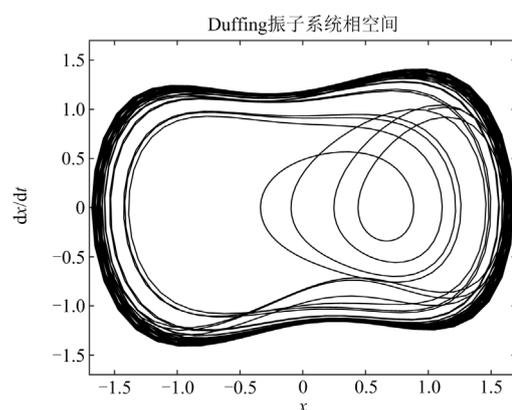


图 12 $F=0.827608$ 时的混沌临界态相图

Fig. 12 Phase diagram of the chaotic critical state at $F=0.827608$

以频率 50 Hz 的驱动力为例, 将经过比例缩放后的微弱谐波信号 $0.001x(t)$ 输入 Duffing 系统, 混合信号的信噪比为 -20 dB, Duffing 系统进入大周期运动态, 系统相图如图 13 所示。

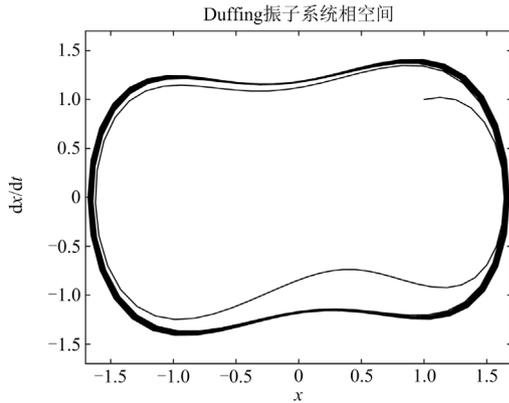


图 13 输入含噪微弱谐波信号扰动后的系统大周期运动态相图
Fig. 13 Input the large-period phase diagram of the system after disturbance of a noisy weak harmonic signal

Duffing 系统进入大周期运动态后, 以 10^{-7} 为步长缩减驱动力, 并重新计算相轨迹, 当 Duffing 系统重新进入混沌临界态时, 将当前驱动力与初始驱动力的差值进行 1000 倍比例放大, 即可得到谐波信号的幅值。

在信噪比为 -10 dB、-20 dB 的噪声环境下, 经本文方法的处理分析, 得到的稳态谐波幅值检测结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 通过归一化随机共振方法得到谐波信号的准确频率成分后, 利用 Duffing 系统, 可实现谐波各分量幅值的精准检测, 即使在 -20 dB 噪声环境下, 依然可保证幅值检测误差不超过 0.08%。

4.3 混沌原理方法与传统方法的性能对比

混沌系统应用于微弱信号检测领域的初衷, 是

表 2 稳态谐波幅值检测结果

Table 2 Steady-state harmonic amplitude detection results

谐波次数	理论值/ p.u.	幅值			
		SNR 为 -10 dB		SNR 为 -20 dB	
		检测值/p.u.	误差/%	检测值/p.u.	误差/%
基波	1.00	1.0001	0.010	1.0001	0.01
2.2	0.15	0.1501	0.067	0.1500	0
3	0.25	0.2500	0	0.2498	0.08
5	0.20	0.1999	0.050	0.2000	0
7	0.10	0.1000	0	0.1000	0

在极低信噪比的情况下, 确保微弱信号能够准确、灵敏地检出, 同时克服传统滤波算法在宽谱强背景噪声下难以准确运行的困难^[22]。但为了体现混沌系统在微弱谐波检测中的出众性能, 在信噪比为 30 dB 和 20 dB 的情况下, 与经验小波变换的方法进行对比, 幅值检测结果数据对比如表 3 所示, 频率检测结果数据对比如表 4 所示。同时将本文提出的方法与文献[5]中提到的经典方法在检测实时性方面进行对比, 在 Matlab 编辑器中使用 tic、toc 进行计时, 计算时间对比如表 5 所示。结果表明, 本文方法可实现远低于经验小波变换方法的弱谐波幅值检测误差, 消除了经验小波变换方法中的谐波频率检测误差, 实现无差检频, 对降低电力系统检测设备的检测阈值、精密继电保护设备设计以及事故精确诊断等具有重要意义。相较于传统算法, 该方法计算效率适中, 且适用于极低信噪比下的未知微弱谐波信号检测。

表 3 稳态谐波幅值检测结果对比

Table 3 Comparison of steady-state harmonic amplitude detection results

谐波次数	理论值/p.u.	幅值					
		SNR 为 30 dB			SNR 为 20 dB		
		本文检测值/p.u.	本文检测误差/%	经验小波误差/%	本文检测值/p.u.	本文检测误差/%	经验小波误差/%
基波	1.00	1.00	0	0.120	1.00	0	0.270
2.2	0.15	0.15	0	0.867	0.15	0	1.867
3	0.25	0.25	0	0.200	0.25	0	0.360
5	0.20	0.20	0	0.100	0.20	0	1.550
7	0.10	0.10	0	1.000	0.10	0	3.800

表 4 稳态谐波频率检测结果对比

Table 4 Comparison of steady-state harmonic frequency detection results

谐波次数	理论值/Hz	频率					
		SNR 为 30 dB			SNR 为 20 dB		
		本文检测值/Hz	本文检测误差/%	经验小波误差/%	本文检测值/Hz	本文检测误差/%	经验小波误差/%
基波	50	50	0	0.007	50	0	0.014
2.2	110	110	0	0.034	110	0	0.054
3	150	150	0	0.017	150	0	0.005
5	250	250	0	0.004	250	0	0.022
7	350	350	0	0.005	350	0	0.057

表 5 检测算法实时性对比

Table 5 Real-time comparison of detection algorithms

s

方法	经验小波变换	加窗插值 FFT	VMD	EEMD	本文方法
耗时	0.0105	0.1032	2.3814	7.5216	3.7293

5 结论

本文将归一化随机共振原理与 Duffing 混沌系统相结合应用于电力系统微弱谐波检测, 主要结论如下:

1) 归一化随机共振算法在合理选择系统参数后, 可实现对高频多次微弱谐波信号的精准频率识别, 并实现各次谐波频率的无差识别, 有效解决了经典时频域分析法中的频率混叠及超低信噪比下的精准检测难题。

2) Duffing 混沌系统具有极高的幅值检测灵敏度与很强的噪声抵抗力, 实现了在较低信噪比下微弱谐波信号幅值的超低误差检测, 有效避免了经典时频域分析方法的检测失真问题。

3) 依托随机共振原理对频率的严苛敏感性与 Duffing 混沌系统对幅值的严苛敏感性, 使微弱谐波信号的各特征量在与基频分量无相位差的状态下得到近乎完美的还原。

在算法实时性方面存在的缺点可采用本文 3.5 节中提到的控制策略从软件层面解决, 或将朗之万方程和 Duffing 方程采用模拟运算电路的方法实现, 也可大大降低计算时间, 这将是未来的研究方向, 本文更着重于研究混沌理论在电力系统运行维护领域中的应用前景。此外, 当谐波信号中存在与基频分量有相位差的谐波分量时, 单一 Duffing 混沌系统的检测效能下降, 存在一个相位响应区间。未来计划对 Duffing 系统的非线性恢复力及阵列拓扑^[23]进行分析, 进一步完善基于混沌理论的电力系统微弱谐波检测方法。

参考文献

- [1] 贾茜琳. 分布式光伏发电系统的谐波分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
JIA Xilin. Harmonic analysis of distributed photovoltaic generation system power[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [2] 吴瀚, 徐海亮, 张利, 等. 弱电网下含负序控制的双馈风机阻抗建模及关键致稳因素评估[J/OL]. 高电压技术: 1-13[2022-12-05]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220622>.
WU Han, XU Hailiang, ZHANG Li, et al. Impedance modeling and key stabilizing factor evaluation of DFIG-

- based wind turbines with negative sequence control during weak power grid[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-13[2022-12-05]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220622>.
- [3] 李星辰. 正弦弱信号的自适应检测方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
LI Xingchen. Research on the adaptive detection method of weak sinusoidal signal[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [4] 温和. 新型窗函数与改进 FFT 谐波分析方法及应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
WEN He. Study on new windows and improved FFT-based harmonic analysis methods and applications[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [5] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.
WU Jianzhang, MEI Fei, CHEN Chang, et al. Harmonic detection method in power system based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 136-143.
- [6] 陶顺, 郭傲, 刘云博, 等. 基于矩阵束和奇异值分解的间谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 57-64.
TAO Shun, GUO Ao, LIU Yunbo, et al. Interharmonic detection algorithm based on a matrix pencil and singular value decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 57-64.
- [7] 商立群, 许海洋, 臧鹏, 等. 基于 DFT 和群组谐波能量回收理论的谐波与间谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 91-98.
SHANG Liqun, XU Haiyang, ZANG Peng, et al. A harmonic and interharmonic detection algorithm based on DFT and group harmonic energy recovery theory[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 91-98.
- [8] 陈大全. 基于随机共振微弱信号检测方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
CHEN Daquan. Research on weak signal detection method based on stochastic resonance[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2021.
- [9] 陈敏, 胡芑庆, 秦国军, 等. 参数调节随机共振在机械系统早期故障检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 131-135.
CHEN Min, HU Niaoqing, QIN Guojun, et al. Application

- of parameter-tuning stochastic resonance for detecting early mechanical faults[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(4): 131-135.
- [10] 罗琦, 朱敏, 韦香. 多频信号的自适应随机共振检测方法[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2013, 59(3): 260-266. LUO Qi, ZHU Min, WEI Xiang. Adaptive stochastic resonance in multiple frequency signal detection method[J]. *Journal of Wuhan University (Science Edition)*, 2013, 59(3): 260-266.
- [11] 唐登平, 汪应春, 余鹤. 基于 Duffing 振子的电网电力线宽带载波检测[J]. *电子设计工程*, 2020, 28(18): 144-147, 152. TANG Dengping, WANG Yingchun, YU He. Broadband carrier detection of power line based on Duffing oscillator[J]. *Electronic Design Engineering*, 2020, 28(18): 144-147, 152.
- [12] 付华, 王婧羽. 基于 SR-VMD 的微弱故障行波检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(1): 156-162. FU Hua, WANG Jingyu. Weak fault traveling wave detection method based on SR-VMD[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(1): 156-162.
- [13] 胡芑庆, 温熙森, 陈敏. 随机共振原理在强噪声背景信号检测中的应用[J]. *国防科技大学学报*, 2001, 23(4): 40-44. HU Niaoqing, WEN Xisen, CHEN Min. The application of stochastic resonance theory for detecting weak signals in heavy background noise[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2001, 23(4): 40-44.
- [14] 陆思良. 基于随机共振的微弱信号检测模型及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015. LU Siliang. Models and applications of stochastic resonance-based weak signal detection[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [15] 冷永刚, 王太勇, 李瑞欣, 等. 变尺度随机共振用于电机故障的监测诊断[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(11): 115-119. LENG Yonggang, WANG Taiyong, LI Ruixin, et al. Scale transformation stochastic resonance for the monitoring and diagnosis of electromotor faults[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(11): 115-119.
- [16] 赵雅琳, 赵兴勇, 宋丽. 随机共振在谐振接地系统故障选线中的应用[J]. *自动化与仪表*, 2020, 35(10): 1-4. ZHAO Yalin, ZHAO Xingyong, SONG Li. Application of stochastic resonance in fault line selection of resonant grounding system[J]. *Automation and Instrumentation*, 2020, 35(10): 1-4.
- [17] 聂春燕. 混沌理论及基于特定混沌系统的微弱信号检测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006. NIE Chunyan. Research on the weak signal detection method based on the chaos theory and specific chaotic system[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [18] 蔡瑞, 须文波, 柴志雷, 等. 粒子群优化算法的硬件实现及其性能分析[J]. *计算机工程*, 2010, 36(4): 166-168. CAI Rui, XU Wenbo, CHAI Zhilei, et al. Hardware implementation and capability analysis of particle swarm optimization algorithm[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(4): 166-168.
- [19] YANG Zhen, LI Zhiqian, ZHOU Fengxing, et al. Weak fault feature extraction method based on improved stochastic resonance[J]. *Sensors*, 2022, 22(17): 6644.
- [20] 高子艺, 林昊晟, 钟奕, 等. 基于非线性双稳系统的混沌共振实验[J]. *物理实验*, 2022, 42(6): 1-7, 13. GAO Ziyi, LIN Haosheng, ZHONG Yi, et al. Chaotic resonance experiment in nonlinear bistable system[J]. *Physical Experiment*, 2022, 42(6): 1-7, 13.
- [21] 孙文军, 芮国胜, 张驰, 等. 混沌检测系统对噪声的免疫性分析及稳健建模[J]. *电子科技大学学报*, 2017, 46(3): 492-497. SUN Wenjun, RUI Guosheng, ZHANG Chi, et al. Analysis on noise immunity of chaotic detection system and robustness modeling approach[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2017, 46(3): 492-497.
- [22] 郭龙飞. 微弱信号检测方法及应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. GUO Longfei. Research on weak signal detection method and its application[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [23] 孙文军, 芮国胜, 陈强, 等. 基于 Duffing 振子的弱信号初始相位同步算法[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(7): 210-214, 240. SUN Wenjun, RUI Guosheng, CHEN Qiang, et al. The weak signals' chaotic phase synchronization algorithm based on Duffing oscillator[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(7): 210-214, 240.

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-04-14

作者简介:

孙淑琴(1969—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统建模及仿真计算技术; E-mail: sunsq@jlu.edu.cn

祁鑫(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统建模及仿真计算技术; E-mail: xinqi21@mails.jlu.edu.cn

李再华(1974—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析、电能质量评估与治理。

E-mail: lizaihua@epri.sgcc.com.cn

(编辑 周金梅)