

DOI: 10.7667/PSPC161011

## 触电事故特征改进近似熵检测方法

熊晓祎, 肖先勇, 左金威, 黄勇, 赵恒

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为了有效减少人身触电事故的发生, 针对低压系统, 给出一种基于近似熵的触电特征快速检测方法。利用滑动时间窗计算单通道测量所得总剩余电流的近似熵值。根据近似熵变化规律识别触电事故特征。并针对近似熵算法存在的计算冗余问题, 提出一种改进近似熵算法, 以此减少触电特征检测时间。对 IEC 人体电阻抗模型、实验用兔和小树枝进行低压实验, 并利用数据验证该方法。结果证明, 触电特征近似熵检测方法具有噪声鲁棒性、不受总剩余电流幅值和触电方式影响的特点, 采用改进近似熵算法缩短了触电特征检测时间, 能满足工程应用需要。  
**关键词:** 剩余电流保护技术; 触电事故电流; 近似熵; 事故检测; 触电特征

### Electrical shock feature detection method based on improved approximate entropy

XIONG Xiaoyi, XIAO Xianyong, ZUO Jinwei, HUANG Yong, ZHAO Heng

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Aiming at reducing the frequency of the electrical shock faults in low voltage power system, approximate entropy (ApEn) based electrical shock feature method is proposed. Firstly, it samples a total residual current from a single-channel and slides a time window continuously to calculate the ApEn in every target period. Then, it determines whether the electrical shock fault happens by identifying the varying tendency of ApEn. Considering the redundant operation in the present algorithm, it proposes an improved algorithm to reduce the time consumption of electrical shock feature detection. Finally, physical experiment about IEC body impedance model, experimental rabbits and sprays is made and verified by using the data. The result shows that the method is of noise robustness, and also independent of amplitude of the total residual current and the way of electric shock. Moreover, the proposed algorithm shortens the detection time of electric shock feature, meeting the need of engineering application.

This work is supported by Science and Technology Department of Sichuan Province, China (No. 2015RZ0055).

**Key words:** residual current protection technology; electrical shock current; approximate entropy; fault detection; electrical shock feature

## 0 引言

电能在日常生活和工作中得到了广泛利用, 因触电事故造成的人身伤害成为工业界和学术界关注的重要课题。低压配网中大量采用剩余电流保护装置<sup>[1-2]</sup>, 能在发生触电的瞬间切除电源, 保护人身安全。但是, 由于现有保护装置主要根据触电电流的大小或变化量动作, 不能准确判断生命体或非生命体触电, 人身安全保护的動作正确率较低<sup>[1-4]</sup>。信号存在独有的特征<sup>[5-7]</sup>, 理论上, 利用生命体和非生命

体电阻抗的特征差异可以识别生命体触电, 但由于保护装置安装在电网侧, 可生命体电阻抗特性在检测所得总剩余电流中非常微弱, 且易受测量噪声、自然漏电流、环境因素、电网运行方式等影响, 使生命体触电特征检测成为了仍待解决的难题<sup>[1]</sup>。为使保护装置能有效检测生命体触电事故, 研究检测电流中生命体触电事故特征提取方法, 具有重要的理论价值和工程意义。

近年来, 国内外学者对触电事故特征检测开展了大量研究, 提供了宝贵思路<sup>[1,8-12]</sup>。特波法是一种基于经验的方法, 根据触电波形一致性进行检测, 但受触电时刻、谐波和噪声等影响; 为此, 神经网络

基金项目: 四川省科技支撑计划 (2015RZ0055)

络法、支持向量机法和局部均值分解法等以触电电流幅值为依据对经验法进行了改进,但由于样本依赖性,当触电方式、线路参数等改变时,难以准确判断触电事故。生命体与非生命体之间电阻抗特征的差异,是检测触电事故的重要物理依据,电阻抗法是一种基于物理特征的方法。文献[11-12]证明,生命体电阻抗具有复杂性,其中,频散特性是区分生命体和非生命体触电的有效特征<sup>[11,13]</sup>,但算法难度大,应用困难。因此,研究简单、有效地从总剩余电流中提取生命体触电特征的方法,是触电事故特征检测的关键。

事实上,相对于生命科学和医学研究中的电压和电流,供电网具有电压高,电流大,正常电频率为 50 Hz 工频的特点。保护装置从电网侧检测到的总剩余电流是自然漏电流和触电电流的总和,受自然环境、用电行为等多因素影响,其中包含的生命体触电特征具有复杂性和不规则性,易受噪声影响。因此,有效的生命体触电特征提取方法应能刻画其复杂性和不规则性,满足抗噪抗扰性要求。

近似熵(Approximate Entropy, ApEn)是一种时序信号复杂性和不规则性的测度<sup>[14]</sup>,具有抗噪抗扰性和实时性强,信号幅值不相关的特点,在医学检验、气象预报、电力故障选线等领域已得到应用<sup>[14-18]</sup>。本文以近似熵作为度量检测电流中生命体触电特征的测度,以保护装置检测所得单通道总剩余电流为检测电流,基于近似熵原理研究提取生命体触电特征的近似熵方法,并对改进近似熵算法进行了详细研究,提出基于改进近似熵的触电事故特征提取算法,通过实验和仿真验证了方法的有效性。

## 1 近似熵测度及其原理

触电特征信号可看作是保护装置检测所得总剩余电流信号中出现的新模式。近似熵可度量信号中出现新模式的概率大小,刻画检测信号的复杂程度与非线性特征<sup>[14]</sup>。对应地,近似熵值越大,表明信号越复杂。近似熵算法是测度熵的一种替代算法,具有简单可靠的特点,可用于剩余电流保护装置检测生命体触电特征。

低压供电网中的剩余电流保护装置,通常单通道检测总剩余电流 $x(n)$ 。假设检测窗口长度为 $N$ ,标准差为 $SD$ ,对检测电流归一化,可计算近似熵<sup>[14]</sup>。

用 $x(n)$ 构造比较向量矩阵 $\mathbf{X}$ ,含 $M$ 个 $m$ 维的比较向量( $M=N-m+1$ ),其中,第 $i$ 个比较向量为

$$\mathbf{X}_i = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)] \quad (1)$$

计算比较向量间距离矩阵定义为:  $\mathbf{D} = \{d_{ij} | i, j = 1, 2, \dots, M\}$ ,其中,矩阵元素 $d_{ij}$ 为比较向量间的距离

$$d_{ij} = \max_{k=0, 1, \dots, m-1} \{|x(i+k) - x(j+k)|\} \quad (2)$$

在给定相似容限 $r$ 条件下,定义未超限占比 $C_i^m(r)$ 。

$$C_i^m(r) = \frac{1}{M} P_i^m \quad (3)$$

式中, $P_i^m$ 为第 $i$ 个比较向量距离 $d_{ij}$ 中不超过 $r$ 的数量。

由此得近似熵因子 $\Phi^m(r)$ 为

$$\Phi^m(r) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \ln C_i^m(r) \quad (4)$$

同理构造长度为 $m+1$ 的比较向量,计算近似熵因子 $\Phi^{m+1}(r)$ ,得有限长信号 $x(n)$ 的近似熵 $AE$ 为

$$AE = |\Phi^m(r) - \Phi^{m+1}(r)| \quad (5)$$

近似熵本质上表征了当比较向量由 $m$ 维变化为 $m+1$ 时信号中产生新模式的概率大小,反映了信号的复杂程度<sup>[14-16]</sup>。另外,在实际应用中为了降低信号样本长度 $N$ 对近似熵数值的影响、保证统计结果的合理性, $m$ 和 $r$ 取值应满足一定条件<sup>[14]</sup>。根据文献[14],文中 $m$ 取值为2, $r$ 取值为0.15 $SD$ 。

## 2 提取触电特征的近似熵方法

### 2.1 提取触电事故的理论依据

触电事故是电流通过生命体而造成其伤害的事故,当生命体触电事故发生时,保护装置检测到的总剩余电流必然受生命体电阻抗的固有特征影响<sup>[10-13]</sup>,出现不同于非生命体触电的物理属性,已被证明特征有:幅值微弱,起振迅速,短时间衰减并最终等幅振荡等<sup>[9-11]</sup>,但现有保护装置无法直接获取这些特征。基于近似熵算法,利用近似熵刻画信号复杂程度和非线性特征提取触电事故特征,可实现触电事故的快速检测。

电网正常运行时,剩余电流保护装置检测到的剩余电流主要是自然漏电流 $i_r(n)$ ,该电流具有周期性缓慢变化的平稳规则性,其近似熵基本不变。当发生触电事故时,触电事故电流 $i_s(n)$ 随机叠加于 $i_r(n)$ ,引起检测信号近似熵改变。实际经验和实验可知,触电事故电流的暂态过程极短,非周期分量衰减后,触电电流表现为周期性波形,导致检测电流在短时间内复杂度增加后略降低,随后保持不变。对应地,近似熵变化也满足增大后减小,最后达到稳定值,这一机理为触电事故特征提取提供了理论依据。

### 2.2 触电事故特征的提取算法

为了检测准确性,可用连续滑动窗近似熵算法

检测近似熵, 但计算冗余量大, 检测时间长, 难以满足应用要求<sup>[16]</sup>, 为此, 提出一种改进近似熵算法。

1) 设检测窗口滑动步长为  $H$ , 检测起始点为  $a$ , 窗口滑动计数器  $b$ 。取总剩余电流  $x(n)$  的区间  $[a, a + N - 1]$ , 共  $N$  个检测数据。

2) 按照第 2 节方法求近似熵  $AE(b)$ 。

若根据式(2)、式(3)求解比较向量未超限占比, 由于过程中存在大量冗余计算, 将严重影响算法效率。根据文献[16], 采用“0-1”法来计算未超限占比, 可以有效缩短计算时间。

构造  $M$  阶未超限距离矩阵  $Q$ , 矩阵元素  $q_{ij}$  为

$$q_{ij} = \begin{cases} 1, & |x(i) - x(j)| \leq r \\ 0, & |x(i) - x(j)| > r \end{cases} \quad (6)$$

考虑到未超限距离矩阵的对称性, 即  $q_{ij} = q_{ji}$ , 仅需计算矩阵上三角元素, 使计算简化为

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & q_{12} & \cdots & \cdots & q_{1M} \\ q_{12} & 0 & q_{23} & \cdots & q_{2M} \\ \cdots & q_{23} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & q_{M-1M} \\ q_{1M} & q_{2M} & \cdots & q_{M-1M} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

在求解  $P_i^m$  时, 需要判断  $X(i)$  和  $X(j)$  的距离未超过阈值  $r$ , 即  $d_{ij} \leq r$ 。当  $m=2$  时, 这一过程可以等价判断  $|x(i) - x(j)| \leq r$  与  $|x(i+1) - x(j+1)| \leq r$  同时成立, 即  $q_{ij}q_{i+1j+1}=1$  成立(反之,  $q_{ij}q_{i+1j+1}=0$ )。同样地, 当  $m=3$  时, 则有  $q_{ij}q_{i+1j+1}q_{i+2j+2}=1$  成立(反之,  $q_{ij}q_{i+1j+1} \cdot q_{i+2j+2}=0$ )。用 1, 0 表示是否超限, 在统计数量时, 只需要将这个值相加就可以快速求得  $P_i^m$ 。对应地, 比较向量未超限占比  $C_i^2(r)$ ,  $C_i^3(r)$  简化为

$$\begin{cases} C_i^2(r) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} q_{ij}q_{i+1j+1} \\ C_i^3(r) = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^{N-2} q_{ij}q_{i+1j+1}q_{i+2j+2} \end{cases} \quad (8)$$

3) 以步长  $H$  滑动窗口, 获取区间  $[a+H \cdot b, a+N-1+H \cdot b]$  的总剩余电流序列, 并按步骤 2) 方法求解近似熵, 得近似熵序列。

### 3 方法验证

#### 3.1 实验平台与条件

为验证本文方法, 在学术伦理道德委员会批准下, 在实验室进行低压触电实验, 实验原理如图 1。

实验中忽略了线路阻抗和用户侧漏电阻抗, 仅考虑线路漏电阻抗(漏电电阻  $R_l=5 \text{ k}\Omega$ , 漏电电容  $C_l=0.47 \text{ }\mu\text{F}$ )。用可编程电源模拟供电电源。实验对象为成年健康实验用兔、IEC 人体触电模型<sup>[19]</sup>、小

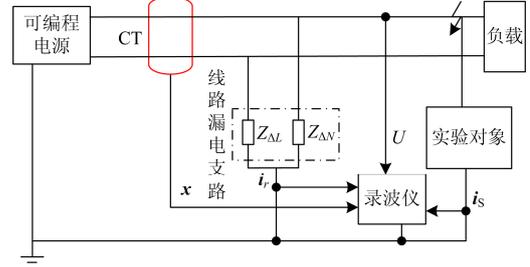


图 1 低压触电实验原理

Fig. 1 Principle of the electrical shock experiment

树枝(阻值约  $0.1 \text{ M}\Omega$ )。其中, 实验用兔以左前肢、右后肢为触电接触点, 并作无损脱毛。IEC 触电模型由电阻和电容构成, 原理如图 2, 其中,  $R_s=1.5 \text{ k}\Omega$ ,  $C_s=0.22 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $R_b=0.5 \text{ k}\Omega$ 。

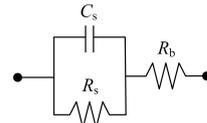


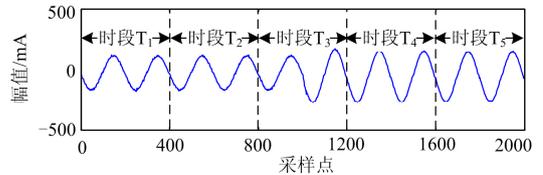
图 2 IEC 人体触电阻抗模型

Fig. 2 Model of human body impedance by IEC

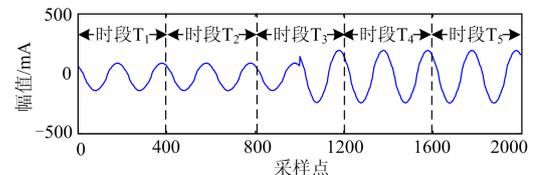
对供电侧含谐波和不含谐波两种情况分别进行实验。利用录波仪(DL750)记录触电电流(采样时长 2 s, 采样频率  $10 \text{ kHz}$ )。

#### 3.2 实验数据分析

在 Matlab 中用近似熵算法分析触电电流。随机取样共 200 组包括任意触电时刻的触电电流数据, 每组包含未触电、触电时和触电后共 10 个周期波形(2000 个采样点)。实验数据分析时, 观测窗口长度取为 2 个周波(400 个采样点)。将总剩余电流划分为 5 个时段( $T_1 \sim T_5$ ), 其中,  $T_1, T_2$  为未触电时段,  $T_3$  为触电时段,  $T_4, T_5$  为触电后时段。供电侧不含谐波时实验测得总剩余电流, 如图 3 所示。



(a) 工频电源



(b) 含谐波电源

图 3 实测总剩余电流波形

Fig. 3 Waveforms of total residual currents

### 3.2.1 抗噪抗扰性

剩余电流保护装置的检测对于运行环境噪声很敏感，影响触电事故检测可靠性。本文实验时在模拟电源中增加随机噪声和谐波模拟环境噪声，验证本文方法的抗噪抗扰性。

#### (1) 随机噪声

分析过程中，对实验数据添加随机噪声，使其信噪比从 60 dB 变化到 20 dB。添加噪声前后的近似熵如表 1 所示。

表 1 随机噪声条件下结果统计

| 时段     | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IEC 模型 |                |                |                |                |                |
| 无噪声    | 0.1208         | 0.1208         | 0.1442         | 0.1258         | 0.1258         |
| 60 dB  | 0.1228         | 0.1230         | 0.1464         | 0.1259         | 0.1257         |
| 40 dB  | 0.1355         | 0.1397         | 0.1502         | 0.1316         | 0.1298         |
| 20 dB  | 0.9395         | 0.9328         | 0.6907         | 0.5908         | 0.5497         |
| 实验用兔   |                |                |                |                |                |
| 无噪声    | 0.1334         | 0.1334         | 0.1476         | 0.1354         | 0.1354         |
| 60 dB  | 0.1338         | 0.1339         | 0.1478         | 0.1360         | 0.1366         |
| 40 dB  | 0.1414         | 0.1424         | 0.1587         | 0.1455         | 0.1457         |
| 20 dB  | 0.8862         | 0.8291         | 0.6343         | 0.5904         | 0.6021         |

从表 1 中可知，IEC 模型和实验用兔由于含有不同成分组织，各时段的近似熵略有不同，但整体上，触电特征具有一致性。时段 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 内，近似熵在无噪声时相同，添加噪声后，由于随机噪声导致不同时间段的复杂程度不同，近似熵不同，T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub> 同理。弱噪声(60 dB、40 dB)情况下，随着噪声强度增大，信号复杂程度增加，各时段近似熵值略有增加，但仍满足未触电时近似熵不变，触电时增大 10%，随后略有减小并保持基本不变的变化规律。在噪声强度较大(20 dB)时，各时段近似熵增大，此时，IEC 模型、实验用兔均无法满足触电信号变化规律，检测效果不佳。可见，在一定信噪比范围内，本文基于近似熵算法，利用相似容限  $r$  进行阈值滤波，能有效抑制噪声。

#### (2) 含谐波的情况

以纯工频、含 3 次(3%)、含 3 次(3%)+5 次(3%)谐波等电源下，直接接触电为例，各时间段近似熵结果如表 2 所示。

可见，随着谐波含量复杂程度增大，IEC 模型各时段近似熵略有增加，实验用兔在含 5 次谐波时，各时段近似熵明显增大，说明真实生命体阻抗特性比 IEC 模型更复杂<sup>[13,19]</sup>。但 IEC 模型和实验用兔的总体变化趋势仍较一致，即未触电时段近似熵基本不变，触电时刻近似熵增加近 10%，随后略有减少，最终趋于平稳，满足当非周期分量迅速衰减后触电电流表现为周期性波形的变化规律。因此，含谐波条件下，本文方法仍有较好的检测效果。

表 2 含谐波条件下结果统计

| 时段       | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IEC 模型   |                |                |                |                |                |
| 工频       | 0.1208         | 0.1208         | 0.1442         | 0.1258         | 0.1258         |
| +3 次谐波   | 0.1236         | 0.1236         | 0.1464         | 0.1282         | 0.1282         |
| +3,5 次谐波 | 0.1259         | 0.1259         | 0.1489         | 0.1305         | 0.1305         |
| 实验用兔     |                |                |                |                |                |
| 工频       | 0.1334         | 0.1334         | 0.1476         | 0.1354         | 0.1354         |
| +3 次谐波   | 0.1339         | 0.1338         | 0.1532         | 0.1370         | 0.1369         |
| +3,5 次谐波 | 0.3341         | 0.3341         | 0.3571         | 0.3387         | 0.3387         |

### 3.2.2 幅值无影响特性

改变总剩余电流幅值为原来的 0.1 倍、10 倍，分别求解近似熵值。仍以表 2 实验用兔数据为例，对比信号幅值变化时的近似熵，如图 4 所示。

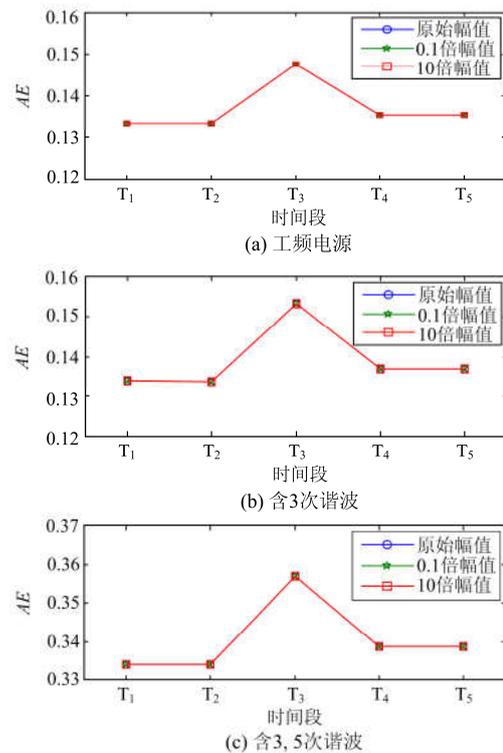


图 4 不同幅值总剩余电流近似熵比较

Fig. 4 Comparison of ApEn (different amplitudes)

由图 4 可见，实测电流复杂程度不变时，近似熵仍保持不变。这是由于，近似熵仅表征总剩余电流信号的复杂性，与电流幅值无关，不受电流幅值的影响。文献[12]讨论了触电前后总剩余电流的信息熵。实质上，信息熵是信息量绝对值，一定程度上会受总剩余电流幅值的影响。电流分离法等也存在同样问题<sup>[8-9]</sup>。近似熵用前后时间段信息量的相对变化量描述信号的模式自相似度，与信号绝对幅值无关<sup>[14-15]</sup>，因此，本文方法不受幅值影响。

## 3.2.3 不同触电方式弱影响特性

以直接接触电、串联 10 kΩ 触电、并联 1 kΩ 触电

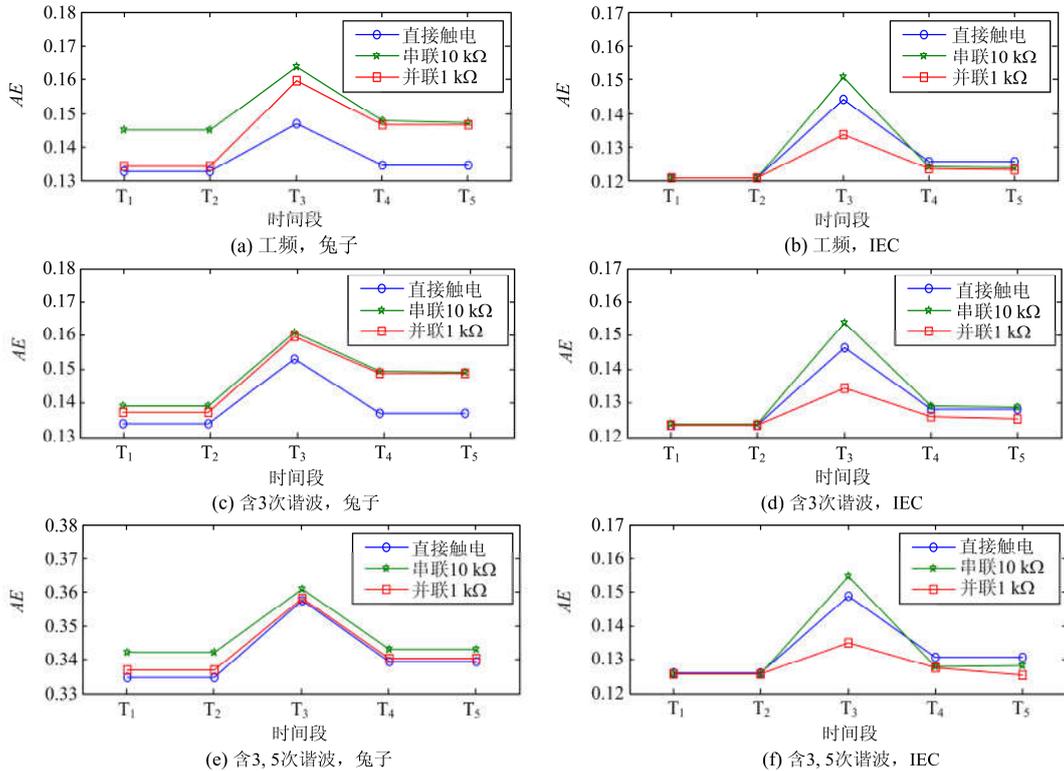


图 5 不同触电方式下的近似熵比较

Fig. 5 Comparison of ApEn (directly-touching or indirectly-touching shock)

可见, 当电源相同时, 触电方式不同, 总剩余电流信号的复杂程度不同, 近似熵数存在差异, 但在观测时段内( $T_1 \sim T_5$ ), 近似熵的变化规律保持一致, 证明了本文方法不受触电方式影响。

## 3.2.4 检测效率分析

仿真过程中, 滑动时间窗连续检测 5 个时段, 记录近似熵和检测计算时间。以兔子直接接触电、工频电源条件的实验数据为例, 结果如图 6。

由图 6 可见, 两种方法求得的近似熵绝对值有明显差异, 但在观测时段内( $T_1 \sim T_5$ ), 近似熵的变化规律仍保持一致。这同样是因为近似熵算法仅刻画触电事故信号的复杂程度, 两种检测方法均具有可靠性。

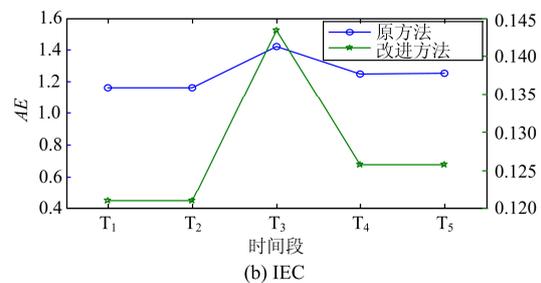
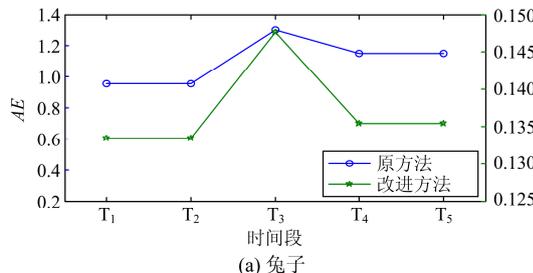


图 6 改进方法与原方法比较

Fig. 6 Comparison of ApEn (different algorithms)

现有几种方法的检测时间如表 3。

表 3 已有方法检测计算时间

| Table 3 Amplitude of total residual currents |       |        |                        |
|--|-------|--------|------------------------|
| 方法   | 近似熵法  | 改进近似熵法 | 局部均值分解法 <sup>[7]</sup> |
| 时间/s   | 0.844 | 0.0565 | 0.0835                 |

原近似熵算法的检测时间为 0.844 s, 改进近似熵算法检测时间为 0.0565 s, 相对时间缩短了近 15 倍, 检测效率得到了明显提升。改进近似熵算法与局部均值分解法相比, 检测时间更短, 这是由于改

进近似熵算法无需进行信号重构，仅用少量数据刻画触电特征，计算量小。因此，本文方法对触电事故检测时间短，有利于进行实时检测<sup>[20]</sup>。

### 3.2.5 区别生命体与非生命体触电

计算以小树枝为代表的非生命体触电对应的近似熵，并与以实验用兔为代表的近似熵结果做对比。以工频、无噪声条件的结果为例，如表 4 和图 7 所示。

表 4 生命体与非生命体近似熵结果统计  
Table 4 Effects of non-living and living things

| 时段   | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>5</sub> |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 小树枝  | 0.1198         | 0.1198         | 0.1204         | 0.1208         | 0.1208         |
| 实验用兔 | 0.1334         | 0.1334         | 0.1476         | 0.1354         | 0.1354         |

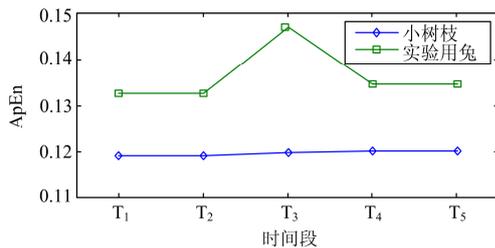


图 7 生命体触电与非生命体触电结果对比

Fig. 7 ApEn of non-living things vs. living things

根据图表可以发现，小树枝触电过程中，近似熵在触电过程中略有增大，但增幅很微弱，可认为几乎不变。相较于小树枝而言，实验用兔触电过程有明显变化过程，这是由于生命体触电特征具有复杂性和不规则性<sup>[9-11]</sup>，通过近似熵可以有效刻画这一特性。因此，本文方法能有效区别生命体触电与非生命体触电。

## 4 结论

从现有剩余电流保护装置采用单通道检测的实际出发，提出一种快速检测触电事故特征的近似熵方法，采用经连续滑动时间窗的近似熵算法，能快速、准确检测触电特征，可为人身触电安全保护提供技术支持。主要结论为：

(1) 触电特征近似熵检测方法，原理简单，易于触电事故特征检测。

(2) 提出的改进近似熵检测算法，相比于原有方法，计算时间短、结果准确，能满足工程应用需要。

(3) 提出的方法不受触电时刻、触电方式等影响，噪声鲁棒性好，能有效区别生命体和非生命体触电，可以为新型触/漏电保护技术提供参考。

## 参考文献

[1] 滕松林, 杨校生. 触电漏电保护器及其应用[M]. 北京:

机械工业出版社, 1994.

[2] 邵利敏, 杜松怀, 苏娟, 等. 农网剩余电流保护装置动作边界研究现状[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 145-148.

SHAO Limin, DU Songhuai, SU Juan, et al. Present research situation and improving measures for the trip boundary of residual current operated protective device[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(2): 145-148.

[3] LUO X, DU Y, WANG X, et al. Tripping characteristics of residual current devices under nonsinusoidal currents[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1515-1521.

[4] ROLDÁN-PORTA C, ESCRIVÁ-ESCRIVÁ G, CÁRCEL-CARRASCO F, et al. Nuisance tripping of residual current circuit breakers: a practical case[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 106(1): 180-187.

[5] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.

SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.

[6] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.

YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.

[7] 凌光, 苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.

LING Guang, SU Bin. A method to identify inrush current based on waveform characteristics of differential current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 19-24.

[8] 关海鸥, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种触电信号的自动快速检测模型[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2328-2335.

GUAN Haiou, DU Songhuai, SU Juan, et al. An automatic and quick detection model of electric shock signals[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2328-2335.

[9] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 238-245.
- [10] 韩晓慧, 杜松怀, 苏娟, 等. 基于局部均值分解的触电故障信号瞬时参数提取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 221-227.
- HAN Xiaohui, DU Songhuai, SU Juan, et al. Extraction of biological electric shock signal instantaneous amplitude and frequency based on local mean decomposition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 221-227.
- [11] 李浩. 触/漏电故障分量提取与触电特征识别研究[D]. 成都: 四川大学, 2014.
- LI Hao. Shock/leakage fault component extraction and shock characteristic identification[D]. Chengdu: Sichuan University, 2014.
- [12] 关海鸥, 郭元建, 杜松怀, 等. 农村低压电网触电电流数字特征描述与分析[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(3): 202-207.
- GUAN Haiou, GUO Yuanjian, DU Songhuai, et al. Description and analysis of shock current digital features for low-voltage rural power grid[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(3): 202-207.
- [13] HERMAN S. Electrical properties of tissue and cell suspensions[J]. Advances in Biological and Medical Physics, 1957, 5: 147-209.
- [14] PINCUS S. Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure[J]. Chaos, 1995, 5(1): 110-117.
- [15] 符玲, 何正友, 麦瑞坤, 等. 近似熵算法在电力系统故障信号分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 68-73.
- FU Ling, HE Zhengyou, MAI Ruikun, et al. Application of approximate entropy to fault signal analysis in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 68-73.
- [16] 洪波, 唐庆玉, 杨福生, 等. 近似熵、互近似熵的性质、快速算法及其在脑电与认知研究中的初步应用[J]. 信号处理, 1999, 15(2): 100-108.
- HONG Bo, TANG Qingyu, YANG Fusheng, et al. ApEn and cross-ApEn: property, fast algorithm and preliminary application to the study of eeg and cognition[J]. Signal Processing, 1999, 15(2): 100-108.
- [17] 何文平, 何涛, 成海英, 等. 基于近似熵的突变检测新方法[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 813-821.
- HE Wenping, HE Tao, CHENG Haiying, et al. A new method to detect abrupt change based on approximate entropy[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 813-821.
- [18] 杨小明, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 动态近似熵在强迫功率振荡在线检测中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 129-133.
- YANG Xiaoming, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Application of dynamic approximate entropy in real-time detection of forced power oscillation[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 129-133.
- [19] VALERIO S, PIERRE B, DOMENICO L, et al. Assessment of human body impedance for safety requirements against contact currents for frequencies up to 110 MHz[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2011, 58(2): 390-396.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. GB 16916.1-2014 家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB)第1部分: 一般规则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 16916.1-2014 residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection for household and similar uses (RCCB) — part 1: general rules[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.

收稿日期: 2016-07-05; 修回日期: 2016-09-14

作者简介:

熊晓祎(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为漏电保护与安全用电;

黄勇(1970—), 男, 通信作者, 硕士, 讲师, 从事电能质量、智能电网领域的教学和研究以及硬件开发工作。

E-mail: 951093608@qq.com

(编辑 张爱琴)