

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241100

多因素影响下动物体的直流触电电流响应特性分析

朱鸿章^{1,2}, 吴传平^{2,3}, 周洋², 廖秀晶⁴, 周天念^{2,3}, 李健⁴, 陈可⁴

(1. 湖南防灾科技有限公司, 湖南长沙 410129; 2. 长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室, 湖南长沙 410129; 3. 国网湖南省电力有限公司防灾减灾中心, 湖南长沙 410129; 4. 国网湖南省电力有限公司衡阳供电分公司, 湖南衡阳 421600)

摘要: 针对直流触电电流响应特性尚不明晰的问题, 剖析了多因素下动物体直流触电电流的幅值、峰值上升时间、滑动斜率的时域响应特性, 同时提出了一种变分模态与奇异值分解(variational mode decomposition and singular value decomposition, VMD-SVD)的直流触电电流时频响应特性分析方法。首先通过对不同触电方式、触电电压、皮肤表面干湿度、触电路径和动物体质量工况下的活体猪直流触电电流幅值、滑动斜率、峰值上升时间时频响应特性进行分析, 揭示了触电电流响应特征与多因素之间的变化规律。同时定量地分析了各因素对活体猪直流触电电流特性的影响, 揭示了动物体质量和直流触电电压与电流幅值间的定量关系。最后采用 VMD-SVD 分析了多因素下触电前/后的活体猪直流触电电流时频响应特性, 揭示了触电前/后最大奇异值和奇异熵特征量存在明显差异, 且多因素影响下最大奇异值和奇异熵特征量差异 $<10\%$ 。

关键词: 多因素; 直流触电电流; 响应特性; 滑动斜率; 变分模态与奇异值分解

Analysis of DC electric shock current response characteristics in animals under multiple influence factors

ZHU Hongzhang^{1,2}, WU Chuanping^{2,3}, ZHOU Yang², LIAO Xiuqing⁴, ZHOU Tiannian^{2,3}, LI Jian⁴, CHEN Ke⁴

(1. Hunan Disaster Prevention Technology Co., Ltd., Changsha 410129, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410129, China; 3. Disaster Prevention and Reduction Center of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410129, China; 4. Hengyang Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co, Ltd., Hengyang 421600, China)

Abstract: To address the unclear characteristics of current response under DC electric shock, this paper analyzes the time-domain response characteristics, including current amplitude, peak rise time, and sliding slope of DC electric shock current in animals under multiple factors. A time-frequency response characteristic analysis method based on variational mode decomposition and singular value decomposition (VMD-SVD) is also proposed. First, the DC electric shock current amplitude, sliding slope, and peak rise time in live pigs are analyzed under various conditions, including different electric shock methods, electric shock voltages, skin surface dryness and humidity, current paths, and animal body mass. This reveals the relationship between the electric shock current response characteristics and these multiple factors. At the same time, the influence of various factors on the DC electric shock current characteristics of live pigs is quantitatively analyzed, revealing the quantitative relationship between animal body mass, shock voltage, and current amplitude. Finally, the VMD-SVD method is used to analyze the time-frequency response characteristics of DC electric shock current in living pigs before and after electric shock under multiple factors. The results show significant differences in the maximum singular value and singular entropy characteristics before and after electric shock, although under the influence of multiple factors, these differences remain within 10%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52404196).

Key words: multiple factors; DC electric shock current; response characteristics; sliding slope; variational mode decomposition and singular value decomposition (VMD-SVD)

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52404196)

0 引言

近年来，随着国家绿色能源和节能减排战略的实施，大量分布式光伏发电和电动汽车直流充电桩普及，低压直流供电系统安全问题受到广泛关注^[1-4]。通常情况下，直流充电桩和光伏电池板等因长期暴露在户外环境中，易受潮湿、漏雨等自然环境因素的影响，导致绝缘水平下降，人在无意中接触到直流供电端可能会导致触电死亡^[5]。因此直流触电保护的研究尤为重要。

人体发生直流触电事故时，如何快速、准确地提取直流触电电流的特征参数是提高剩余电流保护动作速度的重要手段。目前关于低压直流触电特征分析方面的研究较少，主要研究方向聚焦于直流触电防护策略与方法的探索。文献[6-8]均围绕低压直流配电系统保护的研究展开，概述了直流配电系统保护技术的发展现状，但多局限于故障特征分析及概述，尚缺乏具体、切实可行的保护方案。文献[9-10]对比了低压直流系统的接触电压限值，分析了不同接地方式下低压直流系统在发生接地故障时的安全性能。文献[11-12]不仅分析了不同接地方式下直流系统的电击防护性能，还结合直流电流对人体的作用效应，探讨了典型触电事故的危险性。文献[13]针对低压配电系统的触电事故展开研究，详细介绍了触电事故的识别与保护方法，并分析了实际配电系统与用户接地系统存在的安全风险。

在直流线路故障的特征分析方面，研究者开展了相关研究^[14-19]。文献[14]通过分析两端电流在区内外故障时的突变特征，提出基于突变电流积聚量的全新原理的直流线路差动保护方法。文献[15]选取直流线路的电流变化率作为特征量，对比分析了短路故障前/后电流变化率的特征差异，并提出基于电流变化率的直流线路保护方法。文献[16]构造了一种卷积功率的时域故障特征量，实现对 S 域功率特征的有效提取，进而提出了一种基于时域卷积功率差的多端混合高压直流线路快速纵联保护方法。文献[20]提出使用短时傅里叶变换进行直流线路故障检测的方法，通过分析固定长度时间窗内采集到的电流信号各个频率分量，判断短路故障是否发生。文献[21]通过小波变换提取区、内外故障的电流信号，并对比电流信号的高频暂态特征差异，实现直流线路故障识别。

上述直流线路故障提取方法，为低压直流动物体触电电流响应特性分析提供了思路。

由于人体的特殊性，无法作为试验对象，猪与人的触电特征具有相似性^[22]，为此本文以活体猪为

试验对象，首先通过低压直流模拟人身触电试验平台，获取了多因素(触电路径、触电电压、皮肤表面干湿润程度、触电方式、动物质量)下动物体直流触电电流，然后分析了多因素下直流触电电流的幅值、峰值上升时间、滑动斜率的时域响应特性变化规律，最后提出一种变分模态与奇异值分解的时频响应特性分析方法，实现了直流触电前/后电流的时频特征分析，揭示了触电前/后触电电流的时频变化规律，为直流防人身触电提供理论支撑。

1 多因素下动物体直流触电试验设计

为模拟低压直流 IT 系统触电工况，本文搭建了低压直流触电模拟试验平台如图 1 所示，主要由三相隔离调压器、直流充电桩、电压/电流数据采集系统、生物体触电支路、电池模拟负载等组成。直流电压 200~750 V 可调，额定电流为 250 A。动物体触电电流数据通过 N2893A 电流探头采集，电流范围为 0~15 A，精度为±1%，噪声<2.5 mA。

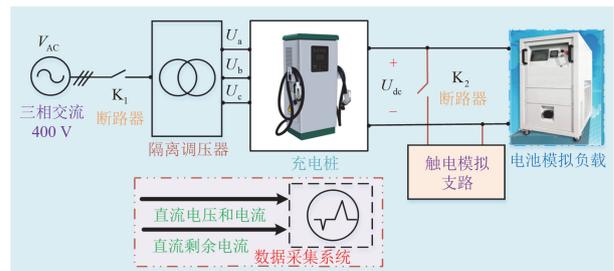


图 1 低压直流触电电流平台

Fig. 1 Low voltage DC shock current platform

本文以 30 kg/45 kg/50 kg/90 kg 的多头猪为试验对象，在多因素条件下开展直流触电试验，直流触电电压为 200~750 V；触电方式分为：捆绑(将电线缠绕在猪的腿部)和点触(将电线触碰猪的腿部)；皮肤表面干湿湿度：干燥、2L 水(将水均匀涂抹在猪皮肤表面)；触电路径：左前肢-右后肢、右前肢-左后肢、左前肢-左后肢、右前肢-右后肢。

根据动物体质量、触电路径、皮肤表面干湿程度、触电方式、动物体质量、触电电压的不同，开展触电试验设计。同等电压等级和同等质量下开展 16 组实验，每一组重复 2 次，共计 32 次实验，触电试验工况表如表 1 所示。根据每组有效数据计算出试验动物触电电流幅值的平均值。为模拟人身触电，空载情况下采用正负两极直接接触生猪，触电时间为 0.1 s，配备 B 型剩余电流保护装备进行动物体触电保护，试验过程中记录触电电流数据。活体猪每次触电实验间隔为 15 min，确保动物体身体机

能恢复到正常状态。

根据表 1 获得的 30 kg/250 V 试验 1 的活体猪触电电流波形如图 2 所示, 为一缓慢上升至稳定的非线性时变直流电流信号, 由于细胞膜极化、离子通道开启及电阻电容特性变化, 当离子流逐渐达到平衡, 电流呈现非线性时变并最终趋于稳定。根据图 2 可知, 直流触电电压下, 活体猪触电电流信号中包含了丰富的时域和时频响应特征。

表 1 直流触电试验工况表

Table 1 DC electric shock test condition table

试验组别	因素水平		
	触电路径	皮肤表面干湿度	触电方式
1	左前肢-左后肢	干燥	点触
2	左前肢-左后肢	干燥	捆绑
3	左前肢-左后肢	2L 水	点触
4	左前肢-左后肢	2L 水	捆绑
5	左前肢-右后肢	干燥	点触
6	左前肢-右后肢	干燥	捆绑
7	左前肢-右后肢	2L 水	点触
8	左前肢-右后肢	2L 水	捆绑
9	右前肢-左后肢	干燥	点触
10	右前肢-左后肢	干燥	捆绑
11	右前肢-左后肢	2L 水	点触
12	右前肢-左后肢	2L 水	捆绑
13	右前肢-右后肢	干燥	点触
14	右前肢-右后肢	干燥	捆绑
15	右前肢-右后肢	2L 水	点触
16	右前肢-右后肢	2L 水	捆绑

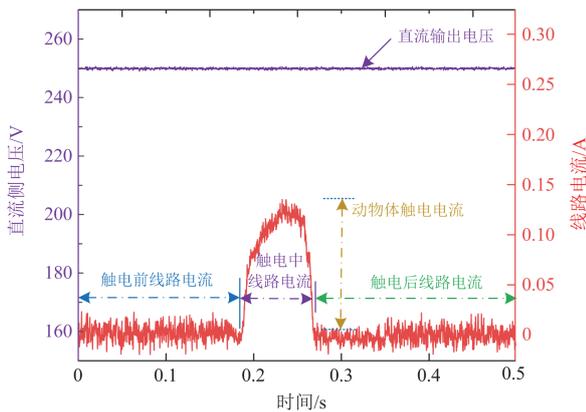


图 2 30 kg/250 V 试验 1 直流触电电流

Fig. 2 30 kg/250 V test 1 DC shock current

2 多因素下动物体直流触电电流时域响应特性分析

通常直流信号的时频响应特性包含均值、峰值、峰值上升时间、斜率等。为了得到动物体直流触电

电流的时域响应特性变化规律, 本文通过对多因素下动物体直流触电电流的峰值、峰值上升时间、斜率进行分析, 揭示了直流触电电流的时域响应特性, 为直流防触电提供理论依据。

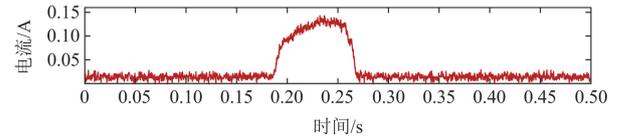
2.1 直流触电电流预处理

由图 2 动物体直流触电电流特征波形可知, 其电流中存在大量谐波信号, 为能更准确地分析直流触电电流特征, 先采用小波软阈值滤波算法^[23]对直流触电信号进行滤波处理。其滤波算法为

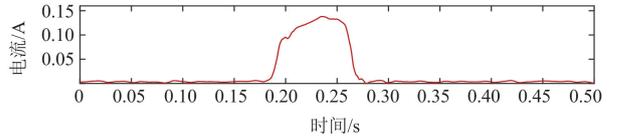
$$H' = \begin{cases} \text{sgn}(H)(|H| - \xi G), & |H| \geq G \\ 0, & |H| < G \end{cases} \quad (1)$$

式中: H' 为阈值处理后的系数; H 为小波分解细节系数; G 为阈值; ξ 为比例系数, $0 \leq \xi \leq 1$; $\text{sgn}()$ 为符号函数。

通过图 3(a)和图 3(b)的结果对比可知, 小波软阈值滤波算法滤波性能优越, 可以有效滤除直流触电电流中的高频谐波。



(a) 滤波前



(b) 滤波后

图 3 小波软阈值滤波结果

Fig. 3 Wavelet soft threshold filtering results

2.2 多因素下动物体直流触电电流幅值响应特性分析

为了分析触电电压、触电方式、动物体质量、皮肤表面干湿度、触电通道对动物体直流触电电流幅值响应特性的影响, 首先采用方差分析方法进行定性分析, 得到各因素对电流幅值特性的影响程度, 然后定量地分析各因素下直流电流幅值的特征规律。以 30 kg 和 50 kg 活体猪为例, 依据试验工况表 1, 在 250 V、500 V 和 650 V 直流电压下分别进行了 48 组试验, 所得直流触电电流幅值见表 2。

方差分析是通过各因素变差平方和 S_g 的值给出定性的判断。

$$S_g = z \sum_{m=1}^p (\bar{x}_m - \bar{x})^2 = \sum_{m=1}^p \frac{1}{z} \left(\sum_{g=1}^{\bar{z}} x_{gm} \right)^2 - \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^p \sum_{g=1}^{\bar{z}} x_{gm} \right)^2 \quad (2)$$

式中： z 表示试验的次数； p 表示水平的数量； \bar{x}_m 为第 m 个水平下的组内均值； \bar{x} 为总数据均值； M 为总样本数； x_{gm} 为第 g 组试验中第 m 个水平下的数据值。

表 2 活体猪直流触电电流幅值

Table 2 Amplitude of DC electric shock current in live pigs

试验组别	直流触电电流幅值/mA					
	直流电压 250 V		直流电压 500 V		直流电压 650 V	
	30 kg	50 kg	30 kg	50 kg	30 kg	50 kg
1	131.8	145.6	434.9	478.4	616.7	678.3
2	158.5	177.5	523.1	575.3	743.7	813.6
3	164.2	183.9	541.8	596.5	767.4	845.2
4	197.2	220.9	650.7	715.8	924.8	1 013.1
5	119.2	133.5	393.3	432.4	557.6	613.6
6	140.4	157.3	463.3	509.6	657.3	722.7
7	151.8	172.7	501.9	551.1	710.2	783.4
8	174.3	194.2	575.1	632.4	815.6	895.2
9	111.4	124.8	367.6	404.3	521.3	574.4
10	134.1	151.2	442.5	486.7	626.5	693.3
11	145.2	162.6	476.1	527.2	678.3	747.4
12	165.4	185.5	546.8	600.4	773.2	851.4
13	125.5	141.6	415.1	455.5	587.4	642.2
14	148.2	166.3	489.3	537.9	693.5	764.4
15	154.2	175.2	507.8	559.7	723.6	794.7
16	185.6	205.9	614.4	673.7	865.5	953.4

S_g 的自由度 $f_g = p - 1$ ，各列均方差 $\bar{S}_g = S_g / f_g$ ，当量误差为 $S_{\epsilon A}$ 。定义最新的试验误差的方差为 $\bar{S}_{\epsilon A}$ ，做统计量 F 条件检验。

$$F = \frac{\bar{S}_g^2}{\bar{S}_{\epsilon A}^2} \quad (3)$$

采用方差分析法检验触电电压(A)、触电路径(B)、皮肤表面干湿湿度(C)、触电方式(D)和动物体质量(E)对活体猪触电电流幅值的显著性影响，检验结果如表 3 所示，表中“***”表示具有显著影响。

表 3 的分析结果显示，动物体质量、触电路径、皮肤表面干湿湿度和触电方式的 $P < 0.01$ ，因此对试验猪的直流触电电流幅值特性具有显著影响。

表 3 直流触电电流方差分析

Table 3 Variance analysis of DC electric shock current

因素	变差平方和	均方	F 值	P 值	显著性
A	73 452.914	24 484.305	14.79	0	***
B	267 231.51	267 231.51	161.51	0	***
C	149 089.61	149 089.61	90.11	0	***
D	50 581.80	50 581.80	30.57	0	***
E	5 486 323.04	2 743 161.52	1657.93	0	***

1) 不同触电方式下触电电流幅值特性规律

其他触电工况不变，仅考虑不同触电方式对直流触电电流幅值特性影响。根据表 2 中不同触电条件下的直流触电电流幅值，按照同等工况从小到大排序得到触电电流幅值如图 4 所示，第 1 组—第 16 组为直流 250 V 电压下直流触电电流数据，第 17 组—第 32 组为直流 500 V 电压下直流触电电流数据，第 33 组—第 48 组为直流 650 V 电压下直流触电电流数据，图中由于从第 17 组数据开始，直流触电电压数据增大了一倍，导致直流触电电流的数据出现突变，其他因素下直流触电电流幅值结果均参照此种方式，故不再累述。根据图 4 可知，直流触电电流幅值：捆绑条件 > 点触条件，触电电流幅值平均值差值范围为 20.2~167.9 mA，倍数变化范围为 1.139~1.219。触电电流幅值的差异主要源于接触面积的差别。当电流通过动物体时，导线与动物体的接触面积是决定阻抗大小的一个重要因素。在捆绑状态下导线与动物体的接触面积显著增大，对应的接触阻抗也随之减小。因此，在其他条件相同的情况下，直流触电电流幅值在捆绑状态下会大于点触状态。

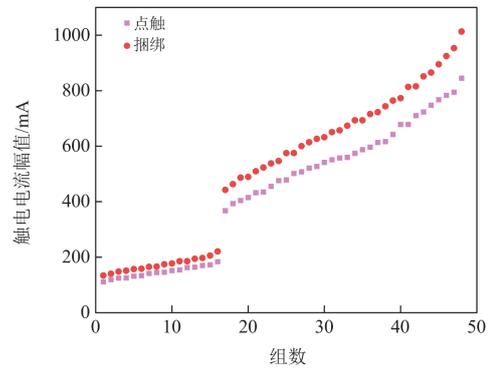


图 4 不同触电方式下触电电流幅值

Fig. 4 Electric shock current amplitude under different electric shock modes

2) 不同皮肤表面干湿湿度下触电电流幅值特性规律

其他触电工况不变，仅考虑皮肤表面干湿湿度对直流触电电流幅值特性的影响。根据表 2 得到不同皮肤表面干湿湿度下的触电电流幅值如图 5 所示，直流触电电流幅值：2L 水 > 干燥条件，触电电流幅值平均值差值范围为 20.2~189 mA，倍数变化范围为 1.139~1.294。由于水的介入显著改变了皮肤的导电特征。通常情况下，干燥皮肤的阻抗相对较高，因为皮肤表层的角质层起到了一定的绝缘作用。而在湿润条件下，皮肤表面的水分充当了导电的媒介，

大大降低了皮肤的阻抗, 致使触电电流增大。

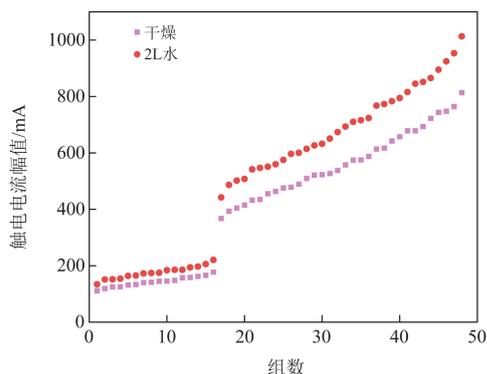


图5 不同皮肤表面干湿度下触电电流幅值

Fig. 5 Electric shock current amplitude at different skin surface dryness and humidity

3) 不同触电路径下直流触电电流幅值特性规律

其他触电工况不变, 仅考虑触电路径对直流触电电流幅值特性的影响。根据表2得到不同触电路径下的触电电流幅值如图6所示, 直流触电电流幅值排序为: 左前肢-左后肢、右前肢-右后肢、左前肢-右后肢、右前肢-左后肢。将左前肢-左后肢、右前肢-右后肢路径定义为同侧触电路径, 将左前肢-右后肢、右前肢-左后肢路径定义为异侧触电路径。其他条件不变的情况下, 同侧触电路径所产生的触电电流显著大于异侧触电路径下的电流。由于在相同的条件下, 动物的阻抗和触电路径长度呈正比关系。在同侧触电路径下活体猪的阻抗值会小于异侧触电路径下的阻抗值, 因此触电电流幅值大。触电通道为从左前肢到右后肢的电流幅值大于触电通道从右前肢到左后肢的电流。由于心脏是由多种细胞组织构成的器官, 具有较低的电阻抗, 当电流通过心脏时, 心脏组织因其较好的电导性, 相较于身体其他组织, 表现出较低的阻抗。

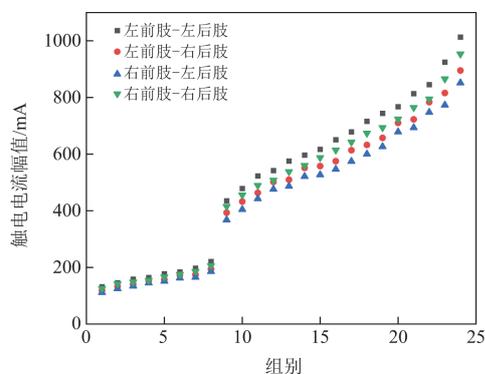


图6 不同触电路径下触电电流幅值

Fig. 6 Electric shock current amplitude under different electric shock channels

4) 不同动物体质量下直流触电电流幅值特性规律

其他触电工况不变, 仅考虑动物体质量对直流触电电流幅值特性的影响。根据表2得到不同质量下的触电电流幅值如图7所示, 活体猪直流触电电流: $50\text{ kg} > 30\text{ kg}$ 。由于 $R = \rho l / s$ (ρ 为活体猪电导率, l 和 s 分别为活体猪长度和圆柱面积), 动物质量越大, 阻抗越小, 触电电流幅值越大。触电时流过猪体内的触电电流与质量呈正相关。

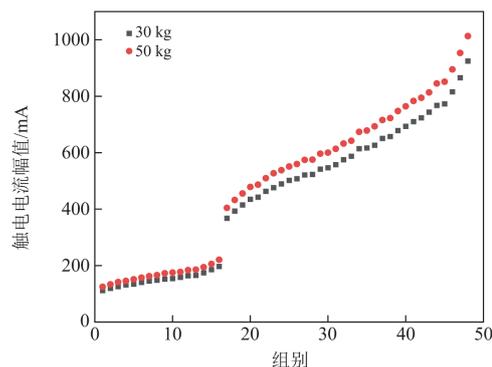


图7 不同质量下触电电流幅值

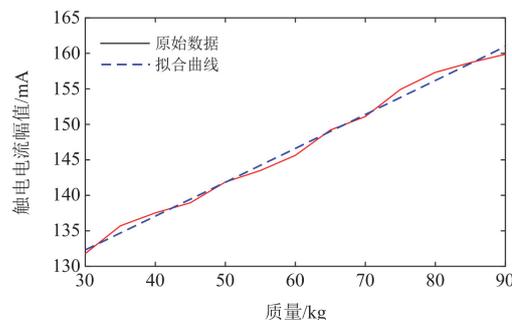
Fig. 7 Electric shock current amplitude under different masses

根据试验1工况获得30~90 kg活体猪的质量与直流触电电流幅值的关系如图8(a)所示, 并对其采用非线性最小二乘法得到的关系式为

$$y_1 = 0.4776x_1 + 117.98 \quad (30 \leq x_1 \leq 90) \quad (4)$$

式中: y_1 表示直流触电电流的平均幅值; x_1 表示试验猪的质量, kg。拟合曲线的 R^2 值为 0.993, 曲线拟合的误差如图8(b)所示, 拟合误差 $< 1\%$, 因此拟合效果显著。若考虑不同试验工况下的电流值时, 需引入相应的系数进行分析。捆绑工况相较于点触条件下的电流校正系数 a_1 为 1.139~1.219; 湿度 2L 水工况相较于干燥工况的电流校正系数 a_2 为 1.139~1.294。

5) 不同直流触电电压下直流触电电流幅值特性规律



(a) 动物体质量与触电电流幅值关系拟合结果

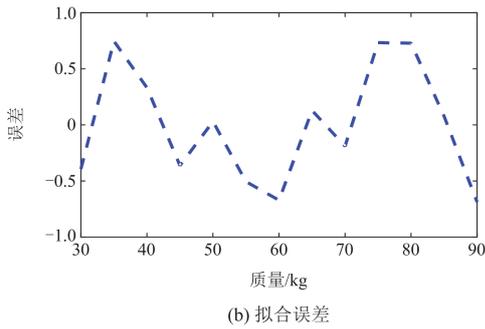


图 8 动物体质量与触电电流幅值关系

Fig. 8 Relationship between animal body mass and electric shock current amplitude

其他条件不变, 仅考虑直流触电电压对直流触电电流幅值的影响。不同直流电压下的触电电流幅值如图 9 所示, 随着直流电压的升高, 动物体直流触电电流增大, 由于高电压会导致细胞渗透或穿透, 使电流更容易通过皮肤进入身体, 导致电流增大, 阻抗变小。触电时流过猪体内的触电电流与直流电压呈正相关。根据表 1 中试验 15 工况获得活体猪直流电压 200~750 V 与直流触电电流的幅值关系, 如图 10(a)所示, 并对其采用非线性最小二乘法得到的关系式如式(15)所示。

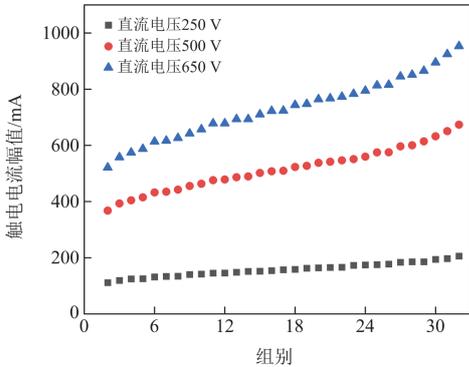
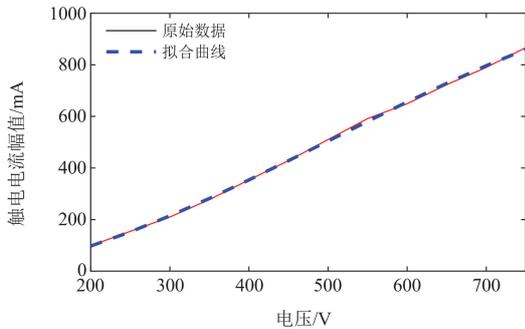
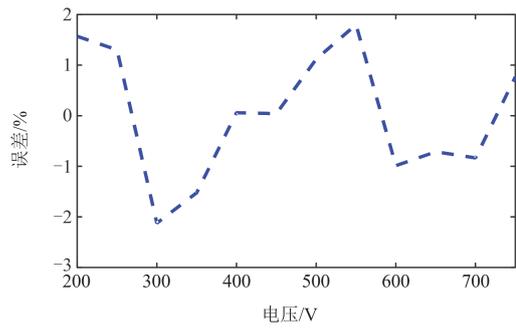


图 9 不同直流电压条件下的触电电流幅值

Fig. 9 Electric shock current amplitude under different DC voltage conditions



(a) 直流电压与触电电流幅值关系拟合结果



(b) 拟合误差

图 10 直流电压与触电电流幅值关系

Fig. 10 Relationship between DC voltage and electric shock current amplitude

$$y_2 = -1.86 \times 10^{-6} x_2^3 + 2.74 \times 10^{-4} x_2^2 + 0.143x_2 - 26.05 \quad (200 \leq x_2 \leq 750) \quad (5)$$

式中: y_2 表示直流触电电流的平均幅值; x_2 表示直流触电电压, 拟合曲线的 R^2 值为 0.9995, 误差分析结果如图 10(b)所示, 拟合误差 < 2.5%, 曲线拟合效果显著。

2.3 多因素下动物体直流触电电流峰值上升时间和滑动斜率特性分析

直流触电电流的滑动斜率和峰值上升时间示意图如图 11 所示。其中直流电流上升起始时刻为 t_{start} , 峰值时刻为 t_{peak} , 峰值上升时间 $\Delta t_p = t_{peak} - t_{start}$ 斜率的表达式为

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta t_s} = \frac{f(t_s + \Delta t_s) - f(t_s)}{\Delta t_s} \quad (6)$$

式中: Δf 为曲线值的变化量; Δt_s 为时间变化量; $f(t_s + \Delta t_s)$ 和 $f(t_s)$ 分别为 $t_s + \Delta t_s$ 和 t_s 时刻的曲线值。

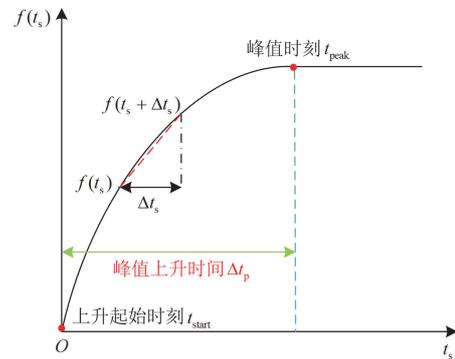


图 11 滑动斜率和峰值上升时间示意图

Fig. 11 Schematic diagram of sliding slope and peak rise time

计算直流触电电流的滑动斜率的具体步骤如下。

1) 数据预处理。将采样的直流电流信号 I_h 经过

小波软阈值滤波后得到电流信号 I_g 。

2) 确定滑动窗口大小。窗口大小应根据直流电流数据的采样频率和电流变化频率来确定, 本文滑动窗口大小为 50。

3) 计算滑动窗口内的斜率值。假设经过预处理的直流触电电流信号 $I_g(t_s)$ 包含 N 个采样点 ($I_g(t_s)$, $I_g(t_s + \Delta t_s)$, $I_g(t_s + 2\Delta t_s)$, \dots , $I_g(t_s + N\Delta t_s)$), 构建 L 个点 ($I_g(t_s)$, $I_g(t_s + \Delta t_s)$, \dots , $I_g(t_s + (L-1)\Delta t_s)$) 的滑动窗口电流数据, 根据式(6)得到滑动斜率的表达式为

$$S = \frac{\Delta I_g}{\Delta t_s} = \frac{I_g(t_s + \Delta t_s) - I_g(t_s - \Delta t_s)}{2\Delta t_s} \quad (7)$$

式中: ΔI_g 为电流变化量; $I_g(t_s + \Delta t_s)$ 和 $I_g(t_s - \Delta t_s)$ 分别为 $t_s + \Delta t_s$ 和 $t_s - \Delta t_s$ 时刻的电流值。本文中直流触电电流的采样频率为 10 kHz, 因此 Δt_s 为 0.0001 s。

4) 窗口移动。将窗口向前移动一个步长的距离, 然后重复步骤 3) 的计算, 计算这个窗口内斜率值。

若持续满足 $f(t_s) < f(t_s + \Delta t_s) < f(t_s + 2\Delta t_s)$, 则可确定 $f(t_s)$ 的直流电流上升起始时刻 t_{start} ; 持续上升至峰值时对应时刻为 t_{peak} , 一阶导数和二阶导数满足以下条件。

一阶导数:

$$\frac{df(t_s)}{dt_s} = 0 \quad (8)$$

二阶导数:

$$\frac{d^2 f(t_s)}{dt_s^2} < 0 \quad (9)$$

30 kg/250 V 条件下, 采用滑动斜率和峰值上升时间求取算法对试验 1、试验 2 直流触电电流波形进行分析, 试验 1、试验 2 的分析结果分别如图 12、图 13 所示。根据图 12 和图 13 可知, 试验 1 的峰值上升时间 Δt_p 为 59.2 ms, 试验 2 的峰值上升时间 Δt_p

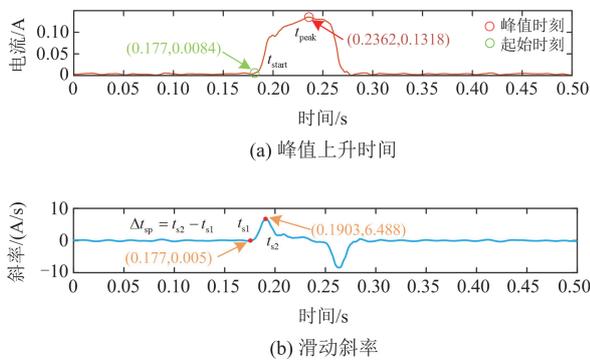


图 12 试验 1 峰值上升时间和滑动斜率

Fig. 12 Peak rise time and sliding slope of test 1

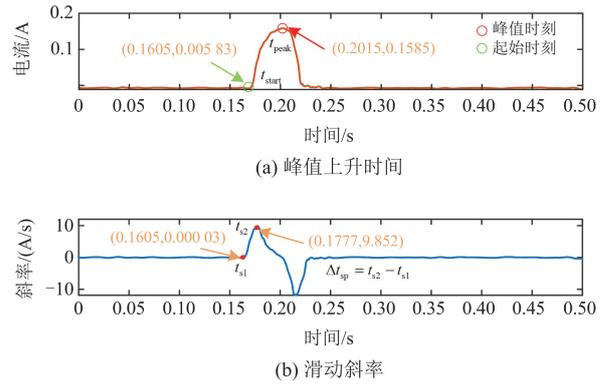
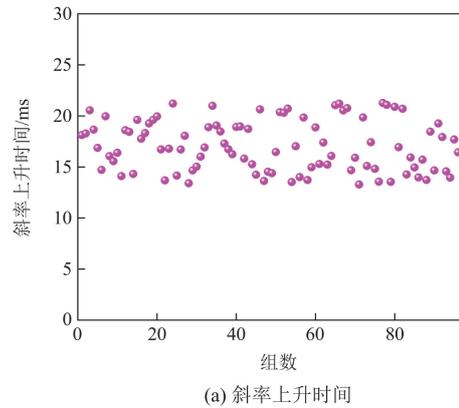


图 13 试验 2 峰值上升时间和滑动斜率

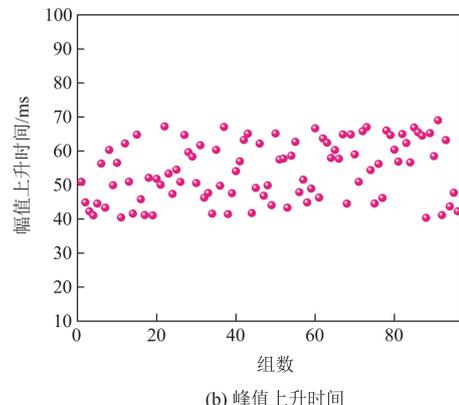
Fig. 13 Peak rise time and sliding slope of test 2

为 41.0 ms, 试验 1 的滑动斜率上升时间 Δt_{sp} 为 13.3 ms, 试验 2 的滑动斜率上升时间 Δt_{sp} 为 17.2 ms, 试验 1 的滑动斜率峰值 S_{max} 为 6.488, 试验 2 的滑动斜率峰值 S_{max} 为 9.852。

根据表 2 确定的多因素下峰值上升时间和斜率上升时间如图 14 所示, 其斜率上升时间 Δt_{sp} 随机分布在 13.1~21.2 ms 之间, 其峰值上升时间 Δt_p 随机



(a) 斜率上升时间



(b) 峰值上升时间

图 14 峰值上升时间和斜率上升时间

Fig. 14 Peak rise time and slope rise time

分布在 40.2~69.3 ms, 与各因素的影响无关, 且直流触电电流幅值与上升时间不成正比关系。

根据表 2 确定的斜率峰值如图 15 所示, 其斜率峰值 S_{\max} 分布在 4.12~60.1, 斜率峰值与电流幅值成正比关系, 因此其捆绑、2L 水条件下的斜率峰值大于点触、干燥条件下。不同触电路径下直流斜率峰值排序为: 左前肢-左后肢、右前肢-右后肢、左前肢-右后肢、右前肢-左后肢。同时直流触电电压越高, 触电电流斜率峰值越大。

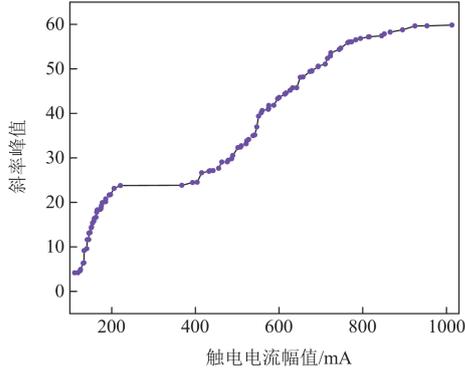


图 15 触电电流幅值与斜率峰值分析结果

Fig. 15 Analysis results of electric shock current amplitude and slope peak

综合上述分析可知, 多因素下直流触电电流幅值和斜率峰值与多因素有关, 且直流触电电流幅值与斜率峰值呈正相关, 其斜率峰值 S_{\max} 为 4.12~60.1, 斜率上升时间 Δt_{sp} 随机分布在 13.1~21.2 ms, 峰值上升时间 Δt_p 随机分布在 40.2~69.3 ms, 与各因素无关。因此可以选取斜率峰值 $S_{\max} \geq 4$, 斜率上升时间 $\Delta t_{sp} \geq 13$ ms, 峰值上升时间 $\Delta t_p \geq 40$ ms 作为直流触电识别的时域特征量。

3 基于变分模态与奇异值分解的触电电流时频响应特性分析

为了明晰动物体直流触电电流的时频响应特性, 本文提出一种变分模态与奇异值分解 (variational mode decomposition and singular value decomposition, VMD-SVD) 特性分析方法, 该方法结合了变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD)^[24] 具有物理意义明确、分解性能优异的优势与奇异值分解 (singular value decomposition, SVD)^[25] 可有效地提取特征和降低矩阵维数的优点。该方法首先对直流触电前/后电流进行 VMD, 提取相关系数大的模态分量, 然后对提取的模态分量构建 Hankel 矩阵, 最后提取出直流触电前/后电流最大奇异值与奇异熵

特征量进行分析。

变分模态分解直流触电信号的原理为: 将直流触电信号分解问题转变为带有约束条件的变分问题, 在约束条件内反复迭代寻找最优解, 将直流触电信号分解为多个中心频率和带宽的单分量信号。各模态分量 u_k 的计算公式为

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\| \sum_{k=1}^K \partial_t [(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t)] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \\ \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K u_k = f(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: K 为模态分量个数; ∂_t 为微分算子; u_k 为分解后第 k 个有限带宽固有模态分量; ω_k 为第 k 个有限带宽固有模态分量的中心频率; $f(t)$ 为原始信号;

“*” 为卷积运算; $\delta(t)$ 为脉冲函数, $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$ 。

引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘法算子 $\lambda(t)$, 解决上述约束问题。

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = & \alpha \sum_k \left\| \partial_t [(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) u_k(t)] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \\ & \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \end{aligned} \quad (11)$$

引入交替方向乘法子法进行迭代计算, 获得式(11)的鞍点, 解得模态分量 \hat{u}_k^{n+1} 及中心频率 ω_k^{n+1} 分别为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (12)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (13)$$

式中: n 为迭代次数; $\hat{\cdot}$ 表示傅立叶变换; $|\hat{u}_k(\omega)|$ 表示进行傅里叶逆变换。

VMD 计算的程序实现步骤如下。

1) 初始化 $\{\hat{u}_k^1\}$ 、 $\{\omega_k^1\}$ 、 $\{\hat{\lambda}^1\}$ 、 n 均为 0, 将分解模态数 K 设置为某个合适的正整数, 通常 K 值需人工选取。

2) 根据式(12)、式(13)更新 u_k 和 ω_k 。

3) 更新 $\hat{\lambda}$ 。

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau [\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega)] \quad (14)$$

式中: τ 为保真系数。

4) 直到满足 $\sum_k \frac{\|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} < \varepsilon$ 停止迭代, 输出

结果, 否则回到步骤 2), ε 为判别精度, 且 $\varepsilon > 0$ 。

变分模态分解得到的 K 个有限带宽固有模态分量构成的矩阵为 $\mathbf{u}_k = [u_k(1), u_k(2), \dots, u_k(N)]$ 。采用相关系数提取出 VMD 算法中 $\gamma_k \geq 0.1$ 的模态分量 $[u_1, u_2, \dots, u_p]$, $p \leq K$ 。原信号 $Y(t)$ 的相关系数 γ_k 定义为

$$\gamma_k = \frac{\sum_{t=1}^N (Y(t) - \bar{y})(u_k(t) - \bar{u}_k)}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Y(t) - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^N (u_k(t) - \bar{u}_k)^2}} \quad (15)$$

式中: $Y(t)$ 为原信号; \bar{y} 为原信号 $Y(t)$ 的平均值; \bar{u}_k 为 u_k 分量平均值。

对 u_p 构造 Hankel 矩阵 \mathbf{H} 。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} u_p(1) & u_p(2) & \cdots & u_p(l) \\ u_p(2) & u_p(3) & \cdots & u_p(l+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_p(v) & u_p(v+1) & \cdots & u_p(N) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: l 为矩阵列数, 取值范围为 $N/20 \sim N/2$; v 为矩阵行数, 满足 $v+l-1=N$ 。本文中 l 取为 $N/2$ 。

矩阵 $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{v \times l}$, 无论其行列是否相关, 必定存在正交矩阵 $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{v \times l}$ 和 $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{v \times l}$, 使得

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{A} \mathbf{V}^T \quad (17)$$

式中: \mathbf{A} 为对角矩阵, 其对角元素为矩阵 \mathbf{H} 的奇异值, $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$, $r = \min(v, l)$, 按降序排列, 奇异值的大小反映了能量的集中情况。

定义奇异熵 E 为

$$E = \sum_{i=1}^r - \underbrace{(\lambda_i / \sum_{a=1}^r \lambda_a)}_A \log(\lambda_i / \sum_{a=1}^r \lambda_a) \quad (18)$$

式中: A 为 i 个奇异值占有所有奇异值的权重, 信号奇异熵越大, 信号所含的信息也就越复杂, 能量越分散。

采用 VMD 算法对触电前/后直流触电电流进行分析, 模态分量个数 $K=5$, 触电前/后分析结果分别如图 16 和图 17 所示。根据图 16 可知, 触电前各模态的中心频率为 60 Hz、220 Hz、30 Hz、937 Hz、1200 Hz。根据图 17 可知, 触电后各模态的中心频率为 0 Hz、200 Hz、556 Hz、950 Hz、1200 Hz。因此, 取 $K=5$, 触电前/后触电电流的各模态中心频率不接近, 满足 VMD 分解性能要求。

提取出相关系数 $\gamma_k \geq 0.1$ 的三个模态分量 u_1 、 u_2 、 u_3 , 进行 SVD 分解后将最大奇异值和奇异熵作为触电特征量分析。为避免触电电流幅值变化使得各模态的最大奇异值不同, 造成触电识别误差,

对最大奇异值进行最大值归一化处理。奇异熵仅与信息复杂程度有关, 无需归一化处理。归一化后触电前/后最大奇异值如图 18 所示。奇异值越大代表此模态下能量信息量越大。根据图 18(a)可知, 触电前第 1 模态分量的最大奇异值最高, 第 2 和第 3 模态分量最大奇异值较高, 表明触电前直流触电信号的主要能量集中在第 1 模态分量, 但第 2 模态和第 3 模态分量仍保留一定的能量分布。根据图 18(b)可知, 触电后第 1 模态分量的最大奇异值最高, 第 2 模态和第 3 模态最大奇异值接近于 0, 这表明信号的能量更多地集中于第 1 模态, 而其他高频模态的能量可忽略不计。

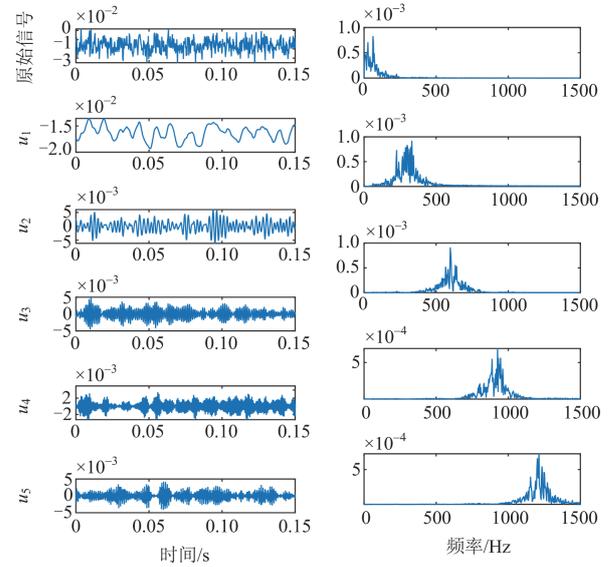


图 16 触电前 VMD 算法分析结果

Fig. 16 VMD algorithm analysis results before electric shock

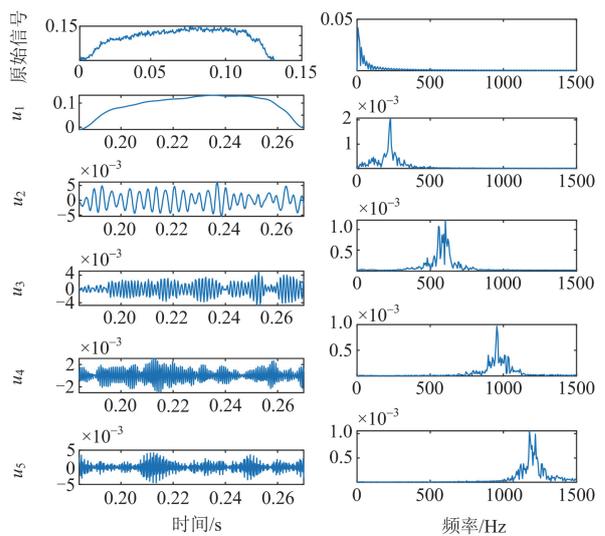


图 17 触电后 VMD 算法分析结果

Fig. 17 VMD algorithm analysis results after electric shock

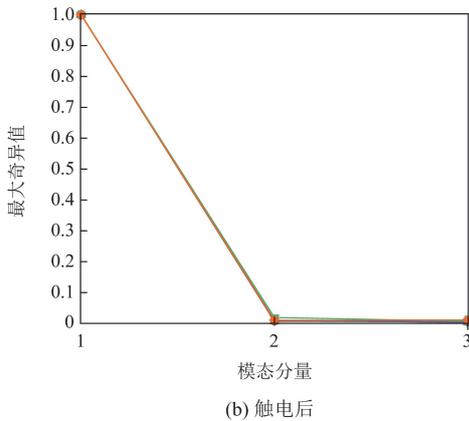
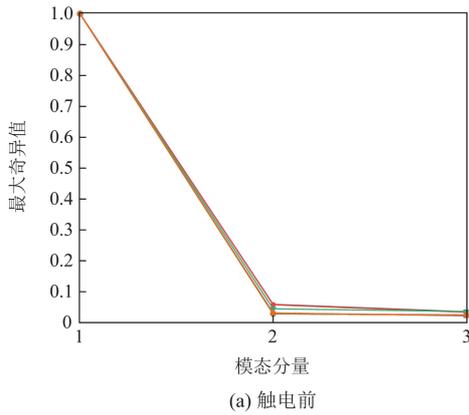


图 18 归一化后触电前/后最大奇异值

Fig. 18 Maximum singular value before and after electric shock normalization

奇异熵表征信号复杂程度，信号越简单，能量越集中，熵值越小；相反，信号越复杂，能量越分散，熵值越大。由图 19(a)可知，触电前奇异熵随着模态分量的增加呈现增大的趋势，表明随着模态分量增加触电前电流信号越复杂。由图 19(b)可知，触电后电流信号的奇异熵大小呈先增大后平稳的趋势。触电前电流模态分量 2 和模态分量 3 奇异熵值均大于触电后电流，代表触电前电流各层的复杂程度和能量分散程度均高于触电后电流。

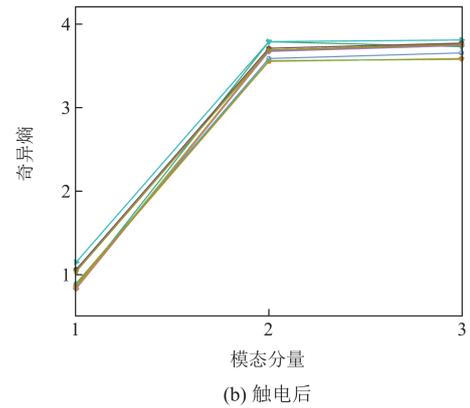
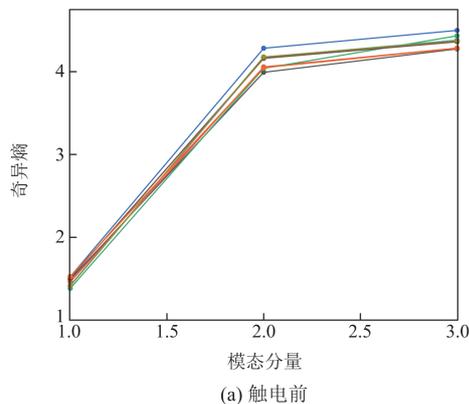


图 19 触电前/后奇异熵值

Fig. 19 Singular entropy values before and after electric shock

根据表 4 和表 5 可知，触电前/后最大奇异值和奇异熵特征量存在差异，其值的大小仅与信号的能量与复杂程度有关，与电流幅值无关，多因素影响下最大奇异值和奇异熵差异 < 10%。因此最大奇异值和奇异熵特征可以作为直流触电的时频特征量。

表 4 多因素下触电前奇异熵与归一化的奇异值

Table 4 Singular entropy and normalized singular value before electric shock under multiple factors

组别	奇异值			奇异熵		
	模态 1	模态 2	模态 3	模态 1	模态 2	模态 3
1	1	0.0285	0.0252	1.218	4.177	4.374
2	1	0.0286	0.0242	1.126	4.048	4.282
3	1	0.0283	0.0235	1.159	4.157	4.259
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
96	1	0.0284	0.0236	1.278	4.281	4.351

表 5 多因素下触电后奇异熵与归一化的奇异值

Table 5 Singular entropy and normalized singular value after electric shock under multiple factors

组别	奇异值			奇异熵		
	模态 1	模态 2	模态 3	模态 1	模态 2	模态 3
1	1	0.0099	0.004 59	0.8388	3.682	3.751
2	1	0.0095	0.004 40	0.8466	3.782	3.723
3	1	0.0090	0.004 55	0.8251	3.665	3.736
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
96	1	0.0093	0.004 79	0.8893	3.554	3.571

4 结论

本文以活体猪为试验对象，通过搭建的低压直流模拟人身触电试验平台，获取了多因素下动物体直流触电电流，分析了多因素下直流触电电流的时域响应特性，同时提出一种 VMD-SVD 方法对触电前/后直流触电电流的时频特性进行分析，主要结论如下。

1) 活体猪触电电流波形为一缓慢上升的非线

性时变直流电流信号, 触电电压、触电路径、皮肤表面干湿湿度、触电方式、动物体质量对动物触电电流幅值影响显著。

2) 多因素下动物体直流触电电流的幅值和斜率峰值与多因素有关, 且幅值与斜率峰值呈正相关。峰值上升时间 Δt_p 随机分布在 40.2~69.3 ms, 斜率上升时间 Δt_{sp} 随机分布在 13.1~21.2 ms, 与多因素无关。

3) 触电前/后最大奇异值和奇异熵特征量存在差异, 其值的大小仅与信号的能量与复杂程度有关, 与电流幅值无关, 多因素下最大奇异值和奇异熵差异 $< 10\%$ 。

4) 可以选取斜率峰值 $S_{max} \geq 4$ 、峰值上升时间 $\Delta t_p \geq 13$ ms、斜率上升时间 $\Delta t_{sp} \geq 40$ ms、最大奇异值、奇异熵特征量作为触电特征量, 用于触电识别。

参考文献

- [1] 沈赋, 李施伟, 王健, 等. 融合储能的光伏发电系统并网逆变器建模与稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 131-143.
SHEN Fu, LI Shiwei, WANG Jian, et al. Modeling and stability analysis of a photovoltaic grid-connected inverter integrated with an energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 131-143.
- [2] 皇金锋, 杨振宇, 李帅杰. 基于混合储能的光储直流微网改进型滑模自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 151-159.
HUANG Jinfeng, YANG Zhenyu, LI Shuaijie. Improved sliding mode self-disturbance resistance control of an optical storage DC micro-grid based on hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 151-159.
- [3] 王桐, 史雯, 石浩渊, 等. 基于平稳小波变换的光伏直流串联电弧故障检测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 82-93.
WANG Tong, SHI Wen, SHI Haoyuan, et al. Photovoltaic DC series arc fault detection based on stationary wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 82-93.
- [4] 黄瑞, 肖宇, 刘雄, 等. 基于智能电能表量测数据的低压供电线路健康状态评估[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 204-208, 215.
HUANG Rui, XIAO Yu, LIU Xiong, et al. Health status assessment of low voltage power supply line based on smartelectricity meter measurement data[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 204-208, 215.
- [5] SARANGI S, SAHU B K, ROUT P K. A comprehensive review of distribution generation integrated DC microgrid protection: issues, strategies, and future direction[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(4): 5006-5031.
- [6] WANG S, LI H, LIU Q, et al. Research on the requirements for the break time of DC-RCD under different voltage levels and grounding modes in LVDC system[C] // 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 30-November 1, 2020, Wuhan, China: 3675-3680.
- [7] MARISCOTTI A. Electrical safety and stray current protection with platform screen doors in DC rapid transit[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1724-1732.
- [8] 李露露, 雍静, 梁仕斌, 等. 民用低压直流供电系统保护综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 133-143.
LI Lulu, YONG Jing, LIANG Shibin, et al. A review of civil low voltage DC distribution system protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 133-143.
- [9] WANG T, MONTI A, GOLDBECK R, et al. Voltage selection and personal safety in low voltage direct current networks at customer end[C] // 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), October 21-25, 2018, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina: 1-6.
- [10] LI L, YONG J, ZENG L, et al. Investigation on the system grounding types for low voltage direct current systems[C] // 2013 IEEE Electrical Power & Energy Conference, August 21-23, 2013, Halifax, NS, Canada: 1-5.
- [11] CHENG D, ZHANG B, XIONG S, et al. Residual current detection prototype and simulation method in low voltage DC system[J]. IEEE Access, 2022, 10: 51100-51109.
- [12] 李天友, 郭峰. 低压配电的触电保护技术及其发展[J]. 供用电, 2019, 36(12): 2-8.
LI Tianyou, GUO Feng. Electric shock protection technology and its development of low-voltage distribution[J]. Distribution and Utilization, 2019, 36(12): 2-8.
- [13] 雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52.
YONG Jing, XU Xin, ZENG Liqiang, et al. A review of low voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42-52.
- [14] 曹虹, 周泽昕, 柳焕章, 等. 基于突变电流积聚量的高压直流输电线路伪同步差动保护新原理[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 70-80.
CAO Hong, ZHOU Zexin, LIU Huanzhang, et al. Principle of pseudo-synchronous differential protection based on

- sudden current accumulation for HVDC transmission lines[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(1): 70-80.
- [15] TISSERAND E, LEZAMA J, SCHWEITZER P, et al. Series arcing detection by algebraic derivative of the current[J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 119: 91-99.
- [16] 李海锋, 褚倍钰, 梁远升, 等. 基于时域卷积功率差的多端混合高压直流线路快速纵联保护方法[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(6): 175-182.
LI Haifeng, CHU Beiyu, LIANG Yuansheng, et al. Fast pilot protection method of multi-terminal hybrid HVDC line based on time-domain differential convolution power[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(6): 175-182.
- [17] 晁武杰, 李智诚, 唐志军, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电线路双极性故障检测方法研究[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(9): 165-170.
CHAO Wujie, LI Zhicheng, TANG Zhijun, et al. Research of bipolar fault detection method based on the MMC flexible DC transmission lines[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(9): 165-170.
- [18] 刘祥波, 王森, 高芳, 等. 基于幅值和斜率变化的配电线路故障录波数据同步方法研究[J]. *供用电*, 2024, 41(4): 19-27.
LIU Xiangbo, WANG Sen, GAO Fang, et al. Research on synchronization method of fault recording data of distribution line based on amplitude and slope change[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(4): 19-27.
- [19] YEAP Y M, GEDDADA N, SATPATHI K, et al. Time- and frequency-domain fault detection in a VSC-interfaced experimental DC test system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(10): 4353-4364.
- [20] 黄建明, 瞿合祚, 李晓明. 基于短时傅里叶变换及其谱峭度的电能质量混合扰动分类[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 3184-3191.
HUANG Jianming, QU Hezuo, LI Xiaoming. Classification for hybrid power quality disturbance based on STFT and its spectral kurtosis[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 3184-3191.
- [21] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特征的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(21): 5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(21): 5741-5749.
- [22] ZHU H, WU C, ZHOU Y, et al. Electric shock feature extraction method based on adaptive variational mode decomposition and singular value decomposition[J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2023, 17(9): 361-372.
- [23] LI C, ZHANG L. A novel denoising algorithm based on wavelet and non-local moment mean filtering[J]. *Electronics*, 2023, 6: 1-8.
- [24] 陈春, 曹伯仲, 曹一家, 等. 高比例分布式电源接入下基于变分模态分解的励磁涌流辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 94-104.
CHEN Chun, CAO Bozhong, CAO Yijia, et al. Identification of inrush current based on variational modal decomposition under a high proportion of distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 94-104.
- [25] 骆钊, 张涛, 阮彦俊, 等. 基于 APSO-SSD-SVD 的特高压换流站 OLTC 振动信号降噪方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(21): 13-23.
LUO Zhao, ZHANG Tao, RUAN Yanjun, et al. Noise reduction method for the OLTC vibration signal of a UHV converter station based on APSO-SSD-SVD[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(21): 13-23.

收稿日期: 2024-08-19; 修回日期: 2025-01-13

作者简介:

朱鸿章(1991—), 男, 博士研究生, 研究方向为电网防灾减灾; E-mail: 895940611@qq.com

吴传平(1984—), 男, 通信作者, 博士, 正高级工程师, 研究方向为电网防灾减灾、储能技术、电能质量控制等。

E-mail: jandom@126.com

(编辑 许威)