

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006019

基于相关理论及零休特征融合的串联故障电弧检测方法^{*}

赵怀军¹, 秦海燕¹, 刘 凯², 朱凌建¹

(1. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048; 2. 应急管理部沈阳消防研究所 沈阳 110034)

摘 要:针对串联故障电弧发生时隐蔽性和随机性强、电流幅值相对较小易被负载电流湮没、与负载性质关联性大而导致的难以准确检测问题,提出一种基于相关理论及零休特征融合的串联故障电弧检测方法。以参照 UL1699 标准搭建的低压单相交流串联故障电弧实验平台为基础,通过采集用电回路的两个周期电流并计算其零休时间比例系数、滤除低频成份后的归一化绝对值最大互相关系数,然后用模糊逻辑器将两系数进行融合处理得到串联故障电弧综合特征识别系数,进一步结合零休时间比例系数并分别与经验阈值比较,从而判别是否有串联故障电弧发生。结果表明,该法对低压单相交流用电回路中使用 GB14287.4 推荐负载时产生的串联故障电弧辨识率高达 100%,无误判漏判现象发生。

关键词: 串联故障电弧检测; 零休时间比例系数; 相关理论; 特征融合

中图分类号: TM501 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A series fault arc detection method based on the fusion of correlation theory and zero current feature

Zhao Huaijun¹, Qin Haiyan¹, Liu Kai², Zhu Lingjian¹

(1. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Shenyang Fire Research Institute of MEM, Shenyang 110034, China)

Abstract: Due to the concealment and randomness of the series fault arc, it is difficult to detect these faults accurately. The relatively small current amplitude is easy to be annihilated by the load current, and the load is highly correlated with the nature of the load. To solve these problems, a method based on the low-voltage single-phase AC series fault arc experiment platform is proposed, which refers to the UL1699 standard. Two periodic currents of the electrical circuit are collected. The proportion coefficient of zero current time and the maximum correlation coefficient of the normalized absolute value after filtering the low-frequency components are calculated. Then, two coefficients are fused by a fuzzy logic processor to obtain the comprehensive characteristic identification coefficient of the series fault arc. It is possible to identify whether there is occurrence of series fault arc by comparing the deep combination of the achieved coefficient and the proportion coefficient of zero current time with the empirical threshold value. Experimental results show that this method can recognize up to 100% of the series fault arc when the recommended load in GB14287.4 is used in the low-voltage single-phase AC power circuit. There is no phenomenon of misjudgment and leakage.

Keywords: series fault arc detection; proportion coefficient of zero current time; correlation theory; feature fusion

0 引 言

串联故障电弧是配用电回路中因电气线路连接处接触不良、单根导线断裂、线缆或设备绝缘老化破损等原因

引起电压击穿缺陷处空气间隙所导致的气体游离放电现象,其发生时会产生大量热能,伴有高温残渣溅射,极易引燃周围易燃易爆品,引发火灾与爆炸事故,危及人民生命及财产安全。因此,精准检测串联故障电弧保障用电安全,其经济和民生意义巨大。但是,在实际工程应用

收稿日期:2020-01-13 Received Date:2020-01-13

^{*} 基金项目:国家重点研发计划重大科学仪器设备开发重点专项(2017YFF0104403)资助

中,受限于串联故障电弧隐蔽性和随机性强、发生时电流幅值相对较小易被负载电流湮没、受负载性质影响较大等特点的影响,很难对其做到准确检测。

目前国内外对串联故障电弧的检测方法主要有以下3类。1) 基于电弧数学模型检测相应电参量识别电弧的方法,此法因建立的电弧数学模型不完善、检测参数较多、电弧识别算法复杂等缺陷存在一直停留在模型仿真阶段^[1-2],应用发展缓慢。2) 基于电弧放电时引发声、光、热及电磁辐射等物理现象间接识别电弧的方法,此法在实际应用中会受到电弧发生位置不确定及用电负载类型多样化的限制,适用范围有一定局限性^[3-4]。3) 基于故障电弧发生时其回路电压、电流信号特征变化识别电弧的方法,电压信号特征变化识别法因负载位置范围变化大难以进行有效电压取样而使其在实际应用中受阻,电流信号特征变化识别法包括:(1) 基于串联电弧电流某个或某些特征进行故障识别的方法,如时域频域特征^[5]、小波变换分析法^[6-7]、峭度与脉冲数双重判据法^[8],此方法存在故障识别率低、准确性不高等缺陷;(2) 基于串联故障电弧电流整体特性进行故障识别的方法,如神经网络分析法^[9-10]等,此方法因需要大量数据样本进行算法训练导致其存在实时性差的缺陷;(3) 基于串联电弧电流某个或某些特征与整体特征的融合技术进行故障识别的方法^[11-16],如文献[11]对电弧电流特征量分类排序后基于支持向量机技术实现故障电弧识别,其算法难度大、识别速率低,文献[14]基于相关系数和偏态指标方法实现故障电弧识别,因工频分量占比大使相关系数识别精度需达到0.000 1甚至更高的要求,工程实用性不强,同时其融合采用的极限学习机分类识别技术实时性差。

本文以参照美国 UL1699 标准^[17]搭建的低压单相交流串联故障电弧实验平台为基础,进行了大量实验研究和分析,提出一种基于相关理论及零休特征融合的串联故障电弧检测方法,其通过利用模糊逻辑器对用电回路两个周期电流的零休特征、去除低频(含工频)成份后的最大相关程度特征进行融合处理,得到串联故障电弧综合特征识别系数,将此系数、零休时间比例系数分别与经验阈值进行比较,从而精准检测用电回路中是否有串联故障电弧发生。

1 基于相关理论及零休特征融合的串联故障电弧检测理论分析

1.1 串联故障电弧电流特征提取

以用电回路两个工频周期电流波形为研究对象,假设 x 为某一工频周期内无串联故障电弧发生时电流波形, y 为另一工频周期内无串联故障电弧或有串联故障电弧发生时电流波形。分别采用基于零休特征的零休时

间比例系数计算方法、基于相关理论的改进型归一化绝对值最大互相关系数计算方法对 x 、 y 电流波形进行处理,以提取串联故障电弧特征。

1) 基于零休特征的零休时间比例系数获得

以工频周期电流有效值的 5% 为零休时间起止记录的幅值阈值。当采样时间间隔一定时,低于记录零休时间起止幅值阈值的时间即为零休时间。以电流波形 x 、 y 的零休时间比例系数作为零休特征,求取步骤如下所述。

(1) 分别计算用电回路中两电流波形 x 、 y 的有效值 $I_{x_{rms}}$ 和 $I_{y_{rms}}$, 计算公式如式(1)、(2)所示。

$$I_{x_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |x_i|^2} \quad (1)$$

$$I_{y_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |y_i|^2} \quad (2)$$

式中: x_i 为用电回路电流波形 x 的第 i 个采样值; y_i 为用电回路电流波形 y 的第 i 个采样值; k 为一个工频周期电流波形的总采样点数。

(2) 分别统计两电流波形 x 、 y 零休时间期间的采样间隔数 P_x 、 P_y , 计算公式如式(3)、(4)所示:

$$P_x = \sum_{i=1}^{k-1} (|x_i| < I_{x_{rms}} \times 5\% \& |x_{i+1}| < I_{x_{rms}} \times 5\%) \quad (3)$$

$$P_y = \sum_{i=1}^{k-1} (|y_i| < I_{y_{rms}} \times 5\% \& |y_{i+1}| < I_{y_{rms}} \times 5\%) \quad (4)$$

(3) 计算两电流波形 x 、 y 的零休时间, 计算公式如式(5)、(6)所示:

$$t_x = \frac{P_x}{f_s} \quad (5)$$

$$t_y = \frac{P_y}{f_s} \quad (6)$$

式中: f_s 为电流波形采样频率(5 MHz)。

(4) 计算两电流波形 x 、 y 的零休时间比例系数 $A1$, 计算公式如式(7)所示:

$$A1 = \frac{\min(t_x, t_y)}{\max(t_x, t_y)} \quad A1 \in [0, 1] \quad (7)$$

2) 基于相关理论的改进型归一化绝对值最大互相关系数获得

(1) 基于相关理论的通用型归一化绝对值最大互相关系数获得

基于相关理论将两电流波形 x 、 y 进行互相关运算获得互相关函数 $\hat{R}_{xy}(m)$, 然后对 $\hat{R}_{xy}(m)$ 进行归一化处理获得互相关系数, 取其绝对值最大的作为相关理论归一化绝对值最大互相关系数。具体获得实施步骤如下所述。

① 计算用电回路中两电流波形 x 、 y 的互相关函数

$\hat{R}_{xy}(m)$, 计算公式如式(8)所示:

$$\hat{R}_{xy}(m) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{k-m-1} x_{i+m} y_i^*, & m \geq 0 \\ \hat{R}_{yx}^*(-m), & m < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: m 为电流波形 y 相对电流波形 x 延迟的采样点数 ($m=0,1,2,\cdots,k-1$); k 为一个工频周期电流波形的总采样点数; x_{i+m} 为电流波形 x 的第 $i+m$ 个采样值; y_i^* 为电流波形 y 的第 i 个采样值 y_i 的复共轭值; $\hat{R}_{yx}(-m)$ 为电流波形 x 相对电流波形 y 延迟 $-m$ 个采样点数的互相关函数; $\hat{R}_{yx}^*(-m)$ 为 $\hat{R}_{yx}(-m)$ 的复共轭值。

②对互相关函数 $\hat{R}_{xy}(m)$ 进行归一化处理获得介于 -1 和 1 之间的表示两电流波形 x 和 y 相关程度的互相关系数 $\hat{R}_{xy,\text{coeff}}(m)$, 计算公式如式(9)所示:

$$R_{xy,\text{coeff}}(m) = \frac{1}{\sqrt{\hat{R}_{xx}(0) \times \hat{R}_{yy}(0)}} \times \hat{R}_{xy}(m) \quad (9)$$

式中: $\hat{R}_{xx}(0)$ 和 $\hat{R}_{yy}(0)$ 分别为电流波形 x 和 y 的自相关函数的最大值。

由于 $\hat{R}_{xy,\text{coeff}}(m)$ 数值表征着两电流波形 x 和 y 的相似度, 因此提取互相关系数绝对值中的最大值作为归一化绝对值最大互相关系数 $A2$, 则 $A2$ 代表两电流波形 x 和 y 的最大相似度, 计算公式如式(10)所示:

$$A2 = \text{Max}(\text{abs}(\hat{R}_{xy,\text{coeff}}(m))) \quad (10)$$

(2) 基于相关理论的改进型归一化绝对值最大互相关系数获得

由于用电回路电流波形中主要成份为工频^[18], 所以故障电弧发生前后电流波形 x 和 y 的相关性仍较大。为了减少工频和其他低频电流成份对串联故障电弧特征影响, 凸显串联故障电弧发生前后用电回路电流波形的差异性, 本文对上述基于相关理论的通用型归一化绝对值最大互相关系数获得方法进行改进, 即先去除用电回路电流波形中的工频和其他低频成份, 再基于相关理论求取归一化绝对值最大互相关系数。

①去除工频和其他低频成份的滤波器设计

本文选用滤波平坦、响应特性更加接近理想设计目标的 3 阶, 截止频率为 550 Hz 巴特沃斯高通滤波器。

②将用电回路电流波形 x, y , 通过上述设计的滤波器处理分别得到电流波形 X 和 Y , 同理根据式(8)~(10)分别计算可获得改进型归一化绝对值最大互相关系数 $A2^*$, 如式(11)所示, $A2^*$ 代表两电流波形 X 和 Y 的最大相似度。

$$A2^* = \text{Max}(\text{abs}(\hat{R}_{XY,\text{coeff}}(m))) \quad (11)$$

式中: $\hat{R}_{XY,\text{coeff}}(m)$ 为电流波形 X 和 Y 的互相关系数。

1.2 串联故障电弧特征融合

为了提高用电回路串联故障电弧检测的准确性, 采

用模糊逻辑处理器对电流波形 x, y 零休时间比例系数 $A1$ 和改进型归一化绝对值最大互相关系数 $A2^*$ 两特征进行模糊融合以获得串联故障电弧综合特征识别系数 $A0$ 。具体步骤如下所示:

1) 对输入变量零休时间比例系数 $A1$ 、改进型归一化绝对值最大互相关系数 $A2^*$ 以及输出变量串联故障电弧综合特征识别系数 $A0$ 进行模糊化, 其模糊集及其论域定义如下:

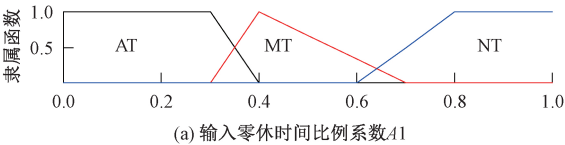
$A1$ 的模糊集为 {AT(故障)、MT(可能发生故障)、NT(无故障)};

$A2^*$ 的模糊集为 {AC(故障)、MC(可能发生故障)、NC(无故障)};

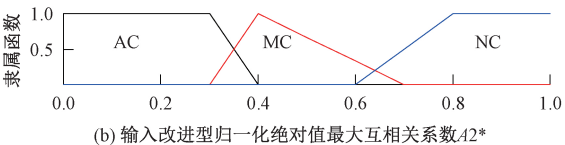
$A0$ 的模糊集为 {AA(故障)、MM(可能发生故障)、NN(无故障)};

$A1, A2^*, A0$ 的论域均为 $V=[0, 1]$ 。

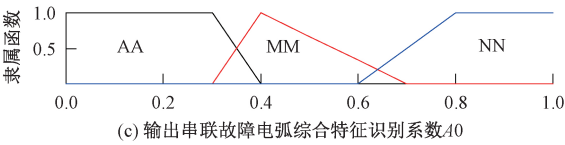
2) 根据大量实验及经验定义隶属函数如图 1 所示, 即对模糊变量赋值, 确定论域内元素对模糊变量的隶属度。



(a) Affiliation function of porportion coefficient $A1$ of the zero current time



(b) Affiliation function of the modified normalized absolute maximum cross correlation coefficient $A2^*$



(c) Affiliation function of coefficient $A0$ of the comprehensive characteristic identification of series fault arc

图 1 模糊集隶属函数

Fig.1 Membership function graph of fuzzy set

3) 根据大量实验及经验得出串联故障电弧模糊识别的 9 条模糊规则并制定模糊识别规则表, 如表 1 所示。

表 1 模糊识别规则表

Table 1 Fuzzy recognition rule

模糊识别		改进型归一化绝对值最大互相关系数 $A2^*$		
		AC	MC	NC
零休时间比例系数 $A1$	AT	AA	AA	AA
	MT	AA	MM	MM
	NT	MM	MM	NN

4) 将 $A1$ 和 $A2^*$ 按照 Mamdani 算法进行模糊推理, 计算式如 (12) 所示:

$$u_{A0'}(z) = \{ \bigvee_{m \in V} u_{A1'}(m) \wedge (u_{A1}(m) \wedge u_{A0}(z)) \}$$
$$\wedge \{ \bigvee_{n \in V} u_{A2^*'}(n) \wedge (u_{A2^*}(n) \wedge u_{A0}(z)) \}$$

(12)

式中: m 为 $A1$ 论域中的元素; $u_{A1}(m)$ 为 m 隶属于 $A1$ 的隶属度; $u_{A1'}(m)$ 为输入新元素隶属于 $A1$ 的隶属度; n 为 $A2^*$ 论域中的元素; $u_{A2^*}(n)$ 为 n 隶属于 $A2^*$ 的隶属度; $u_{A2^*'}(n)$ 为输入新元素隶属于 $A2^*$ 的隶属度; z 为 $A0$ 论域中的元素; $u_{A0}(z)$ 为 z 隶属于 $A0$ 的隶属度; $u_{A0'}(z)$ 为 $u_{A1'}(m)$ 和 $u_{A2^*'}(n)$ 模糊识别结果。

5) 通过最大隶属度平均法对输出的模糊集进行反模糊化处理获得串联故障电弧综合特征识别系数 $A0$ 。最大隶属度平均法计算公式如式 (13)、(14) 所示:

$$A0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i$$

(13)

$$z_i = \max_{z \in V} (u_{A0}(z))$$

(14)

式中: N 为具有相同最大隶属度输出的总数; z_i 为模糊识别结果集合中隶属度最大的输出值; $u_{A0}(z)$ 为模糊识别结果; V 为输出论域。

获得串联故障电弧综合特征识别系数 $A0$ 后, 进一步结合零休时间比例系数 $A1$, 分别与经验阈值 $A0 < 0.5$ 且 $A1 < 0.8$ (大量实验及经验获得) 比较, 满足此条件时, 则判断结果为有串联故障电弧发生, 反之则无。

2 实验装置与典型负载实验

2.1 实验装置

本文搭建的低压单相交流串联故障电弧实验平台装置如图2所示, 其中1为单相交流220 V/50 Hz的市电电源, 2为空气开关, 3为电流探头(CP8150A 电流钳, 12 MHz带宽), 4为示波器(MDO3024 泰克示波器, 200 MHz带宽), 5为电气负载, 6为电弧发生器。电弧发生器实物如图3所示, 其静、动触头分别采用直径为80.0、50.0 mm的石墨球, 动触杆端连接螺旋测微千分尺, 最小步距0.1 mm。

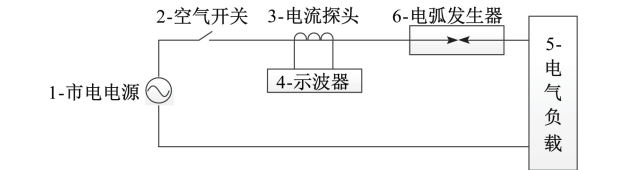


图2 单相交流串联故障电弧实验平台装置原理
Fig.2 Schematic diagram of single phase AC series fault arc experimental platform device

实验开始时让电弧发生器的静触头和动触头保持紧密接触, 此时电路系统中无故障电弧发生, 然后缓慢调节电弧发生器的螺旋测微千分尺移动动触头, 使静、动触头

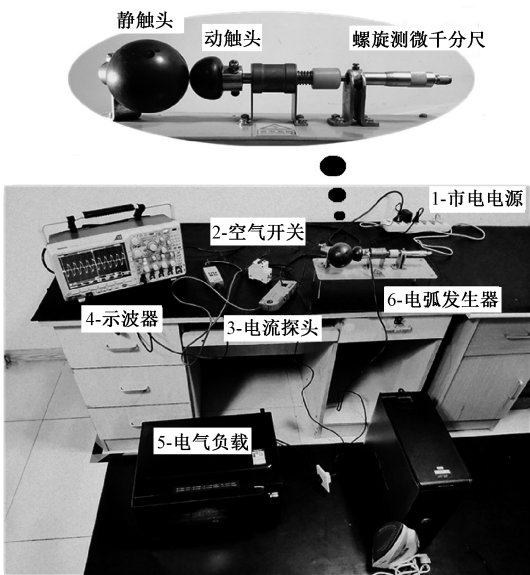


图3 单相交流串联故障电弧实验平台装置实物
Fig.3 Physical diagram of single phase AC series fault arc experimental platform device

逐渐打开出现间隙产生串联故障电弧, 继续调节静、动触头间隙距离使电弧保持稳定持续, 由示波器记录用电回路中电流探头采集的电流波形。

2.2 典型负载实验

串联故障电弧电流信号特征会跟随电气负载类型的不同而发生变化, 本文采用 GB 14287.4 标准^[19]推荐的常用典型负载, 如表2所示。

表2 常用典型负载类型

Table 2 The commonly used types

序号	属性	类型	名称	参数
1	线性	阻性负载	300 Ω 电阻	220 V 162 W
2	负载	阻性负载	电熨斗	220 V 1 100 W
3		涡流	电磁炉	220 V 2 000 W
4		开关电源	计算机	220 V 600 W
5	非线性负载	磁控管	微波炉	220 V 1 100 W
6		串激电机	角磨机	220 V 660 W
7		串激电机	吸尘器	220 V 1 200 W
8		气体放电	日光灯 (带电子镇流器)	220 V 36 W

在相同实验条件下, 对表2中各电气负载用电回路在无串联故障电弧发生和有串联故障电弧发生两种情况下分别进行5组实验, 用示波器记录其电流采样值, 采样频率 f_s 为5 MHz, 记录长度为10个工频周期。其中, 在上述典型电气负载条件下用电回路中无串联故障电弧发

生时有和串联故障电弧发生时的第一组实验前5个工频周期电流波形如图4所示,其余实验电流波形在此不再赘述,但均参与本文后续数据处理过程。

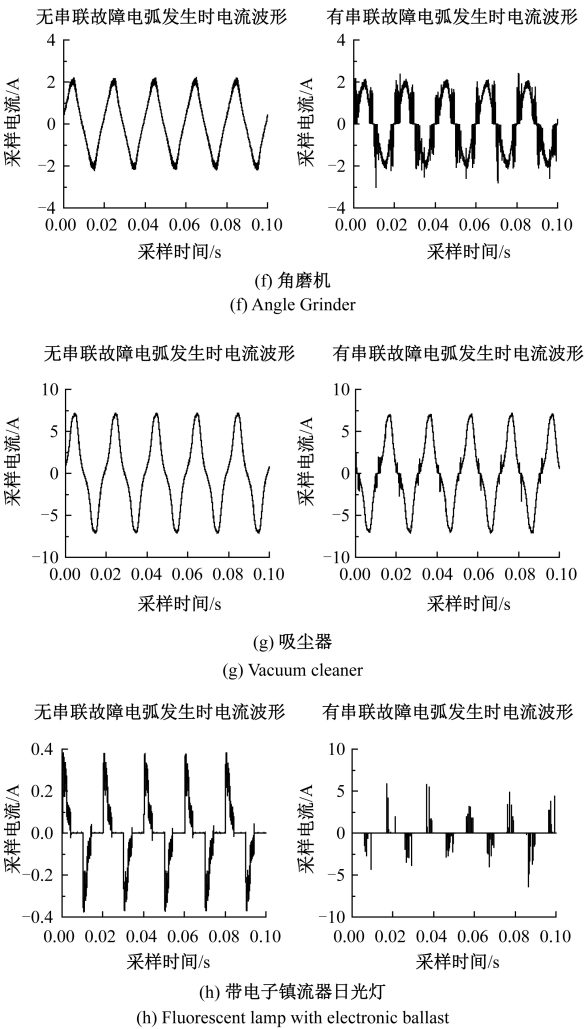
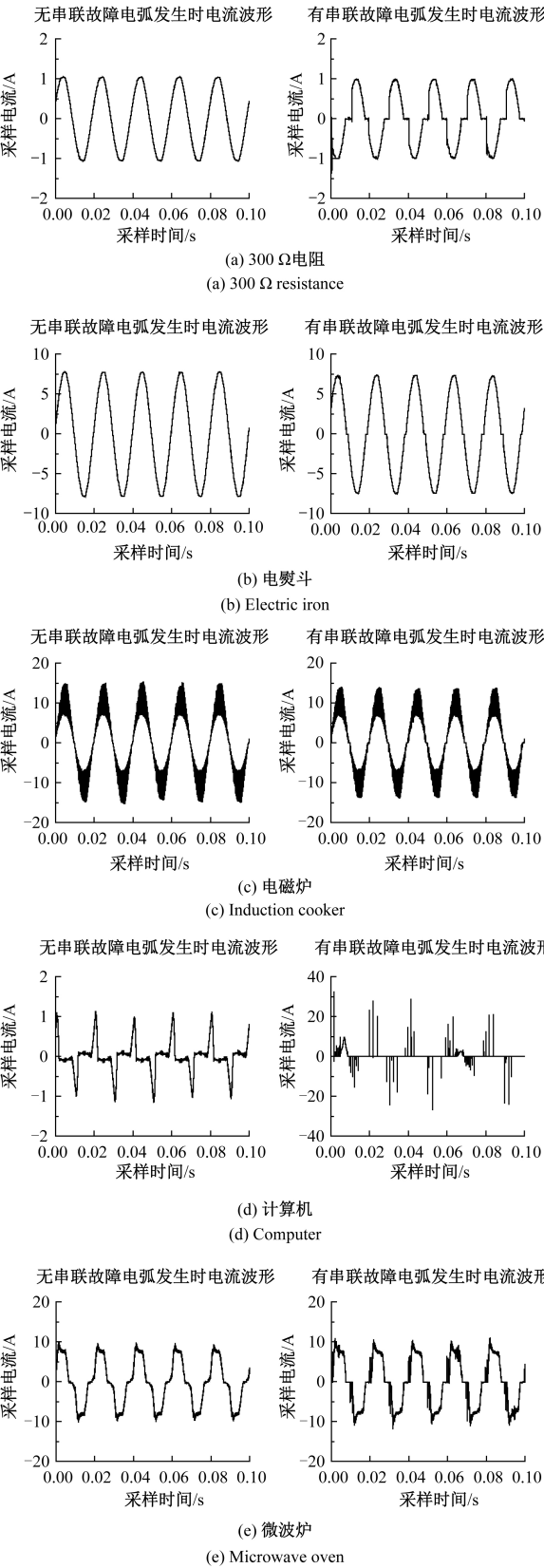


图4 用电回路无/有串联故障电弧发生时电流波形图
Fig.4 Current waveform of no series fault arc/series fault arc in electric circuit our-link structure diagram

图4(a)和(b)所示为表2线性负载条件下的电流波形,(c)~(h)所示为非线性负载条件下的电流波形。显然看出:对于线性负载,在故障电弧发生前后,用电回路电流过零点附近的“零休”现象表现明显,同时因故障电弧放电过程中其导电系数呈现强非线性特征,其非“零休”时段电流信号中含有高次谐波;对于非线性负载,在故障电弧发生前后,用电回路电流过零点附近的“零休”现象和电流信号中含有的高次谐波^[20]会发生复杂变化,且不同类型负载变化差异较大。本文以这些实验获得的电流变化特征为依据,按上文所述有关理论对实验数据进行分析研究。

3 基于相关理论及零休特征的系数提取与数据分析

在表2所示的典型负载条件下进行实验,分别提取

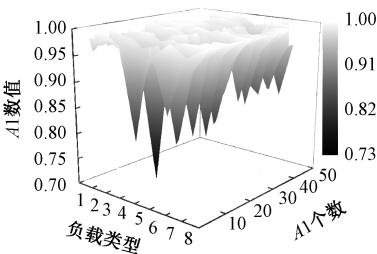
电流波形 x 与无串联故障电弧发生时电流波形 y 、电流波形 x 与有串联故障电弧发生时电流波形 y 之间的特征系数并进行数据分析。

3.1 基于零休特征的零休时间比例系数提取与数据分析

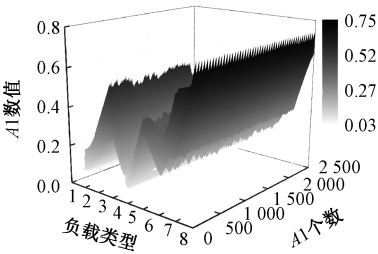
在表 2 所示的典型负载条件下,根据式(1)~(7)分别计算其用电回路电流波形 x 与无串联故障电弧发生时电流波形 y 、电流波形 x 与有串联故障电弧发生时电流波形 y 之间的零休时间比例系数 $A1$,获得数据范围如表 3 和图 5 所示。其中,表 3 左栏的 Max、Min 分别为无串联故障电弧发生时 50 个电流波形彼此相邻零休时间比例系数 $A1$ (总计 49 个)的最大值、最小值;表 3 右栏的 Max、Min 分别为 50 个有串联故障电弧发生和无串联故障电弧发生时电流波形相互间零休时间比例系数 $A1$ (总计 2 500 个)的最大值、最小值。本文后续表格中的 Max、Min 与此类似。图 5(a)所示为 x 与无串联故障电弧发生时电流波形 y 之间的零休时间比例系数 $A1$,图 5(b)所示为 x 与有串联故障电弧发生时电流波形 y 之间的零休时间比例系数 $A1$ 。

表 3 常用典型负载零休时间比例系数 $A1$ 数据范围
Table 3 Data range of proportion coefficient $A1$ of the zero current time in common typical load

零休时间 比例系数 $A1$	x/y (无串联故障电弧 发生时电流波形)		x/y (有串联故障电弧 发生时电流波形)	
	Max	Min	Max	Min
300 Ω 电阻	1	0.931 423	0.226 878	0.069 535
电熨斗	0.998 748	0.962 458	0.344 098	0.184 098
电磁炉	0.999 406	0.893 924	0.588 697	0.267 446
计算机	0.999 467	0.729 282	0.203 471	0.029 489
微波炉	0.998 876	0.883 507	0.450 016	0.319 492
角磨机	0.999 729	0.816 219	0.420 859	0.174 611
吸尘器	1	0.94 087	0.644 168	0.283 644
日光灯 (带电子镇流器)	0.999 983	0.995 255	0.747 131	0.617 76



(a) x 与无串联故障电弧发生时 y 的 $A1$ 图
(a) $A1$ diagram of x and y when no series fault arc occurs



(b) x 与有串联故障电弧发生时 y 的 $A1$ 图
(b) $A1$ diagram of x and y when series fault arc occurs

图 5 常用典型负载零休时间比例系数 $A1$ 图
Fig.5 Diagram of proportion coefficient $A1$ of the zero current time in common typical load

从表 3 和图 5 中分析得出:1)对于除计算机外的其他典型负载,用电回路电流波形 x 与有串联故障电弧发生时电流波形 y 的零休时间比例系数 $A1$ 均比 x 与无串联故障电弧发生时电流波形 y 的 $A1$ 明显减小,如在表 3 右栏与图 5(b)中 $A1$ 均小于 0.8,而表 3 左栏与图 5(a)中 $A1$ 均大于 0.8;2)计算机和日光灯(带电子镇流器)的 $A1$ 变化范围存在交叠区,如在表 3 中日光灯 x 与有串联故障电弧发生时电流波形 y 的 $A1$ 范围为 0.617 76~0.747 131,计算机 x 与无串联故障电弧发生时电流波形 y 的 $A1$ 范围为 0.729 282~0.999 467,二者在 0.729 282~0.747 131 之间发生重叠现象,在交叠区内难以用 $A1$ 检测判断是否有串联故障电弧发生。

因此,采用零休时间比例系数 $A1$ 为特征依据对用电回路串联故障电弧进行检测的方法,会受到负载类型的影响和限制,存在误判漏判现象。

3.2 基于相关理论的改进型归一化绝对值最大互相关系数提取与数据分析

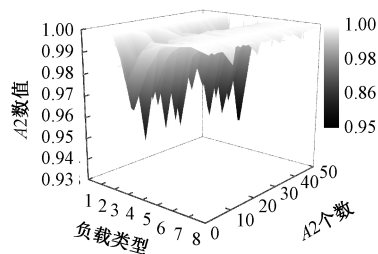
在表 2 所示的典型负载条件下,根据式(8)~(10)计算用电回路电流波形 x 与无串联故障电弧发生时电流波形 y 、电流波形 x 与有串联故障电弧发生时电流波形 y 之间的归一化绝对值最大互相关系数 $A2$,根据式(11)计算改进型归一化绝对值最大互相关系数 $A2^*$,其中 $A2$ 的数据范围如表 4 和图 6 所示, $A2^*$ 数据范围如表 5 和图 7 所示。

从表 4 和图 6 中分析得出,对于除计算机和日光灯外,对于其他典型负载归一化绝对值最大互相关系数 $A2$ 均大于 0.94,甚至同一负载条件的 $A2$ 还存在严重的交叠现象(如在表 4 中电熨斗 $A2$ 交叠范围为 0.993 694~0.996 829),这表明其他典型负载用电回路电流波形在串联故障电弧发生前后的变化不明显,不能直接将基于相关理论计算获得的归一化绝对值最大互相关系数 $A2$ 作为依据有效识别是否有串联故障电弧发生。

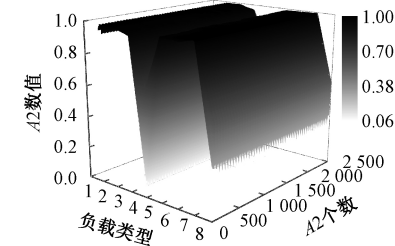
表 4 常用典型负载类型归一化绝对值
最大互相关系数 A2 数据范围

Table 4 Data range of maximum cross correlation
coefficient A2 of the normalized absolute value
in common typical load

归一化 绝对值最大互 相关系数 A2	x/y(无串联故障电弧 发生时电流波形)		x/y(有串联故障电弧 发生时电流波形)	
	Max	Min	Max	Min
300 Ω 电阻	0.999 983	0.999 226	0.996 191	0.932 141
电熨斗	0.999 989	0.993 694	0.996 829	0.984 834
电磁炉	0.999 827	0.945 264	0.995 445	0.940 745
计算机	0.997 881 9	0.984 019	0.698 114	0.056 354
微波炉	0.999 274 3	0.994 435	0.992 020	0.967 626
角磨机	0.999 255 7	0.997 421	0.994 441	0.969 359
吸尘器	0.999 930 9	0.999 659	0.998 621	0.993 771
日光灯 (带电子镇流器)	0.999 191 2	0.991 606	0.560 348	0.266 347



(a) x 与无串联故障电弧发生时 y 的 A2 图
(a) A2 diagram of x and y when no
series fault arc occurs



(b) x 与有串联故障电弧发生时 y 的 A2 图
(b) A2 diagram of x and y when
series fault arc occurs

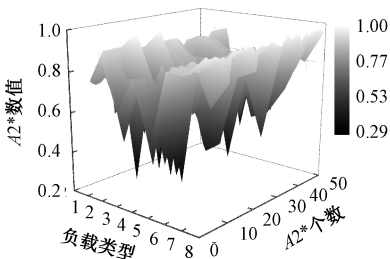
图 6 常用典型负载归一化绝对值最大互相关系数 A2 图
Fig.6 Diagram of maximum cross correlation
A2 of the normalized absolute value in common typical load

从表 5 和图 7 中分析得出:1)对于除电熨斗、电磁炉和微波炉外的其他典型负载,用电回路电流波形 X 与有串联故障电弧发生时电流波形 Y 的改进型归一化绝对值最大互相关系数 A2* 均比 X 与无串联故障电弧发生时电流波形 Y 的 A2* 明显减小,如在表 5 右栏与图 7(b)中

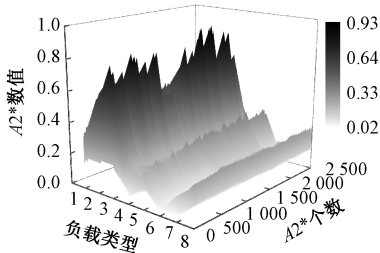
表 5 常用典型负载类型改进型归一化绝对值
最大互相关系数 A2* 数据范围

Table 5 Data range of the modified normalized absolute
maximum cross correlation coefficient A2*
in common typical load

改进型归一化 绝对值最大 互相关系数 A2*	X/Y(无串联故障电弧 发生时电流波形)		X/Y(有串联故障电弧 发生时电流波形)	
	Max	Min	Max	Min
300 Ω 电阻	0.797 263	0.521 456	0.466 06	0.154 028
电熨斗	0.924 231	0.690 613	0.626 611	0.182 428
电磁炉	0.996 951	0.293 987	0.928 5	0.108 59
计算机	0.862 5	0.769 005	0.218 082	0.036 917
微波炉	0.778 733	0.303 744	0.371 764	0.108 778
角磨机	0.916 713	0.475 789	0.172 24	0.021 195
吸尘器	0.916 833	0.480 845	0.215 478	0.030 971
日光灯 (带电子镇流器)	0.984 648	0.835 914	0.297 744	0.123 637



(a) x 与无串联故障电弧发生时 y 的 A2* 图
(a) A2* diagram of x and y when no
series fault arc occurs



(b) x 与有串联故障电弧发生时 y 的 A2* 图
(b) A2* diagram of x and y when
series fault arc occurs

图 7 常用典型负载改进型归一化绝对值最大互相关
系数 A2* 图

Fig.7 Diagram of the modified normalized absolute maximum
cross correlation coefficient A2* in common typical load

A2* 均小于 0.47,而表 5 左栏与图 7(a)中 A2* 均大于 0.47;2)300 Ω 电阻和电熨斗的 A2* 变化范围存在交叠区,如在表 5 中电熨斗 X 与有串联故障电弧发生时电流

波形 Y 的 $A2^*$ 范围为 $0.182\ 428\sim0.626\ 611$, $300\ \Omega$ 电阻 X 与无串联故障电弧发生时电流波形 Y 的 $A2^*$ 范围为 $0.521\ 456\sim0.797\ 263$, 二者在 $0.521\ 456\sim0.626\ 611$ 之间发生重叠现象, 在交叠区内难以用 $A2^*$ 检测判断是否有串联故障电弧发生。

因此, 采用改进型归一化绝对值最大互相关系数 $A2^*$ 为特征依据对用电回路串联故障电弧进行检测的方法, 会受到负载类型的影响和限制, 存在误判漏判现象。

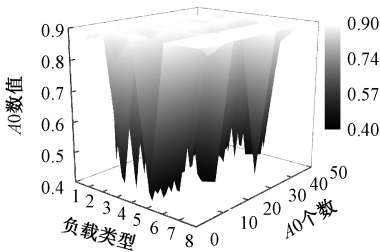
4 基于相关理论及零休特征融合的串联故障电弧检测实验结果与数据分析

在表 2 所示的典型负载条件下, 根据串联故障电弧特征融合检测方法对零休时间比例系数 $A1$ 和改进型归一化绝对值最大互相关系数 $A2^*$ 进行特征融合运算, 获得 $A0$ 的数据范围如表 6 和图 8 所示。

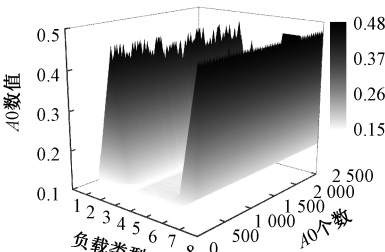
表 6 常用典型负载串联故障电弧综合特征识别系数 $A0$ 数据范围

Table 6 Data range of coefficient $A0$ of the comprehensive characteristic identification of series fault arc in common typical load

串联故障 电弧综合特征 识别系数值 $A0$	x/y (无串联故障电弧 发生时电流波形)		x/y (有串联故障电弧 发生时电流波形)	
	Max	Min	Max	Min
300 Ω 电阻	0.9	0.44	0.17	0.15
电熨斗	0.9	0.85	0.295	0.15
电磁炉	0.9	0.4	0.48	0.15
计算机	0.9	0.865	0.15	0.15
微波炉	0.89	0.405	0.45	0.15
角磨机	0.9	0.425	0.17	0.15
吸尘器	0.9	0.43	0.48	0.15
日光灯 (带电子镇流器)	0.9	0.9	0.48	0.185



(a) x 与无串联故障电弧发生时 y 的 $A0$ 图
(a) $A0$ diagram of x and y when no series fault arc occurs



(b) x 与有串联故障电弧发生时 y 的 $A0$ 图
(b) $A0$ diagram of x and y when series fault arc occurs

图 8 常用典型负载串联故障电弧综合特征识别系数 $A0$ 图
Fig.8 Diagram of the comprehensive characteristic identification coefficient $A0$ of series fault arc in common typical load

从表 6 中和图 8 中分析得出: 1) 对于除 $300\ \Omega$ 电阻、电磁炉、微波炉、角磨机和吸尘器外的其他典型负载, 其用电回路电流波形 x 与有串联故障电弧发生时电流波形 y 间通过模糊融合得到的 $A0$ 均比 x 与无串联故障电弧发生时电流波形 y 间通过模糊融合得到的 $A0$ 明显减小, 如在表 6 右栏与图 8(b) 中 $A0$ 均小于 0.5, 而表 6 左栏与图 8(a) 中 $A0$ 均大于 0.5; 2) 电磁炉、微波炉、吸尘器等负载用电回路中 $A0$ 变化范围较大, 如吸尘器用电回路电流波形 x 与有串联故障电弧发生时电流波形 y 间通过模糊融合得到的 $A0$ 出现了最大值 0.48, 超过了 x 与无串联故障电弧发生时电流波形 y 间通过模糊融合得到的 $A0$ 最小值 0.43, 这种交叠现象会导致误判漏判现象。

为解决 $A0$ 交叠问题, 进一步将电弧综合特征识别系数 $A0$ 与零休时间比例系数 $A1$ 结合, 并与大量实验获得的经验阈值 ($A0<0.5$ 且 $A1<0.8$) 比较, 判断用电回路串联故障电弧是否发生, 若满足该判断条件, 则认为用电回路中发生了串联故障电弧, 否则认为没有发生。

基于此经验阈值, 对表 2 中不同负载用电回路在无串联故障电弧发生和有串联故障电弧发生时的 5 组实验数据(每组实验均采集 10 个工频周期电流波形)采用如图 9 所示流程处理。

1) 用电回路无串联故障电弧发生时, 对表 2 典型负载用电回路, 分别采集其 50 个工频周期电流波形, 计算彼此相邻周期电流波形间的零休时间比例系数 $A1$ 、改进型归一化绝对值最大互相关系 $A2^*$ 、串联故障电弧综合特征识别系数值 $A0$, 最后与经验阈值 ($A0<0.5$ 且 $A1<0.8$) 比较后判断是否有串联故障电弧发生, 无记为 0, 有则记为 1。判断结果为 49 次均为无串联故障电弧发生, 如表 7 左栏所示。

2) 用电回路有串联故障电弧发生时, 同理采集 50 个工频周期电流波形, 计算相互间的 $A1$ 、 $A2^*$ 、 $A0$, 最后与经

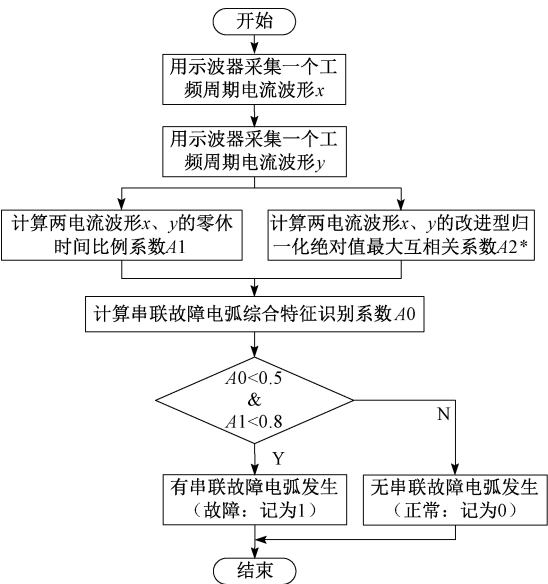


图 9 常用典型负载串联故障电弧识别流程
Fig.9 Flow chart of series fault arc identification
in common typical load

验阈值($A_0<0.5$ 且 $A_1<0.8$) 比较后判断是否有串联故障电弧发生,无记为 0,有则记为 1。判断结果为 2 500 次均为有串联故障电弧发生,如表 7 右栏所示。

表 7 所示的判断结果表明,利用模糊逻辑器对表 2 典型负载用电回路两个周期电流的零休时间比例系数、去除低频(含工频)成份后的归一化绝对值最大互相关系数进行融合处理后,进一步结合零休时间比例系数并分别与经验阈值($A_0<0.5$ 且 $A_1<0.8$) 比较,从而判断是否有串联故障电弧发生的检测方法准确性好,能防止误判漏判现象发生。

表 7 阈值判断输出数量

Table 7 Output number of threshold judgment

阈值判断 输出数量	x/y(无串联故障电弧 发生时电流波形)		x/y(有串联故障电弧 发生时电流波形)	
	1(故障)	0(正常)	1(故障)	0(正常)
300 Ω 电阻	0	49	2 500	0
电熨斗	0	49	2 500	0
电磁炉	0	49	2 500	0
计算机	0	49	2 500	0
微波炉	0	49	2 500	0
角磨机	0	49	2 500	0
吸尘器	0	49	2 500	0
日光灯 (带电子镇流器)	0	49	2 500	0

5 结 论

本文以参照美国 UL1699 标准搭建的低压单相交流串联故障电弧实验平台为基础,通过大量试验研究和分析,获得以下结论:

1) 基于零休时间比例系数检测用电回路串联故障电弧的方法,存在误判漏判现象(如对计算机、日光灯等负载);

2) 去除用电回路电流波形中的低频(含工频)成份后能凸显串联故障电弧发生前后电流波形的差异性,但基于相关理论的改进型归一化绝对值最大互相关系数检测串联故障电弧的方法,会受到负载类型的影响和限制,也存在误判漏判现象(如电磁炉、微波炉等负载);

3) 基于零休时间比例系数和改进型归一化绝对值最大互相关系数特征融合获得串联故障电弧综合特征识别系数后,进一步结合零休时间比例系数并分别与经验阈值比较,从而检测用电回路串联故障电弧的方法,不受 GB 14287.4 中典型负载性质影响,准确度高,无误判漏判现象发生。

参考文献

[1] 刘艳丽,郭凤仪,李磊,等.一种串联型故障电弧数学模型[J].电工技术学报,2019,34(14):2901-2912.
LIU Y L, GUO F Y, LI L, et al. A mathematical model for series fault arc [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 2901-2912.
[2] LIU B W, TANG J R, WU X X, et al. Analysis of arc model and its application in single-phase grounding fault simulation in distribution networks [C]. China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2018: 1865-1871.
[3] 刘艳丽,郑佳,李磊,等.环境湿度影响下串联型故障电弧特性分析[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(8):7-12.
LIU Y L, ZHENG J, LI L, et al. Analysis of series fault arc characteristics under the influence of ambient humidity [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8): 7-12.
[4] PULKKINEN J P. Commercial arc fault detection devices in military electromagnetic environment [J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2018, 7(4): 49-52.
[5] 秦雪,刘亚东,孙鹏,等.基于故障波形时频特征配网故障识别方法研究[J].仪器仪表学报,2017,38(1):

- 41-49.
- QIN X, LIU Y D, SUN P, et al. Research on distribution network fault recognition method based on time-frequency characteristics of fault waveforms[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 41-49.
- [6] 卢其威, 王涛, 李宗睿, 等. 基于小波变换和奇异值分解的串联电弧故障检测方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 208-217.
- LU Q W, WANG T, LI Z R, et al. Series arc fault detection method based on wavelet transform and singular value decomposition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 208-217.
- [7] ILMAN A F, DZULKIFLIH. Low voltage series arc fault detecting with discrete wavelet transform [C]. International Conference on Applied Engineering (ICAE), 2018: 1-5.
- [8] 鲍光海, 江润. 基于磁通不对称分布的串联电弧故障检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 54-61.
- BAO G H, JIANG R. Research on series arc fault detection based on asymmetric magnetic flux distribution [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 54-61.
- [9] 余琼芳, 黄高路, 杨艺, 等. 基于 AlexNet 深度神经网络的串联故障电弧检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(3): 145-152.
- YU Q F, HUANG G L, YANG Y, et al. Series fault arc detection method based on AlexNet deep learning network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(3): 145-152.
- [10] 焦治杰, 李腾, 王莉娜, 等. 基于卷积神经网络的光伏系统直流串联电弧故障检测[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(7): 29-34.
- JIAO ZH J, LI T, WANG L N, et al. DC series arc fault detection of photovoltaic system based on convolution neural network [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(7): 29-34.
- [11] 王智勇, 郭凤仪, 冯晓丽, 等. 基于电流信号特征的弓网电弧识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 82-91.
- WANG ZH Y, GUO F Y, FENG X L, et al. A bow network arc identification method based on current signal characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 82-91.
- [12] VU H D, CALDERON E, SCHWEITZER P, et al. Multi criteria series arc fault detection based on supervised feature selection [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 113: 23-34.
- [13] CALDERON-MENDOZA E, SCHWEITZER P, WEBER S. Kalman filter and a fuzzy logic processor for series arcing fault detection in a home electrical network [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 107: 251-263.
- [14] 崔芮华, 王洋, 李英男. 基于相关系数和偏态指标的航空串联电弧故障检测[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(01): 82-88.
- CUI R H, WANG Y, LI Y N. Aviation series arc fault detection method based on correlation coefficient and skewness index [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(1): 82-88.
- [15] 马少华, 鲍洁秋, 蔡志远, 等. 基于信息维数和零休时间的电弧故障识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(09): 2572-2579.
- MA SH H, BAO J Q, CAI ZH Y, et al. A novel arc fault identification method based on information dimension and current zero [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2572-2579.
- [16] 邹云峰, 吴为麟, 李智勇. 基于自组织映射神经网络的低压故障电弧聚类分析[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(3): 571-576.
- ZOU Y F, WU W L, LI ZH Y. Low voltage arc fault cluster analysis based on self-organizing map [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(3): 571-576.
- [17] UL 1699, Standard for safety for arc fault circuit interrupters[S].
- [18] LEZAMA J, SCHWEITZER P, TISSERAND E, et al. An embedded system for AC series arc detection by inter-period correlations of current [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 129: 227-234.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 国家标准 电气火灾监控系统 第4部分: 故障电弧探测器: GB 14287. 4-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of The People's Republic of China, Standardization Administration of China. Electrical fire monitoring system-Part4: Arcing fault detectors: GB 14287. 4-2014 [S]. Beijing: China Standards Press, 2014.
- [20] ATHARPARVEZ M, PURANDARE K R. Series arc fault detection using novel signal processing technique [C].

IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2018; 335-339.

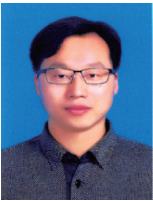
作者简介



赵怀军,1991 年于中国计量大学获得学士学位,1996 年于西安理工大学获得硕士学位,2007 年于西北工业大学获得博士学位,现为西安理工大学副教授,主要研究方向为仪器科学与技术,自动化检测和控制。
E-mail: hi_rate@ 163.com

Zhao Huaijun received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 1991, received his M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 1996, and received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2007. He is currently an associate professor at Xi'an University of

Technology. His main research interests include instrument science and technology, automated testing and control.



朱凌建(通信作者), 2001 年和 2004 年于西安理工大学分别获得学士学位和硕士学位, 2015 年于西安交通大学获得博士学位,现为西安理工大学副教授,主要研究方向为测量、控制,智能信息处理方法与技术。
E-mail: zlj_zhy@ 126.com

Zhu Lingjian (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Xi'an University of Technology in 2001 and 2004, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2015. He is currently an associate professor at Xi'an University of Technology. His main research interests include measurement, control, intelligent information processing and technology.