

# 阻性负载下含分段噪声的间歇性直流电弧阻抗模型

周灵锋, 杨善水, 王莉, 尹振东, 陈洪圳, 高杨

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 构建准确且能够较为全面地反映出电弧特征的阻抗模型, 对于电弧故障定位与检测的研究具有重要意义。针对现有的电弧阻抗模型无法反映出间歇性和完整噪声特性的问题, 提出了含分段噪声的间歇性电弧阻抗模型。首先, 通过对阻性负载条件下间歇性直流电弧的实验数据进行时频域特征分析, 其结果表明时域上电弧阻抗随电流变化且随机性较强, 频域上电弧噪声在高、低频段呈现的频谱分布存在差异。然后, 提出了具有概率分布规律的阻抗模型以反映电弧在时域上的随机性与间歇性, 同时采用分段噪声模型来体现其频域上噪声频谱分布的特点。最后, 基于实验数据验证了模型的性能, 结果表明所提出的模型能够同时在时域和频域上准确刻画出差断性电弧的随机特性。

**关键词:** 间歇性电弧; 阻抗模型; 概率分布; 分段噪声

## Intermittent DC arc impedance model with segmented noise under resistive loads

ZHOU Lingfeng, YANG Shanshui, WANG Li, YIN Zhendong, CHEN Hongzhen, GAO Yang

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Research on arc fault location and detection needs to build an accurate and comprehensive impedance model that can reflect the characteristics of the arc. There is a problem in that existing arc impedance models cannot reflect intermittent and complete noise characteristics. Thus, an intermittent arc impedance model with segmented noise is proposed. First, the time-frequency domain characteristics of the experimental data of intermittent DC arc under resistive loads are analyzed, and the results show that the arc impedance varies with the current and is highly random, and the arc noise in the frequency domain presents differences in the spectral distribution of high and low frequency bands. Then, the impedance model with a probability distribution law is proposed to reflect the randomness and intermittency of the arc in the time domain, and the segmented noise model is used to reflect the characteristics of the noise spectrum distribution in the frequency domain. Finally, the performance of the model is verified based on experimental data, and the results show that the proposed model can accurately depict the random characteristics of the intermittent arc in both the time and frequency domains.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877102).

**Key words:** intermittent arc; impedance model; probability distribution; segmented noise

## 0 引言

随着多电飞机的发展, 机载设备需要大量的直流电缆来连接, 由于振动、高温、辐射等外界复杂环境的影响<sup>[1]</sup>, 电缆会出现接触不良、绝缘老化破损、接头松动等<sup>[2]</sup>问题, 可能导致间歇性电弧故障的发生。这种电弧故障在系统没有上电运行的时候很难被发现, 具有很强的隐蔽性。而即使是在系统运行过程中, 这种电弧也是处于熄弧和燃弧交替出

现的状态, 具有复杂性和随机性, 给系统的安全稳定运行带来了一定程度的威胁。由于电弧特征难以复现并且随机性强等原因, 造成现场试验研究成本较高。因此, 通过建立电弧模型的方式来研究故障电弧特征, 对开展故障电弧检测和定位的研究具有重大意义。

目前, 业内相关研究人员对电弧建模和间歇性故障的发展机理已经开展了大量研究<sup>[3-6]</sup>。经典的电弧数学模型有根据能量守恒提出的 Cassie 模型和 Mayr 模型。基于经典模型, 后来又提出了改进的 Mayr 模型<sup>[7]</sup>、Cassie-Mayr 组合模型<sup>[8]</sup>和 Mayr-

Schwarz<sup>[9]</sup>模型等。但这些模型更适用于交流电弧，因为直流电弧并不存在电流的零休现象。还有一些基于直流电弧的伏安特性提出来的 U-I 模型<sup>[10-13]</sup>，如 Ayrton 模型和 Nottingham 模型，而这些模型描述的是电弧电压与电流之间的关系，无法直接反映出电弧阻抗的变化。因为对于间歇性电弧故障，比较适用的故障检测方法是基于阻抗不匹配原理的反射法<sup>[14-15]</sup>，而一个能够直接体现电弧阻抗变化的电弧模型便是其研究的基础。

文献[16]提出了一种能够同时具备电弧电流低频零休和高频振荡特征的电弧阻抗模型，但只适用于交流电弧。有学者提出用时变电阻模型<sup>[17-19]</sup>来描述电弧阻抗特性，但现有的时变电阻模型大都包含电弧电压、电流或者功率，无法单独分析阻抗变化，更无法体现出间歇性的特点。此外，电弧发生时还会产生大量的噪声，文献[20-21]在仿真中加入高斯白噪声模拟电弧的随机性，白噪声的频谱能量呈均匀分布，无法很好地模拟电弧噪声的低频特性。相比白噪声，粉红噪声<sup>[22-23]</sup>可以更好地表现出电弧频谱能量在频域上的非线性特征。但实际电弧噪声的频谱分布在频带的低、高频段表现出来的特征并不一样，而且与电弧电流也有关，显然单一的噪声模型还无法全面反映出电弧的噪声特性。

综上所述，对于间歇性直流电弧，目前业界还没有深入开展研究，也没有适合的电弧模型。对此，本文搭建了实验平台，利用电弧发生器对间歇性电弧进行复现，通过分析实验数据，发现了间歇性直流电弧的特征和规律，并进一步提出了适合间歇性直流电弧并且能反映其阻抗特性和噪声特性的电弧模型，最后与实验数据进行对比，验证了模型的正确性。

### 1 实验设置与电弧特征分析

为了研究间歇性串行直流电弧的特征，搭建了直流电弧故障模拟实验平台，其原理框图如图 1 所示，主要由直流电源、电弧发生器、阻性负载、电压探头和电流探头组成。电弧发生器主要由碳棒和铜棒两种电极构成，通电前两电极无间隔，线路接通电源后，通过手动拉弧<sup>[24]</sup>的方式逐渐增大两电极的间距，当电极两端电压和回路电流均满足起弧条件后，便能看到电弧的产生。燃弧的强弱与电弧电流的大小有关，电流越大，燃弧越剧烈，同时发出的光和热也会越强烈。

为了排除负载可能带来的干扰，本文仅对阻性负载下的间歇性直流电弧开展研究，只分析电弧自

身的特征。实验过程中通过使用电压探头和电流探头采集电弧发生时的电弧电压和电流，再由欧姆定律计算得到电弧的阻抗。

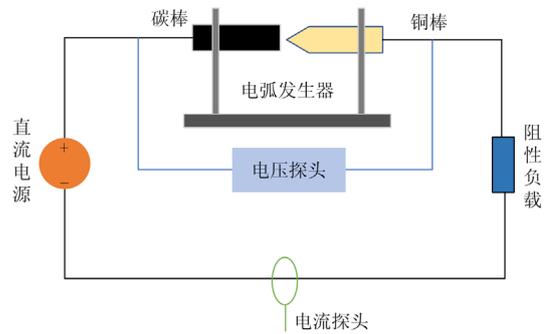
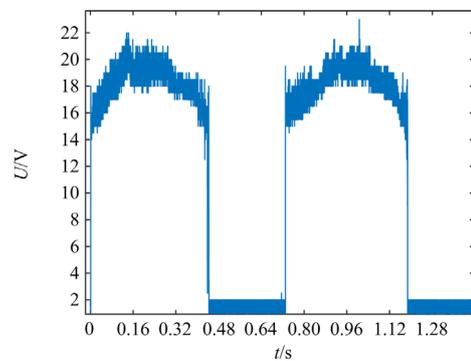


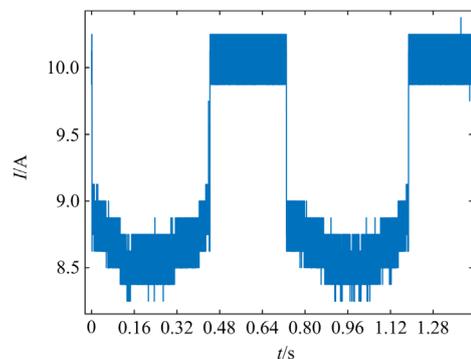
图 1 间歇性直流电弧实验电路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of intermittent DC arc experimental circuit

下面对  $U_s = 120\text{ V}$ 、 $I_s = 10.1\text{ A}$  实验条件下的直流电弧实验数据进行分析，得到图 2 所示波形。从图 2 中可以看出，当发生电弧时，电弧电压瞬间上升，而线路的电流将会瞬间下降，但两者波形中均含有高频分量，具有很强的随机性。由于是间歇性电弧，电弧时有时无，发生电弧时，整个电弧电压为“拱门”型，幅值呈现先增加后减小的变化趋势，而电流的波形恰好与之相反。



(a) 电弧电压波形



(b) 电弧电流波形

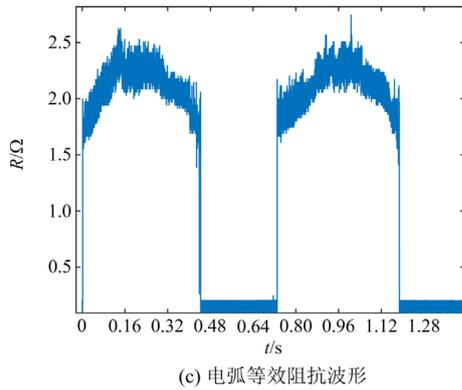


图2 间歇性电弧时域特征分析

Fig. 2 Time domain characteristic analysis of intermittent arc

为了便于分析, 本文将电弧的阻抗等效为一个时变电阻, 可以发现电弧电阻的变化与电弧电压保持一致, 其平均电阻并非固定不变, 同样为先增大后减小的非线性变化, 同时电弧持续的时间也是不固定的。

现有的电弧阻抗模型很难描述出这种变化特点, 为了体现这种变化趋势, 本文采用参数可调的半周期正弦函数来描述该特征, 变量为时间。正弦函数的正半周期用来描述电弧发生时刻的变化, 其系数表征了平均电阻的最大增量, 函数内部通过设置不同的参数来改变半周期的大小, 即电弧持续的时间长短。

由图2所示的时域波形可以发现, 电弧燃烧阶段会产生大量噪声, 而正常阶段由于实验设备和现场环境的影响也会引入一些噪声, 现对这两个时间阶段的噪声做频谱分析, 如图3所示。

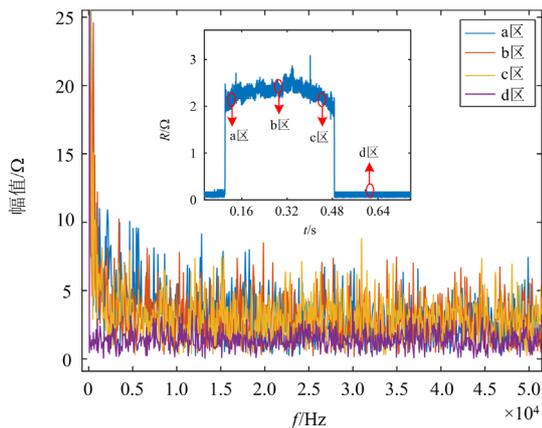


图3 不同时间阶段的噪声频谱分析

Fig. 3 Noise spectrum analysis at different time stages

图3中, 时域上的a、b、c3个区域处在燃弧阶段, 而d区域处在正常阶段。可以看出, 正常阶

段的噪声幅值较小且不随频率发生变化, 表现为白噪声; 而燃弧阶段的噪声幅值较大且在低频段时随频率逐渐减小, 表现为有色噪声, 而在高频段逐渐稳定, 表现为白噪声。此外, a、b、c3个区域的噪声频谱分布大致相同, 故本文最终选取a区域的数据进行后续的频谱分析。

由于直流电弧的高频分量主要在10~100 kHz<sup>[10]</sup>, 故根据香农采样定理设置采样率为312.5 kHz, 利用快速傅立叶变换(fast Fourier transform, FFT)对不同电流等级下的间歇性电弧阻抗进行频谱分析, 分析的点数为4096个, 频谱分析结果如图4所示。

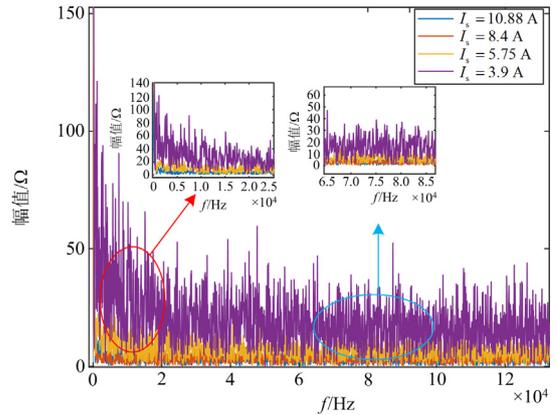


图4 间歇性电弧频域特征分析

Fig. 4 Frequency domain characteristic analysis of intermittent arc

可以看出, 电弧噪声频段中低频幅值较高且随频率增大而逐渐减小, 表现为有色噪声的形式。在高频段, 频谱幅值较为稳定, 表现为白噪声的形式。频谱幅值还与电流大小有关, 电流越小, 噪声频谱幅值越高; 而不同电流等级的频谱幅值在低频段的下降趋势大致相同, 并且在30 kHz频率点附近存在明显的转折点。针对电弧噪声在不同频段呈现出的特点, 本文提出了分段噪声模型, 在低频段和高频段采用不同的噪声模型, 能够更好地体现实际电弧噪声的频域特征。

## 2 电弧建模

本文考虑到现有直流电弧阻抗模型的不足, 并针对间歇性直流电弧的特点, 提出了含有分段噪声的间歇性直流电弧阻抗模型, 整体上由阻抗特性模型与分段噪声模型两部分构成。该模型将间歇性电弧的特点全都反映在了电弧阻抗的变化上, 既可以在时域上表现出电弧间歇性和随机性的特征, 又能在频域上反映出其噪声的频谱分布规律。

## 2.1 阻抗特性模型

基于经典电弧模型 Mayr 模型和 Cassie 模型推导和衍生出来的电弧阻抗模型,均离不开电压  $U$ 、电流  $I$  或者功率  $P$ 。文献[25]推导出了电感分断放电电弧电阻的数学表达式,式中电弧电阻仅与电极间距和尺寸以及放电区域气体浓度有关,而电弧电流项则被抵消,得到了电弧电阻只随时间的变化关系。但电感放电电弧与本文的直流串行电弧有所差异,且其无法反映出间歇性的特点。故本文提出一种具有间歇性和随机性特点的串行直流电弧阻抗模型如式(1)和式(2)所示。

$$R(t) = \begin{cases} \alpha \sin\left(\frac{t-NT}{\beta}\pi\right) + \gamma, & NT \leq t \leq NT + \beta \\ 0, & NT + \beta < t \leq (N+1)T \end{cases} \quad (1)$$

$$\beta = DT \quad (2)$$

式中:采用时变电阻  $R(t)$  作为电弧等效阻抗; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $D$  为模型参数; $t$  为时间变量; $T$  为间歇性电弧发生时间和未发生时间之和; $N$  为自然数,用来表示多个间歇性电弧的发生。该模型用半周期正弦函数来反映燃弧期间电弧平均电阻先增大后减小的变化规律,正弦函数的系数  $\alpha$  代表的物理含义是平均电阻的最大增量,由于电弧具备随机性, $\alpha$  的大小并非确定值,而是满足一定的概率分布规律。

正弦函数内部是个分数的表示形式,分子部分的作用是描述电弧实时发生的时间,而分母中的参数  $\beta$  用来表示电弧持续的时间。根据不同的实验条件  $T$  可以设置成不同的值以便更好地模拟真实电弧的随机性,本文在某一条件下具体分析时将其设置为固定值; $D$  为占空比,代表的物理含义是发生电弧的时间占整个  $T$  的比例,其值也满足概率分布规律。而  $\gamma$  反映的是电弧初始时刻的平均电阻,由电弧电压和电流共同决定。而未发生电弧的时间段内,令电弧的电阻值为 0。

与传统的电弧模型相比,该模型的部分参数服从概率分布而非确定值,能够更好地体现电弧随机性的特点;而模型中引入占空比  $D$  的概念,是为了反映出其间歇性的特点。

## 2.2 分段噪声模型

通过对直流电弧的频谱分析可知,电弧噪声在低频段内表现为有色噪声形式。而粉色噪声常用来描述直流电弧的故障噪声,其功率频谱密度的幅值与频率的关系如式(3)所示<sup>[26]</sup>。

$$S(f) \propto \frac{1}{f} \quad (3)$$

式中: $S(f)$  为频谱能量函数; $f$  为频率值。粉色噪声的频谱能量与频率的倒数呈正相关。但由前文的

分析可知,间歇性直流电弧的噪声幅值与电流大小有关,且都存在一定的下降趋势。基本的粉色噪声模型的频谱能量幅值与频率的关系相对固定,难以全面地反映电弧噪声在低频段的频谱分布特点。

本文根据实验数据,推导了一种修正的粉色噪声模型,能够适用于电弧噪声的低频段,如式(4)所示。

$$S(f) = \frac{\lambda_1}{f^{k_1}} \times S_w(f) \quad (4)$$

式中: $S_w(f)$  为白噪声频谱能量函数<sup>[27]</sup>;参数  $\lambda_1$  可以改变频谱能量的幅值大小;而系数  $k_1$  可以控制频谱能量函数下降的趋势。通过选择合适的参数变量,即可反映出各种电流条件下电弧噪声的频谱分布,将参数变量化则可以改善噪声模型的准确性,使得该模型具有更好的普适性。

而在某个转折频率点  $f_0$  之后,电弧噪声表现为白噪声形式,只有幅值的区别,故高频段的电弧噪声表示为

$$S(f) = \frac{\lambda_2}{f_0^{k_2}} \times S_w(f) \quad (5)$$

式中:参数  $\lambda_2$  可以改变高频区白噪声的幅值; $k_2$  决定了频谱幅值随频率的变化程度,而在频率不变的条件也可和  $\lambda_2$  共同控制白噪声的大小。综上,完整的电弧分段噪声模型可表示为

$$S(f) = \begin{cases} \frac{\lambda_1}{f^{k_1}} \times S_w(f) & f < f_0 \\ \frac{\lambda_2}{f_0^{k_2}} \times S_w(f) & f \geq f_0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)给出的是噪声模型的频域表达式,在实际使用时需将其转变成时域上的随机序列再叠加在阻抗模型上,才能使得最终的电弧阻抗模型在时域上表现出含有丰富的高频噪声的特点。

## 3 模型参数的确定

在间歇性直流电弧阻抗模型中, $T$  的值则需要根据具体的实验条件来确定,对于某一特定条件下发生的电弧其值便是确定的,模型中将其设置为变量只是为了改善模型的灵活性,使之更好地满足实际需求。本文只对具有普适性和存在规律的参数进行研究,包括了阻抗模型中的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $D$  以及噪声模型中的  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $k_1$ 、 $k_2$ 。

通过对大量实验数据的分析和统计,如表 1 所示,发现参数  $\alpha$  满足一定的概率分布规律。在串联回路电流  $I_s = 7.5 \text{ A}$  条件下,用不同的概率密度函数对该参数的概率分布进行拟合,拟合结果如表 2 和

图 5 所示, 从参数标准差的对比可以看出, 拟合效果最佳的是正态分布。

表 1 不同回路电流下  $\alpha$  的值

Table 1 Values  $\alpha$  for different loop currents

电流/A	$\alpha/\Omega$
7.5	0.78, 0.9, 1.6, 1.6, 0.7, 2.1, 0.6, 0.98, 1.6, 1.3,
7.5	1.25, 1.2, 1.1, 1.2, 0.8, 0.7, 1.5, 1.3, 1.1, 1.1
8.4	1.45, 0.87, 1, 0.97, 0.7, 0.6, 1.3, 0.85, 1.4, 1, 0.9,
8.4	0.93, 0.5, 1.1, 0.6
9.3	0.75, 1.07, 0.72, 0.72, 0.87, 0.78, 0.67, 0.91, 0.51,
9.3	0.26, 0.36, 0.59, 0.66, 0.59, 0.62, 0.59, 0.66
10.1	0.5, 0.45, 0.35, 0.47, 0.47, 0.45, 0.42, 0.34, 0.43,
10.1	0.42, 0.53, 0.27, 0.35, 0.23, 0.33
10.9	0.2, 0.25, 0.35, 0.35, 0.31, 0.34, 0.37, 0.31, 0.36,
10.9	0.35, 0.35, 0.47, 0.37, 0.4, 0.42

表 2 不同概率密度分布函数拟合效果对比

Table 2 Comparison of fitting effects of different probability density distribution functions

概率密度分布函数	函数参数	参数估计值	参数标准差
正态分布 (Normal)	$\mu$	1.1705	0.085 068
	$\sigma$	0.380 436	0.062 543 2
伽马分布 (Gamma)	$a$	10.0247	3.118 76
	$b$	0.116 762	0.037 497
韦伯分布 (Weibull)	$A$	1.303 41	0.091 571 6
	$B$	3.370 36	0.562 647

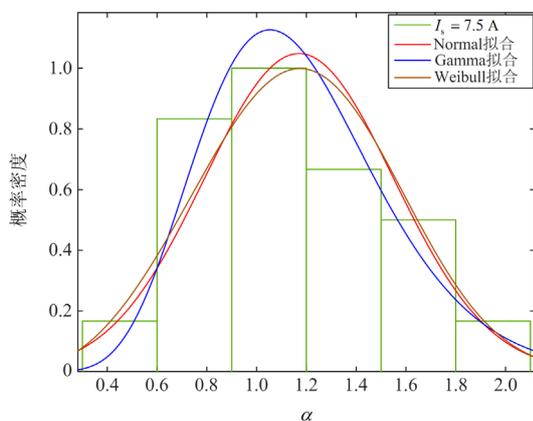


图 5 参数  $\alpha$  取值的概率密度分布

Fig. 5 Probability density distribution of parameter  $\alpha$

正态分布的概率密度函数为式(7)。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为位置参数;  $\sigma$  为尺度参数。

不同回路电流下参数  $\alpha$  的概率密度分布如图 6 所示。通过对比可以发现, 正态分布概率密度函数的分布随着电流的增大而发生左移, 这是因为回路

电流增大时电弧燃烧会更稳定, 产生的噪声幅值会有所减小, 即  $\alpha$  减小, 从而导致整体分布左移。表 3 给出了不同回路电流下  $\alpha$  的正态分布最佳拟合参数。

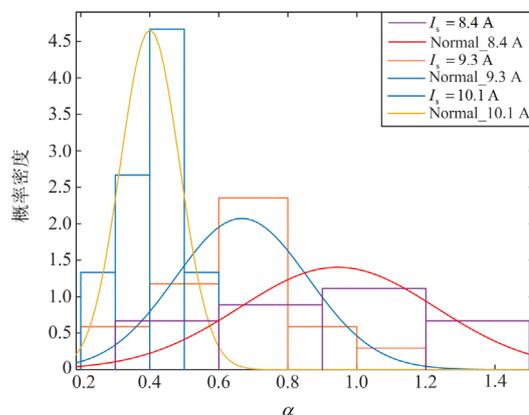


图 6 不同电流下参数  $\alpha$  的概率密度分布

Fig. 6 Probability density distribution of parameter  $\alpha$  under different currents

表 3 不同电流等级下正态分布拟合参数

Table 3 Normal distribution fitting parameters at different current levels

电流等级/A	参数 $\mu$ 估计值	参数 $\sigma$ 估计值
7.5	1.1705	0.380 436
8.4	0.944 667	0.284 325
9.3	0.666 471	0.192 449
10.1	0.400 667	0.085 646
10.9	0.346 667	0.064 549 7

由式(2)可知, 当占空比  $D$  确定后, 参数  $\beta$  也将随之确定。同样基于对实验数据的分析和统计, 不同分布函数对真实数据的拟合如图 7 所示, 对比拟合参数误差如表 4 所示, 发现参数  $D$  的概率密度分布函数更接近于服从逻辑斯谛分布。

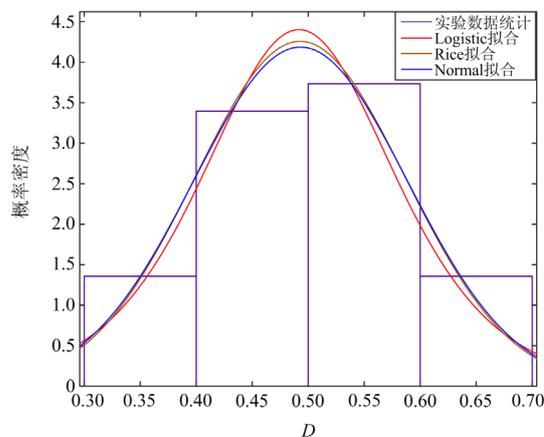


图 7 参数  $D$  取值的概率密度分布

Fig. 7 Probability density distribution of parameter  $D$

表 4 不同概率密度分布函数对参数  $D$  的分布拟合误差对比  
Table 4 Comparison of the distribution fitting errors of parameter  $D$  by different probability density distribution functions

概率密度分布函数	函数参数	参数估计值	参数标准差
正态分布 (Normal)	$\mu$	0.493 103	0.017 894 1
	$\sigma$	0.095 285 4	0.128 483
逻辑斯谛分布 (Logistic)	$\mu$	0.491 734	0.018 830 9
	$\sigma$	0.056 783 6	0.008 527 82
莱斯分布 (Rice)	$s$	0.483 765	0.017 922 6
	$\sigma$	0.094 574	0.012 681 3

服从逻辑斯谛分布的概率密度函数表达式为

$$f(x) = \frac{e^{-(x-\mu_1)/\gamma_1}}{\gamma_1(1+e^{-(x-\mu_1)/\gamma_1})^2} \quad (8)$$

式中： $\mu_1$  为位置参数； $\gamma_1$  为形状参数。利用 Matlab 工具对函数进行拟合，得到了最佳拟合状态下的参数值： $\mu_1 = 0.492$ ，标准差为 0.019； $\gamma_1 = 0.057$ ，标准差为 0.009。

参数  $\gamma$  代表的物理含义是燃弧期间起始时刻的电弧平均电阻。文献[2]中发现影响电弧特征的因素主要是电流和电极间距，电流越大，电弧电阻越小，故本文通过实验数据探究参数  $\gamma$  与回路电流  $I_s$  的关系，其变化规律如图 8 所示。

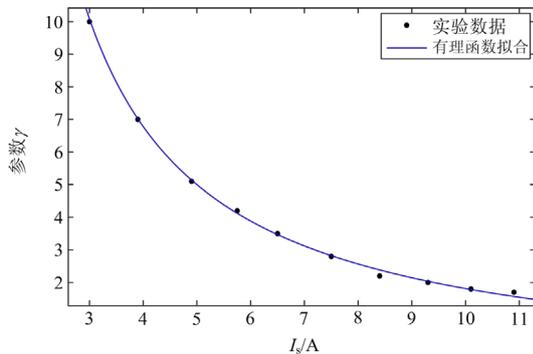


图 8 有理函数拟合  $\gamma$  随  $I_s$  的变化

Fig. 8 Change of rational function fitting  $\gamma$  with  $I_s$

可以发现  $\gamma$  与  $I_s$  呈负相关，满足关系式(9)。

$$\gamma = \frac{26.57 - 0.96I_s}{I_s - 0.92} \quad (9)$$

式中， $I_s$  为回路电流，也等于电弧电流。当回路电流逐渐减小时， $\gamma$  会呈指数增长，即电弧电阻会趋于无穷大。这是因为当电流过小时，达不到起弧条件，便无法产生电弧，两电极间处于完全开路状态。

参数  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别表征的是有色噪声和白噪声的幅值大小，两者具有相同的变化趋势。通过对实验数据的分析和处理，发现当电弧电流增大时，噪声幅值反而减小，如图 9 和图 10 所示。这是由于电

弧电流越大，空气被击穿的越彻底，电弧等效电阻就越小，电弧燃烧越稳定。该结论在文献[2]中也得到了验证。

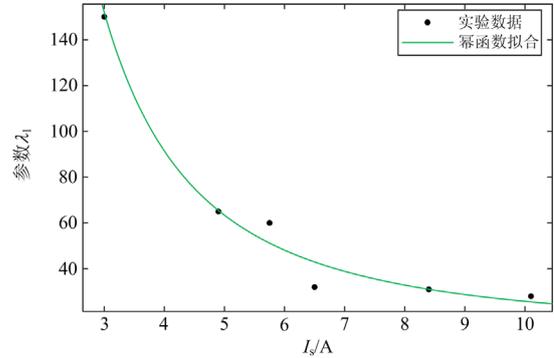


图 9 幂函数拟合  $\lambda_1$  随  $I_s$  的变化

Fig. 9 Change of power function fitting  $\lambda_1$  with  $I_s$

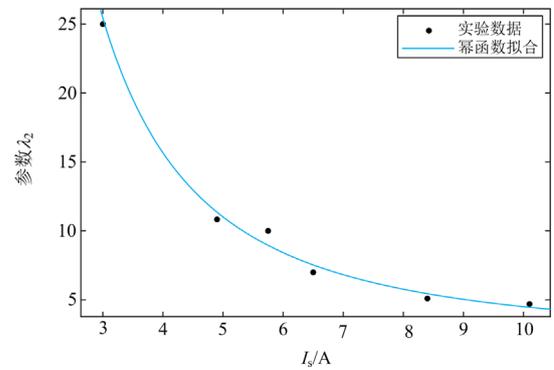


图 10 幂函数拟合  $\lambda_2$  随  $I_s$  的变化

Fig. 10 Change of power function fitting  $\lambda_2$  with  $I_s$

通过幂函数对数据进行拟合，得到  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  与  $I_s$  的关系式为

$$\begin{cases} \lambda_1 = 1192 \times I_s^{-1.967} + 12.9 \\ \lambda_2 = 175.2 \times I_s^{-1.85} + 2.031 \end{cases} \quad (10)$$

噪声模型中的参数  $k_1$  和  $k_2$  控制的是频谱幅值随频率的变化，通过对不同电流下的电弧噪声频谱的分析，发现在转折频率  $f_0$  之前频谱幅值随频率下降的趋势大致相同，而在  $f_0$  之后，白噪声幅值不再随频率下降，经过对实际数据的多次分析和统计，本文最终取  $k_1 = 0.4$ ， $k_2 = 0.32$ ， $f_0 = 30$  kHz。

整个电弧模型在实际使用中，服从概率分布规律的参数需通过满足对应概率密度分布函数生成的随机数产生，其他与  $I_s$  满足一定函数关系的参数，则需通过串联回路电流的大小而确定。

#### 4 模型验证

本文基于实验数据，验证所提出的含分段噪声

的间歇性电弧阻抗模型的准确性。在时域和频域内分别对比相同条件下电弧模型与真实电弧数据的差异, 选取电弧峰峰值、平均值、频谱能量和这 3 个常用的电弧特征量进行量化对比, 其中电弧峰峰值和平均值描述的是电弧时域特征, 而频谱能量和则描述的是电弧频域特征。

考虑到通过手动拉弧的方式产生的电弧是动态变化的, 在验证模型准确度时需分段对比电弧模型和实际电弧的差异性。将发生电弧期间时域上的电弧电阻数据等间隔选取 10 小段, 每小段包含 20 个点。先统计实际电弧与电弧模型在每小段数据内的电阻平均值误差和峰峰值误差, 再根据式(11)、式(12)计算出电阻平均值的均方根误差和峰峰值误差的平均值; 而在频域上只研究 0~100 kHz 频带范围内的误差, 将转折频率前后的有色噪声区和白噪声区分别均分 5 等份, 先统计每段带宽内实际电弧频谱能量和与电弧模型频谱能量和, 再计算出两者频谱能量和误差绝对值的平均值, 如式(13)所示。

电弧平均电阻的均方根误差  $\bar{R}_{\text{RMSE}}$  的公式为

$$\bar{R}_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (\bar{R}_{m,i} - \bar{R}_{r,i})^2} \quad (11)$$

式中:  $p$  为区间数;  $\bar{R}_{m,i}$  为该模型每段数据区间内统计得到的电弧平均电阻;  $\bar{R}_{r,i}$  为实际发生电弧时每段数据区间内统计得到的电弧平均电阻。

电弧电阻峰峰值误差绝对值的平均值  $\bar{R}_{\text{pp\_error}}$  的公式为

$$\bar{R}_{\text{pp\_error}} = \frac{\sum_{i=1}^p |R_{\text{pp\_m},i} - R_{\text{pp\_r},i}|}{p} \quad (12)$$

式中:  $R_{\text{pp\_m},i}$  为该模型每段数据区间内统计得到的电弧电阻峰峰值;  $R_{\text{pp\_r},i}$  为实际发生电弧时每段数据区间内统计得到的电弧电阻峰峰值。

频谱能量和误差绝对值的平均值  $\bar{Q}(n, p, f)$  公式为

$$\bar{Q}(n, p, f) = \frac{\sum_{i=1}^p |Q_m(f, n, i) - Q_r(f, n, i)|}{p} \quad (13)$$

式中:  $n$  为每个频谱区间内的数据点数;  $Q_m$  为该模型每段频谱区间内统计得到的频谱能量和;  $Q_r$  为实际电弧每段频谱区间内统计得到的频谱能量和。

在已知实验条件为  $U_s = 120 \text{ V}$ 、 $I_s = 10.1 \text{ A}$  的前提下, 将  $I_s$  的值代入到式(9)和式(10)中即可求得参数  $\gamma = 1.84$ ,  $\lambda_1 = 25.51$ ,  $\lambda_2 = 4.46$ 。其他满足概率

分布的参数由 Matlab 调用相应的概率密度分布函数生成随机数产生。最终电弧模型的数据与实际测得的数据在时域和频域上的对比结果分别如图 11 和图 12 所示。

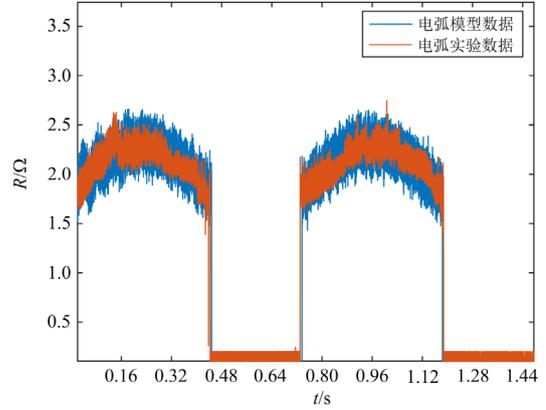


图 11 模型数据与实验数据时域对比

Fig. 11 Time domain comparison between model data and experimental data

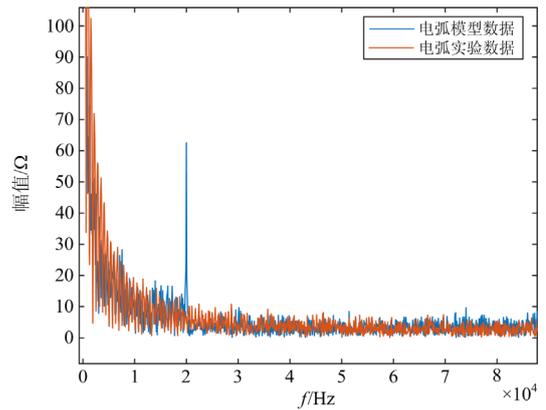


图 12 模型数据与实验数据频域对比

Fig. 12 Frequency domain comparison between model data and experimental data

再结合表 5 统计的误差数据, 代入式(11)一式(13), 可得电弧平均电阻的均方根误差  $\bar{R}_{\text{RMSE}}$  为 0.1, 电弧电阻峰峰值误差绝对值的平均值  $\bar{R}_{\text{pp\_error}} = 0.124$ , 频谱能量和误差绝对值的平均值  $\bar{Q} = 0.945$ 。可以看出, 在时频域上, 该模型都比较符合实际电弧的特征。

同理, 对实验条件为  $U_s = 60 \text{ V}$ 、 $I_s = 4.9 \text{ A}$  下的实测数据与模型数据进行对比, 此时参数  $\gamma = 5.49$ ,  $\lambda_1 = 65.22$ ,  $\lambda_2 = 11.29$ 。时频域下的对比结果分别如图 13 和图 14 所示, 并且结合表 5 可以进一步求得该条件下 3 个电弧特征量的误差结果为:  $\bar{R}_{\text{RMSE}} = 0.29$ ,  $\bar{R}_{\text{pp\_error}} = 0.094$ ,  $\bar{Q} = 2.352$ 。

表 5 不同数据区间的模型误差统计表

Table 5 Model error statistics table for different data intervals

$U_s = 60\text{ V}$ $I_s = 4.9\text{ A}$			$U_s = 120\text{ V}$ $I_s = 10.1\text{ A}$		
平均值	峰峰值	频谱能	平均值	峰峰值	频谱能
误差	误差	误差	误差	误差	误差
0.069	0.086	8.72	0.115	0.265	5.64
0.233	0.147	1.21	0.09	0.18	0.65
0.452	0.14	3.27	0.022	0.19	0.84
0.391	0.052	2.2	0.123	0.15	0.75
0.542	0.158	2.43	0.143	0.06	0.66
0.217	0.009	1.82	0.165	0.007	0.023
0.127	0.15	1.72	0.051	0.142	0.023
0.003	0.007	1.02	0.124	0.166	0.28
0.142	0.02	0.7	0.052	0.02	0.28
0.272	0.166	0.43	0.04	0.056	0.3

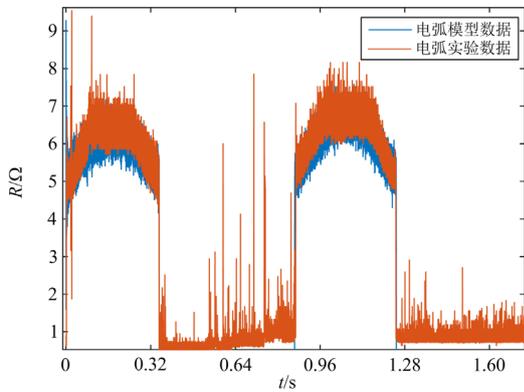


图 13 模型数据与实验数据时域对比

Fig. 13 Time domain comparison between model data and experimental data

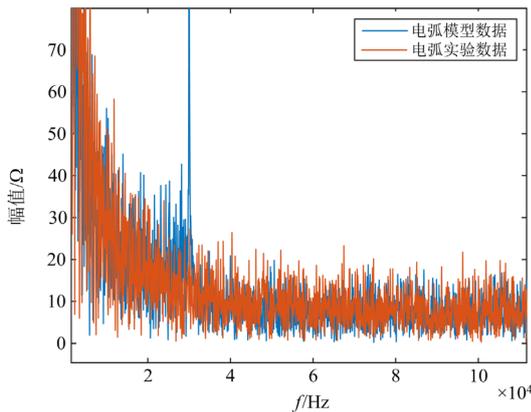


图 14 模型数据与实验数据频域对比

Fig. 14 Frequency domain comparison between model data and experimental data

表 5 中的数据从上至下分别为区间段 1 至区间段 10 的模型特征量误差结果, 从中可以看出, 电弧

模型在时域上各个区间内的误差整体要小于频域上的误差, 频域上其他区间的误差要明显小于第一个区间, 且大电流条件下的误差要比小电流时更小些。这是由于低频处噪声幅值较大, 而当电流减小时电弧高频噪声会增多, 随机性更强, 噪声幅值更高, 进而导致了误差量的增加。另外, 图 12 和图 14 中出现的突变点是由于分段噪声模型在频率转折点处不连续导致的, 但单个突变点并不影响噪声模型整体的准确性, 本文提出的噪声模型主要侧重于反映其频谱分布规律以及随电流的变化关系, 从最终结果来看, 该模型能够在一定的电流范围内对实际间歇性电弧进行较为理想的模拟, 对主要的电弧特征还原度较高。

## 5 结论

本文针对间歇性直流电弧的特点, 提出了含分段噪声的间歇性直流电弧阻抗模型, 并通过实验数据对模型进行了对比验证, 同时选取了可以体现电弧特征的 3 个参量进行量化误差统计, 验证了模型的准确性。综上, 本文提出的电弧模型具备以下特点:

1) 模型描述的是间歇性串行直流电弧, 并且与以往的电弧阻抗模型不同的是, 该模型采用等效的时变电阻来描述电弧发生过程中阻抗的变化, 在形式上完全与电弧电压量和电流量分离, 只是时间的函数。此外, 模型中的部分参数服从概率分布规律, 这也更加体现了电弧随机性强的特点; 而占空比的引入则能够很好地反映出电弧的间歇性。

2) 分段噪声模型可以通过调整参数  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  来改变噪声的幅值, 改变参数  $k_1$ 、 $k_2$  来控制噪声频谱幅值随频率变化的趋势, 使得噪声模型的灵活性增强, 能够更好地反映出实际电弧噪声的特点。

3) 在电弧阻抗特性模型上叠加分段噪声模型, 使得整个间歇性直流电弧模型不仅在频域上能满足电弧频谱在高、低频段的分布规律, 还能在时域上直接反映出电弧噪声所引起阻抗变化。

本文所做的工作, 对于间歇性直流电弧的特性研究有一定的指导意义, 但其更重要的价值在于为间歇性电弧故障的检测定位研究提供了参考模型。目前对于传输线电弧故障的在线检测定位, 普遍采用的是基于阻抗不匹配原理的反射法, 故本文提出的电弧阻抗模型能够为电弧故障定位提供相应的研究基础, 具有一定的研究价值。

## 参考文献

[1] 高闯, 王莉, 杨善水. 电缆故障在线检测定位装置研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 447-450.

- GAO Chuang, WANG Li, YANG Shanshui. Research on cable fault online detecting and locating device[J]. *Advances in Aeronautical Engineering*, 2018, 9(3): 447-450.
- [2] 熊兰, 曾泽宇, 杨军, 等. 小电流直流故障电弧的数学模型及其特性[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(13): 2820-2829.
- XIONG Lan, ZENG Zeyu, YANG Jun, et al. Mathematical model and characteristics of low current DC fault arc[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(13): 2820-2829.
- [3] 俞小勇, 秦丽文, 欧阳健娜. 间歇性电弧接地故障建模分析[J]. *南方电网技术*, 2019, 13(12): 67-73.
- YU Xiaoyong, QIN Liwen, OUYANG Jianna. Modeling analysis of intermittent arc grounding fault[J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13(12): 67-73.
- [4] 蔺华, 王子龙, 郭振华, 等. 考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障建模及辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 31-39.
- LIN Hua, WANG Zilong, GUO Zhenhua, et al. Modeling and identification of a distribution network arc grounding fault considering arc length dynamic variation[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 31-39.
- [5] 崔朴奕, 李国丽, 张倩, 等. 基于VMD-CNN的小电流接地系统故障电弧检测方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(23): 18-25.
- CUI Puyi, LI Guoli, ZHANG Qian, et al. A fault arc detection method of a small current grounding system based on VMD-CNN[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(23): 18-25.
- [6] 高杨, 王莉, 张瑶佳, 等. 简化的 Schavemaker 交流电弧模型参数的计算方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 96-105.
- GAO Yang, WANG Li, ZHANG Yaojia, et al. Research on the calculation method for the parameters of the simplified Schavemaker AC arc model[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 96-105.
- [7] 江润, 方艳东, 鲍光海, 等. 适用于低压串联故障电弧的 Mayr 改进模型[J]. *电器与能效管理技术*, 2019(21): 14-18.
- JIANG Run, FANG Yandong, BAO Guanghai, et al. An improved Mayr model applicable to low voltage series arc faults[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2019(21): 14-18.
- [8] 张俊康, 邓启亮, 唐金城, 等. 串联故障电弧的特征分析与建模研究[J]. *电工技术*, 2017(1): 30-32.
- [9] 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 Yanli, GUO Fengyi, LI Lei, et al. A kind of series fault arc mathematical model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(14): 2901-2912.
- [10] 熊庆, 陈维江, 汲胜昌, 等. 低压直流系统故障电弧特性、检测和定位方法研究进展综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(18): 6015-6027.
- XIONG Qing, CHEN Weijiang, JI Shengchang, et al. Review of research progress on characteristics, detection and localization approaches of fault arc in low voltage DC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(18): 6015-6027.
- [11] 宋冬冬, 程林, 林志法, 等. 电弧热等离子体建模、仿真及应用综述[J]. *高电压技术*, 2018, 44(3): 932-943.
- SONG Dongdong, CHENG Lin, LIN Zhifa, et al. Review of arc thermal plasma modeling, simulation and application[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(3): 932-943.
- [12] LI X, PAN C, LUO D, et al. Series DC arc simulation of photovoltaic system based on Habedank model[J]. *Energies*, 2020, 13.
- [13] 刘琨, 崔鑫, 王宾, 等. 配电网线路经生物体高阻接地故障特性对比分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(22): 67-74.
- LIU Kun, CUI Xin, WANG Bin, et al. Comparative analysis of high impedance grounding fault characteristics via an organism in distribution lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 67-74.
- [14] 吴志江. 飞机电缆间歇性故障检测方法研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(17): 35-39.
- WU Zhijiang. Research of aircraft cable intermittent fault detection method[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(17): 35-39.
- [15] 张新宇, 聂宇, 王雅楠, 等. 小电流接地电网单相间歇性电弧接地故障定位方法[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2021, 35(5): 150-156.
- ZHANG Xinyu, NIE Yu, WANG Yanan, et al. Analysis on single-phase intermittent arc grounding fault location in neutral point non-effectively grounded system[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35(5): 150-156.
- [16] 高小庆, 陈晓军, 鲍光海. 考虑故障电弧电流高频特征的阻抗电弧模型[J]. *电器与能效管理技术*, 2021(3): 6-12.
- GAO Xiaoping, CHEN Xiaojun, BAO Guanghai. Impedance arc model considering high-frequency characteristics of fault arc current[J]. *Electrical & Energy*

- Management Technology, 2021(3): 6-12.
- [17] 黄仕杰, 刘毅, 林福昌, 等. 高压脉冲放电破岩电弧阻抗特性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4978-4988.  
HUANG Shijie, LIU Yi, LIN Fuchang, et al. Analysis of arc impedance characteristics in high-voltage electric pulse discharge rock destruction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4978-4988.
- [18] 刘毅, 黄仕杰, 赵勇, 等. 液中大电流脉冲放电电弧阻抗特性分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2591-2598.  
LIU Yi, HUANG Shijie, ZHAO Yong, et al. Analysis of arc impedance characteristics of high current pulsed discharge in liquid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2591-2598.
- [19] 李进. 高压隔离开关高频电弧建模分析研究[J]. 电工技术, 2019(20): 23-25.  
LI Jin. Modeling and analysis of high frequency arc of high voltage isolation switch[J]. Electric Engineering, 2019(20): 23-25.
- [20] TELFORD R D, GALLOWAY S, STEPHEN B, et al. Diagnosis of series DC arc faults—a machine learning approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(4): 1598-1609.
- [21] 孟羽, 李兴文, 吴子豪, 等. 光伏系统直流故障电弧时频域特性及其复合模型研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 23-30, 40.  
MENG Yu, LI Xingwen, WU Zihao, et al. Research on time-frequency characteristics and composite models of DC arc faults in photovoltaic system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 23-30, 40.
- [22] MCCALMONT S. Low cost arc fault detection and protection for PV systems[M]. Los Gatos: National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [23] GEORGIJEVIC N, JANKOVIC M, SRDIC S, et al. The detection of series arc fault in photovoltaic systems based on the arc current entropy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5917-5930.
- [24] 陈思磊, 李兴文, 屈建宇. 直流故障电弧研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2015(15): 1-6, 45.  
CHEN Silei, LI Xingwen, QU Jianyu. Overview of research about DC arc fault[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(15): 1-6, 45.
- [25] 赵永秀, 刘树林, 王孟, 等. 基于安全火花试验装置的电感分断电弧电阻建模研究[J]. 电子学报, 2017, 45(5): 1078-1083.  
ZHAO Yongxiu, LIU Shulin, WANG Meng, et al. Arc resistance modeling of inductor-disconnected circuit based on safety spark test apparatus[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(5): 1078-1083.
- [26] KIM J C, LEHMAN B, BALL R. DC arc fault model superimposing multiple random arc noise states on an average model[C] // 2019 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), June 17-20, 2019, Toronto, ON, Canada: 1-8.
- [27] YIN Z, WANG L, ZHANG Y, et al. Parameter identification of DC arc models using chaotic quantum cuckoo search[J]. Applied Soft Computing, 2021, 108.

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2022-11-16

作者简介:

周灵锋(1997—), 男, 硕士, 研究方向为航空供配电系统; E-mail: zhoulinfeng@nuaa.edu.cn

杨善水(1969—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为航空供配电系统. E-mail: yshanshui@nuaa.edu.cn

(编辑 魏小丽)