

# 封闭容器内部短路燃弧特性及电弧电压计算

欧阳子卿,杜志叶,黎 鹏,张 力

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

**摘要:**为了准确计算金属封闭开关设备发生短路燃弧时产生的能量,通过开展小尺寸封闭容器内部短路燃弧试验,利用 L-C 振荡试验回路获得不同充电电压和间隙距离下的电弧电压和电流等数据,详细分析了封闭容器内部燃弧特性,结果表明:封闭环境中电弧电压与压强成正比;电弧电压有效值随电流变化具有较大的不确定性,间隙距离对电弧电压的影响更为明显,当间隙距离为 5、10 和 15 cm 时,电弧电压有效值的平均值分别为 130.4、208.0、252.2 V。同时考虑到封闭环境中的电弧电压随机性较大,提出了一种基于支持向量机的电弧电压计算方法,并与基于 Mayr 电弧模型的计算结果及试验结果进行了对比,对比结果证明所提方法优于 Mayr 电弧模型,计算结果与试验测量值的平均绝对百分比误差仅为 4.04%。

**关键词:**电弧电压;金属封闭开关设备;短路燃弧特性;小尺寸封闭容器;支持向量机;Mayr 电弧模型

**中图分类号:**TM 501+2

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.023

## 0 引言

随着电力系统的飞速发展,金属封闭开关设备在电网中得到了广泛应用,但是由于设计制造和运行维护等方面的原因,近年来金属封闭开关设备内部电弧故障频发,成为影响电网安全运行的主要问题之一<sup>[1]</sup>。金属封闭开关设备发生燃弧故障时会释放大量能量,产生的高温、高压气体不仅对设备的正常稳定运行造成影响,而且可能造成设计不当的设备在强大压力下结构受损,甚至直接威胁现场工作人员的生命安全<sup>[2-3]</sup>。根据德国精密机械和电工技术职业协会(BGFE)的事故统计,电弧事故约占总电流事故的 25%,因此内部电弧故障仍然是金属封闭开关设备面临的一大威胁<sup>[4]</sup>。

电弧能量是计算金属封闭开关设备内部故障电弧引起压力升和温升效应的基础<sup>[3]</sup>,其主要与电弧电流和电弧电压有关。电弧电流一般达到数 10 kA,可通过试验直接测得。而电力系统中的电弧电压仅数百伏,并且与电弧长度、电流大小、间隙结构等因素有关,导致电弧电压的随机性较大,目前国内外学者均通过简单封闭容器的短路燃弧试验来研究电弧特性,并针对电弧电压的计算取得了一定的成果<sup>[2,5-8]</sup>。文献[5-6]基于磁流体动力学建立了实际电弧等离子体模型,但均进行了不同程度的等效处理,难以考虑多种因素的影响;文献[7]将电弧简化为非线性电导元件,避开电弧内部复杂的物理过程,利用电弧黑盒模型获得电弧电压随时间的变化规律,但黑盒模型中的未知参数较多,而且该模型主要应用于开放环境的燃弧,对于实际封闭开关设备的燃弧是否适用还有待考证;另外部分学者为了简化电弧能量的计算,假设电弧电压梯度为常数,如文献[2]在电弧电压梯度为 13 V/cm 的前提下对中压开

关柜压力升进行了计算,文献[8]通过开展小尺寸模型的燃弧试验得到金属封闭开关设备电弧电压梯度为 20~30 V/cm,但该文献同时指出,对于长间隙电弧可以假定电弧电压降为固定值,目前封闭容器燃弧试验中的间隙距离一般以 10 cm 以下的短间隙为主,因此有必要研究不同电极间隙距离下的燃弧特性,并对电弧电压梯度进行计算。

本文利用 L-C 振荡试验回路开展了封闭容器内部棒-棒间隙短路燃弧试验,通过测量电流、电弧电压等数据,分析了不同短路电流和电极间隙距离下封闭容器内部电弧的燃烧特性;同时提出了一种基于支持向量机(SVM)的电弧电压计算方法,将电流、电极间隙距离等特征量作为输入参量、电弧电压作为输出参量,并与基于 Mayr 电弧模型的计算结果及试验结果进行了对比,以验证本文提出方法的有效性。本文方法有望为实际金属封闭开关设备电弧电压的获取提供一种新的思路。

## 1 封闭容器内部短路燃弧试验

### 1.1 试验回路

封闭容器内部短路燃弧试验平台由封闭容器和合成试验回路 2 个部分组成<sup>[9]</sup>。封闭容器两端通过高压电缆接入合成试验回路,合成试验回路布置如图 1 所示,其主要包括以下 4 个部分。

- 电流源。电流源通过 L-C 振荡产生工频衰减大电流,其中  $C=4.2\text{ mF}$ 、 $L=2.412\text{ mH}$ ,电流峰值可根据充电电压大小进行调整。
- 合闸断路器,其初始状态为分闸。
- 高压探头,变比为 1 000:1,用于测量电弧燃弧过程的电压降。
- 罗氏线圈,变比为 50 000:1,用于测量回路的短路电流。

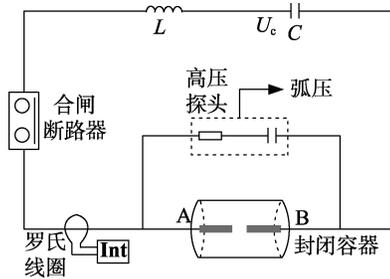


图 1 合成试验回路

Fig.1 Schematic diagram of testing circuit

### 1.2 试验封闭容器

封闭容器由圆柱形铁壳加工而成,水平放置于绝缘基座上,其直径为 0.7 m、长为 0.8 m,直径为 2 cm 的平头圆柱形棒电极水平对称布置于容器的左右两侧,电极两端通过支柱绝缘子与电流源回路的 10 kV 高压电缆相连,如图 2 所示。间隙距离  $d$  可根据试验需要进行调整,为了引燃电弧,间隙用焊锡丝进行短接。当电容器组充电完成后,闭合合闸断路器投入短路电流。

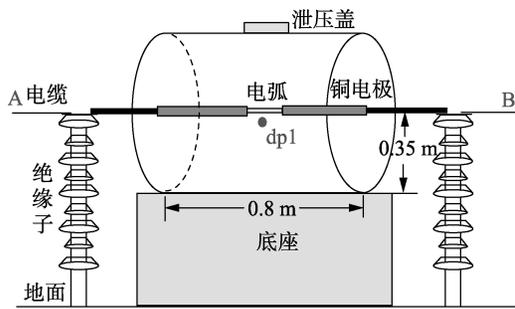


图 2 封闭容器

Fig.2 Closed container

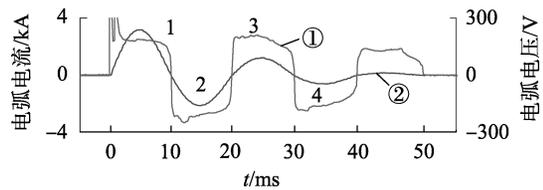
封闭容器内表面的压强采用型号为 Omega PX409-100G-5 V 的压力传感器进行测量,安装于图 2 中 dp1 所示位置。试验过程中,通过 NI 数据采集卡将压强、电流以及电弧电压信号传输到 PC 上。

## 2 封闭容器内部短路燃弧特性

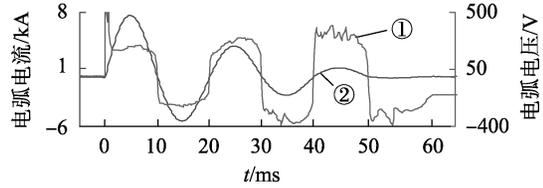
### 2.1 交流电弧的伏安特性

燃弧试验所用的焊锡丝熔点较低,将其熔化所需的能量很小,如熔化 10 cm 长的焊锡丝仅需 14 J 的能量,基本不会影响电弧的燃烧,图 3 为电极间隙距离为 10 cm 时,在充电电压  $U_c$  分别为 3.01 kV 和 6.81 kV 情况下测得的电流和电弧电压波形。由图可见:电弧电流峰值和燃弧时间随着充电电压的升高而增加,电流幅值在第 1 个半波内最大,随后由于电容器组充电能量的衰减而逐渐下降,直至无法维持电弧的燃烧,电流过零时电弧熄灭,整个燃弧过程中电弧电流波形均为频率 50 Hz 的正弦波;电弧电压在电弧电流过零时出现反向,尤其在起弧时刻出现很大的振荡,而在每个电流半波内电弧电压相对

比较稳定,但是数值有差异。



(a)  $U_c = 3.01$  kV



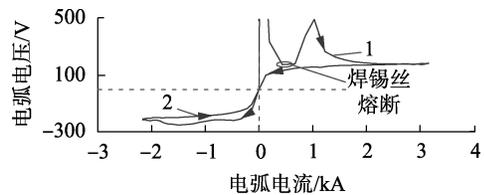
(b)  $U_c = 6.81$  kV

①—电弧电压,②—电弧电流

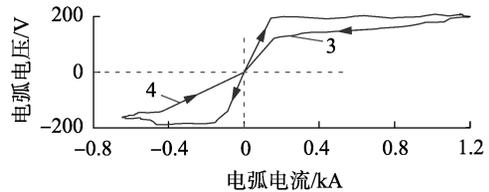
图 3 电弧电流与电弧电压波形

Fig.3 Waveforms of arc current and arc voltage

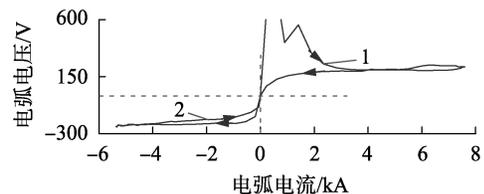
交流电弧的电流、温度等参数都随时间变化,在这种情况下,电弧的伏安特性也会与静态伏安特性曲线有所区别,为了更全面地反映封闭容器中交流电弧的燃烧特性,绘制电弧的伏安特性曲线如图 4 所示,图中数字 1—4 依次表示燃弧前 4 个半波(0~40 ms)的伏安特性曲线。由图 4 可见,电弧电压在起弧时刻出现 2 个尖峰,第 1 个尖峰的形成与电容



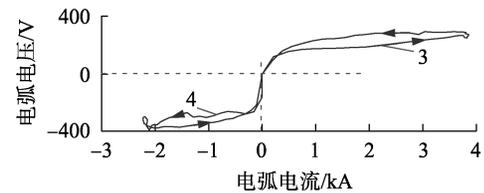
(a)  $U_c = 3.01$  kV



(a)  $U_c = 3.01$  kV



(b)  $U_c = 6.81$  kV



(b)  $U_c = 6.81$  kV

图 4 交流电弧的伏安特性

Fig.4 Volt-ampere characteristics of AC arc

器组的暂态过电压有关,当回路通流焊锡丝熔化时,间隙电导率增加,使得电弧电压迅速下降;第 2 个尖峰的形成与焊锡丝熔断产生电弧有关,电弧电压升高,随着电弧电流增大,电弧温度也升高,使得弧阻逐渐减小,导致电弧电压逐渐降低。而在电弧电流过零附近,由于电弧的冷却,弧阻大幅度上升,导致电弧电压变化剧烈。

进一步分析,从图 4(a)中可以看到,除了第 1 个半波外,在每个燃弧半波内,前半波电弧电压都略高于后半波,这主要是电弧的热惯性导致电弧温度的变化滞后于电流的变化导致的;但是当充电电压增大后,电弧电压在整个燃弧周期的变化规律并不都满足相同电流大小时前半波电弧电压略高于后半波,如图 4(b)所示,笔者分析后认为这是由于电弧能量增加到一定程度后,在燃弧后期的封闭容器中压强对电弧电压的影响开始增大。

## 2.2 压强对电弧电压的影响机理

图 5 为电极间隙距离为 10 cm、充电电压为 3.01 kV 时,试验测得的封闭容器内相对压强随时间的变化规律。由图 5 可见,燃弧开始前压强波形在 -2.2 ~ -1.7 kPa 之间呈现有规律的上下振荡,这与压力传感器自身的零点漂移现象有关,压强增量为短路燃弧过程中的峰值减去零漂值,从图中可以看到压强随时间基本呈线性上升,同时压力波的反射、叠加效应导致压强曲线波动较大,其他充电电压下的压强波形类似,只是数值有差异,燃弧结束后,随着与外界能量的交换,压强逐渐下降。

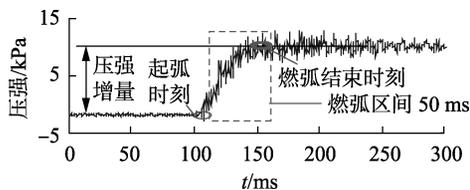


图 5 封闭容器内压强变化规律

Fig.5 Change of pressure inside closed container

对比图 3(a)、(b)可知,当充电电压增大时,尤其在燃弧后期电弧电压曲线波动增大,脉冲尖峰明显增多,结合 2.1 节中对不同充电电压下交流电弧伏安特性曲线的分析可知,封闭环境与开放环境中的燃弧有较大差异,封闭容器内的压强增大不仅会对电弧的运动特性产生影响,如弧长的变化会直接影响电弧电压大小,而且电弧会通过热传导、热对流、热辐射等方式与周围空气发生强烈的能量交换,空气受热膨胀后导致压强上升,反过来又对电弧等离子体的参数产生影响<sup>[3,8,10]</sup>。

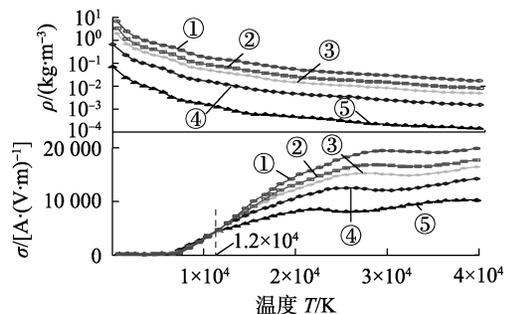
J. J. Lowke 等<sup>[10]</sup>在考虑自然对流和电磁力的影响下,忽略电弧等离子体内部发生的湍流和流体粘性等因素,假设电弧整体恒温,推导出大电流下的电弧电压表达式如式(1)所示。与已有试验值的对比

表明,该经验公式具有一定的科学性。

$$u = 0.52 \left( \frac{hl}{\sigma} \right)^{0.5} (\mu j_0 \rho)^{0.25} i^{0.25} \quad (1)$$

其中, $u$ 为电弧电压; $l$ 为弧长; $\sigma$ 为电弧等离子体电导率; $h$ 为电弧的焓; $\rho$ 为电弧密度; $\mu$ 为磁导率; $j_0$ 为阴极斑点电流密度; $i$ 为电弧电流。

X. Zhang<sup>[3]</sup>等通过模拟短路燃弧试验测量了容器内不同初始压强下的电弧电压变化,结果表明电弧电压与初始压强(空气密度)成正比。X. Zhang<sup>[3]</sup>等深入分析了电弧能量平衡机制,指出压强对电弧电压的影响主要体现在其对电弧等离子体的密度和电导率上,同时从式(1)中可以看出电弧电压与电弧密度成正比,与电弧电导率成反比,图 6 为电弧密度和电弧电导率随电弧等离子体内压强和温度的变化<sup>[11]</sup>。



①—0.01 MPa, ②—0.10 MPa, ③—0.30 MPa  
④—0.50 MPa, ⑤—1.01 MPa

图 6 电弧密度和电导率随压强的变化曲线

Fig.6 Curves of arc density and conductivity vs. pressure

由图 6 知:在相同温度下电弧密度随压强的增大而增大;而电弧电导率随压强的变化较为复杂,当温度低于 12 000 K 时,不同压强下的电弧电导率十分接近,压强主要通过改变电弧密度来影响电弧电压;当温度高于 12 000 K 时,压强对电弧电导率的影响增大,不能忽略,参照式(1),此时有  $u \propto \rho^{0.25} / \sigma^{0.5}$ ,但是压强对电弧密度的影响大于其对电导率的影响,以温度为 20 000 K 为例,当压强从 0.1 Mpa 增大到 1.0 Mpa 时,电弧密度约增大 17 倍,而相应的电导率只增大约 1.7 倍,因此在其他条件不变时,总体上压强越大,电弧电压越大。

## 2.3 电弧电压随电流的变化规律

为了便于比较不同电流半波内的电弧电压大小,类比电路中电阻元件有效值的定义,保证每个半波内电弧能量不变,定义电弧电压有效值  $u_{arc}$  如下:

$$u_{arc} = Qf / \sum_{k=1}^n i(k) \quad (2)$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} u(t) i(t) dt = \sum_{k=1}^n u(k) i(k) / f \quad (3)$$

$$Q = \sum_{k=1}^n i(k) u(k) / f = \sum_{k=1}^n i(k) u_{arc} / f \quad (4)$$

其中,  $Q$  为电弧能量(单位为 kJ);  $t_1$  和  $t_2$  为任意 2 个相邻的电弧电流过零时刻(单位为 s);  $u(k)$  为某个燃弧半波内第  $k$  个采集点的电弧电压(单位为 V);  $i(k)$  为某个燃弧半波内第  $k$  个采集点的电弧电流(单位为 kA);  $n$  为某个燃弧半波内的采集点数;  $f$  为采集频率(单位为 Hz)。

由于试验条件的限制,电源产生的短路大电流为工频衰减正弦波,不同充电电压下的电流波形衰减程度不同,后续燃弧半波的电弧电压易受到前面燃弧情况的干扰,这与实际金属封闭开关设备发生燃弧故障时的电流波形有一定差异,并且燃弧后期压强的增大会影响电弧电压曲线的稳定性,为了描述电弧电压与电弧电流之间的关系,均取燃弧试验中第 1 个电流半波的电弧电压有效值进行分析,此时处于燃弧的初始阶段,封闭容器内部压强很小,电弧电压主要与电极间隙距离和电流大小有关。图 7 为不同电极间隙距离下,电弧电压有效值随电弧电流峰值的变化规律。

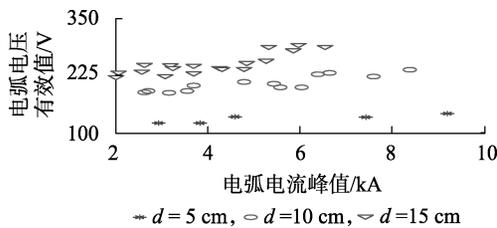


图 7 电弧电压有效值与电弧电流峰值的关系

Fig.7 Relationship between RMS of arc voltage and peak value of arc current

由图 7 可知,电弧电压有效值与电弧电流峰值呈现的关系较为复杂,但是从整体上看,电弧电压有效值随着电弧电流峰值的增加有增大的趋势,并且当电极间隙距离增大时,电弧电压有效值随电弧电流变化的波动也增大;另外电极间隙距离对电弧电压的影响程度大于电弧电流,当电极间隙距离为 5、10、15 cm 时,电弧电压有效值的平均值分别为 130.4、208.0、252.2 V,在相同电流峰值下,电极间隙距离越大,电弧电压有效值越高。进一步分析计算得到电弧电压梯度( $u_{\text{arc}}/d$ )的平均值分别为 26.08、20.80、16.81 V/cm,随着电极间隙距离增大,电弧电压有效值的上升速率变缓,而且电弧电压梯度与文献[2, 5]中给出的数值也有较大差异,因此,对于封闭容器(实际开关设备)内部短路燃弧,电弧电压梯度应根据实际燃弧状况进行取值。

### 3 基于 SVM 的电弧电压计算方法

#### 3.1 SVM 的基本原理

电弧电压与其影响因素之间是一种多维非线性关系,而且通过短路燃弧试验获得的数据有限,而 SVM 基于有限的训练样本数据,采用结构风险最小

化原理保证学习的推广性,对小样本情况具有较好的泛化性能<sup>[12]</sup>,适用于本文对电弧电压的计算。SVM 最早主要用于解决二分类问题,处理分类问题和回归问题的 SVM 分别称为支持向量分类机(SVC)和支持向量回归机(SVR)。LIBSVM 工具箱<sup>[13]</sup>是台湾大学林智仁博士等开发的一种通用 SVM 算法研究平台,可以有效解决分类、回归等问题,同时提供 4 种 SVM 常用的核函数,其中径向基核函数 RBF (Radial Basis Function) 泛化能力较好,是目前应用最广泛的核函数,其表达式为:

$$K(x_i, y_i) = \exp(-\gamma \|x_i - y_i\|^2) \quad (5)$$

其中,  $\gamma$  为核函数参数,且  $\gamma > 0$ 。

#### 3.2 参数优化和数据归一化

通过分析 SVM 的基本原理,惩罚系数  $C$  和核函数参数  $\gamma$  共同决定了 SVM 的识别性能。为了获得最优参数组合,引入  $k$  折交叉验证的方法,分别采用网格搜索 GS (Grid Search) 算法<sup>[14]</sup>、遗传算法 GA (Genetic Algorithm)<sup>[15]</sup> 和粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法<sup>[15]</sup> 对参数进行优化。

此外,为了避免样本数据的量级和量纲对预测结果产生影响,加快模型的收敛速度,需要对特征量进行归一化处理,将其归一到  $[0, 1]$  区间内,归一化方法为:

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

其中,  $x'_i$  为某一特征量  $x_i$  归一化后的值;  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为该特征量的最大值和最小值。

#### 3.3 误差分析方法

误差分析是评价 SVM 模型是否合理的重要环节,本文采用误差平方和  $e_{\text{SSE}}$ 、均方根误差  $e_{\text{MSE}}$ 、平均绝对百分比误差  $e_{\text{MAPE}}$ 、均方百分比误差  $e_{\text{MSPE}}$  4 种误差指标<sup>[15]</sup> 对计算结果进行分析。

$$e_{\text{SSE}} = \sum_{i=1}^N (A_i - P_i)^2 \quad (7)$$

$$e_{\text{MSE}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - P_i)^2} \quad (8)$$

$$e_{\text{MAPE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{A_i - P_i}{A_i} \right| \quad (9)$$

$$e_{\text{MSPE}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{A_i - P_i}{A_i} \right)^2} \quad (10)$$

其中,  $A_i$  为第  $i$  个测试样本的试验值;  $P_i$  为第  $i$  个测试样本的计算值;  $N$  为测试样本的个数。

#### 3.4 计算流程图

本文提出的基于 SVM 计算封闭环境中电弧电压的方法流程如图 8 所示。

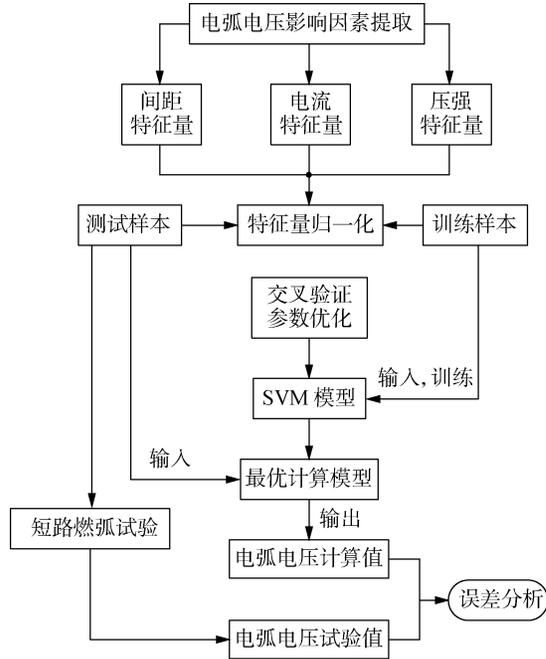


图 8 基于 SVM 的电弧电压计算流程图

Fig.8 Flowchart of arc voltage calculation based on SVM

## 4 电弧电压计算结果与分析

### 4.1 参数优化方法的影响

通过上述试验分析可知, 封闭环境中电弧电压大小主要与电极间隙距离、电流以及压强有关, 本文模拟短路燃弧试验的电弧能量较小, 容器内压力升只有数十 kPa, 在样本选取时均选择第 1 个燃弧半波的电弧电压数据, 此时处于燃弧的初期阶段, 认为容器内压强差异对电弧电压的影响基本可以忽略不计, 将电极间隙距离 5 cm 和 10 cm 下的 6 组电弧电压试验数据作为训练样本, 具体如表 1 所示。

表 1 训练样本集

Table 1 Training samples set

<i>d</i> /cm	电弧电流峰值/kA	$u_{arc}$ /V
5	2.93	116
	4.60	136
	9.19	143
10	2.63	189
	4.78	212
	7.59	224

将表 1 中的训练样本输入 SVM 模型中进行训练, 在 3 折交叉验证方法下, 分别采用 GS 算法、GA 和 PSO 算法进行参数寻优, 得到的 SVM 最优参数和测试样本计算结果的误差指标汇总于表 2 中(表中,  $t_{op}$  为寻优时间)。从表 2 中可以看出, PSO 算法的精度最低, 而且寻优时间最长, GS 算法和 GA 的参数寻优结果相同, 计算精度均较高, 寻优时间也相差不多, 但是由于 GA 为启发式算法, 对相同训练样本进行多次寻优时, 得到的结果不尽相同, 存在不稳定的问题, 因此 GS 算法相对而言更适合于本文的应用

场合。

表 2 不同算法得到的最优参数和误差指标

Table 2 Optimal parameters and errors obtained by different algorithms

参数或误差	计算结果		
	GS 算法	GA	PSO 算法
$C$	512	512	450
$\gamma$	0.25	0.249	0.20
$t_{op}/s$	7.10	5.42	11.48
$e_{SSE}$	1 445.689 1	1 445.690 0	2 367.566 1
$e_{MSE}$	4.224 7	4.224 7	5.406 4
$e_{MAPE}$	0.040 38	0.040 38	0.044 90
$e_{MSPE}$	0.015 83	0.015 83	0.019 18

### 4.2 结果及分析

为了进一步验证本文方法的优越性, 采用基于传统电弧数学模型的计算方法进行对比。Mayr 电弧模型是一种基于热游离、热惯性和热平衡 3 种原理建立的动态电弧模型<sup>[16]</sup>, 具有较为明确的物理意义, 其电弧方程为:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d(\ln g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{ui}{P_{loss}} - 1 \right) \quad (11)$$

其中,  $g$  为电弧电导;  $\tau$  为电弧时间常数;  $P_{loss}$  为电弧耗散功率, 为常数。

按照 1.1 节中的燃弧试验回路在 MATLAB 中搭建仿真试验电路(见附录中的图 A1), 通过在电容器上施加不同的初始电压来改变回路电流大小, 由于 Mayr 模型中电弧初始电导  $g_0$ 、 $\tau$  和  $P_{loss}$  计算公式复杂, 难以得到准确值, 本文根据相关文献<sup>[17-18]</sup> 选取一组典型值进行计算:  $g_0 = 10^4$  s,  $\tau = 5 \times 10^{-4}$  s,  $P_{loss} = 2.9 \times 10^5$  W。

2 种计算方法对  $d=15$  cm 时的电弧电压计算结果如表 3 所示, 其中, 计算值 1 和相对误差为基于 SVM 原理的计算结果; 计算值 2 为基于 Mayr 电弧模型的计算结果。由表可知, 以试验结果为参照值, 基于 SVM 原理的电弧电压计算结果的平均绝对百分比误差约为 4%, 全部测试样本的电弧电压计算值和试验值的相对误差均在 10% 以内; 基于 Mayr 电弧模型的电弧电压计算结果与试验值差异很大, 这是由

表 3  $d=15$  cm 时电弧电压计算结果

Table 3 Calculative results of arc voltage when  $d=15$  cm

电弧电流峰值/kA	试验值/V	计算值 1/V	相对误差/%	计算值 2/V
2.07	232	234.15	1	212.82
2.64	249	241.19	-3	180.91
3.20	248	248.00	0	148.19
3.71	247	253.27	3	131.74
4.30	240	259.15	8	112.75
5.32	284	267.78	-6	91.32
5.98	292	272.21	-7	81.91
6.82	287	276.45	-4	72.23
7.08	263	273.42	4	69.58

于文中仿真时电弧模型的参数是依照开放环境下的燃弧试验选取,而且在不同短路电流时均设置为恒定值,参照式(11),其他参数不变时,电弧电流越大,电弧电导率变化速率越快,弧柱通道内的消游离过程进行越迅速,带电粒子密度在很短时间内显著降低,导致电弧电压降低<sup>[19]</sup>。

通过上述分析,以 Mayr 模型为代表的传统电弧模型虽然可以定性分析电弧开断现象,但是要得到较为准确电弧电压,每次都需通过试验重新修正  $g_0$ 、 $\tau$  和  $P_{\text{loss}}$  参数,封闭环境中这些参数的获取难度更大,而且实际燃弧时的  $\tau$  和  $P_{\text{loss}}$  也是不断变化的,不能简单地作为常数处理,因此很难应用于实际金属封闭开关设备的电弧电压计算中。

## 5 结论

本文通过 L-C 振荡试验回路开展了封闭容器内部短路燃弧试验,得到不同电极间隙距离和短路电流下的电弧电压随时间变化曲线,详细分析了封闭容器内部电弧的燃烧特性,同时提出了一种基于 SVM 原理的电弧电压计算方法,通过与试验结果和基于 Mayr 电弧模型的计算结果进行对比,得到以下结论。

**a.** 封闭容器内部燃弧时,压强变化不仅会对电弧的运动特性产生影响,而且通过改变电弧等离子体的参数来影响电弧电压大小;电弧密度与压强成正比;电弧电导率在温度低于 12 000 K 时基本不受压强影响,在温度大于 12 000 K 时与压强成正比。由于压强对电弧密度的影响远大于电导率,导致电弧电压随着容器内压强的增大而增大。

**b.** 电弧电压有效值随电弧电流变化的随机性较大,但是从整体上呈现电弧电流增加、电弧电压增大的趋势;电极间隙距离对电弧电压有效值的影响程度更明显,当电极间隙距离为 5、10、15 cm 时,电弧电压有效值的平均值分别为 130.4、208.0、252.2 V,而且随着电极间隙距离的增加,电弧电压上升速率变缓。

**c.** 基于 SVM 原理,以电极间隙距离 5 cm 和 10 cm 下的电弧电压数据作为训练样本来计算电极间隙距离 15 cm 下的电弧电压,对比分析了不同参数优化算法对计算结果的影响,结果表明计算值与试验值吻合良好,相对误差均在 10% 以内,验证了本文方法的可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

[1] ROCHETTE D, CLAIN S, ANDRE P, et al. Two-dimensional modelling of internal arc effects in an enclosed MV cell provided with a protection porous filter [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(10): 3137-3144.

[2] 熊泰昌. 内部电弧故障试验情况下中压开关柜强度计算[J]. *高压电器*, 2002, 38(4): 42-44.  
XIONG Taichang. Strength calculation of medium voltage switchgear under internal arc-fault test [J]. *High Voltage Apparatus*, 2002, 38(4): 42-44.

[3] ZHANG X, ZHANG J, PIETSCH G. Estimation of the arc power during a three-phase arc fault in MV electrical installations [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(3): 724-730.

[4] 王伟. 12 kV 开关柜内部燃弧仿真及柜体强度优化[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.  
WANG Wei. Internal arcing simulation and cabinet strength optimum of 12 kV switchgear [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.

[5] RONG M, LI M, WU Y, et al. 3-D MHD modeling of internal fault arc in a closed container [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(3): 1220-1227.

[6] WU Y, RONG M, YANG F, et al. Experimental and theoretical study of internal fault arc in a closed container [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 12(11): 1873-1886.

[7] 许哗, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(7): 57-64.  
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network [J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(7): 57-64.

[8] FJELD E, HAGEN S T. Small scale arc fault testing in air [C] // 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED). Prague, Czech Republic; 2009: 8-11.

[9] LI P, RUAN J, HUANG D, et al. Analysis of pressure rise in a closed container due to internal arcing [J]. *Energies*, 2017, 10(3): 294.

[10] LOWKE J J. Simple theory of free-burning arcs [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1979, 12(11): 1873-1886.

[11] 韩伟锋. 弓网电弧磁流体动力学模型及温度分布研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
HAN Weifeng. Study on MHD model and temperature distribution of pantograph-catenary arc [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[12] 纪昌明, 周婷, 向腾飞, 等. 基于网格搜索和交叉验证的支持向量机在梯级水电系统随机调度中的应用 [J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(3): 125-131.  
JI Changming, ZHOU Ting, XIANG Tengfei, et al. Application of support vector machine based on grid search and cross validation in implicit stochastic dispatch of cascaded hydropower stations [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(3): 125-131.

[13] CHANG Chihchung, LIN Chihjen. LIBSVM: a library for support vector machines [J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2011, 2(3): 1-27.

[14] 王健峰. 基于改进网格搜索法 SVM 参数优化的说话人识别研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.  
WANG Jianfeng. Study on speaker recognition based on improved grid search parameters optimization algorithm of SVM [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.

[15] 徐茹枝, 王宇飞. 粒子群优化的支持向量回归机计算配电网理论线损方法 [J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(5): 86-89.  
XU Ruzhi, WANG Yufei. Theoretical line loss calculation based on SVR and PSO for distribution system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(5): 86-89.

[16] MAYR O. Contribution to the theory of static and dynamic arcs [J]. *Arch, Elec*, 1943, 37(1): 589-608.

[17] 郭婷, 周文俊, 黄海鲲, 等. 多间隙灭弧结构熄弧工频电弧的仿真与试验 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(10): 2853-2861.  
GUO Ting, ZHOU Wenjun, HUANG Haikun, et al. Simulation and experiment on arc quenching structure with multi-gaps to quench

the power frequency arc [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (10): 2853-2861.

- [18] SCHAVEMAKER P H, VAN DER SLUI L. An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 580-584.
- [19] 裴振江. 特高压断路器开断容量的合成试验方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- PEI Zhenjiang. Research on synthetic test circuit for ultra-high voltage circuit breakers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

#### 作者简介:



欧阳子卿

欧阳子卿 (1994—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要研究方向为高压电器 (E-mail: 1628126140@qq.com);

杜志叶 (1976—), 男, 河南许昌人, 教授, 博士, 主要研究方向为高压电器和电磁场数值计算 (E-mail: duzhiye@126.com);

黎鹏 (1989—), 男, 湖北咸宁人, 博士, 主要研究方向为高压电器 (E-mail: 820228470@qq.com)。

## Internal arcing characteristic and arc voltage calculation in closed container

OUYANG Ziqing, DU Zhiye, LI Peng, ZHANG Li

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to accurately calculate the energy when the short circuit arcing occurs in metal-enclosed switchgear, the internal short circuit arcing test in a small-scale closed container is carried out. The measured data, such as current and arc voltage under different gap lengths and charging voltages, are obtained by the L-C oscillation test circuit, and the combustion characteristics of internal arc are analyzed. The analytical results show the arc voltage is proportional to the pressure inside the closed surrounding, arc voltage RMS has larger randomness with the change of arc current, the impact of electrode gap length on arc voltage is more obvious, and the average of arc voltage RMS is 130.4 V, 208.0 V and 252.2 V when the electrode gap length is 5 cm, 10 cm and 15 cm respectively. Considering the randomness of the arc voltage in the closed surrounding, a calculation method of arc voltage based on the SVM (Support Vector Machine) is proposed. The results calculated by the proposed method are compared with the calculation and experimental results based on the Mayr arc model, which shows that the proposed method is superior to the Mayr arc model, and the average absolute percentage error between the results calculated by the proposed method and the testing results is only 4.04%.

**Key words:** arc voltage; metal-enclosed switchgear; short circuit arcing characteristic; small-scale closed containers; support vector machine (SVM); Mayr arc model

附录

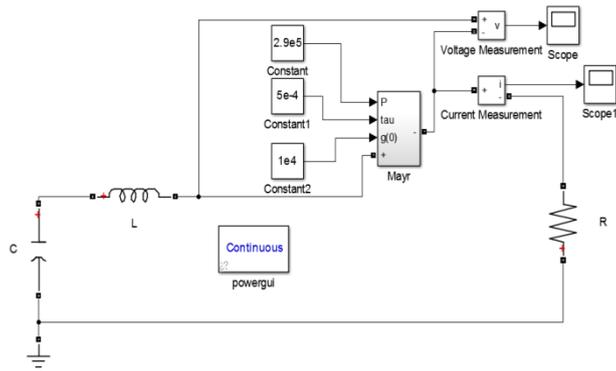


图 A1 仿真试验电路

Fig.A1 Simulation test circuit