

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.03.006

基于电弧图像的中频真空电弧阳极燃烧特性研究

赵云峰, 王永兴, 邹积岩, 董文亮

(大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了研究中频真空电弧的阳极燃烧规律, 利用 CMOS 高速摄像机, 对可拆卸真空灭弧室中的纯铜平板触头之间的中频真空电弧进行拍摄, 触头开距为 8 mm, 触头直径为 28 mm, 分别采集了不同电流频率以及不同电流峰值下的电弧图像。利用 MATLAB 图像处理技术对阳极触头的灰度分布、阳极高灰度值区域的持续时间以及运动规律等进行了分析处理。结果表明电流峰值大小对阳极灰度分布的影响要远大于电流频率; 阳极高灰度值区域的持续时间占总半波燃弧时间百分比随电流频率的增加而下降, 而随电流峰值的增加而增加; 阳极高灰度值区域在电流上升阶段发生融合, 在下降阶段发生收缩。

关键词: 中频真空电弧; 阳极特性; 图像处理; 灰度值

Study on Anode Combustion Characteristics of Intermediate-frequency Vacuum Arc Based on Arc Image

ZHAO Yunfeng, WANG Yongxing, ZOU Jiyan, DONG Wenliang

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the anode combustion of intermediate-frequency vacuum arc, intermediate-frequency vacuum arc images are acquired in a detachable vacuum chamber applying CMOS high speed camera. The electrode is copper plat contacts with the gap 8 mm and the contact diameter 28 mm. The experiment is performed under the condition of different frequency and amplitude. The distribution of anode radiation intensity, the duration and movement of the anode high energy radiation area are analyzed and processed using MATLAB image processing technology. The results show that the influence of the current peak value on the distribution of anode radiation intensity is much greater than the frequency. The duration of anode high energy radiation area decreases with the frequency, but increases with the peak value of current. The anode high energy radiation area merge in the current rising stage, while shrink in the falling stage.

Key words: intermediate-frequency vacuum arc; anode characteristics; image processing; gray value

0 引言

在基于有源换流法的直流开断技术中, 换流支路频率如果选取的太小, 需要容量和参数较大的换流电容和换流电感, 导致项目和试验开支增加; 如果频率过高, 容易造成断路器重燃, 开断失败。为了保证开断的可靠性, 同时控制成本, 通常会选取 500~

2 000 Hz 的中频作为换流频率^[1]。

中频电弧的燃烧状态对于开关能否及时有效的开断电路起到决定性的作用。当电流过大时, 将会在阳极产生电流的集聚现象, 造成局部的能量过高, 导致阳极触头熔化烧蚀。这些烧蚀的部分在电弧熄灭后仍然会释放出金属蒸气, 造成电极间的介质绝缘强度降低, 对电路开断产生不利影响, 因此深入研究中频电弧的阳极燃烧过程具有重要的现实意义。

阳极表面能流密度的大小是评定金属蒸气电弧

收稿日期: 2016-11-09; 修回日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51337001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51337001).

对阳极加热作用的重要参数。文[2]中利用数值模拟技术,求解真空电弧磁流体动力学模型,讨论分析了电弧电流、触头半径等燃弧参数对阳极表面能流密度的影响;文[3]中建立了纵向磁场下真空电弧阳极热过程的二维瞬态轴对称模型,并对极限开断条件下不同能流密度作用下纯铜电极的阳极热过程进行了仿真分析;文[4]中通过仿真揭示了在自生磁场的作用下阳极温度发生偏移的规律;文[5]中利用可拆卸灭弧室,以实验为基础,分析了真空电弧在不同开距下面的阳极表面熔池旋转运动;文[6-7]中利用伪彩色图像处理技术,对电弧图像进行伪彩色处理,提高了观察者对图像信息的检索能力;文[8-10]中处理了 CMOS 高速摄像机拍摄的工频真空电弧图像,研究了电弧面积和电弧扩散速度;文[11]中对电弧图像周长等几何特征进行了提取,实现了电弧燃烧过程中的量化描述;文[12]中对电弧图像进行几何形态学处理,得到内部高能等离子体以及电弧外部轮廓的时间面积变化曲线。此外,在图像处理特别是电弧图像的形态学检测、增强、去噪、边缘检测等方面许多学者也进行了相关研究^[13-19]。

文中采用实验手段,利用可拆卸灭弧室,对固定间距下的平板触头,在不同电流峰值和频率下进行燃弧实验,使用 CMOS 高速摄像机对阳极燃烧过程进行拍摄,并应用 MATLAB 对拍摄到图像的阳极区灰度分布、阳极高灰度值区域的持续时间及其运动规律等方面进行分析处理,探讨分析了中频真空电弧的阳极燃烧特性。

1 试验系统

中频电弧振荡电路实验系统见图 1。图 1 中 T 为变比可调的变压器,通过调节一、二次侧变比改变二次侧输出电压,整流后为电容 C_0 充电。该实验所应用的电感 L_0 大小为 $35.6 \mu\text{H}$,通过调节 C_0 电容值可以改变中频电弧的频率,改变电容 C_0 的充电电压可以调节燃弧阶段电流的大小。高压探头 P 用来测量电容 C_0 的实时充电电压。罗氏线圈用来测量中频电弧的电流大小。CMOS 为与上位机相连的高速摄像机。CMOS 高速摄像机的采样速率设置为每秒 60 000 帧。为了拍摄阳极区域,需要将 CMOS 高速摄像机倾斜一定角度。

做两组实验,一组拍摄频率为 2 177 Hz,电流峰值分别为 2、5、8 kA 的电弧图片,分析电流的变化对阳极燃烧的影响;另一组拍摄电流峰值为 5 kA,频率分别为 1 088、1 540、2 177 Hz 的电弧图片,分析频率的变化对阳极燃烧的影响。

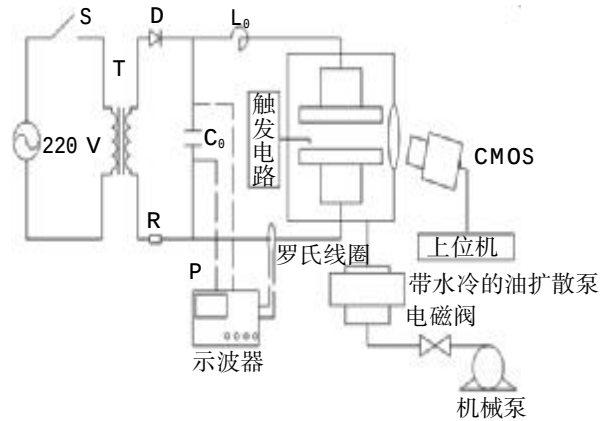


图 1 实验主线路图

Fig. 1 Experiment circuit

2 电弧图像的处理

2.1 电弧图像

采用上述实验电路,触发产生中频电弧进行图像采集。高速摄像采集的典型电弧图像见图 2。电流峰值为 5 kA,频率为 2 177 Hz。图 2(a)中的椭圆形区域为阳极表面,长方形区域为阴极,其他图中阳极表面和阴极位置与图 2(a)相同。

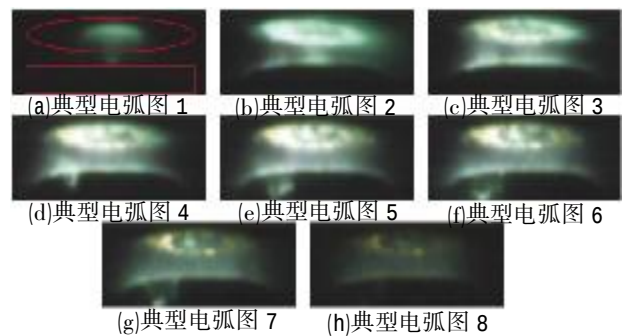


图 2 典型中频电弧图像

Fig. 2 Typical arc image of intermediate frequency

CMOS 高速摄像机相机输出的是 TIF 格式的彩色图像,通过 MATLAB 图像处理技术将彩色图像转化为灰度图像,每一个像素点都会对应一个灰度值,灰度值的大小和 CMOS 高速摄像机对应阵列的感光量成正比。当电弧电流越大,对阳极的加热作用越剧烈,辐射越强,则生成图像对应像素点的灰度值越高^[20]。

依据 Abel 逆变换的推导过程可知,CMOS 相机拍摄到电弧每一点的辐射强度 $I(y)$ 是对发射系数 $\varepsilon(r)$ 的积分^[8],见式(1)。

$$I(y) = 2 \int_0^x \varepsilon(r) dx. \quad (1)$$

CMOS 相机拍摄系统将电弧物像成在感光硅基板,硅基板接收到光通量 Q_v 为^[20]

$$Q_v = KI(y)SU/d^2. \quad (2)$$

式(2)中: K 为光学系统的通过率; $I(y)$ 为等离子体的辐射强度; S 为发光面面积; U 为光学系统的出瞳面积; d 为物距。由式(2)可知,光通量 Q_v 与通过率 K 成正比。调节光圈能够改变通过率 K ,从而改变感光器件所接收到的光通量。式(1)中的 $I(y)$ 由弧柱区的光辐射和阳极区域的光辐射组成。其中阳极区辐射能量较高的那些区域是电弧剧烈燃烧的结果,其发射系数 $\varepsilon(r)$ 远大于弧柱区,是 $I(y)$ 的主要组成部分。调小光圈,降低 K ,相机接收到的阳极区的光辐射和弧柱区的光辐射等比例减小,由于阳极辐射能量高的区域光辐射占比较大,从而使CMOS感光硅基板的光通量 Q_v 主要来自于阳极区的。即可以通过调小光圈来观察阳极的燃烧情况。

2.2 处理方法

人眼对灰度图像的识别能力比彩色图像的识别能力小的多,所以将灰度图像的不同灰度值与彩色图像的R、G、B分量对应起来能够提高图像的可视度,有助于电弧图像处理者对图像特征的发现和规律的提取^[6]。

伪彩色图像视觉显示的优劣很大程度上取决于灰度图像灰度值与真彩图像RGB的映射关系,经笔者对不同映射关系的显示效果对比,决定采用式(3)-(5)函数关系式。

$$f_R(x, y) = \begin{cases} 0 & 0 \leq f \leq 64 \\ 0 & 64 < f \leq 128 \\ 4f(x, y) - 512 & 128 < f \leq 192 \\ 256 & 192 < f \leq 256 \end{cases}; \quad (3)$$

$$f_G(x, y) = \begin{cases} 4f(x, y) & 0 \leq f \leq 64 \\ 256 & 64 < f \leq 128 \\ 256 & 128 < f \leq 192 \\ -4f(x, y) + 1024 & 192 < f \leq 256 \end{cases}; \quad (4)$$

$$f_B(x, y) = \begin{cases} 256 & 0 \leq f \leq 64 \\ -4f(x, y) + 512 & 64 < f \leq 128 \\ 0 & 128 < f \leq 192 \\ 0 & 192 < f \leq 256 \end{cases} \quad (5)$$

经过伪彩色处理之后电弧图像见图3。从图3中可以看出,通过调整光圈到合适大小,使感光面接收到的弧柱区的能量由于光圈的调小而削弱。虽然感光面接收到的阳极区的辐射能也在一定程度上降低,但由于阳极高能辐射区域的存在,使得这种降低对其成像影响较小。

基于上述分析,作出频率为2 177 Hz,不同峰值电流(2、5、8 kA)时刻阳极区灰度值分布的三维网格曲面图见图4-6。图4-6中: x 轴和 y 轴坐标用来确定像素点所处的阳极区位置; z 轴坐标用来表示像

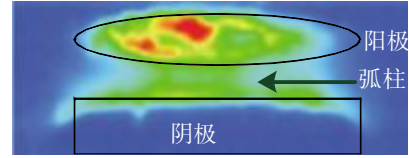


图3 伪彩色处理图像

Fig. 3 Image of pseudo-color processing

素点的灰度值。

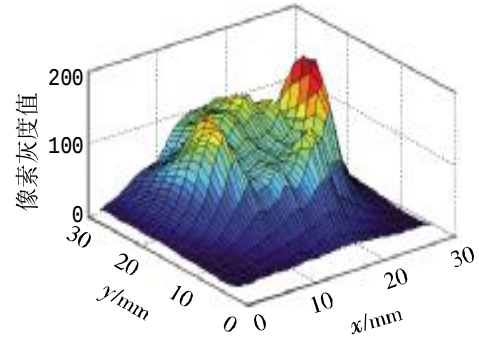


图4 阳极区灰度分布($f=2\ 177\ \text{Hz}$, $I=2\ \text{kA}$)

Fig. 4 Gray distribution of anode region ($f=2\ 177\ \text{Hz}$, $I=2\ \text{kA}$)

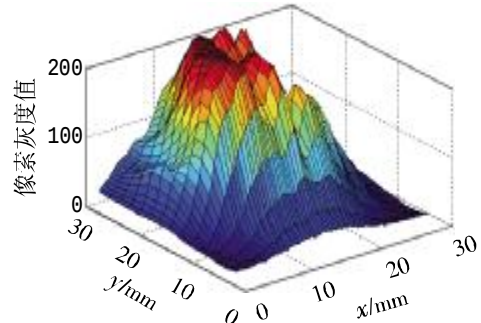


图5 阳极区灰度分布 ($f=2\ 177\ \text{Hz}$, $I=5\ \text{kA}$)

Fig. 5 Gray distribution of anode region ($f=2\ 177\ \text{Hz}$, $I=5\ \text{kA}$)

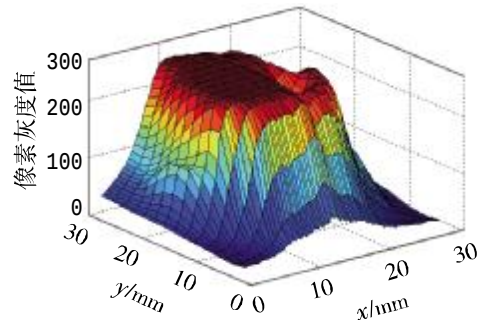


图6 阳极区灰度分布 ($f=2\ 177\ \text{Hz}$, $I=8\ \text{kA}$)

Fig. 6 Gray distribution of anode region ($f=2\ 177\ \text{Hz}$, $I=8\ \text{kA}$)

3 实验结果分析

3.1 阳极灰度分布

为了便于对阳极表面不同区域的灰度分布进行描述,分别将图4-6中每一个像素点灰度值沿 y 方

向进行积分,得到阳极区灰度值沿 x 方向的分布规律,见图 7。

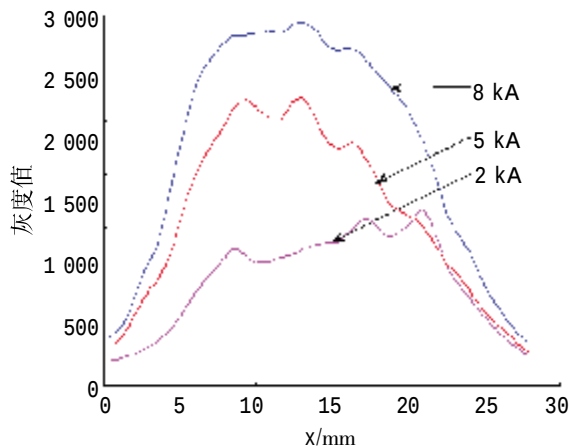


图 7 电流峰值变化对阳极灰度分布的影响

Fig. 7 The influence of peak value of current variation on the gray distribution of anode

从图 7 可以看出,当电流峰值增加时阳极区灰度值在整个触头范围内增大,但是触头中心处的灰度值相对于其他部分增加较快,电流峰值从 2 kA 增大到 5 kA 时, x 方向 13.41 mm 处的灰度值从 1 320 增大到 2 633,增幅为 1 313,而 3.9 mm 处则只从 461 增大到 1 071,增幅仅为 610,阳极区灰度值在触头中心位置急剧增加,而不是在整个触头范围内均匀增加,说明电弧在燃烧过程中发生集聚现象。灰度分布在一定程度上能够反映不同位置的辐射强度,当电弧电流越大,阳极燃烧向中心收缩的趋势越明显。将文中实验和文[2]对比可知,两者趋势一致。

选取电流峰值为 5 kA,频率分别为 1 088、1 540、2 177 Hz 的电弧图片,进行与图 7 相同的积分操作,见图 8。由图 8 可以看出,在每一个电流频率下,阳极直径中心处的灰度值大于两边的。随着频率的变化,阳极灰度分布大体趋势基本不变。将图 7、8 对比,能够看出电流峰值对阳极灰度分布的影响要远大于电流频率。

3.2 阳极高灰度值区域的持续时间

在整个半波的燃弧阶段,阳极区辐射能量较高的那些区域持续时间的长短对断路器能否成功开断故障电流有重大影响,过度烧蚀将导致阳极在熄弧阶段继续向触头间隙提供过量的金属蒸气,从而减弱间隙介质恢复强度。文中将阳极灰度值较高区域的持续时间占总半波燃弧时间的百分比作为衡量烧蚀时间的量度。计算方法为将阳极区域图像进行阈值分割,选取灰度值 242 作为全局阈值^[2],当阳极区像素的灰度值大于 242 就将此像素标记为 1,即目标对象阳极高灰度值区域,否则标记为 0。利用某一

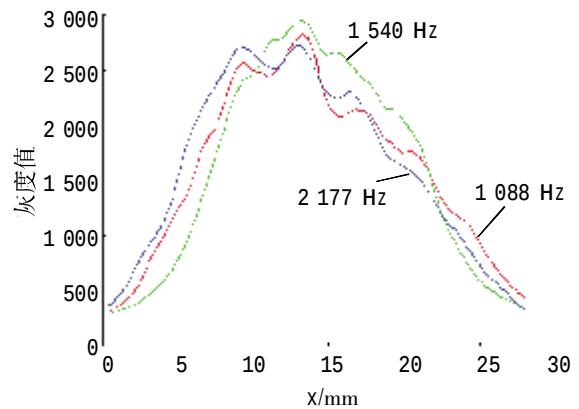


图 8 电流频率变化对阳极灰度分布影响

Fig. 8 The influence of current frequency variation on the gray distribution of anode

电流频率或电流峰值下存在阳极高灰度值区域的帧数除以整个燃弧半波下拍摄的总帧数即求出阳极高灰度值区域的持续时间占总半波燃弧时间百分比。经计算得出,当电流峰值为 5 kA,频率分别为 1 088、1 540、2 177 Hz 时,对应的阳极高灰度值区域的持续时间占总半波燃弧时间的百分比为 63%、60%、53%。当电流频率为 2 177 Hz,电流峰值分别为 2、5、8 kA 时,对应的阳极高灰度值区域的持续时间占总半波燃弧时间的百分比从零增加到 53%和 73%。

可以看出,随着电源频率的增加,阳极高灰度值区域的持续时间占总半波燃弧时间百分比逐渐变小。随着电流峰值的上升,阳极高灰度值区域的持续时间占总半波燃弧时间百分比越来越大。频率降低导致燃弧电流对触头加热时间变长,长时间加热促进了阳极高灰度值区域的维持。电流峰值增加,导致燃弧每一时刻注入阳极的能量升高,从而对触头的加热效果更加剧烈,进而阳极高灰度值区域的相对持续时间更长。

3.3 阳极高灰度值区域的运动规律

电流上升阶段连续拍摄并经过伪彩色处理之后的阳极燃烧图像见图 9。图 9 中箭头所指为阳极高灰度值区域。从图 9 能够明显看出阳极高灰度值区域存在移动现象,并且移动方式是趋向于融合而不是分离。

连续拍摄的电流下降阶段阳极燃烧图像见图 10,并且经过了伪彩色处理。将图 10 变化过程和图 9 阳极变化过程对比可知,下降阶段没有出现阳极高灰度值区域的移动现象,而存在缩小现象。相比于电流上升阶段移动,电流下降阶段阳极高灰度值区域的不移动现象造成高能量区域对阳极触头同一点的长时间加热,可能导致在熄弧之后继续释放高温金属蒸气,降低触头间隙的介质强度,造成电弧重燃。其他燃弧频率(1 088、1 540 Hz)以及电流峰值(2、

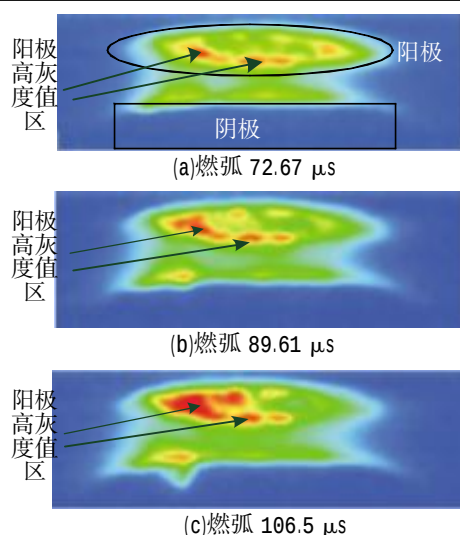


图 9 电流上升阶段阳极高灰度值区域运动情况
($f=2\,177\text{ Hz}$, $I_{\max}=5\text{ kA}$)

Fig. 9 The motion of anode high gray value area in the current rising phase($f=2\,177\text{ Hz}$, $I_{\max}=5\text{ kA}$)

8 kA)的阳极高灰度值区域的运动规律与 2 177 Hz, 5 kA 相似。

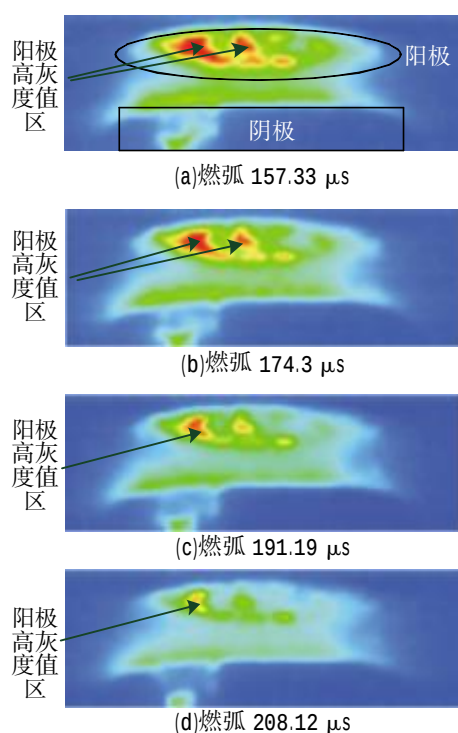


图 10 电流下降阶段阳极高灰度值区域运动情况
($f=2\,177\text{ Hz}$, $I_{\max}=5\text{ kA}$)

Fig. 10 The motion of anode high gray value area in the current falling phase($f=2\,177\text{ Hz}$, $I_{\max}=5\text{ kA}$)

4 结论

1)利用图像处理方法,计算分析了中频电弧的阳极区灰度分布。当电流峰值增大时,触头中心处的灰度值相对于其他部分增加更为显著,阳极燃烧

出现收缩特性。电流峰值对阳极灰度分布的影响要远大于电流频率。

2)阳极高灰度值区域的持续时间占总半波燃弧时间百分比与电流频率和峰值有关。随着频率的降低或电流峰值的增加,阳极高灰度值区域的持续时间占总半波燃弧时间百分比也越来越大。

3)中频电弧的阳极高灰度值区域在电流上升阶段会发生移动,移动方式为多块阳极高灰度值区域发生融合;而在电流下降阶段,阳极高灰度值区域几乎不发生移动,只存在缩小现象。

参考文献:

- [1] 郑占锋. 基于换流技术的快速直流真空开关理论与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
ZHENG Zhanfeng. Theory and application of high-speed DC vacuum switch based on active commutation circuit [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [2] 向 川, YAN Jiudun, 董华军, 等. 燃弧参数对小间隙真空电弧特性的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3095-3100.
XIANG Chuan, YAN Jiudun, DONG Huajun, et al. Influence of arcing parameters on vacuum arc characteristic in short gaps[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3095-3100.
- [3] 王立军, 贾申利, 刘 宇, 等. 纵磁下真空电弧阳极热过程的仿真[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 65-73.
WANG Lijun, JIA Shenli, LIU Yu, et al. Simulation of anode thermal process in vacuum arc under axial magnetic field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 65-73.
- [4] 黄小龙, 王立军, 贾申利, 等. 纵向磁场和外部横向磁场共同作用下真空电弧偏移与阳极偏烧现象的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 941-946.
HUANG Xiaolong, WANG Lijun, JIA Shenli, et al. Simulation research of deflection phenomenon of vacuum arc and anode erosion under the combined action of axial magnetic field and external transverse magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 941-946.
- [5] 王立军, 王流火, 贾申利, 等. 电极间距对真空电弧电压及阳极熔池旋转速度影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 31(25): 135-140.
WANG Lijun, WANG Liuhuo, JIA Shenli, et al. Experimental study on effects of electrode gaps on the high-current vacuum arc voltage and the rotation speed of anode melting pool[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 31(25): 135-140.
- [6] 王之亮. 低压接触器电弧温度检测研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.

- WANG Zhiliang. Research on the measurement of arc temperature in the low voltage contactors[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [7] 董文亮. 短间隙大电流真空开关电弧形态特性量化研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
- DONG Wenliang. Research on morphological characteristics of the vacuum switch arc within short-gap and large current[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013.
- [8] 董华军. 真空开关电弧形态研究及其等离子体参数诊断[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- DONG Huajun. Investigations on the characteristics of arc forms and diagnosis of plasma parameters in VCB[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [9] 董华军, 石桂名, 宋春雨, 等. 基于图像序列短间隙真空开关电弧形态研究[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(1): 44-47.
- DONG Huajun, SHI Guiming, SONG Chunyu, et al. Studies of vacuum switching arc at short-gap by image processing[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(1): 44-47.
- [10] 吴延清, 董华军, 田小静, 等. 真空开关电弧图像面积变化研究[J]. 真空科学与技术学报, 2010(6): 604-607.
- WU Yanqing, DONG Huajun, TIAN Xiaojing, et al. Variations in area and shape of vacuum switching arc images[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2010(6): 604-607.
- [11] 董华军, 赵鸿飞, 李敏, 等. 真空开关电弧形态几何特性量化实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(7): 638-641.
- DONG Huajun, ZHAO Hongfei, LI Min, et al. Digitization and on-line diagnosis of vacuum switching arc images[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(7): 638-641.
- [12] 董华军, 刘政君, 郭英杰, 等. 真空开关电弧等离子体几何形态研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(12): 1408-1413.
- DONG Huajun, LIU Zhengjun, GUO Yingjie, et al. Time evolution of arc plasma geometric morphology in vacuum current breaker[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(12): 1408-1413.
- [13] 田小静, 冯雨, 郭英杰, 等. 基于小波变换和形态学细化算法的真空电弧形态检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 110-114.
- TIAN Xiaojing, FENG Yu, GUO Yingjie, et al. Morphological detection of vacuum switching arc based on wavelet transform and morphology edge thinning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 110-114.
- [14] 董华军, 吴延清, 刘岩. 基于 MATLAB 的真空开关电弧图像处理[J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(3): 85-87.
- DONG Huajun, WU Yanqing, LIU Yan. Image processing of vacuum switching arc image using MATLAB[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2010, 31(3): 85-87.
- [15] 吴延清. 短间隙真空开关电弧特性实验和建模研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- WU Yanqing. Modeling and experimental researches on the characteristics of vacuum arcs in short-gap VCB[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [16] DONG Huajun, WANG Hongyan, SHEN Jijun. Study of wavelet denoising in images of vacuum switching arc[C]// International Conference on Computer Science and Information Processing(CSIP). Xi'an: [s.n.], 2012: 22-24.
- [17] KRYLOV V, POLYAKOVA M. The method of image contour segmentation based on wavelet transform and mathematical morphology[C]// Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, International Conference. [S.l.]: IEEE, 2006: 236-238.
- [18] 董华军, 赵鸿飞, 袁端磊, 等. 短间隙真空开关电弧图像边缘提取研究[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(2): 155-157.
- DONG Huajun, ZHAO Hongfei, YUAN Duanlei, et al. Edge extraction algorithm for vacuum switching arc at short-gap[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(2): 155-157.
- [19] 崔立. 真空开关电弧形态诊断系统的研发[D]. 大连: 大连交通大学, 2014.
- CUI Li. Research on diagnostic system of vacuum circuit breaker arc shape[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2014.
- [20] 唐秉湘. 基于数字图像处理的锅炉火焰温度检测研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- TANG Bingxiang. The boiler flame temperature measuring research based on digital image processing[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- 赵云峰(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事真空电弧的研究。