

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240975

基于视觉追踪技术的中频真空电弧 弧后特性研究

蒋原^{1,2} 马速良³ 武雨田¹ 何安景¹ 李擎¹ 武建文⁴ 夏尚文⁴

(1. 北京科技大学自动化学院工业过程知识自动化教育部重点实验室 北京 100083

2. 利物浦大学电气工程与电子系 利物浦 L69 3GJ

3. 北方工业大学电气与控制工程学院 北京 100144

4. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

摘要 为更全面地掌握中频真空电弧的弧后特性,该文采用目标检测及交并比跟踪等视觉追踪技术分析电弧图像,三维重构了弧后金属液滴的喷溅轨迹,并基于此求解了电弧内部的空间压力梯度。实验及理论分析结果表明:当中频真空电弧发生弧后击穿时,电弧电压发生频率为50 kHz的高频振荡,弧后期间在双视角电弧图像中均观察到了大量的金属液滴喷溅。在考虑将电弧压力梯度作为金属液滴喷溅的驱动力的情况下,灭弧室内的压力梯度可达到1.2 MPa/mm。三个方向的加速度均达到 10^5 m/s²数量级,喷溅速度为10 m/s数量级,从触头边缘喷溅至灭弧室玻璃内壁的时间尺度为ms级。金属液滴表面的Cu蒸气密度为 2.2×10^{19} m⁻³,在喷溅过程中,金属液滴持续蒸发,液滴表面Cu的质量分数从65%下降到10%,大量Cu蒸气进入灭弧室,减弱弧后介质恢复强度。

关键词: 中频真空电弧 弧后特性 金属液滴 多目标跟踪 电弧压力

中图分类号: TM561.2

0 引言

将真空开关应用于多电飞机变频(中频360~800 Hz)电力系统,可解决由于电流频率提高导致的熄弧困难以及电器开断能力受限等问题。深入分析中频真空电弧复杂的放电过程,既是电器学的前沿研究,也是提升灭弧室性能的关键^[1-4]。

真空电弧的阳极活跃程度决定了开关电器的弧后状态及开断能力,尤其在大电流时阳极还能主动发出金属蒸气、等离子体以及金属液滴。阳极烧蚀的机理主要有热爆炸力学说、磁流体动力学说以及热应力学说^[5]。目前研究中频真空电弧的手段主要有实验方法和仿真计算,其中仿真计算能够定量地描述等离子体内部变化,相比实验方法,研究成本更低、电弧微观特性更容易获取^[6-7]。关于阳极烧蚀的仿真技术已经从早期的一维传热模型发展为二维磁流体动力学模型,并正在向三维瞬态模型方向发

展^[8]。然而,电弧仿真所需要的关键参数仍需通过实验方法获取^[9-10],准确的仿真参数是得到高精度仿真计算结果的基础。文献[11]利用非接触式光谱法获得中频真空电弧的电子温度为0.5~3 eV,电子密度数量级为 $10^{20} \sim 10^{21}$ m⁻³,为中频真空电弧的仿真提供了重要依据。文献[12]通过实验捕捉电弧在灭弧腔室内的动态演变过程,根据电弧熄灭时刻验证了三维仿真模型的准确性。文献[13]在实验中观察得到的中频真空电弧弧后击穿区域,与仿真中得到的阳极边缘离子高能区重合,验证了仿真模型的合理性。文献[14]在仿真直流故障电弧电阻时发现,当介质仅为空气时,计算误差相比实验测量值较大,加入铜蒸气成分后,最大偏差约为13%。

电弧压力是放电过程的一个重要参数,为电场、磁场、热场综合作用于等离子体而表现出来的一种宏观状态,既直接影响等离子体射流的形成^[15]、真空电弧的扩散与集聚^[16-17],还能作用于触头产生的金属液滴,通过喷射运动影响弧后击穿过程^[18]。文献[19]发现较高的电弧压力可加快电弧电导衰减,进而提高直流熔断器的分断速度。针对中压开关柜

内的故障电弧压力,文献[20]提出了开关柜内部压力升计算的模型简化方法,将电弧压力升计算时间缩短了近 55%。文献[21]研究了 SF₆ 替代气体对故障电弧压力的影响,相同能量下开关柜内电弧压力的上升速度与气体分子、初始充气压力关系紧密。

由于真空灭弧室的特殊环境,利用传感器直接测量电弧压力难度较大,一般采用非接触式测量手段。由于当电流较大时,触头烧蚀以喷溅为主,液滴喷溅是真空灭弧室内金属蒸气的主要来源,因此在认为电弧压力是驱动弧后金属液滴喷溅的假设条件下,文献[22]提出了一种间接计算电弧压力的方法,借助电弧图像获取金属液滴在各采样时刻的坐标,根据加速度推算电弧压力,但该方法只能获得图像平面内的压力,缺少空间第三维度的信息。为解决上述问题,文献[23]又提出利用双目立体成像算法确定金属液滴在各采样时刻的三维坐标,进而确定中频真空电弧的内部压力。在实际电弧图像分析中,还存在诸多技术难题,具体体现在:①亮度值在真空电弧发展过程中变化较大,基于灰度阈值法的检测方法难以准确识别液滴;②弧后过程喷射的金属液滴数量多且几何特征相似,人工逐帧追踪难度较大。使用图像处理技术可辅助分析电弧的发展过程^[24-25]。通过追踪金属液滴,进而得到电弧压力及金属蒸气浓度,对于分析真空电弧的弧后特性具有重要的价值。在此方面,文献[26]考虑电弧和触头之间能量的相互耦合,根据喷溅造成的质量损失折算出触头间隙内的金属蒸气浓度,并分析了喷溅现象对直流开断造成的影响。文献[27]提出了一种基于 Mie 散射理论的测量方法,可对真空电弧放电过程产生的金属液滴粒径分布特性进行在线测量,为研究真空放电过程提供了重要参考。

为更全面地掌握中频真空电弧的弧后特性,本文采用目标检测及交并比 (Intersection over Union, IoU) 跟踪等视觉追踪算法分析电弧图像,三维重构弧后金属液滴运动,求解电弧内部的空间压力梯度,并且分析金属蒸气对弧后击穿过程的影响。

1 实验系统

模拟波音 B787 飞机的三相变频电力系统,其供电容量为 1 450 kV·A、相电压为 230 V,按最大短路电流瞬时值为额定电流的 5 倍估算^[1,4],实验中最高电流等级可达 10 kA,使用实验室楼内配电难以直接获得。为此本文搭建了中频真空开关电弧实验平台,原理如图 1a 所示,通过调整 C_1 和 L_1 值,

可产生实验所需要的中频 360~800 Hz 电流。使用量程为 30 kA、带宽范围为 0.2 Hz~1 MHz 的罗氏线圈测量电流。

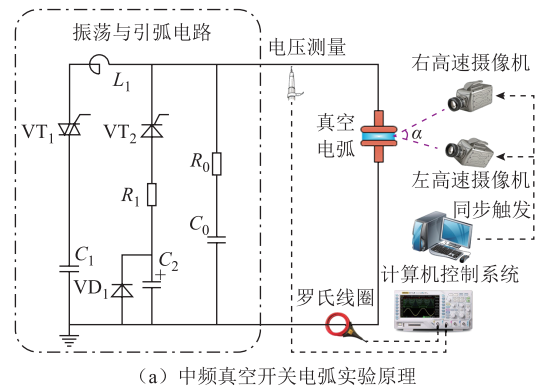


图 1 立体视角中频真空电弧实验系统

Fig.1 Intermediate frequency vacuum arc experiment system with stereoscopic view

为获取稳定的电弧图像、减小直接开断造成的时间分散性误差,实验采用“引弧”策略。引弧支路由电解电容 C_2 、限流电阻 R_1 、晶闸管 VT_2 和电力二极管 VD_1 组成,可在真空开关触头间引出近似直流电弧,引入中频电流后自行关断。另外, R_0 和 C_0 构成调频电路,用来调节电流过零后断口的瞬态恢复电压 (Transient Recovery Voltage, TRV)。

本文使用触头直径为 41 mm 的纵磁真空灭弧室,触头材料为 CuCr50,开距为 3 mm;为方便拍摄图像,去除金属屏蔽罩,仅保留玻璃罩,外径为 100 mm。实验使用千眼狼高速摄像机采集电弧图像,拍摄间隔为 1/40 000 s、曝光时间为 5 μ s、图像分辨率为 704×272。在电弧图像采集过程中采用两台高速摄像机,二者同步拍摄,可实现对中频真空电弧的双目立体视觉观测,具体如图 1b 所示。

2 实验现象

2.1 中频真空电弧过零熄灭

过零熄灭的中频真空电弧电压、电流与电弧图

像如图 2 所示，电流峰值约为 12 kA。

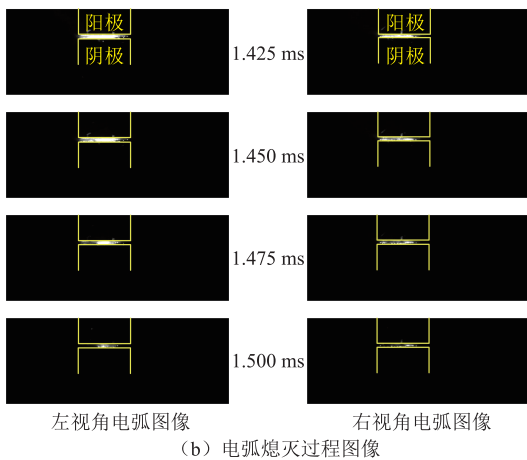
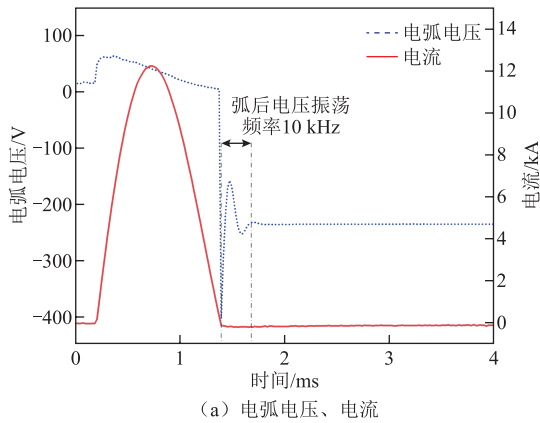


图 2 过零熄灭的中频真空电弧电压、电流与电弧图像
Fig.2 Arc voltage, current and arc images when intermediate frequency vacuum arc extinguished after current zero

由图 2 可知，左、右摄像机拍摄的图像变化规律基本一致，电流临近零点时，中频真空电弧的弧柱区域逐渐减小，阴极斑点始终在电极表面均匀分布。电流过零后，电弧熄灭，随后电弧电压发生频率为 10 kHz 的小幅振荡，振荡时间约持续 0.5 ms，振荡峰值接近 -400 V，最终断口电压稳定在约 -250 V，未发生弧后击穿。

2.2 中频真空电弧弧后击穿

发生弧后击穿的中频真空电弧电压、电流与电弧图像如图 3 所示，电流峰值约为 15 kA。

由图 3 可知，与过零熄灭的实验结果明显不同：
①当电流过零后发生弧后击穿时，电弧电压发生了高频振荡，频率约为 50 kHz，电压恢复至稳态的时间约为 2 ms；
②在左、右摄像机拍摄的图像中均观察到了大量的金属液滴向外喷溅。金属液滴的喷射运动是由电弧压力驱动的，影响弧后击穿过程，如图 3b 中的标记所示。

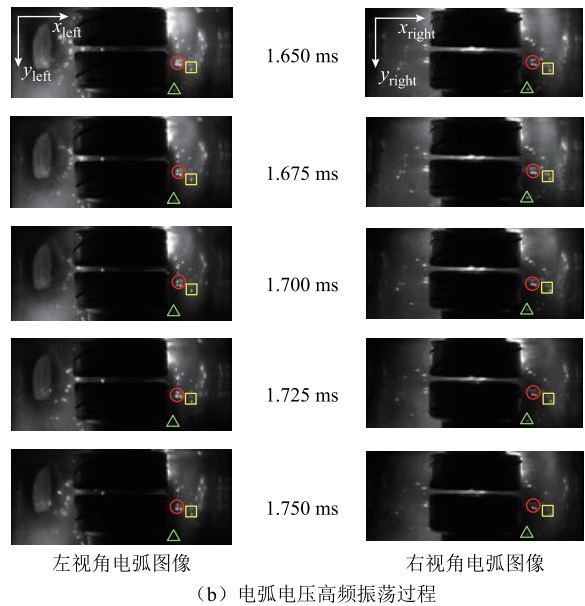
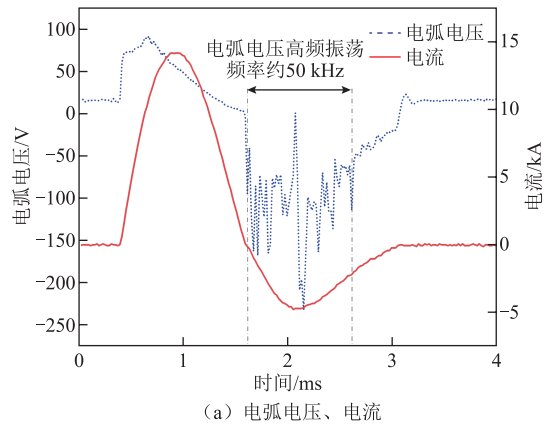


图 3 弧后击穿的中频真空电弧电压、电流与电弧图像
Fig.3 Arc voltage, current and arc images when post arc breakdown happened

3 中频真空电弧弧后过程分析

3.1 电弧压力梯度计算原理

根据文献[15, 22]，当中频真空灭弧室内发生弧后击穿时，金属液滴的运动与压力的关系为

$$\begin{aligned}
 ma &= \mathbf{F} = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\pi r_0^2 \sin\varphi \cos\varphi (-\nabla p) r_0 \cos\varphi d\varphi \\
 &= -\frac{4}{3} \pi r_0^3 \nabla p \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中， m 为金属液滴的质量； \mathbf{a} 为金属液滴的加速度，是三维矢量； \mathbf{F} 为金属液滴的受力，也是三维矢量； r_0 为金属液滴的半径； θ 为球坐标系中金属液滴的天顶角； φ 为球坐标系中金属液滴的方位角； ∇p 为沿金属液滴运动方向的压力梯度，同样是三维矢量。电弧压力由中心向外递减，而液滴由电弧内部向外迁移，因此公式中有负号。

若将球坐标系转换为笛卡尔坐标系，则加速度 \mathbf{a} 可分解为 x 、 y 和 z 轴方向的加速度分量 a_x 、 a_y 和 a_z 。同理，压力梯度 ∇p 可分解为 x 、 y 和 z 轴方向的压力梯度分量 ∇p_x 、 ∇p_y 和 ∇p_z 。

因此，进一步整理可得到

$$\begin{cases} \nabla p_x = -\frac{3ma_x}{4\pi r_0^3} = -\rho a_x \\ \nabla p_y = -\frac{3ma_y}{4\pi r_0^3} = -\rho a_y \\ \nabla p_z = -\frac{3ma_z}{4\pi r_0^3} = -\rho a_z \end{cases} \quad (2)$$

式中， ρ 为金属液滴的密度。由式 (2) 可知，当测得某一方向的液滴加速度后，就可以计算该方向中频真空电弧的压力梯度。

3.2 电弧图像平面到三维空间的映射

不同视角下的中频真空电弧立体视角拍摄系统如图 4 所示。双高速摄像机的轴线形成观测角 α ，轴线夹角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时观测效果最佳，本实验中 $\alpha \approx 27^\circ$ 。相机轴线与各自成像平面天然成垂直关系，电弧图像分别成像于左、右成像平面 $x_{left}-y_{left}$ 、 $x_{right}-y_{right}$ 。金属液滴在左、右平面内的加速度是空间加速度 \mathbf{a} 在两个成像平面的投影。

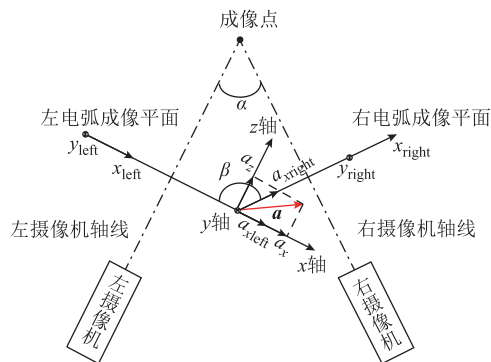


图 4 电弧立体视角拍摄系统
Fig.4 Arc stereo camera system

3.3 金属液滴的视觉追踪方法

根据 3.1 节的分析，利用金属液滴的运动信息可推算电弧压力梯度。尽管电弧图像中的液滴数量多、亮度变化大，人工检测和跟踪的难度高，但真空电弧图像中的金属液滴具有显著的边缘特征和一致的形状特征，通过边缘提取和连通域分析实现高精度目标检测具有可能性。电弧图像的背景对于识别液滴的干扰较大，为此，本文首先根据电弧图像的灰度性质，在 OpenCV 平台中划分图像感兴趣区域 (Region of Interest, ROI)，考虑去除阴阳极触头、开距内的燃弧

区域，选取金属液滴数量较多的区域作为 ROI，缩小有效检测范围；其次，利用 Canny 边缘检测算法捕捉电弧灰度图像中的液滴轮廓；然后，利用连通域分析技术获取液滴信息并根据几何学形态特征进行筛选；最后，使用 IoU 算法逐帧扫描，跟踪电弧图像中的液滴位置。电弧图像中金属液滴的自动检测与追踪算法流程如图 5 所示。

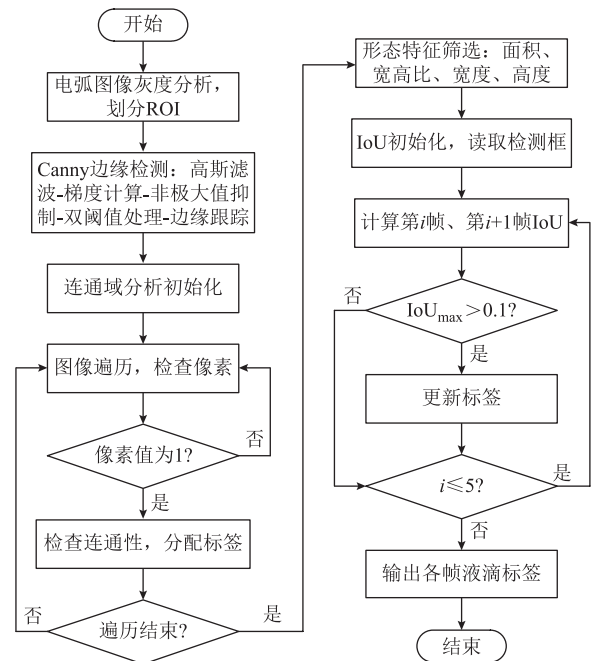


图 5 电弧图像中金属液滴的自动检测与追踪算法流程
Fig.5 Automatic detection and tracking algorithm flow of metal droplets in arc images

将上述几种算法进行综合可以提高对正确标注样本的巡回概率和全部检测样本的正确概率。对于液滴检测效果，本文采用精确率和召回率两个指标进行评价：精确率指正确识别的液滴占检测到的全部液滴的比例，可达到 91.69%；召回率指正确识别的液滴数量占实际液滴数量的比例，可达到 84.28%。精确率表示预测为液滴的样本中正确预测的比例，精确率高说明一旦有液滴被检出，则有极大概率是真正的液滴，误检很难发生，即满足条件的液滴不会产生误判，这是通过调试算法参数得以保证的。召回率表示实际为真正液滴的样本中，被预测正确的液滴占总实际真正液滴的比例，其值相对略低，但仍具有较高的水平，这是因为需要保证算法的严格性，保证液滴而非其他噪声被检出。

对于追踪效果，本文采用多目标跟踪准确率 (Multi-Object Tracking Accuracy, MOTA) 和多目标跟踪精度 (Multi-Object Tracking Precision, MOTP) 两个指标进行评价：MOTA 指在跟踪过程中正确跟

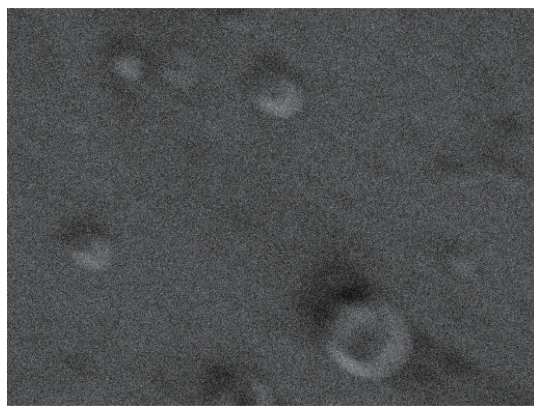
表 3 不同实验条件下液滴运动参数统计结果

Tab.3 The moving parameters of metal droplets in space

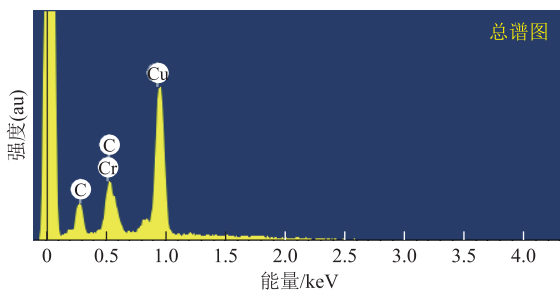
频率/Hz	电流/kA	速度/(m/s)	加速度/(10 ⁵ m/s ²)
360	20	15.7	0.3
360	22	18.3	0.9
500	18	21.2	1.1
500	20	19.3	0.7
650	15	10.9	1.3
650	20	17.6	0.9
800	13	9.8	1.8
800	15	16.6	1.1

说明本文提出的计算方法具有合理性。

本文实验使用的是 CuCr50 触头, 由于 Cu 和 Cr 的熔点差异较大, 喷溅出的金属液滴成分未知。金属液滴最终沉积在灭弧室玻璃罩内壁, 对玻璃取样后进行扫描电镜分析, 其成分如图 8 和表 4 所示。



(a) 扫描电镜图像



(b) 成分分析结果

图 8 金属液滴成分的扫描电镜结果

Fig.8 SEM results of metal droplet composition

根据速度、加速度及液滴密度的分析结果, 可以求得金属液滴从触头边缘喷溅至玻璃壁的时间尺度为 ms 级, 弧后击穿时灭弧室内的压力梯度为

$$|\nabla p| = \sqrt{\nabla p_x^2 + \nabla p_y^2 + \nabla p_z^2} = 1.2 \text{ MPa/mm} \quad (3)$$

实际上, 上述计算是对实际情况的理想假设,

表 4 灭弧室玻璃内壁成分

Tab.4 Composition of inner wall of glass

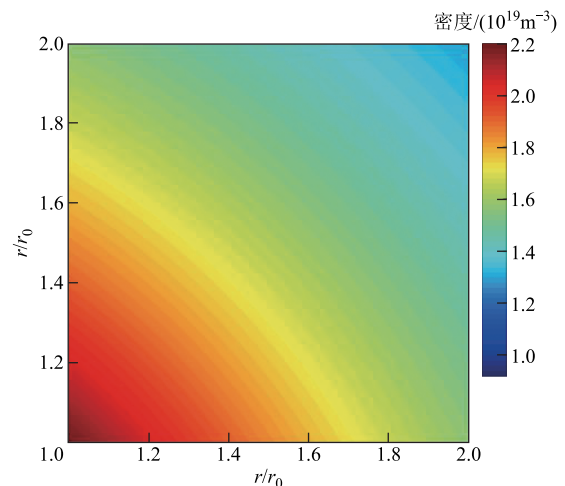
成分	质量百分比(%)	原子百分比(%)
C	7.17	24.56
O	5.48	14.11
Cr	32.89	26.04
Cu	54.46	35.29
总量	100	100

一方面, 忽略了金属液滴的电荷, 电弧压力并非驱动金属液滴运动的唯一动力; 另一方面, 灭弧室内的压力梯度并非均匀。但计算结果仍具有较大的参考意义: 在中频真空电弧发生弧后击穿时, 从燃弧区域内向外部存在较大的压力梯度, 驱动金属液滴向外喷射, 形成三维空间运动, 并且伴随着运动, 液滴持续释放金属蒸气。假设金属液滴为对称的球体, 质量分布均匀, 则根据扩散和对流原理, 液滴外任意半径 r 处的蒸气比流速度 q 与 Cu 蒸气的质量分数 w_{Cu} 间的关系为^[18]

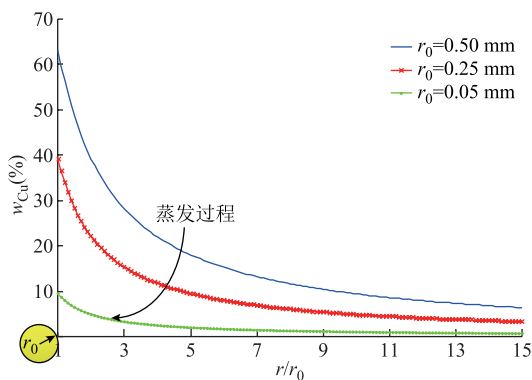
$$\int \frac{4\pi D \rho_{Cu}}{w_{Cu} - 1} dw_{Cu} = \int \frac{q}{r^2} dr \quad (4)$$

式中, D 为扩散系数; ρ_{Cu} 为气态 Cu 密度。根据式 (4), 可计算出金属液滴周围的 Cu 蒸气密度。设金属液滴的半径 $r_0=0.5 \text{ mm}$, 金属液滴周围的 Cu 蒸气密度如图 9a 所示 (由于对称性, 仅画出球体 1/4 平面内的分布), 可见在金属液滴表面 Cu 蒸气的密度最大可达 $2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。

图 9b 所示为蒸发过程金属液滴周围 Cu 蒸气的质量变化。设金属液滴开始蒸发时半径 $r_0=0.5 \text{ mm}$, 对于初始状态, 在液滴表面 (距液滴中心的距离为液滴半径 r_0) Cu 蒸气的质量分数最大, 接近 65%;



(a) 金属液滴周围的 Cu 蒸气密度



(b) 蒸发过程金属液滴周围Cu蒸气的质量变化

图9 金属液滴蒸发释放Cu蒸气的过程

Fig.9 The process by which metal droplets evaporate to release Cu vapor

在距液滴中心的距离为 $5r_0$ 的位置, Cu 蒸气的质量分数下降到 20% 以下。随着蒸发过程的进行, 金属液滴的半径逐渐变小, 液滴表面的 Cu 质量分数也逐渐降低, 当金属液滴半径降为 0.25 mm 时, 液滴表面的 Cu 质量分数下降为 40%; 当半径进一步缩小至 0.05 mm 时, 液滴表面的 Cu 质量分数仅有约 10%。说明在金属液滴 ms 级的喷射时间内, 大量的 Cu 蒸气通过扩散和对流的方式进入灭弧室, 削弱弧后介质恢复强度, 在此期间发生弧后击穿与电压高频振荡。

4 结论

本文对中频真空电弧的弧后击穿过程进行了研究, 得到以下结论:

1) 根据实验结果, 当中频电流过零后发生弧后击穿时, 电弧电压发生高频振荡, 频率约为 50 kHz, 电压恢复至稳态的时间约为 2 ms, 弧后期间在双视角电弧图像中均观察到了大量的金属液滴向外喷溅。

2) 利用视觉追踪算法及空间映射关系, 可三维重构弧后击穿期间金属液滴的立体喷射过程。三个方向的加速度均达到 10^5 m/s^2 数量级, 灭弧室内的压力梯度值可达到 1.2 MPa/mm, 喷溅速度的数量级为 10 m/s, 从触头边缘喷溅至灭弧室玻璃内壁的时间尺度为 ms 级。

3) 金属液滴表面的 Cu 蒸气密度为 $2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 在 ms 级的喷溅过程中, 金属液滴不断蒸发, 液滴表面的 Cu 质量分数从 65% 下降到 10%, 大量 Cu 蒸气以扩散和对流的形式进入灭弧室, 削弱弧后介质恢复强度, 在此期间发生弧后击穿与电压高频振荡。

致谢: 特别感谢利物浦大学 Jiudun Yan 教授对本文理论分析部分的指导。感谢合肥中科君达视界技术股份有限公司协助提供的电弧图像立体视角高速拍摄方案。

参考文献

- [1] 张卓然, 许彦武, 姚一鸣, 等. 多电飞机电力系统及其关键技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 969-984.
Zhang Zhuoran, Xu Yanwu, Yao Yiming, et al. Electric power system and key technologies of more electric aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 969-984.
- [2] Jiang Yuan, Li Qing. Vacuum Circuit Breaker for Aviation Variable Frequency Power System: Theory and Application of Arc in Electrical Appliances[M]. Singapore: Springer, 2021.
- [3] 佟子昂, 武建文, 高辉, 等. 中频下正弦曲面触头真空电弧特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6460-6471.
Tong Ziang, Wu Jianwen, Gao Hui, et al. Study on the characteristics of vacuum arc in sinusoidal curved contacts at intermediate frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6460-6471.
- [4] 蒋原, 武建文, 李擎, 等. 平板触头小开距中频真空电弧特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6517-6525.
Jiang Yuan, Wu Jianwen, Li Qing, et al. Characteristics of intermediate frequency vacuum arc in butt contact with short gap[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6517-6525.
- [5] 张在秦, 刘志远, 王闯, 等. 大电流真空电弧中阳极熔化过程的实验与仿真研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 2143-2152, 2160.
Zhang Zaiqin, Liu Zhiyuan, Wang Chuang, et al. Experimental and numerical study on anode melting in high current vacuum arcs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2143-2152, 2160.
- [6] 董华军, 程靖洲, 赵一鉴, 等. 大电流真空电弧开断过程瞬态特性仿真分析[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 189-196.
Dong Huajun, Cheng Jingzhou, Zhao Yijian, et al. Simulation analysis on transient characteristics of

- high-current vacuum arc in process of interruption[J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(1): 189-196.
- [7] 崔建, 孙帅, 张国钢, 等. 基于双温度磁流体电弧仿真改进 Mayr 电弧模型的特快速暂态过电压仿真方法[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(16): 5149-5161.
Cui Jian, Sun Shuai, Zhang Guogang, et al. The very fast transient overvoltage simulation method based on two-temperature MHD arc simulation to improve Mayr arc model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(16): 5149-5161.
- [8] 王立军, 王渊, 黄小龙, 等. 纵向磁场下真空电弧中阳极烧蚀过程的实验及仿真研究综述[J]. *高压电压技术*, 2019, 45(7): 2343-2352.
Wang Lijun, Wang Yuan, Huang Xiaolong, et al. Experiments and simulation studies on anode erosion process in vacuum arc under axial magnetic field: a review[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(7): 2343-2352.
- [9] 葛国伟, 王文博, 程显, 等. 基于两间隙异步联动的一体化高压真空灭弧室电场设计[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(17): 5555-5564.
Ge Guowei, Wang Wenbo, Cheng Xian, et al. Electric field design of integrated high-voltage vacuum interrupter based on two-gap asynchronous linkage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(17): 5555-5564.
- [10] 郑伟, 孙英, 董华庆, 等. 双断口真空开关分断速度对动态电压分布影响[J]. *高压电器*, 2024, 60(3): 1-7, 16.
Zheng Wei, Sun Ying, Dong Huaqing, et al. Influence of breaking speed of double break vacuum switch on dynamic voltage distribution[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(3): 1-7, 16.
- [11] 王景, 武建文. 中频真空电弧的等离子体特性[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(36): 145-152.
Wang Jing, Wu Jianwen. Plasma characteristics of intermediate-frequency vacuum arc[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(36): 145-152.
- [12] 贾文彬, 司马文霞, 袁涛, 等. 半密闭灭弧腔室内电弧运动特性的三维仿真和实验[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(增刊1): 321-329.
Jia Wenbin, Sima Wenxia, Yuan Tao, et al. 3D simulation and experiment research on arc motion characteristics in the semi-enclosed arc-extinguishing chamber[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(S1): 321-329.
- [13] 蒋原, 马速良, 武建文, 等. 中频真空电弧边缘击穿现象及仿真研究[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(9): 2887-2895.
Jiang Yuan, Ma Suliang, Wu Jianwen, et al. Experiment and simulation for edge breakdown in intermediate frequency vacuum arc[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(9): 2887-2895.
- [14] 钟昱铭, 熊兰, 杨子康, 等. 计及铜蒸气介质的微小电流直流电弧仿真与实验[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(13): 2913-2921.
Zhong Yuming, Xiong Lan, Yang Zikang, et al. Numerical simulation and experiment of small current DC arc considering copper vapor medium[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(13): 2913-2921.
- [15] Jiang Yuan, Wu Jianwen, Ma Suliang, et al. Appearance of vacuum arcs in axial magnetic field and butt contacts at intermediate frequencies[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(2): 1405-1412.
- [16] Miller H C. Anode modes in vacuum arcs: update[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(8): 2366-2374.
- [17] Wang Lijun, Huang Xiaolong, Zhang Xiao, et al. Modeling and simulation of high-current vacuum arc considering the micro process of anode vapor[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(9): 095203.
- [18] Jiang Yuan, Wu Jianwen, Li Qing, et al. Influence of metal vapor on post-arc breakdown for intermediate frequency vacuum arc[J]. *Vacuum*, 2021, 193: 110551.
- [19] 席泽文, 武瑾, 庄劲武, 等. 直流熔断器电弧压力对电弧电导率影响的分析[J]. *海军工程大学学报*, 2023, 35(6): 34-39.
Xi Zewen, Wu Jin, Zhuang Jinwu, et al. Analysis of influence of arc pressure on arc conductivity of direct current fuse[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2023, 35(6): 34-39.
- [20] 吴田, 杨东, 黎鹏, 等. 中压开关柜内部电弧压力升计算: 模型简化方法研究[J]. *高压电器*, 2020,

- 56(3): 39-45, 53.
- Wu Tian, Yang Dong, Li Peng, et al. Study on the model simplification method for the calculation of arc pressure rise in MV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 39-45, 53.
- [21] 张俊鹏, 袁端磊, 李美, 等. 不同绝缘气体对内部故障电弧压力效应的影响[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 100-104.
- Zhang Junpeng, Yuan Duanlei, Li Mei, et al. Influence of insulating gas on pressure rise in switch cabinet due to internal arc fault[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 100-104.
- [22] 蒋原, 李擎, 崔家瑞, 等. 纵向磁场下中频真空电弧的重燃现象分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3860-3868.
- Jiang Yuan, Li Qing, Cui Jiarui, et al. Re-ignition of intermediate frequency vacuum arc at axial magnetic field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(18): 3860-3868.
- [23] 蒋原, 张茜, 李擎, 等. 一种中频真空电弧内部空间压力确定方法及系统: CN116539217A[P]. 2023-08-04.
- [24] 生鑫, 李争博, 付思, 等. 燃弧过程中真空旋转电弧轨迹追踪与特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6553-6563.
- Sheng Xin, Li Zhengbo, Fu Si, et al. Tracking and characterization of vacuum rotating arc trajectories during arc-firing process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(20): 6553-6563.
- [25] 汤泉, 石志新, 毛志伟. 基于多阈值与神经网络的旋转电弧图像飞溅分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(12): 41-46, 115.
- Tang Quan, Shi Zhixin, Mao Zhiwei. Spatter analysis of rotating arc image based on multi threshold and neural network[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(12): 41-46, 115.
- [26] 徐军帅, 李静, 刘树鑫, 等. 触头喷溅对直流开断的影响研究[J]. 电器与能效管理技术, 2023(1): 16-23.
- Xu Junshuai, Li Jing, Liu Shuxin, et al. Study on effect of contact splash on DC breaking[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2023(1): 16-23.
- [27] 孙存金, 苏格毅, 于海涛, 等. 真空弧阴极放电液滴光散射测量[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(15): 1-7.
- Sun Cunjin, Su Geyi, Yu Haitao, et al. On-line measurement of vacuum arc cathode discharge droplet [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(15): 1-7.

作者简介

蒋原 男, 1985年生, 博士, 副教授, 研究方向为多电飞机电器电弧理论及应用、电力设备状态检测与故障诊断等。

E-mail: jiangyuan@ustb.edu.cn

李擎 男, 1971年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能控制理论及其在电力系统保护、交流调速系统中的应用等。

E-mail: liqing@ies.ustb.edu.cn (通信作者)

Post-Arc Characteristics of Intermediate Frequency Vacuum Arc Based on Visual Tracking Technology

Jiang Yuan^{1,2} Ma Suliang³ Wu Yutian¹ He Anjingsheng¹ Li Qing¹ Wu Jianwen⁴ Xia Shangwen⁴

(1. Key Laboratory of Knowledge Automation for Industrial Processes of Ministry of Education
School of Automation and Electrical Engineering University of Science and Technology Beijing
Beijing 100083 China

2. Department of Electrical Engineering and Electronics University of Liverpool
Liverpool L69 3GJ U.K.

3. School of Electrical and Control Engineering North China University of Technology Beijing 100144 China

4. School of Automation Science and Electrical Engineering Beihang University Beijing 100191 China)

Abstract Applying the vacuum switch in the more-electric aircraft intermediate frequency (IF 360~800 Hz) power system is a new application field, which can solve the difficulties caused by the increase of current frequency and the limited breaking ability of electrical appliances. The anode activity of the vacuum arc determines the post-arc state and interruption ability of the vacuum switchgear, especially at high current, and the anode can actively emit metal vapor, plasma and metal droplets. Because of the special environment of the vacuum chamber, it is

difficult to directly measure the physical quantity of the post-arc state, such as arc pressure, by using the sensor, so non-contact measurement means is generally adopted. To gain a more comprehensive understanding of the post-arc characteristics of intermediate frequency vacuum arcs, the visual tracking techniques such as object detection and Intersection over Union Tracker were utilized to analyze arc images in this paper. The splatter trajectories of post-arc metal droplets were reconstructed in three dimensions. Based on the reconstruction, the spatial pressure gradient inside the arc was determined.

Firstly, an intermediate frequency vacuum arc experimental system was established, along with a dual high-speed camera stereoscopic arc imaging system. Secondly, the experimental results of the intermediate frequency vacuum arc were analyzed, revealing post-arc voltage oscillations and metal droplet ejection phenomena during interruption failure. Thirdly, utilizing visual tracking techniques such as Canny edge detection, connected component analysis, and IoU, along with the mapping relationship from arc plane to three-dimensional space, a method for analyzing the pressure gradient of the post-arc vacuum arc was developed. The detection and tracking performance of arc images were evaluated using metrics such as precision, recall, MOTA, and MOTP, achieving values of 91.69%, 84.28%, 87.19%, and 82.63%, respectively, indicating excellent visual tracking results. Finally, using the aforementioned theories and methods, a comprehensive analysis of the post-arc characteristics of the intermediate frequency vacuum arc was conducted.

The following conclusions can be drawn from the analysis: (1) According to experimental results, when post-arc breakdown occurs after the intermediate-frequency current crosses zero, the arc voltage exhibits high-frequency oscillations with a frequency of approximately 50 kHz. The voltage stabilizes within about 2 ms. During the post-arc period, dual-view arc images reveal substantial outward ejection of metal droplets. (2) By employing visual tracking algorithms and spatial mapping relations, the three-dimensional ejection process of metal droplets during the post-arc breakdown can be reconstructed. The acceleration in all three directions reaches the order of 10^5 m/s^2 , with ejection velocities on the order of 10 m/s. The pressure gradient within the arc chamber can reach 1.2 MPa/mm, and the time scale for droplets to travel from the contact edge to the inner wall of the arc chamber is milliseconds. (3) The vapor density of Cu on the surface of the metal droplets is $2.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. Throughout the ejection process of milliseconds scale, the metal droplets continuously evaporate, reducing the Cu mass fraction on the droplet surface from 65% to 10%. A significant amount of Cu vapor enters the arc chamber through diffusion and convection, weakening the dielectric recovery strength post-arc. During this period, post-arc breakdown and high-frequency voltage oscillations occur.

Keywords: Intermediate frequency vacuum arc, post-arc characteristics, metal droplet, multi target tracking, arc pressure

(编辑 李 冰)