

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.003

基于Stark展宽法对真型断路器中电弧电子密度诊断的研究

肖剑桥¹, 孙昊¹, 李刚², 左耘熹¹, 卢阳¹, 刘平², 宇文博²

(1. 西安交通大学电气学院, 西安 710049; 2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

摘要: 高压电器设备中, 内部产生的电弧直接关系着开关电器开断的成功与否, 因此对电弧等离子体的诊断必不可少。发射光谱法通过测量原子特征谱线的发射强度, 可有效诊断等离子体电子密度。该技术具有非入侵测量、瞬态探测、检出限低、选择性好、仪器简单等优点。在研究中, 关注的对象为2 bar下768 A电流峰值时刻的交流空气电弧。弧光信号通过透镜、光栅元件等光学器件进行分光, 并采用ICCD采集电弧的发射光谱。由于仅能获取弧光在观察窗的二维投影, 需借助Abel逆变换重建实际的光谱分布, 获得发射强度沿弧柱的径向分布。研究中合理选取了N II 571.8 nm谱线作为特征谱线, 将实测的Voigt线型去卷积, 应用Stark展宽法, 获得电弧电子密度在 $0.02 \sim 1.724 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 的范围内变化的数据结果。研究首次在含喷嘴和气吹条件下的真型断路器中, 通过Stark展宽法诊断了电弧电子密度。该结果对深入理解电弧内部微观机理和特性具有重要意义, 为高压电器设备的仿真和参数计算工作提供了数据参考。

关键词: 气体电弧; 发射光谱法; Stark展宽; Abel逆变换

Research on Electron Density Diagnosis of Arcs in Full-scale Circuit Breakers Based on the Stark Broadening Method

XIAO Jianqiao¹, SUN Hao¹, LI Gang², ZUO Yunwei¹, LU Yang¹, LIU Ping², YU Wenbo²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In high-voltage electrical equipment, the arc generated internally is directly related to the success or failure of the interruption of switchgear, making the diagnosis of the arc plasma essential. Emission spectroscopy, by measuring the emission intensity of characteristic atomic spectral lines, can effectively diagnose the electron density of plasma. This technique offers such advantages as non-invasive measurement, transient detection, low detection limits, good selectivity, and simple instrumentation. In this study, the subject of investigation is an AC air arc at a peak current of 768 A under a pressure of 2 bar. The arc light signal is spectrally dispersed through optical components such as lenses and gratings, and the emission spectrum of the arc is captured using an ICCD. Since only the two-dimensional projection of the arc light through an observation window can be obtained, it is necessary to employ the Abel inversion to reconstruct the actual spectral distribution, and obtain the radial distribution of emission intensity distribution along the arc column. In the study, the N II 571.8 nm spectral line is reasonably selected as the characteristic line. The measured Voigt profile is deconvoluted, and the Stark broadening method is applied to obtain the data result on the spatial variation of the arc electron density within the range of 0.02 to $1.724 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$. For the first time, this study diagnoses the arc electron density in a full-scale circuit breaker with nozzle and gas-blowing conditions using the Stark broadening method. These results are of great significance for an in-depth understanding of the internal microscopic mechanisms and characteristics of the arc, and provide data references for the simulation and parameter calculation of high-voltage electrical equipment.

Key words: gas arc; emission spectroscopy; Stark broadening; Abel inversion

收稿日期:2026-04-16; 修回日期:2026-07-24

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2400604);国家自然科学基金项目(52077170)。

Project Supported by National Key Research and Development Program(2021YFB2400604), National Natural Science Foundation of China(52077170).

0 引言

气体电弧是高压开关设备开断电流时产生的热等离子体。鉴于断路器仿真工作的需求,需准确获取灭弧室内等离子体状态。然而,构建大电流条件下精准、可靠的电弧等离子模型,需要前期开展大量电弧等离子体微观状态参数测量实验,通过获取电弧等离子体在极端条件下的燃弧机理以及演化模式,进一步调校大电流条件下电弧等离子体半经验模型,最终确保数值模型的准确性及可靠性。

气体电弧的微观参数特性对于断路器仿真设计有重要影响。电子密度这一核心微观参数,同电导率、电离度、电子温度、电子和重粒子的体碰撞频率、碰撞截面等密切相关。M.Baeva等学者^[1]通过流体模型对氩微等离子体进行了研究,通过控制电子密度,可以更有效地控制电弧的形成和维持,从而提高断路器的可靠性和效率。此外,测量电子密度,能够更准确地评估新技术或新材料在实际应用中的性能,从而推动电气绝缘技术进步^[2]。

目前,测量等离子体电子密度的方法主要有光学发射光谱法(optical emission spectroscopy, OES)^[3-4]、吸收光谱法^[5]、激光诱导荧光法^[6]、微波干涉法^[7]、射电法^[8]、汤姆逊散射法^[9]、截止探针法^[10]等等。在测电子密度 n_e 时,应当合理根据等离子体状态、测量目标的 n_e 范围、是否为非入侵测量、近远程等因素选择恰当的测量方法。对于气体电弧,发射光谱法是一种无源被动且合适的测量方法。

发射光谱法用于研究物质在激发状态下发出的光的特性,是一种光谱分析技术。由于等离子体是高度电离的物质,由离子、原子、带电离子组成,处于激发态的原子和离子会自动从激发态回到基态,当电子从高能级轨道进入低能级轨道时会辐射出光谱。发射光谱法具有非侵入性,不会干扰等离子体的自然状态^[11-12]。OES能够提供高灵敏度和高分辨率的测量,Shin J等人^[13]使用光学发射光谱法分析了激光钻孔过程中Inconel 718等离子体的发射光谱,有助于准确地确定电子密度和温度。光谱法允许实时或近实时测量,Kaupe J等学者^[14]使用OES并提出了一种用于估计低压瞬态Ar/N₂等离子体中电子密度和温度的时间演变的方法,对于动态或不稳定的等离子体系统具有实用价值。除电子密度外,OES还可测量其他等离子体参数,如电子温度、气体温度和化学成分^[15]。相对于其他诊断方法,光谱法通常更为经济,设备也相对易获取和维护。

国内外对等离子体的发射光谱进行了大量研究,但主要研究对象是焊接电弧、激光诱导等离子体,虽有开关设备电弧的部分研究,但鲜有气体电弧在有气吹和PTFE喷口的条件下测量电子密度的报道。在高压电器设备中,通过使用PTFE喷口和气吹技术,达到有效地稳定和控制电弧的目的。在喷口内部,加入高速流动的气体可将电弧有效限制在中心位置,从而实现更快速地熄灭电弧同时,增强了电弧形态的稳定性。该试验对样机喷口的侧面进行处理,设计观察窗,采集弧光信息。电弧等离子体发出光信号经观察窗透出,通过准直透镜和聚焦透镜,被光谱检测系统采集并分光,使用ICCD对分光后的光谱进行拍摄,再通过Abel逆变换、Stark展宽的方法对实验数据进行处理,最后得到了电弧的电子密度分布情况。该真型断路器首次实现了,对含喷口和有气吹环境下,气体电弧中的电子密度这一微观参数的诊断测量。

1 光学诊断电弧实验平台

发射光谱法的实验器材主要包括空气电弧发生设备、光学收集系统、分光装置和检测装置。发射光谱实验系统示意图见图1。

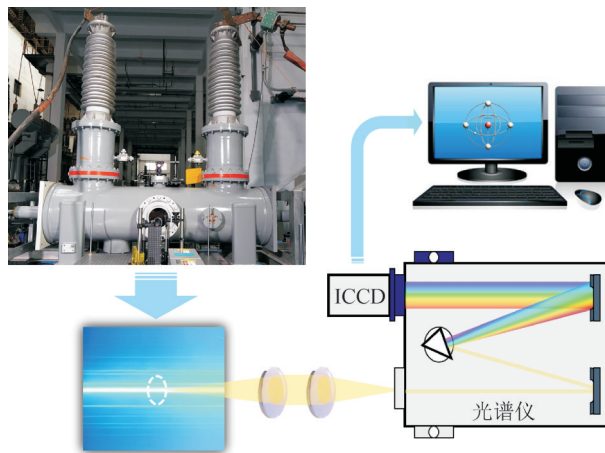


图1 发射光谱诊断空气电弧系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of emission spectrum diagnostic air arc system

空气电弧由50/60 Hz 252 kV/50 kA等级可模拟多种开断工况的真型断路器提供试验等离子体。电流回路采用振荡回路,其拓扑结构主要是采用LC振荡放电获得短路电流和所需的试验频率。试验样机内气压为2 bar, K₁-K₆ 6个隔离开关用于控制电流频率,切换50 Hz和60 Hz两个频率的电流波形。试验时 K₁-K₆处于打开状态,并联支路的电感值较大,产生50 Hz的交流电。操作 S₁-S₆隔离开关可提供不同的短路电流,该试验回路可最多6路并联,实

现电流调节。试验回路拓扑见图2, SP为试验样机。

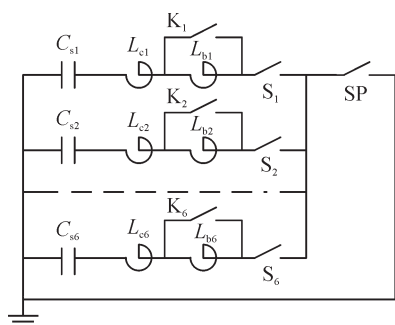


图2 多路电容器与电感并联的LC振荡回路拓扑结构

Fig. 2 LC oscillation circuit topology with multiple capacitors and inductors connected in parallel

鉴于对设备安全的考虑,为重点验证试验方法的可行性,使用的试验电弧电流波形见图3。对电容器进行充电,正式试验时,真型断路器动作命令控制其在图3坐标系5 ms时触头分离,产生电弧。在负半波768 A的电流峰值处采集光信号。在20 ms处电流过零,电弧熄灭,整体燃弧时长为15 ms。

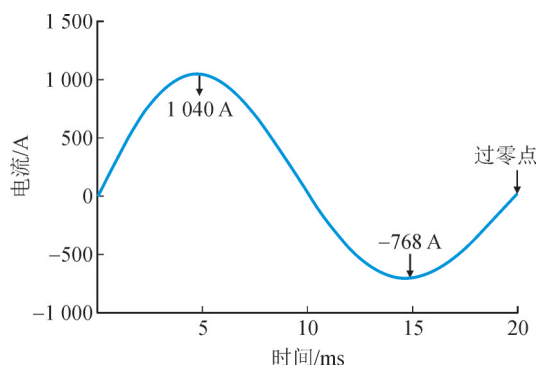


图3 试验电流波形图

Fig. 3 Diagram of the test current waveform

发射光谱信号经过样机的上玻璃观察窗后,使用 $f=400$ mm的消色差双透镜组将光信号收集成像,并进入分光装置光谱仪(princeton instruments spectra Pro HRS-500)的狭缝,设置狭缝宽度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。光栅参数决定了光谱分辨率、带宽和时间分辨率,该试验光谱仪使用 $1\,200\text{ l/mm}$,闪耀波长为 500 nm 的光栅,最高分辨率为 0.05 nm 。光谱信号经过赛纳—特纳(Czerny-Turner)型^[16]分光系统后,将光源发射的光分解为按波长排列的光谱。再使用 $1\,024\times 1\,024$ 点像素阵列的ICCD(teledyne princeton instruments PI-MAX 4 1024i)进行检测拍摄。ICCD内部微通道板处于打开状态的门宽起始时刻,需要通过数字延时器(stanford research system DG535),同空气电弧的电流峰值时刻实现对准,设置曝光时间为 250 ns ,增益器设置为25倍。试验实物布置见图4。

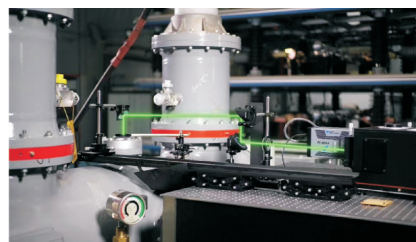


图4 实验样机与收集光路

Fig. 4 Experimental circuit breaker and light collection path

2 实验光谱数据处理方法

当电光源中的各种粒子处于强电场中时,等离子体中的电子和离子,与正在经历光学跃迁的另一个粒子靠近,会导致光谱线展宽以及中心发射波长的偏移,该现象称为 Stark 效应^[3, 17-18]。在实验研究中,由 Stark 效应而产生的谱线展宽,并不严格依赖于电子或离子的速度分布和温度分布。同时, Stark 展宽与等离子体是否处于局部热力学平衡(local thermodynamic equilibrium, LTE)^[19]状态无关。因此,通过分析 Stark 展宽的谱线形状,可以准确地确定等离子体中的电子密度。Yang Lin 等人^[20]使用 Stark 展宽参数来确定脉冲真空电弧射流中的电子密度。Stark 展宽仅是众多展宽机制中的一种,在定量分析时需要对接线线型进行去卷积。

在研究中,关注对象为峰值电流为 768 A 的交流电弧,并对其发射光谱进行了在峰值时刻的拍摄工作。首先,需对拍摄所得的光谱结果进行 Abel 逆变换。通过光谱仪获得的发射光谱,是观察窗所截电弧的光信号,将该段电弧柱视为点光源的合集,在狭缝处收集的弧光是各点光源在此处光强叠加后的结果,是弧柱在狭缝处的投影,即空气电弧沿收集光路方向线积分后测量到的值。需要利用 Abel 逆变换^[21-22],恢复出实际的弧柱的光谱分布,即恢复在收集观察窗内弧柱的各点光源的光信号强度值,以重建发射系数分布。

假设空气电弧是光学薄且轴对称的, $f(r)$ 是发射光信号作为半径 r 的函数,而 $g(R)$ 是该物理量沿直线(从 $-R$ 到 R)的线积分函数。使用如下 Abel 逆变换^[23]可实现从 $g(R)$ 恢复 $f(r)$

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{dg(R)}{dR} \frac{dR}{\sqrt{R^2 - r^2}} \quad (1)$$

式(1)中, $dg(R)/dR$ 为 $g(R)$ 关于 R 的导数。在实际处理中常使用如下的 Gauss 型公式拟合线积分后的数据

$$L(x) = A'[1 + c'(x - x_0)^2] \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

获得待拟合参量 A' , c' , x_0 , σ 。通过 A 、 c 的参数变换, 实现 Abel 逆变换, 重构出式(3), 即沿电弧径向 r 的发射系数分布^[24]。

$$\varepsilon(r) = A[1 + c(r - r_0)^2] \exp\left[-\frac{(r - r_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

$$c = \frac{c'}{1 - c'\sigma^2} \quad (4)$$

$$A = A'[\sqrt{2\pi\sigma^2}(1 + c\sigma^2)] \quad (5)$$

由式(3)-(5)得到沿径向的发射函数后, 由于该谱线展宽包含仪器展宽、Stark 展宽等各类展宽机制, 因此需对重建的发射光谱数据进行去卷积处理。测量所得谱线线型的半高全宽是 Voigt 线型, 该线型由 Gauss 线型和 Lorentz 线型卷积^[25-27]形成。三者的关系表达式为

$$V(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x') \cdot L(x - x') dx' \quad (6)$$

Gauss 线型由仪器展宽和 Doppler 展宽构成。由于发光原子相对于观测仪器而产生的 Doppler 展宽贡献较小^[19, 28], 可以忽略不计, 仅考虑仪器展宽。Gauss 线型的一般数学表达式为

$$G(x) = A \cdot \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

式(7)中: μ 是均值; σ 是标准差。

Lorentz 线型主要考虑固有的自然展宽、Van der Waals 展宽、共振展宽、Stark 展宽^[19, 29]。自然展宽是由于两个能级之间的跃迁存在一定的跃迁几率, 由量子力学的不确定性原理引起的固有谱线展宽, 量级为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ nm, 超出了绝大多数实验室光学器件的分辨极限。非同类中性粒子间相互作用引起的碰撞称为 Van der Waals 展宽, 在高压和低温条件下会有一定的贡献, 但在低压的热等离子体中, 其贡献相对较小。同种中性粒子之间相互作用引起的碰撞称为碰撞展宽, 对于高原子序数密度很重要, N II 作分析谱线时该展宽微不足道。以 Stark 展宽为主。Lorentz 线型的一般表达式为

$$L(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma}{(x - x_0)^2 + \Gamma^2} \quad (8)$$

式(8)中: x_0 为峰值的位置; Γ 为展宽的半宽度。

Lorentz 线型、Gauss 线型、Voigt 线型 3 种线型关系见图 5。图 5 展示了中心为 $x=0$ 时, 3 种线型的关系。可见, Gauss 线型较为瘦高, Lorentz 线型衰减更慢。仪器展宽来自于光谱测量系统的固有分辨率限制, 通过使用卤素标准波长光源(ocean optics, DH-3), 测得本实验系统和设置下为 0.2 nm, 可将 Voigt 线型

去除 Gauss 分量, 得到仅考虑 Stark 展宽的 Lorentz 线型。

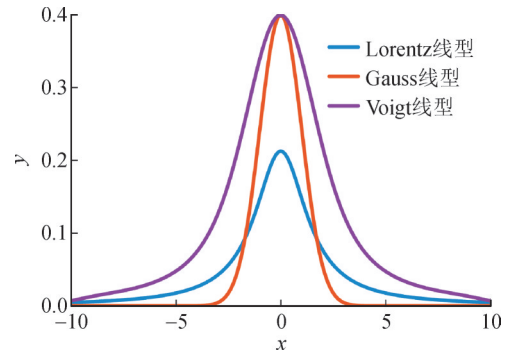


图 5 3 种线型关系图

Fig. 5 Diagrams of three types of linear relationship

由于 Stark 效应主要体现为密度效应, 且对电子温度和电子速度的分布不敏感, 可反映电子密度的分布。Stark 展宽法的诊断下限为 10^{13} cm^{-3} , 当等离子体密度超过 10^{16} cm^{-3} 时, Stark 效应显著^[5]。Stark 展宽同电子密度 n_e 的关系为

$$\Delta\lambda_{1/2} \approx 2W \left(\frac{n_e}{10^{16}} \right) + 3.5A \left(\frac{n_e}{10^{16}} \right)^{1/4} \cdot \left[1 - \frac{3}{4} N_D^{-1/3} \right] W \left(\frac{n_e}{10^{16}} \right) \quad (9)$$

式(9)中: $\lambda_{1/2}$ 为 Stark 半高全宽(FHWM); W 为电子碰撞参数; A 为粒子展宽参数; N_D 为德拜球中的粒子数。式(9)右边第一项为电子贡献项, 第二项为离子贡献项。对于非氢原子, Stark 展宽主要来自于第一项的电子碰撞, 第二项对谱线半高宽的贡献小于 2%, 可忽略离子引起的扰动。结合 Griem^[4]给出的参考数据进行计算, 见式(10), 即电子密度在空气电弧径向上同 Stark 展宽的分布关系有

$$n_e = \left(\frac{\lambda_{1/2}}{2W} \right) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \quad (10)$$

3 实验结果与讨论

断路器 768 A 空气交流电弧电流峰值的发射光谱结果如下。借助原始光强数据, 可将拍摄结果转换为三维曲面图见图 6。

由于电弧电流高, 能量大, 电弧的发射谱线强度大, 且连续谱多。对此, 应选择强度较高且信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)良好, 没有或很少有与其他谱线重叠或接近的谱线, 以减少干扰。且应选择与研究目标, 如元素或分子种类、物理过程等相关的谱线。选择了不受其余谱线干扰的 N II 571.8 nm 发射谱线进行分析见图 7, 以该目标发射谱线为中心波长的 10 nm 范围内的三维曲面图见图 8。

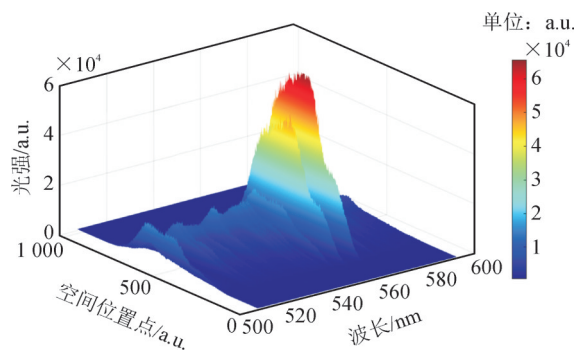


图 6 拍摄数据的三维曲面图

Fig. 6 3D surface plot of captured data

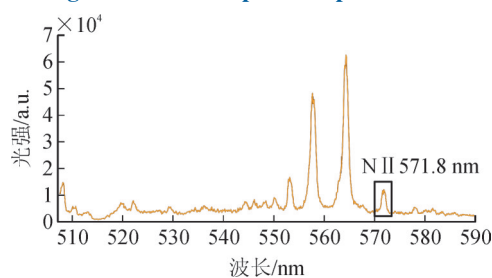


图 7 发射光谱的谱线选取

Fig. 7 Line selection for emission spectra

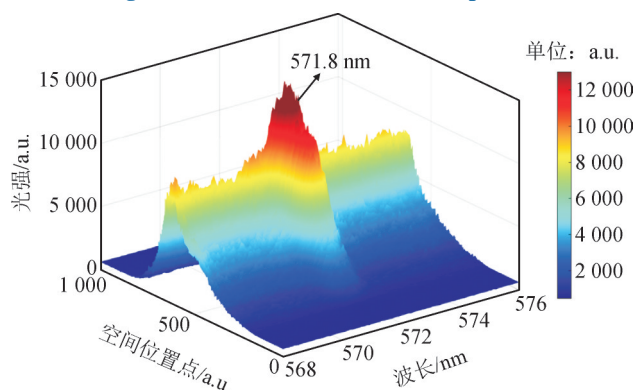


图 8 目标谱线附近光强分布的三维曲面图

Fig. 8 Three-dimensional surface diagram of light intensity distribution near the target spectral line

选择目标谱线后,对目标谱线附近的数据进行截取。为提高信噪比,对原始数据光强进行背景光去除处理。处理前后对比见图9。

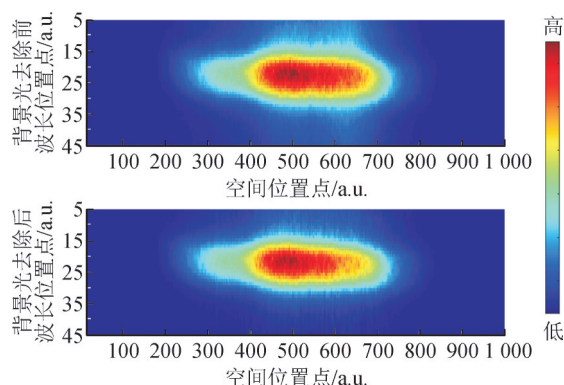


图 9 背景光去除前后对比图

Fig. 9 Comparison pictures before and after background light removal

使用原始数据进行空间位置方向上的拟合。对某一波长值处,在空间位置点上存在 1 024 个光强值的数据散点,对该组散点进行式(3)的最小二乘法的 Gauss 线型拟合。

获得 Gauss 拟合曲线见图 10。对 571.8 nm 波长附近的数据作拟合。假设各波长对应发射系数的径向分布为 Gauss 分布,通过式(3)的参数变换实现 Abel 逆变换,重构出各波长发射系数的径向分布,见图 11。

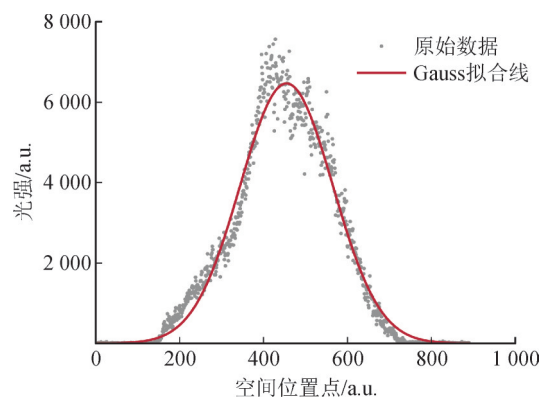


图 10 Gauss 拟合结果

Fig. 10 Gaussian fitting results

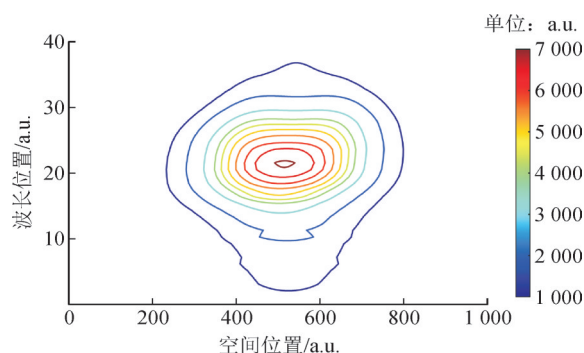


图 11 重构后发射系数的等高线图

Fig. 11 Reconstructed contour plot of emission coefficient

此时的谱线为 Voigt 线型。采用式(11)的 pseudo-Voigt 线型拟合表达式对 Abel 逆变换后,谱线的每一列,即各个空间位置点的 N II 特征谱线进行拟合

$$g_{\text{Voigt}}(\lambda) = A \left\{ \eta \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (\lambda - \lambda_0)^2} + (1 - \eta) \exp \left[- \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

由于 Voigt 线型是 Gauss 型的仪器展宽和 Lorentz 型的 Stark 展宽的卷积结果,需要对其进行去卷积。三者的关系式为

$$\Delta \lambda_{\text{mea}} = \frac{\Delta \lambda_{\text{L}}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda_{\text{L}}}{2} \right)^2 + (\Delta \lambda_{\text{G}})^2} \quad (12)$$

去卷积后得到每个空间位置上的 Stark 展宽,读

出半高全宽的值。代入式(10)构建电子密度分布,由于狭缝长度为1 024个像素点宽,根据狭缝宽度和喷口观察窗的空间分辨率将空间位置点转化为电弧径向空间位置,结果见图12。

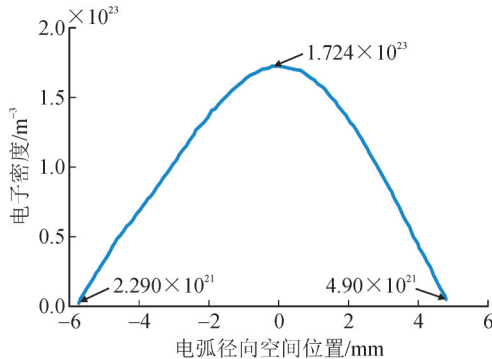


图12 电子密度结果

Fig. 12 Electron number density results

4 结论

在开关设备领域,电弧电子密度是评估和优化每户性能的关键物理量。试验利用发射光谱法对2 bar气压下768 A峰值时刻的交流空气电弧的电子密度进行了诊断测量。由于观测到的强度值是沿观测方向的积分值,采用Abel逆变换还原了弧柱电子密度的空间分布。仪器测得的光谱强度分布是Voigt线型,为了得到Lorentz线型的Stark展宽,需要去卷积。最后根据电子密度对Stark半高全宽的贡献关系,得到弧柱电子密度的径向分布。由结果可知:

1)电子密度在弧柱中心达到最高,在边缘处显著降低,揭示了电弧内部电子密度的非均匀性。电子密度由弧心处的 $1.724 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 降至弧柱半径边缘6 mm处 $2.290 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$,呈现由中心向边缘电子密度减弱的发散趋势。

2)试验所使用的带观察窗的真型断路器,首次实现了在模拟实际灭弧条件下,即包含喷口和气吹环境中,针对气体电弧的电子密度这一微观参数的诊断测量。

3)试验为评估和比较新型绝缘气体的灭弧性能提供了一种实验基础,特别是为探究替代SF₆的环保绝缘气体的研究提供了研究思路,该诊断技术具有一定的应用潜力。

4)借助实验测出的电子密度,有助于预测和控制断路器中的电弧行为,并进一步指导仿真模型的校正和优化,辅助断路器设计和仿真工作,以提高断路器在不同电流电压条件下的开断性能,助力电力系统的高效化和环保化发展。

致谢

特别感谢中国西电集团重大研发项目“气体电弧特性测试的关键技术研究及试验平台建设”对本实验提供的项目资助。

参考文献:

- [1] Baeva M, Loffhagen D, Becker M M, et al. Fluid modelling of DC argon microplasmas: effects of the electron transport description[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2019, 39(4): 949-968.
- [2] Zheng Sheng, Kheirollahi R, Pan Jiuping, et al. DC circuit breakers: a technology development status survey[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3915-3928.
- [3] Griem H R. Spectral line broadening by plasmas[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [4] Griem H R. Plasma spectroscopy[M]. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [5] Harilal S S, Phillips M C, Froula D H, et al. Optical diagnostics of laser-produced plasmas[J]. Reviews of Modern Physics, 2022, 94(3): 035002.
- [6] Breger P, Xiao C, Kunze H J. Electron density measurements combining atomic beam probes and LIF diagnostics of a rapidly-expanding plasma[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1991, 24(12): 2154-2163.
- [7] Mascali D, Naselli E, Torrisi G. Microwave techniques for electron cyclotron resonance plasma diagnostics[J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(3): 033302.
- [8] Chen B, Kooy J E, Wexler D B, et al. Radio studies of the middle corona: current state and new prospects in the next decade[J]. Bulletin of the American Astronomical Society, 2023, 55(3): C059.
- [9] 李刚, 肖剑桥, 阎对丰, 等. 气体电弧在不同气体介质中电子数密度的汤姆逊散射诊断研究[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 163-168.
Li Gang, Xiao Jianqiao, Yan Duifeng, et al. Research on thomson scattering diagnosis of electron number density of gas arc in different gas medium[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 163-168.
- [10] Yeom H J, Kim J H, Choi D H, et al. Flat cutoff probe for real-time electron density measurement in industrial plasma processing[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(3): 035016.
- [11] Akatsuka H. Optical emission spectroscopic(OES) analysis for diagnostics of electron density and temperature in non-equilibrium argon plasma based on collisional-radiative model[J]. Advances in Physics-X, 2019, 4(1): 1592707.
- [12] Akatsuka H. Progresses in experimental study of N₂ plasma diagnostics by optical emission spectroscopy[M/OL]. Patei V. Chemical Kinetics, 2012: 283-308. <https://www.intechopen.com/chapters/29722>.
- [13] Shin J, Mazumder J. Plasma diagnostics using optical emission spectroscopy in laser drilling process[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022008.
- [14] Kaupe J, Riedl P, Coenen D, et al. Temporal evolution of electron density and temperature in low pressure transient Ar/N₂ plasmas estimated by optical emission spectroscopy[J]. Plasma Sources

- Science and Technology, 2019, 28(6): 065012.
- [15] Konjević N, Jovičević S, Ivković M. Optical emission spectroscopy for simultaneous measurement of plasma electron density and temperature in a low - pressure microwave induced plasma[J]. Physics of Plasmas, 2009, 16(10): 103501.
- [16] Reader J. Optimizing czerny - turner spectrographs: a comparison between analytic theory and ray tracing[J]. Journal of the Optical Society of America, 1969, 59(9): 1189.
- [17] Parigger C G. Atomic and molecular emissions in laser - induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica acta. Part B: Atomic Spectroscopy, 2013(79-80): 4-16.
- [18] Milosavljević V, Djenize S. Measured stark widths and shifts of NII, NIII and NIV spectral lines[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1998, 128(1): 197-201.
- [19] Harilal S S, Bindhu C V, Issac R C, et al. Electron density and temperature measurements in a laser produced carbon plasma[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(5): 2140-2146.
- [20] Yang Lin, Tan Xiaohua, Wan Xiang, et al. Stark broadening for diagnostics of the electron density in non - equilibrium plasma utilizing isotope hydrogen alpha lines[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(16): 163106.
- [21] Gröger S, Ramakers M, Hamme M, et al. Characterization of a nitrogen gliding arc plasmatron using optical emission spectroscopy and high-speed camera[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2019, 52(6): 065201.
- [22] Shi Songyue, Finch K, She Yue, et al. Development of abel's inversion method to extract radially resolved optical emission maps from spectral data cubes collected via push-broom hyperspectral imaging with sub-pixel shifting sampling[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2020, 35(1): 117-125.
- [23] Killer C. Abel inversion algorithm[EB/OL]. [2026 - 04 - 16]. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/43639-abel-inversion-algorithm>.
- [24] Kühn-Kauffeldt M. Plasma spectroscopy for stationary and transient welding arcs containing metal-gas mixtures[D]. München: Universität der Bundeswehr, 2016.
- [25] Schreier F. Comments on 'a common misunderstanding about the voigt line profile'[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2009, 66(6): 1860-1864.
- [26] Huang Xianglei, Yung Y L. A common misunderstanding about the voigt line profile[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2004, 61(13): 1630-1632.
- [27] Predoi C A, Bouanich J P, Benner D C, et al. Broadening, shifting, and line asymmetries in the 2←0 band of CO and CO - N₂: experimental results and theoretical calculations[J]. The Journal of Chemical Physics, 2000, 113(1): 58-168.
- [28] Soukhanovskii V A, Johnson D W, Kaita R, et al. Electron density measurements in the national spherical torus experiment detached divertor region using stark broadening of deuterium infrared paschen emission lines[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(10): 10F127.
- [29] 刘广义, 曹 蕤, 卢 阳, 等. 发射光谱法诊断空气电弧的稳态电子密度分布[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 144-150.
- Liu Guangyi, Cao Rui, Lu Yang, et al. Diagnosis of steady state electron density distribution in air arc by emission spectroscopy[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 144-150.
- 肖剑桥(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为开关电弧光学诊断方法。
- 孙 昊(1988—), 男, 教授, 研究方向为电力开关装备开断技术(通信作者)(E-mail: sunhao1031@xjtu.edu.cn)
-
- (上接第 24 页)
- Wang Jing, Zhang Jing. The performance testing and research of varistor electrostatic discharge protective[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(17): 94-97.
- [19] Ejiri H, Kumada A. Transient recovery voltage in direct current circuit breaker with active current injection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 3278-3281.
- [20] 潘 垣, 袁 召, 陈立学, 等. 耦合型机械式高压直流断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7113-7120.
- Pan Yuan, Yuan Zhao, Chen Lixue, et al. Research on the coupling mechanical high voltage DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7113-7120.
- [21] 李越欢, 李 格. 压敏电阻器国内自愿认证标准换版解析[J]. 质量与认证, 2023(1): 58-60.
- Li Yuehuan, Li Ge. Analysis of the replacement of domestic voluntary certification standards for varistors[J]. China Quality Certification, 2023(1): 58-60.
- [22] 翟少磊, 张学志, 段 怡, 等. 基于交直流微电网的智慧能源站拓扑结构研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 28-34.
- Zhai Shaolei, Zhang Xuezhi, Duan Yi, et al. Topology structure of smart energy station based on AC/DC microgrid[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 28-34.
- [23] 王毅钊, 王晓卫, 魏向向, 等. 基于故障电流变化趋势的有源配网高阻故障检测[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(3): 78-84.
- Wang Yizhao, Wang Xiaowei, Wei Xiangxiang, et al. High - impedance fault detection based on arc changing tendency for active distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(3): 78-84.
- [24] 张东进, 何柏娜, 程 婷, 等. 基于振荡回路的光伏直流断路器拓扑结构设计[J]. 供用电, 2024, 41(6): 97-107.
- Zhang Dongjin, He Baina, Cheng Ting, et al. Topology design of photovoltaic DC circuit breaker based on oscillation circuit[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6): 97-107.
- [25] 孔令哲, 何柏娜, 李 辉, 等. 低压直流断路器拓扑参数对燃弧时长影响研究[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 39-46.
- Kong Lingzhe, He Baina, Li Hui, et al. Research on the influence of topology parameters of low - voltage DC circuit breaker on arcing duration[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 39-46.
- [26] 孙曙光, 魏 硕, 王景芹, 等. 基于深度学习的万能式断路器剩余寿命预测优化方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5): 200-207.
- Sun Shuguang, Wei Shuo, Wang Jingqin, et al. Optimization method for remaining life prediction of conventional circuit breaker based on deep learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(5): 200-207.
- 吴铁洲(1966—), 男, 教授, 研究方向为电力系统分析及保护(E-mail: wtz315@163.com)。
- 赵 瑞(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流系统安全预警及保护(通信作者)(E-mail: 863857342@qq.com)。