

中频真空电弧的等离子体特性

王景, 武建文

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京市 海淀区 100191)

Plasma Characteristics of Intermediate-frequency Vacuum Arc

WANG Jing, WU Jianwen

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Haidian District, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The vacuum switch used in intermediate frequency (360~800 Hz) power system of more/all electric aircraft is being developed, and the theoretical understanding of the arcing process at intermediate frequency is increasing. The continuum emission theory of arc plasma was analyzed, electron temperature and electron density of intermediate frequency (400~800 Hz) vacuum arc were obtained by application of a simplified optical-channel model and detection on the intensities of dual-narrowband continuum emission spectra. Then, a plasma-parameter diagnostic system was designed to implement the above measurement. This system consists of a color CCD camera with a dual-narrowband filter and arc-motion picture analysis software, and it can record the arc appearance and the data for measurement simultaneously. After calibrated by using standard source of radiance temperature, the system was applied to observe the arc mode evolution and measure the plasma parameters. The results confirmed the validity of analysis and measurement in this work. At intermediate frequency, the transition arc mode and the diffuse arc mode exist during arc evolution. The transition arc evolves rapidly, and converts into the diffuse arc at the peak current. At the current peak of 8 kA with different frequencies, the electron temperature varies from 0.5~3 eV, and the electron density ranges from 10^{20} ~ 10^{21} m^{-3} , which are in agreement with those achieved by other researchers.

KEY WORDS: continuum emission; electron temperature; electron density; intermediate-frequency vacuum arc

摘要: 目前应用于未来多电和全电飞机(电流频率 360~800 Hz)的中频真空开关正成为研究热点, 中频真空电弧理

论的研究正不断深入。分析了电弧等离子体连续光谱的辐射理论, 在假定中频真空电弧处于部分局部热力学平衡态(partial local thermodynamic equilibrium, PLTE)的基础上, 结合实际光学通路的简化模型, 得到通过双波段窄带连续光谱测量电子温度和电子密度的方法, 然后设计了中频真空电弧的参数测量系统实现上述过程。该系统由添加了双波段窄带滤光片的彩色数字电荷耦合器(charge-coupled device, CCD)摄像机和电弧图像数据分析程序组成, 能够同时拍摄电弧图像并获取所需数据。在对光学通路模型进行标定后, 利用该系统观测了中频(400、650 和 800 Hz)电弧形态的演变, 并测量了真空电弧的电子温度和电子密度, 结果表明理论分析和实验过程有效。中频情况下, 电弧主要呈现过渡态电弧和扩散态电弧 2 种形态。过渡态电弧演变迅速, 并在电流峰值时刻转变为扩散态电弧。有效值约为 8 kA 的中频电流在峰值时刻电子温度处于 0.5~3 eV 之间, 而电子密度量级为 10^{20} ~ 10^{21} m^{-3} , 这些与其他学者得到的电弧等离子体参数相符。

关键词: 连续光谱辐射; 电子温度; 电子密度; 中频真空电弧

0 引言

真空开关广泛应用于工业中等电压领域, 由于它的电流开断容量高、体积小和可靠性高等优点, 具有应用于航空航天领域的优势。目前应用于未来多电和全电飞机(电流频率 360~800 Hz)的真空开关正成为研究热点, 中频真空电弧理论的研究正不断深入^[1-2]。

真空开关电弧作为一种等离子体, 其粒子温度和密度等热力学特征参数的研究历来受到学者们的重视^[3-18]。这些参数能够直接反映等离子体的热力学状态, 对判断电弧等离子体输运特性和演变趋势具有重要意义。电子温度和电子密度是电弧等离子体的 2 个重要热力学参数, 学者们利用多种测量方法

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877002); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200800060004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877002); Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (200800060004).

对其进行了研究。在靠近阴极斑点的区域(≤ 0.1 mm), 电子温度可达 4.6 ± 0.5 eV(Cu 触头)^[3], 附近的电子密度可达到 10^{26} m^{-3} ^[4]。在弧柱等离子体区, 利用探针法和光谱法研究得到的电子温度大多在 2~5 eV 之间^[5-9], 电子密度经多种方法(干涉法^[9-11]、探针法^[8,12]、光谱法^[7,9,13])研究发现量级为 $10^{20} \sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$, 与电流密度成正比^[12-14], 且比靠近阴极斑点的阴极等离子体区电子密度少 4~6 个数量级^[14]。在阳极附近, 探针法测得的电子温度为 6 eV^[15], 比弧柱区稍高, 激光干涉法测得的电子密度约为 10^{20} m^{-3} ^[10]。

电流频率提高至中频后, 电弧形态演变速度明显加快, 对于电弧的等离子体参数诊断提出了更高的要求。常用的接触式测量方法(如探针法等)不仅对电弧等离子体存在一定扰动, 而且会由于电弧的迅速演变及运动而难以处于有效的测量位置。非接触式测量方法如光谱法, 对等离子体无扰动, 既适用于暂态又适用于稳态, 是较为理想的测量方法。光谱法具体可分为^[19-21]: 线光谱绝对强度法和相对强度法、谱线展宽法(塞曼展宽, 斯塔克展宽和多普勒展宽等)、连续光谱绝对强度法和相对强度法等。随着电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)图像传感器非接触式高温测量技术的不断发展, 利用 CCD 摄像机进行温度测量成为检测领域的热点。

武建文分析了工频真空电弧的连续光谱辐射机制, 认为主要为韧致辐射, 而复合辐射较小^[22]。在假定电弧处于局部热力学平衡态的情况下, 推导出了利用连续光谱相对值法进行电子温度测量的方法, 并通过单台黑白 CCD 相机实现了电子温度的测量^[23]。

本文在进一步分析电弧等离子体连续光谱辐射理论和光学系统简化模型的基础上, 结合中频电弧处于部分局部热力学平衡态的假设, 得到了双波段窄带连续光谱测量电子温度和电子密度的方法, 之后设计了基于彩色 CCD 摄像机的中频真空电弧参数测量系统实现上述过程^[24], 使电弧图像和温度测量数据同步获取。在对实验系统进行标定后, 分析了电弧形态的演变过程, 得到了不同频率(400~800 Hz)下真空电弧的电子温度和电子密度。

1 连续光谱法测量等离子体参数

1.1 电弧连续光谱辐射理论

测量工频真空电弧等离子体参数时, 通常假设

电弧处于局部热力学平衡态(local thermodynamic equilibrium, LTE), 此时电弧等离子体为光性薄的, 除普朗克定律以外, 等离子体辐射全部服从完全热力学平衡态时的热力学分布规律。但实际上达到 LTE 的条件是相当苛刻的。董凤宇对工频真空电弧的光谱诊断就发现工频电弧不处于热力学平衡态^[7]。虽然等离子体不满足 LTE, 但其部分高能级之间却可能符合 LTE 状态, 此时等离子体处于部分局部热力学平衡态(partial LTE, PLTE)^[19-21]。这时应用连续光谱法仅需要满足自由电子符合麦克斯韦分布的条件^[25], 而这一条件根据 Spitzer 给出的同类和异类粒子间碰撞平衡时间可知, 是很容易实现的^[26]。因此本文假设中频真空电弧处于 PLTE 状态。

根据以上假设, 可以应用连续光谱法诊断电子温度和电子密度。由于真空电弧连续光谱辐射主要为韧致辐射^[22], 而韧致辐射是带电粒子运动时(自由-自由态)加速或减速过程中产生的电磁波辐射, 考虑电子的加速减速过程, 且假设离子为一次电离, 其韧致辐射表达式^[25,27-30]为

$$\varepsilon_{\lambda} = C_{ei} \frac{n_e^2}{\lambda^2 \sqrt{kT}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT_e}\right) \xi^{ff}(\lambda, T) \quad (1)$$

式中 $C_{ei} = e^6 / 12c^2 \varepsilon_0^3 \sqrt{6\pi^5 m_e^3}$; ε_{λ} 为电子温度为 T_e 的等离子体, 在每单位体积、单位立体角, 在波长为 λ 的单位波长间隔内所发射出的辐射功率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{Sr}^{-1}$; e 、 c 、 ε_0 、 m_e 、 h 和 k 分别为电子电量、光速、介电常数、电子质量、普朗克常数和波尔兹曼常数; n_e 为电子密度; $\xi^{ff}(\lambda, T)$ 为 Biberman 因子, 用于考虑非类氢原子的辐射过程^[25,27,29], 通常情况下, 其近似为 1^[27]。

对于不均匀的、光性薄呈柱状分布的真空电弧等离子体, 辐射功率 ε_{λ} 呈径向分布, 传感器接收到的光谱辐射功率 $I(y)$ 是 $\varepsilon_{\lambda}(r)$ 在某一方向(可设为 X 轴正向)的投影, 其中 r 代表半径。同时, 考虑光学器件和实际 CCD 传感器对可见光的带通效应, CCD 传感器实际接收的辐射功率转换的数字量 $V(y)$ 可表示为

$$\begin{cases} V(y) = K[G \int_{\Omega} \int_S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda) I(y) d\lambda ds d\omega] \\ I(y) = \int_{-x}^x \varepsilon_{\lambda}(r) dx \end{cases} \quad (2)$$

式中: K 为模拟/数字转换系数; G 为代表辐射功率经过光学系统的衰减系数; γ 为 GAMMA 校正系数,

代表实际 CCD 数字摄像系统为了图像显示而对入射光进行的非线性处理； λ_H 和 λ_L 为以 λ 为中心波长的可见光波段截止上下限； S 为被测物在 CCD 传感器上的成像面积； Ω 为被测物辐射所张开的立体角； $Q(\lambda)$ 为光学元件和 CCD 传感器的光谱响应曲线。

因为立体角 $\Delta\Omega$ 、成像面积 ΔS 和波长差 $\Delta\lambda(\lambda_H - \lambda_L)$ 很小，则 $Q(\lambda)$ 可近似为一个常数 Q ，同时考虑 $\varepsilon_\lambda(r)$ 的对称性，式(2)可简化为

$$\begin{cases} V(y) = P[I(y)]^\gamma \\ I(y) = 2\int_0^{\sqrt{R^2-y^2}} \varepsilon_\lambda(r) dx \end{cases} \quad (3)$$

式中 $P = K[G \cdot Q \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta S \cdot \Delta\Omega]^\gamma$ 。

根据 Abel 变换^[21]，可得：

$$\varepsilon_\lambda(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{d\{[V(y)/P]^{1/\gamma}\}}{dy} \frac{dy}{\sqrt{y^2-r^2}} \quad (4)$$

可知，由 $[V(y)/P]^{1/\gamma}$ 的函数表达式，就能得到辐射功率 $\varepsilon_\lambda(r)$ 的径向分布。为求解上式，本文采用 Pearce 线性化^[21]进行处理，将柱状分布的电弧横截面细分为 N 个等宽度的同心圆环，只要圆环间距足够小，则可以认为每一环上的 $\varepsilon_\lambda(r)$ 为恒定值，其原理如图 1 所示。

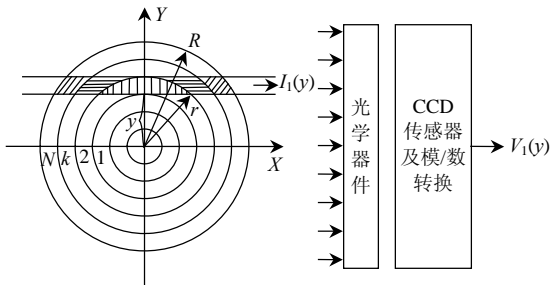


图 1 Abel 变换的 Pearce 线性化处理

Fig. 1 Pearce's matrix method of Abel inversion

此时投影辐射功率 $I(y)$ 为沿 X 轴正向的所有圆环上 $\varepsilon_\lambda(r)$ 的加权和，即

$$I(y_k) = \sum_{i=k}^N s_{ik} \varepsilon_\lambda(r_i) \quad (5)$$

式中：加权值矩阵 S 中的每一个数值 s_{ik} 为第 i 环上的 $\varepsilon_\lambda(r_i)$ 对第 k 个 $I(y_k)$ 的贡献，可通过图 1 中阴影的几何关系求得。对上三角矩阵 S 求逆，得到 T 矩阵，则可得径向分布的 $\varepsilon_\lambda(r_i)$ 为

$$\varepsilon_\lambda(r_i) = \sum_{k=1}^N t_{ki} I(y_k) \quad (6)$$

式中： t_{ki} 为 T 的元素。根据式(6)，同时结合式(3)

中的第 1 个表达式 可得：

$$\varepsilon_\lambda(r_i) = \sum_{k=1}^N t_{ki} [V(y) / P]^{1/\gamma} \quad (7)$$

据此可得，如果常数 P 和 γ 已知，则可根据实际 CCD 摄像系统获取的数字量 $V(y)$ 计算得到径向辐射功率 $\varepsilon_\lambda(r_i)$ 。

1.2 基于彩色 CCD 摄像系统的连续光谱法

利用上节介绍的方法求得的连续光谱径向辐射功率 $\varepsilon_\lambda(r_i)$ 本身是电子温度 T_e 和电子密度 n_e 的函数。为了分别求得这 2 个变量，先采用相对值法消去变量 n_e 求得电子温度 T_e ，再使用绝对值法进而得到电子密度 n_e 。

连续光谱相对值法的基本思想是传感器分别采集以 λ_1 和 λ_2 为中心波长的 2 个波段内的辐射能量，然后相除后消去中间变量，进而求得所需变量。结合此法和第一节理论推导，2 个波段内的径向辐射功率 $\varepsilon_{\lambda_1}(r_i)$ 和 $\varepsilon_{\lambda_2}(r_i)$ 可分别表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_{\lambda_1}(r_i) = \sum_{k=1}^N t_{ki} [V_1(y) / P_1]^{1/\gamma_1} \\ \varepsilon_{\lambda_2}(r_i) = \sum_{k=1}^N t_{ki} [V_2(y) / P_2]^{1/\gamma_2} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)中的两式相除后可求得电子温度 $T_e(r_i)$ 为

$$T_e(r_i) = \frac{hc / k(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln\left(\frac{\sum_{k=1}^N t_{ki} (V_1)^{1/\gamma_1}}{\sum_{k=1}^N t_{ki} (V_2)^{1/\gamma_2}}\right) + \ln\left[\frac{\lambda_1^2 (1/P_1)^{1/\gamma_1}}{\lambda_2^2 (1/P_2)^{1/\gamma_2}}\right]} \quad (9)$$

将 $T_e(r_i)$ 代入式(8)中的任意一式，结合式(1)在已知常数 P 和 γ 的情况下，得到电子密度 $n_e(r_i)$ 为

$$n_e(r_i) = \left\{ \frac{\lambda_1^2 \sqrt{kT_e} \sum_{k=1}^N t_{ki} [V_1(y) / P_1]^{1/\gamma_1}}{C_{ei} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda_1 k T_e}\right) \zeta^{ff}(\lambda_1, T_e)} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

这就是连续光谱绝对值法求电子密度 $n_e(r_i)$ 的步骤。

为了实现连续光谱相对值法和绝对值法测量电子温度和电子密度，本文利用多波段窄带滤光片配合彩色 CCD 数字摄像机进行上述测量^[24]。此方法改进了原有的利用彩色 CCD 摄像机测量黑体温度的方法^[31]，设计了双波段窄带滤光片，提高了温度测量的精度，并实现了电弧图像和测量数据的同步获取。其基本原理如下：电弧发出的电弧光经过

双波段窄带滤光片后被过滤为中心波长分别为 λ_1 和 λ_2 的窄带光并成像于彩色 CCD 感光芯片上,合理设计 λ_1 和 λ_2 使其分别在彩色 CCD 摄像机的感光像元的红色光和蓝色光感应区,而后彩色 CCD 摄像机输出的图像像素中的红蓝两色分量即对应每个波段下的辐射能量,据此根据式(9)和(10)即可求得电子温度和电子密度。

1.3 光学系统的标定

在利用式(9)和(10)进行电子温度和电子密度测量时,每个光学通道的比例系数 P_1 , P_2 以及 GAMMA 系数 γ_1 和 γ_2 是未知的,必须通过设置以及标准温度源进行标定。本文采用钨带灯对光学通道进行标定,此时式(3)中的 $I(y)$ 应替换为钨带灯在某一波长下的单色辐射亮度^[32],其表达式为

$$I(\lambda, T) = \sigma(\lambda, T) \frac{c_1}{\pi} \frac{\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (11)$$

式中 $\sigma(\lambda, T)$ 为钨带灯温度为 T 时,在波长为 λ 下的光谱发射率,其值在0~1之间; c_1 和 c_2 分别为黑体第一辐射常数和黑体第二辐射常数

已知一组 $I(y)$ 和 $V(y)$ 值后,在式(3)中的第一个表达式两边取对数,得到:

$$\ln[V(y)] = \ln P + \gamma \ln[I(y)] \quad (12)$$

通过最小二乘法求出各通道的 P 和 γ ,即得到所需系数。若摄像系统的 γ 设置已知,则可直接进行线性拟合。

2 中频电弧等离子体参数测量系统

2.1 实验系统结构

中频电弧实验系统如图2所示。电容 C_1 、双向晶闸管 VT_1 、电感 L_1 、真空灭弧室 VI 、分流器 R_2 组成振荡电流回路。电解电容 C_2 、电力二极管 VD_1 、限流电阻 R_1 、晶闸管 VT_2 、电感 L_1 、真空灭弧室 VI 和分流器 R_2 组成直流引弧回路^[1]。直流引弧回路用于引出电弧,维持弧隙导通,振荡电流回路在弧隙达到额定4 mm开距时引出中频电流。彩色 CCD 摄像机(Photron FASTCAM-Ultima 1024)用于拍摄电弧图像,在触头达到额定开距后触发,拍摄速度为16 000幅/s,分辨率为256×32,快门为1/64 000s,镜头焦距为50 mm。透镜组包括中性滤光片(透过率10%)和双波段窄带滤光片(中心波长 $\lambda_1=633$ nm, $\lambda_2=441.6$ nm),用于过滤出所需的2个窄带波段可见光。

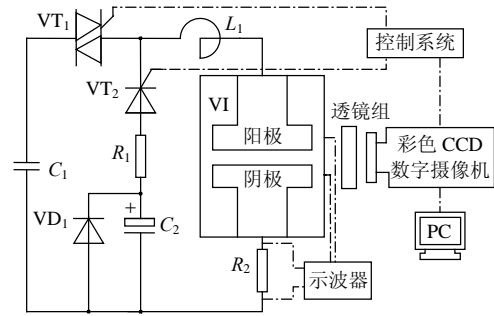


图2 中频电弧实验系统

Fig. 2 Experimental system of intermediate-frequency vacuum arc

2.2 实验流程及数据处理

1) 钨带灯标定系统。

每系列电弧实验开始前,需要利用钨带灯对光学系统(透镜组和彩色 CCD 数字摄像机)进行标定。标定过程中,应避免图像像素出现饱和。之后的电弧实验过程中,不再改变摄像机的拍摄速度、快门、分辨率和焦距等摄像参数,以保证测量精度。彩色摄像机的摄像参数按2.1节所述设置,GAMMA系数通过默认设置为1。以上设置给定后,再通过钨带灯标定,则可得两通道校正系数及GAMMA系数,如表1所示。

表1 光学通道校正系数和GAMMA系数

Tab. 1 Transfer coefficients and GAMMA corrections of two optical channels

中心波长 λ	校正系数 P	GAMMA系数	线性度(R^2)
$\lambda_1=633$ nm	$P_1=1.746 \times 10^{-8}$	1	0.999 2
$\lambda_2=441.6$ nm	$P_2=9.026 \times 10^{-8}$	1	0.998 7

从表1可知,当GAMMA系数设置为1后,利用最小二乘法得到的校正系数的线性度(R^2)很接近1,说明2个通道的输入辐射功率和输出的数字量之间很接近线性关系,这也说明为得到式(3)的积分简化过程是基本成立的。

2) 电弧数据的获取及处理。

当标定后的光学系统进行如2.1节所述的试验后,彩色数字摄像机将测温数据转换为无损无压缩的彩色BMP文件格式,并存储于上位机中。文件中每个像素的红蓝数字分量即代表2个波段的辐射能量。自行设计的电弧等离子体参数分析软件可以将BMP文件格式的电弧图像横截面数据读出,并分离出红蓝数字分量,而后计算得到电弧等离子体参数。该软件在Visual Studio 6.0编程环境下用VC++编写而成。软件流程图如图3所示。

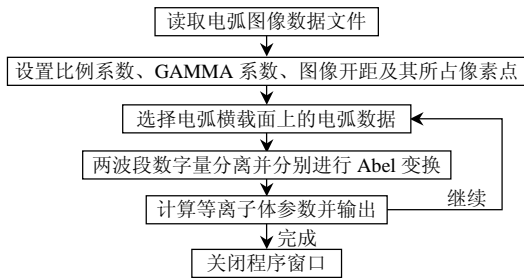


图 3 电弧等离子体参数分析流程图

Fig. 3 Data analysis chart for arc plasma

2.3 测量误差分析

根据第一部分可知，利用连续光谱法诊断等离子体参数的误差产生于公式的简化和推导过程中。立体角 $\Delta\Omega$ ，成像面积 ΔS 和波长差 $\Delta\lambda$ ，以及光学传感器光电感应的误差等，使得光学通道比例系数 P 存在非线性。通过比较给定辐射源时测温系统的实测值和标准值可以估计这一误差。另外，由于钨带灯测温波段光谱中蓝光辐射量较红光辐射量少，测试时应降低钨带灯温度，使蓝光响应(λ_2 波长)降至极低值，这样利用比较法测温时的系统误差最大。由此得到的最大相对误差在 11%左右，如表 2 所示(光学通道校正系数 P_1 和 P_2 见表 1)。而当钨带灯温度提高时，蓝光分量将增加，特别是测量高温的中频真空电弧时，蓝光辐射量将更多，误差将减小。

表 2 测温系统的相对误差

Tab. 2 Relative error of the temperature measurement system

温度 标准值/K	响应值/V		温度 测量值/K	相对 误差/%
	$V_1(\lambda_1)$	$V_2(\lambda_2)$		
1 873.15	68	7.4	1 673.82	10.6

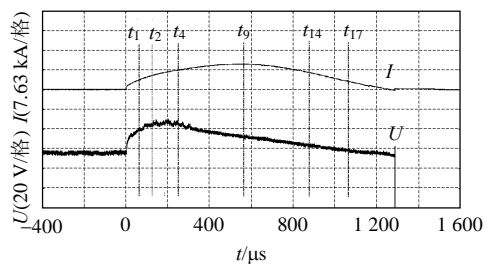
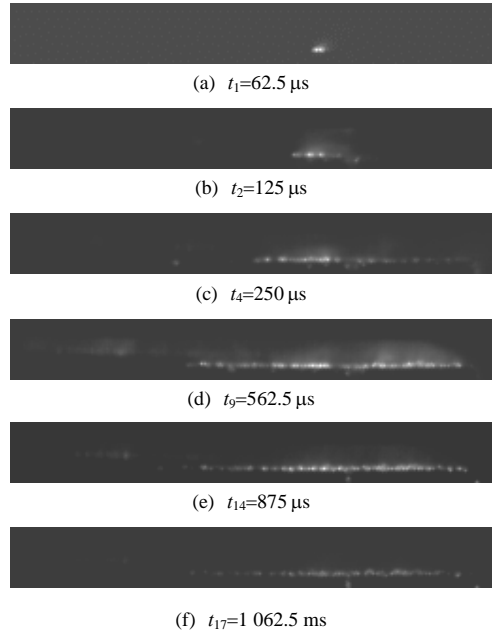
3 实验结果及分析

3.1 中频电弧的典型形态

利用上文中介绍的中频真空电弧参数测量系统，彩色 CCD 摄像机分别记录了电流在 400、650 和 800Hz 频率下的电弧形态。虽然电弧图像数据仅存在 2 个波段的数字量而使得电弧颜色偏紫色，但这并不影响图像形态的判断。中频电弧实验发现电弧主要呈现过渡态电弧和扩散态电弧两种形态，两种形态以电流峰值为界。图 4 所示是典型的电弧图像和电弧电压电流，此时电流为 400Hz，有效值为 8.2kA。

中频电弧在 $t_0=0\mu s$ 时刻引入弧隙，随着电流的增加，电弧弧柱开始膨胀。在 t_1 时刻，阴极上呈现

集中的小阴极斑点团，同时弧柱略微侵斜，电弧具有快速运动的趋势。之后随着电流的增加，弧柱外侧不断出现阴极斑点，电弧直径显著增加。在 t_2 时刻，电弧电压达 42.7V，阴极上呈现多个集中的阴极斑点团。至 t_4 时刻时，电弧已经占据了阴极左侧的部分区域，并有部分弧柱向外侧触头外扩展。同时主弧柱周围的多阴极斑点团持续在阴极表面扩展，其亮度虽然不高，但面积持续增加，同时主弧柱出现向扩散态转化的趋势。以上过程均为过渡态



(g) 电流频率为 400Hz，有效值为 8.2kA 时的电弧电压

图 4 400 Hz 电流在有效值为 8.2kA 时的电弧图像及电压电流波形

Fig. 4 Arc-motion pictures, arc current and arc voltage at 400 Hz, 8.2kA(rms)

电弧的主要特征。当电流达到峰值时(t_0 时刻)，电弧阴极斑点分布面积最大，但仍没有占据整个触头表面，电弧演变为扩散态，电弧电压为 33.7V。之后随着电流值的降低，阴极斑点不再扩张，阴极斑点分布形式和电流峰值时类似，电弧弧柱亮度逐渐降低，阴极斑点数目逐渐减少，如 t_{14} 和 t_{17} 时刻图像所示。

3.2 电流峰值时刻不同频率下的电弧等离子体参数

中频电弧在电流峰值时刻转变为扩散态电弧,对比不同频率下峰值电流电弧图像,见图5,可以发现,频率增加后,电弧分布并没有明显的规律,阴极斑点都没有占据全部触头表面,同时电弧分布的也不均匀,但是电弧弧柱中心的亮度以及阴极斑点集中区域的面积随着频率的增加略有提高。

根据上文介绍的等离子体参数测量方法,选取图5中电弧弧柱中心平面作为求解平面,计算得到等离子体参数的分布。如图6所示,其中电子温度以电子伏特为单位(eV)。可以发现,电子温度在径向上的差别很大,而且不同频率下电子温度的分布也不规律,这反映了电弧内部辐射功率的差异和不均匀性。但同时可以发现,电弧电子温度基本上都分布在0.5~3eV之间,这与其他学者得到的2~5eV的电子温度范围基本吻合^[5-9]。

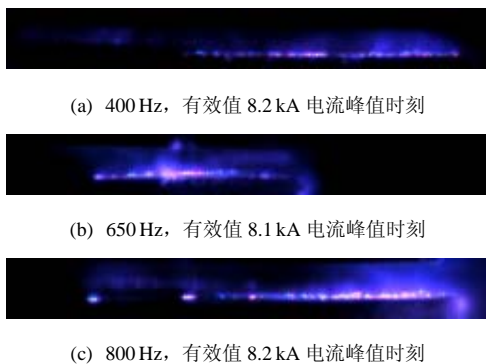


图5 不同频率下有效值为8.2kA电流在峰值时刻的图像

Fig. 5 Arc appearance at current peak of 8.2kA(rms) with different frequencies

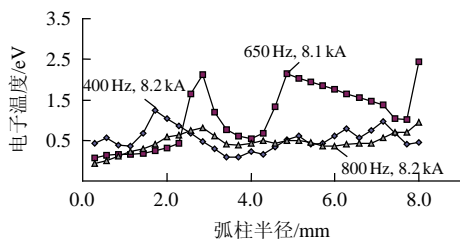


图6 不同频率下有效值为8.2kA(rms)电流峰值时刻触头中心平面电弧电子温度分布

Fig. 6 Distributions of Electron temperature on the mid-gap plane at current peak of 8.2kA(rms) with different frequencies

得到电子温度的分布后,连同通道系数和GAMMA系数代入式(10)求得电子密度分布,如图7所示。不同频率下电弧电子密度在 $10^{20} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 量级内变化,这与学者们通过不同方法得到的

$10^{20} \sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 量级吻合^[7-13]。同时,电子密度的最大值为 $1.9 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$,出现在频率为800 Hz时的弧柱中心;最小值为 $1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$,出现在电流频率为650 Hz时的弧柱边缘。而且不同频率电弧的电子密度都在弧柱中心到达峰值,并随着弧柱半径的增加而减少。当电弧弧柱半径大于2 mm后,电子密度的变化不大。同时由于电子密度和电流密度成正比^[10-12],中频电流峰值时刻电流密度分布的极不均匀,如图5所示,这就造成了中频电流峰值时刻电子密度随频率增加无明显变化。

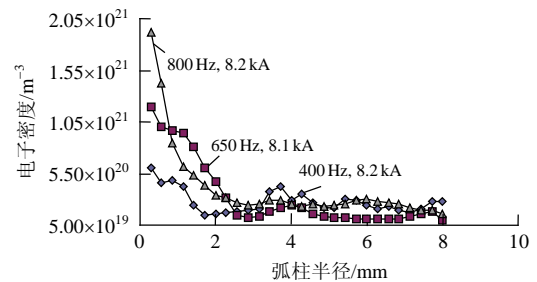


图7 不同频率下有效值为8.2kA电流峰值时刻触头中心平面电弧电子密度分布

Fig. 7 Distributions of Electron density on the mid-gap plane at current peak of 8.2kA(rms) with different frequencies

4 结论

本文在分析改进电弧等离子体连续光谱法测量电子温度的基础上,利用精确标定的双波段窄带滤光片配合彩色CCD数字摄像机,测得了中频真空电弧的电子温度和电子密度,并实现了电弧形态和温度测量数据的同步获取。得到以下结论:

1) 通过电弧等离子体PLTE状态的假设,结合光学系统的简化模型,提出了改进后的连续光谱法,用于测量电子温度和电子密度。

2) 结合连续辐射光谱相对值法和彩色CCD传感器的特点,提出了利用彩色CCD数字摄像机配合双波段窄带滤光片测量电子温度和电子密度的方法,使电弧图像和温度测量数据同步获取。并通过对系统的精确标定,保证了运用连续光谱法测量等离子体参数的精度。结果表明通过以上过程可有效测量电子温度和电子密度。

3) 设计了中频真空电弧等离子体参数测量系统,实现了等离子体参数和电弧图像的同步分析。

4) 电流有效值为8kA时,不同频率下电流峰值时刻的电子温度在0.5~3eV范围内变化,而电子

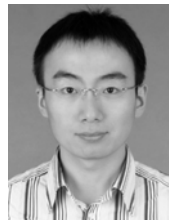
密度在 $10^{20} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 范围内, 这些都与学者们得到的结果吻合, 同时也验证了本文理论推导和实验过程的正确性。

5) 中频电弧的电子温度分布很不规律, 而电子密度在弧柱中心最大, 随着弧柱半径的增大, 电子密度迅速减小。当电流有效值为 8kA 时, 在弧柱半径大于 2mm 而小于弧柱边缘的区域内, 电子密度变化不大。电流峰值时刻电子密度随频率增加变化不大。

参考文献

- [1] 王景, 武建文. 纵向磁场下中频真空电弧的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 126-132.
Wang Jing, Wu Jianwen. Experimental study of intermediate frequency vacuum arc under axial magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 126-132(in Chinese).
- [2] 朱立颖, 武建文. 横向磁场下中频真空电弧形态及电弧电压特性[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 131-137.
Zhu Liying, Wu Jianwen. Modes of intermediate-frequency vacuum arc and characteristics of arc voltage under transverse magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 131-137 (in Chinese).
- [3] Puchkarev V F. Estimating the electron temperature from fluctuations in a vacuum arc plasma: cathode spot operation on a contaminated surface[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1991, 24(5): 685-692.
- [4] Anders A, Anders S, Juttner B, et al. Pulsed dye laser diagnostics of vacuum arc cathode spots[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1992, 20(4): 466-472.
- [5] Kutzner J, Glinkowski M. Electron temperature and probe floating potentials in a plasma of the low-current vacuum arc[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1983, 11(3): 233-238.
- [6] Wang Jianhua, Wang Jimei. Review of theoretical research in vacuum arcs and their applications in China[C]// Proceedings of 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Xian, China: Xi'an Jiaotong University, 2000: 139-149.
- [7] 董凤宇, 王季梅. 真空电弧的光谱诊断[J]. 力学学报, 1990, 22(3): 311-317.
Dong Fengyu, Wang Jimei. The spectroscopic diagnosis on vacuum arc[J]. Acta Mechanica Sinica, 1990, 22(3): 311-317(in Chinese).
- [8] 武建文, 苑舜, 王季梅, 等. 利用双探针阵列对真空电弧电子扩散过程的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(2): 73-79.
Wu Jianwen, Yuan Shun, Wang Jimei, et al. The experimental investigation on the electron diffusing procedure for vacuum arc by double array probes [J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(2): 73-79(in Chinese).
- [9] Schellekens H. The high-current vacuum arc in an axial magnetic field: an experimental investigation[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(1): 144-149.
- [10] Harris J H. Electron density measurements in vacuum arcs at anode spot formation threshold[J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(2): 753-757.
- [11] Boxman R L. Interferometric measurement of electron and vapor densities in a high-current vacuum arc[J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(11): 4835-4846.
- [12] 王建华. 真空电弧阳极斑点的形成过程及纵向磁场的影响[D]. 西安: 西安交通大学, 1985.
Wang Jianhua. Study on the mechanism of vacuum arc anode spot formation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1985(in Chinese).
- [13] Kaneda T, Kaneko E, Yanabu S, et al. The characteristics of vacuum arcs with magnetic fields parallel to its columns[J]. Physica B: Physics of Condensed Matter & C: Atomic, Molecular and Plasma Physics, Optics, 1981, 104(1-2): 124-129.
- [14] Boxman R L, Goldsmith S, Greenwood A. Twenty-five years of progress in vacuum arc research and utilization [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(6): 1174-1185.
- [15] Webster R, Sherman J C, Jenkins J E, et al. Report ULAP-T10[R]. Liverpool: University of Liverpool, 1972.
- [16] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 真空电弧磁流体动力学模型与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 113-118.
Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, et al. MHD model and simulation research of vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 113-118(in Chinese).
- [17] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 大电流真空电弧磁流体动力学模型与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 174-180.
Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, et al. Magnet hydro dynamic model and simulation of high-current vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 174-180(in Chinese).
- [18] 王立军, 贾申利, 史宗谦, 等. 开距对不同状态下真空电弧特性影响的仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 154-160.

- Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, et al. Simulation analysis of influence of electrode separations on vacuum arcs characteristics under different states[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 154-160(in Chinese).
- [19] Huddleston R H. Plasma diagnostic techniques[M]. New York: New York Academic Press, 1965: 201-315.
- [20] Lochte-holtgreven W. Plasma diagnostics [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1968: 135-248.
- [21] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 281-319.
- Guo Zengyuan, Zhao Wenhua. Electric arc and thermal plasma[M]. Beijing: Science Press, 1986: 281-319 (in Chinese).
- [22] 武建文, 王毅, 王季梅. 利用动态图象高速微机采集系统对真空电弧电子密度分布的测试[J]. 电工技术学报, 1997, 12(3): 37-41.
- Wu Jianwen, Wang Yi, Wang Jimei. The measurement on distribution of electron density for vacuum arc by dynamic image high-speed sampling computer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997, 12(3): 37-41(in Chinese).
- [23] 武建文. 真空开关的智能控制及其电弧图像观测[R]. 武汉: 华中科技大学, 1997.
- Wu Jianwen. Intelligent control of the vacuum arc switches and the observation of vacuum arc[R]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1997 (in Chinese).
- [24] 武建文, 王景. 基于单台彩色 CCD 摄像机的双波段比色测温方法[P]. 中国: 200810115098. X, 2008.
- Wu Jianwen, Wang Jing. The relative intensity of continuum emission theory based on a color CCD camera [P]. China: 200810115098. X, 2008 (in Chinese).
- [25] Kunn G, Kock M. Nonequilibrium phenomena and determination of plasma parameters in the hot core of the cathode region in free-burning arc discharges[J]. Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2007, 75(1): 016406.
- [26] 项志遴, 俞昌旋. 高温等离子体诊断技术(上册)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 57-58.
- Xiang Zhilin, Yu Changxuan. High temperature plasma diagnostics(volume 1)[M]. Shanghai: Shanghai scientific & Technical Publishers, 1982: 57-58.
- [27] Burm K T A L. Continuum radiation in a high pressure argon-mercury lamp[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2004, 13(3): 387-394.
- [28] Schnehage S E, Kock M, Schulz-Gulde E. The continuous emission of an argon arc[J]. Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics, 1982, 15(7): 1131-1135.
- [29] Vacquie S, Gleizes A, Kafrouni H. Measurements of electron density in a SF₆ arc plasma[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1985, 18(11): 2193-2205.
- [30] Slade P G, Schulz-Gulde E. Spectroscopic analysis of high-current free-burning ac arcs between copper contacts in argon and air[J]. Journal of Applied Physics, 1973, 44(1): 157-162.
- [31] 王飞, 薛飞, 马增益, 等. 运用彩色 CCD 测量火焰温度场的试验研究及误差分析[J]. 热能动力工程, 1998, 13(74): 81-84.
- Wang Fei, Xue Fei, Ma Zengyi, et al. An experimental study of flame temperature field measurement by the use of a colored CCD camera and its error analysis[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1998, 13(74): 81-84(in Chinese).
- [32] 高庆中. 温度计量[M]. 北京: 中国计量出版社, 2004: 203-322.
- Gao Qingzhong. Temperature measurement[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2004: 203-322(in Chinese).



王景

收稿日期: 2011-05-12。

作者简介:

王景(1983), 男, 博士研究生, 研究方向为真空开关电弧理论、应用及电器控制, wangjing8318@asee.buaa.edu.cn;

武建文(1963), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为真空电弧理论、电器智能化及电力系统配电自动化, wujianwen@vip.sina.com。

(编辑 胡琳琳)