

采用光谱诊断法测量长间隙空气电弧温度

颜湘莲¹, 陈维江², 贺子鸣¹, 王承玉¹, 武建文³, 王景³

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031;
3. 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 100083)

Temperature Measurement of Air Arc in Long Gap by Spectrum Diagnosis

YAN Xianglian¹, CHEN Weijiang², HE Ziming¹, WANG Chengyu¹, WU Jianwen³, WANG Jing³

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;

3. Department of Automatic Science and Electric Engineering, Beihang University, Haidian District, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Arc temperature is an important physical parameter to present air arc characteristics in long gap. It was measured by spectrum diagnosis, which offers foundation for secondary arc self-extinction. Based on the spectrum principle for plasma radiation of air arc, arc films in long gap were taken by the corrected high-speed image sampling system with optical pretreatment instrument. With application of the numerical image process technology and Abel transform, the plasma temperatures were gotten by means of two-color thermometry with relative radiation strength. The temperature measurement system was developed for long air arc, and the temperature distributions of arc at low current were measured. All results show that the temperature measurement method for arc plasma is valid and reliable, which provides the tool to further analyze the plasma mechanism of secondary arc self-extinction.

KEY WORDS: air arc in long gap; arc temperature; plasma radiation; spectrum diagnosis; Abel transform; two-color thermometry

摘要: 电弧温度是表征长间隙空气电弧物理特性的重要参量。采用光谱诊断法测量长间隙空气电弧温度, 为分析输电线路潜供电弧的自熄特性提供了依据。基于空气电弧等离子体辐射的光谱诊断原理, 由附加光学预处理装置的高速图像采集系统来拍摄电弧图像, 结合数字图像处理技术、阿贝尔(Abel)变换和光谱相对强度比色法, 计算得到电弧等离子体的温度分布。研制了长间隙空气电弧温度的测量系统, 对小电流电弧温度特性进行测试分析。结果表明, 所提出的光谱诊断测温法能有效测量长间隙空气电弧等离子体的温度分布, 为研究潜供电弧的自熄机制提供了重要手段。

关键词: 长间隙空气电弧; 电弧温度; 等离子体辐射; 光谱诊断; 阿贝尔变换; 比色测温法

0 引言

输电线路发生单相接地故障引起的潜供电弧, 包含了电、热、光等多种物理过程, 其温度变化会较大程度地影响电弧的自熄特性。已有文献资料刊载了测量开关电弧温度的方法^[1-2], 但因潜供电弧处于开放大气中, 形状复杂, 持续时间长, 目前缺乏潜供电弧温度特性的相关研究。因此, 有必要对长间隙空气电弧的温度测量开展研究, 为分析潜供电弧的自熄特性提供依据和参考。

空气电弧为热等离子体, 温度较高, 探针或热耦的热容量极限难以满足要求, 且接触式探头会干扰被测量电弧的温度场, 所以通常采用红外测温等非接触式方法测量等离子体温度。但红外热像仪通过采集红外图像测温的特点不符合电弧辐射可见光的需求, 存在动态性较差等不足^[3-6]。利用线光谱强度或宽度测温的光谱仪, 较适合分析短间隙电弧温度^[7-8]。随着光电、计算机和数字图像处理技术的发展, 基于彩色电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)图像传感器的非接触式测温技术, 逐渐成为高温检测领域的热点, 光谱诊断测温原理和彩色 CCD 图像所包含的色度信息正是这种测温技术的重要基础^[9-15]。

本文基于空气电弧辐射的光谱诊断原理, 分析等离子体辐射的连续谱强度, 计算电弧辐射的径向光强分布, 获得了校正的比色测温方法。研制出长间隙空气电弧温度测量系统, 标定了测温系统的通道参数, 给出电弧图像的数据处理流程, 进而分析

长间隙空气电弧温度特性，确定了电弧温度的影响因素及电弧自熄的温度特性等。

1 光谱诊断测温法

1.1 电弧辐射光谱强度

空气电弧处于局部热力学平衡 (local thermodynamic equilibrium, LTE), 可采用统一的热力学温度来描述热等离子体状态。空气电弧辐射连续光谱的波长范围为 0.17~5 μm, 覆盖了可见光、紫外线和红外线, 所以测量电弧辐射的光谱强度成为获得电弧等离子体温度的有效手段^[16-17]。

电弧等离子体辐射形成连续谱的主要机制为韧致辐射和复合辐射。韧致辐射是指电子在离子形成的电场中, 从某一自由态跃变为另一能量较低自由态的光子发射^[17]。经量子力学推导, 电子温度为 T_e 、波长为 λ 的等离子体在单位体积、单位波长间隔内辐射的光谱强度 $I(\lambda, T_e)$ 为

$$I(\lambda, T_e) = 4.56 \times 10^{-37} \frac{N^2 Z^2}{\lambda^2 \sqrt{kT_e}} \bar{g} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT_e}\right) \quad (1)$$

式中: N 为粒子密度; Z 为有效电荷数; \bar{g} 为量子力学效应引起的修正因子; k 为玻尔兹曼常数; h 为普朗克常数; c 为光速; kT_e 单位为 eV。

当电子与离子碰撞时, 电子被离子俘获形成一个束缚态引起的光子辐射, 称为复合辐射^[17], 此过程满足的能量守恒方程为

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 + |E_n| = h \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

式中: m_e 为电子质量; v_e 为电子运动速度; E_n 为基态电离能 ($n=1$) 或激发态电离能 ($n>1$); n 为能级主量子数。

对于类氢原子, 有:

$$E_n = -Z^2 \frac{E_1}{n^2} \quad (3)$$

利用彩色 CCD 传感器采集空气电弧图像时, 彩色 CCD 光谱响应的波长范围为 0.2~1 μm, 接收到的光子能量为 $0.2 \times 10^{-18} \sim 1 \times 10^{-18}$ J, 即 1.24~6.21 eV。由式(2)可知, 发生复合辐射须满足 $hc/\lambda > |E_n|$ 。

对于空气电弧等离子体, $E_1 = 14.32$ eV, $Z = 1.85$, 联立式(2)、(3), 得出当 $n > 3$ 时, 彩色 CCD 接收到的光谱强度含有复合辐射连续谱。根据等离

子体复合辐射频谱图^[17], 可知 $n > 3$ 时的复合辐射光谱强度较小, 与连续谱中的韧致辐射光谱强度相比, 可以忽略。

因此, 式(1)给出的电弧辐射光谱强度与等离子体温度的关系可用来测量电弧温度, 但因式中涉及多个未知粒子参数, 若采用绝对强度法直接测量, 存在较大的难度。本文拟通过阿贝尔(Abel)变换将采集的电弧辐射光强转换为径向光强分布, 再应用光谱相对强度的方法, 计算电弧等离子体温度。

1.2 径向光强分布计算

将长间隙空气电弧沿轴向进行空间离散化, 每个电弧横截面辐射的光谱强度满足柱状对称, 假定空气电弧为光学薄的等离子体^[18], 通过 Abel 变换可以得到各电弧横截面的径向光强分布。

如图 1 所示, 电弧等离子体为柱对称, 半径为 R_a , 测量到的谱强度 $I(y)$ 为径向光强 $\varepsilon(r)$ 沿弦 AA' 的积分值, 计算公式为

$$I(y) = 2 \int_0^x \varepsilon(r) dx \quad (4)$$

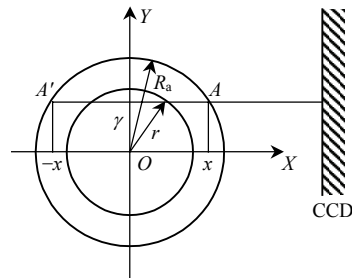


图 1 阿贝尔变换示意图

Fig. 1 Diagram of Abel transform

式(4)的反变换为

$$\varepsilon(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{R_a} \left(\frac{dI(y)}{dy} / \sqrt{y^2 - r^2} \right) dy \quad (5)$$

式(5)称为 Abel 变换^[19-20]。若已知 $(0, R_a)$ 间的 $I(y)$, 可求解径向光强分布 $\varepsilon(r)$ 。基于积分线性化思想, 将电弧横截面分割成若干等宽度的同心圆环, 在足够小的圆环间距内认为 $\varepsilon(r)$ 为常数, 则式(5)的离散化表达式为

$$\varepsilon(r_i) = \sum_{k=1}^N T_{ki} I(y_k) \quad (6)$$

式中 T_{ki} 为 Abel 转换系数, $i, k = 1, 2, \dots, N$, N 为电弧横截面被分割的总圆环数。利用几何图形方法可求取系数 T_{ki} 。

1.3 校正比色测温法

在一定的测试距离和光学系统中,当电弧等离子体在波长 λ 下辐射的光谱强度为 $I(\lambda, T_e)$ 时,彩色 CCD 传感器的信号通道输出的响应值 $V(\lambda)$ 为

$$V(\lambda) = F[D \int_{\Omega} \int_S \int_{\lambda_L}^{\lambda_H} I(\lambda, T_e) d\lambda]^\gamma \quad (7)$$

式中: F 为彩色 CCD 通道的 AD 转换系数; D 为透镜对辐射强度的衰减; Ω 为被测点对透镜所张成的立体角; S 为被观测对象在 CCD 上的成像面积; λ_L 、 λ_H 分别为 CCD 光谱响应的截止下限、上限的波长; γ 为通道的伽马校正系数。当 Ω 、 S 和 $\Delta\lambda = \lambda_H - \lambda_L$ 足够小时,可认为 $I(\lambda, T_e)$ 不变。式(7)可简化为

$$V(\lambda) = F[DA\Omega\Delta S\Delta\lambda I(\lambda, T_e)]^\gamma = KI(\lambda, T_e)^\gamma \quad (8)$$

式中 K 为通道总转换系数,包括光电转换系数、系统增益和由滤光片、镜头和彩色 CCD 的固有光谱特性构成的光谱响应特性等。

利用波长 λ_1 、 λ_2 下的光谱辐射相对强度计算电弧温度,联立式(1)、(6)和(8),得到计算电弧横截面各点温度 T_{ei} 的校正比色测温公式为

$$T_{ei} = \frac{hc}{k} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) / \left\{ \ln \sum_{j=1}^N \left[T_{ij} \left(\frac{V_{1j}}{K_1} \right)^{1/\gamma_1} \right] - \ln \sum_{j=1}^N \left[T_{ij} \left(\frac{V_{2j}}{K_2} \right)^{1/\gamma_2} \right] + 2 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right\} \quad (9)$$

式中: V_{1j} 、 V_{2j} 为电弧横截面的第 j 点分别在 λ_1 、 λ_2 下的响应值; K_1 、 K_2 分别为电弧温度测量系统在 λ_1 、 λ_2 下的通道转换系数; γ_1 、 γ_2 为系统在 λ_1 、 λ_2 下的伽马校正系数。

2 电弧温度测量系统

2.1 总体结构

基于空气电弧等离子体辐射的光谱诊断测温原理,研制了长间隙空气电弧温度测量系统,如图 2 所示,主要包括光学预处理装置、图像采集系统和电弧温度计算程序。

1) 光学预处理装置。

光学预处理通过中性滤光片和 2 个不同中心波长的窄带滤光片实现。吸收型中性滤光片为光学中性,光强衰减比取 8/1,窄带滤光片的中心波长分别取为: $\lambda_1 = 632.8 \text{ nm}$ (红色); $\lambda_2 = 441.6 \text{ nm}$ (蓝色)。

2) 图像采集系统。

利用 Photron 的 FASTCAM-Ultima1024 型高速

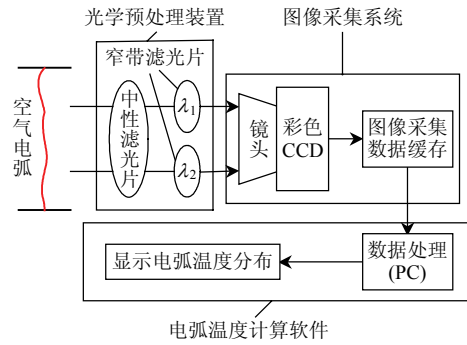


图 2 电弧温度测量系统的结构示意图

Fig. 2 Structure of temperature measurement system for air arc in long gap

摄像机采集电弧图像,分辨率为 1024×1024 的拍摄帧率为 500 帧/s,支持 JPEG、AVI、TIFF、BMP、RAW(压缩和不压缩)等多种文件存储格式,图像分辨率大、动态响应快,完全满足拍摄开放大气中长间隙工频电弧图像的需求。高速图像采集把系统拍摄到的长间隙空气电弧彩色图像,存储为数据无压缩的 BMP 格式的位图文件。

3) 电弧温度计算程序。

电弧温度计算程序为测温系统的核心部分,对电弧图像数据进行处理,数据处理流程见 2.3 节,进而获得电弧等离子体的温度特性。

2.2 通道参数标定

式(9)为计算电弧等离子体温度的表达式,确定式中的通道参数 K 、 γ 为测量电弧温度的首要任务。根据式(8)给出的电弧测温系统对电弧辐射光谱的响应值与通道参数的关系,可采用最小二乘法进行参数估计。

将式(8)进行对数变换后,得线性表达式如下:

$$V = KI^\gamma \Rightarrow \ln V = \ln K + \gamma \ln I \quad (10)$$

式(10)可用来标定电弧温度测量系统的通道参数。利用标准辐射源在特定波长、不同温度下的辐射强度 I ,读取测温系统输出的响应值 V ,由式(10)拟合试验数据,可求出参数 K 和 γ 。

采用由中国计量科学研究所校核的标准钨带灯对电弧测温系统进行了标定。当彩色 CCD 图像采集系统的帧率为 500 帧/s、快门为 1/500 s 时,在波长 λ_1 、 λ_2 下的试验数据及其拟合结果如图 3 所示。图中 R 表征拟合曲线与测量曲线的相关性, R 接近 1,表明 V 与 I 几乎成线性关系,即 $\gamma=1$ 。由测量结果可知, $K_1 = 1 \times 10^{-8}$, $K_2 = 5 \times 10^{-8}$ 。

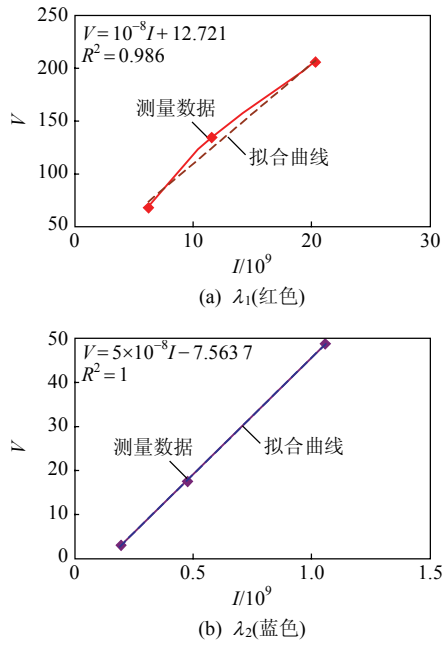


图 3 波长 λ_1 、 λ_2 下的通道参数

Fig. 3 Parameters estimation at wavelengths of λ_1 and λ_2

利用标定过的测温系统，对钨带灯的亮度温度进行核算，与标准温度的比较见表 1。结果表明，温度的计算误差控制在 8% 左右，满足工程计算的要求。可见，本文标定的测温系统通道参数用于计算电弧等离子体温度具有可行性。

表 1 温度计算结果与标准温度的比较

Tab. 1 Temperatures comparison of tungsten strap lamp

标准温度/K	响应值 V		温度计算结果/K	相对误差/%
	$\lambda_1=632.8\text{ nm}$	$\lambda_2=441.6\text{ nm}$		
1873.15	68	3.0	1715.81	8.4
1973.15	135	17.7	1809.38	8.3
2073.15	206	48.7	1907.68	8.0

彩色 CCD 图像采集系统的曝光时间(快门)等因素对通道参数标定产生影响。由于受 CCD 芯片动态范围的限制，需对电弧测温系统在不同快门下的通道参数进行标定。对测温系统在进光量最大、不同快门下的通道参数进行了标定，仍满足 $\gamma=1$ ，两通道的转换系数如表 2 所示。

表 2 不同快门时间下的通道转换系数

Tab. 2 Transfer parameters of two channels at different shutter times

快门/s	K_1	K_2	快门/s	K_1	K_2
1/500	1×10^{-8}	5×10^{-8}	1/4 000	1.2×10^{-8}	5×10^{-8}
1/1 000	7×10^{-9}	2×10^{-8}	1/8 000	6.0×10^{-9}	3×10^{-8}
1/2 000	2×10^{-8}	1×10^{-7}	—	—	—

2.3 数据处理流程

电弧温度计算程序是长间隙空气电弧测温系统的核心部分，采用数字图像处理技术，对电弧彩色图像进行计算分析，获得电弧等离子体温度特性，数据处理流程如图 4 所示。

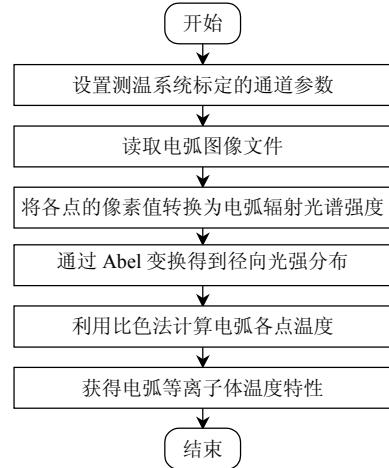


图 4 电弧图像的数据处理流程图

Fig. 4 Data processing chart for arc images

3 测温结果及分析

利用测温系统对小电流电弧温度特性进行测量研究，电弧电流为 10~30 A，改变电弧初始长度和环境条件，分析电弧的温度特性及其影响因素。

采用电弧温度测量系统拍摄空气电弧图像，其色度信息主要为红、蓝色分量，如图 5 所示，图中较亮部分为蓝色分量，较深部分为红色分量，标注的“10 A-120 mm”是指电流为 10 A、初始长度为 120 mm，以此类推。电弧图像显示弧道为蓝色，电弧边缘的红色分量较多，由式(9)可知，弧道的温度

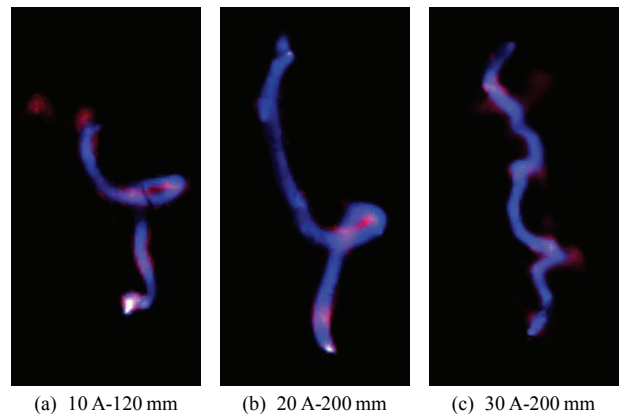


图 5 电弧温度系统拍摄的典型电弧图像

Fig. 5 Typical arc images taken by arc temperature measurement system

明显高于电弧边缘温度。除弧根外，基本消除了图像的饱和失真现象，验证了弧根温度较高的结论。

由于长间隙空气电弧的形状复杂，非真正的柱对称，需对电弧在空间上的离散化作近似处理。本文将电弧从上往下沿轴向分为5个区域：上弧根，弧柱区1为靠近上弧根的弧柱，弧柱区2和3则依次向下，直至下弧根。在每个电弧区域选5~10个电弧横截面求取温度的平均值，以初始长度为120 mm、电流为10 A的电弧在某时刻的温度特性为例，如图6，横轴 l 为电弧径向距最左端弧道(为第1个点)的距离，纵轴 T 为电弧等离子体温度。

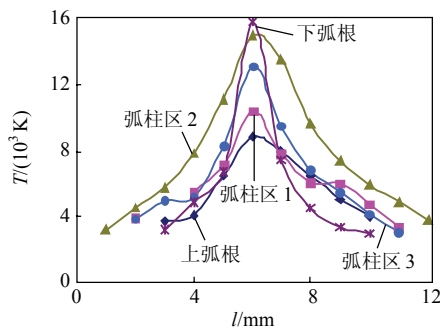


图6 电流10 A的电弧在某时刻的温度特性
Fig. 6 Temperature distributions of air arc at some moment

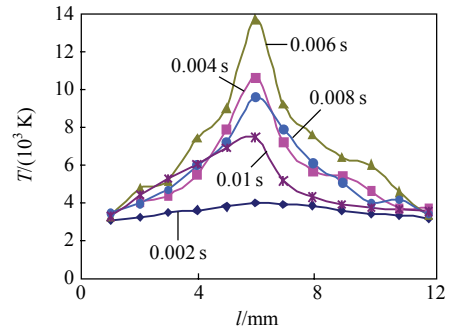
图6中的曲线表明，电弧各部分的温度大小顺序为：下弧根>弧柱区2>弧柱区3>弧柱区1>上弧根。由于下弧根为电弧阴极，提供强大的电子流来源，粒子密度较大，电子高速运动，使得等离子体温度较高。弧柱区2处于弧柱中间部分，粒子之间碰撞激烈，动能较大，温度也较高。上弧根主要聚集正离子，运动速度慢，电弧温度较低。弧柱区1、3为弧根与弧柱的连接处，温度处于上、下弧根温度之间。

在图6基础上，求取不同时刻的电弧平均温度，进而得到一个周期的电弧温度分布曲线，如图7所示，电弧温度随电流瞬时值增加而升高。

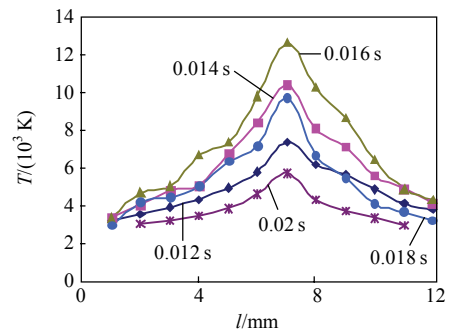
图8给出了电流10 A、不同初始长度下的电弧温度特性，横轴 t 为时间，可看出两者较接近。进而计算了电流20 A、初始长度120 mm和电流30 A、初始长度200 mm在有风时的电弧温度特性，见图9，图中的“30 A-200 mm-W”指后一种工况。

分析图6—9中的长间隙空气电弧等离子体的温度特性，可得出以下结论：

1) 电弧温度随电流瞬时值正向变化，因电弧



(a) 0.002~0.01 s



(b) 0.012~0.02 s

图7 一个周期的电弧温度分布曲线

Fig. 7 Temperature distributions of air arc in one period

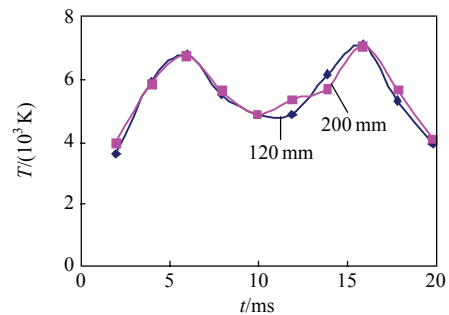


图8 电弧在不同初始长度下的温度分布曲线

Fig. 8 Arc temperature distributions at different gaps

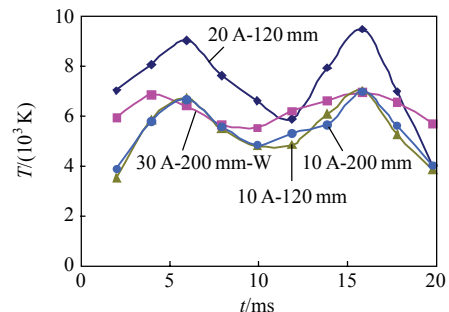


图9 不同试验情形下的电弧温度特性

Fig. 9 Temperature distributions of air arc at different test conditions

的热惯性，温度的变化稍滞后于电流变化。

2) 电弧温度沿径向随离开弧道中心的距离增

加而下降, 与间隙长度几乎无关。

3) 电弧电流幅值增加时, 电弧温度明显上升, 但有风时, 因弧道散热状况得到有效改善, 电弧温度下降。

4) 在图 6—9 中, 稳定发展的电弧等离子体温度大于 3 000 K。当电弧温度下降到小于 3 000 K 时, 空气电弧趋于熄灭。

4 结论

1) 对长间隙空气电弧等离子体温度进行测量分析, 研制了长间隙空气电弧温度的测量系统, 结果表明, 光谱诊断测温方法可有效测量电弧温度, 为分析潜供电弧的自熄特性提供了有效手段。

2) 根据长间隙空气电弧辐射光谱特征, 结合 CCD 光谱响应特性, 提出了与数字图像处理结合的光谱诊断方法并将其用于测量电弧温度

3) 通过附加衰减和滤波的光学预处理装置, 采用标准辐射源标定测温系统的通道参数, 消除了图像失真及其引起的计算误差。

4) 由 Abel 变换得到径向光强分布, 引入通道参数 K 和 γ 校正比色测温方法, 确保获得电弧各点的等离子体温度。

5) 电弧温度沿电弧径向下降, 随电流增加而上升, 但滞后于电流的变化, 与间隙的长度几乎无关, 并且风可使电弧温度降低。若电弧等离子体温度下降到小于 3 000 K 时, 空气电弧趋于熄灭。

参考文献

- [1] 赵子玉, 武建文, 邹积岩, 等. 利用 CCD 摄像系统研究真空电弧演变过程[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 10-13, 58.
Zhao Ziyu, Wu Jianwen, Zou Jiyang, et al. Observation of vacuum arc mode transition using CCD camera system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 10-13, 58(in Chinese).
- [2] 武建文, 王毅, 王季梅. 利用动态图像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]. Proceedings of Electric Technology, 1997, 12(3): 37-41(in Chinese).
- [3] 崔志尚. 温度计量与测试[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998: 53-60.
Cui Zhishang. Temperature measurement and testing[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1998: 53-60(in Chinese).
- [4] 姜忠良. 温度的测量与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 25-40.
Jiang Zhongliang. Temperature measurement and control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 25-40(in Chinese).
- [5] 李峥, 杨茉, 赵婷, 等. 红外仪延迟测量法确定板坯出炉温度[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 166-168.
Li Zheng, Yang Mo, Zhao Ting, et al. Temperature estimation of a heated armor plate's original surface based on deferred infrared temperature-measuring[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(2): 166-168(in Chinese).
- [6] 张丹耀, 赖永生. 动态红外测温技术在变电站中的应用[J]. 电气时代, 2009(3): 90-92.
Zhang Danyao, Lai Yongsheng. Application of dynamic infrared temperature-measuring technology in transform station[J]. Electric Age, 2009(3): 90-92(in Chinese).
- [7] 张淳民, 赵葆常, 相里斌. 偏振干涉成像光谱仪中偏振化方向对调制度的影响[J]. 光学学报, 2000, 20(8): 1077-1083.
Zhang Chunmin, Zhao Baochang, Xiang Libin. Influence of polarized direction on modulation depth of a polarization interference imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(8): 1077-1083(in Chinese).
- [8] 苏丽娟, 相里斌, 袁艳. 高光谱分辨率横向剪切静态干涉光谱仪[J]. 光子学报, 2006, 35(5): 684-687.
Su Lijuan, Xiang Libin, Yuan Yan. A new lateral shearing interferometer stationary Fourier transform spectrometer of high spectrum resolution resolving power[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(5): 684-687(in Chinese).
- [9] Sweeny D W, Attwood D T, Coleman L W. Interferometric probing of laser produced plasmas[J]. Applied Optics, 1976(15): 1126-1128.
- [10] 邵其均, 何煜, 郭文康, 等. 直流等离子体电弧温度测量与模拟计算结果的比较[J]. 物理学报, 1999, 48(9): 1691-1700.
Shao Qijun, He Yu, Guo Wenkang, et al. The comparison of temperature measurement with simulated result for DC plasma arc[J]. Proceedings of Physics, 1999, 48(9): 1691-1700(in Chinese).
- [11] 卫成业, 王飞, 马增益, 等. 运用彩色 CCD 测量火焰温度场的校正算法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 70-72, 76.
Wei Chengye, Wang Fei, Ma Zengyi, et al. Research on colorimetric flame temperature measurement using colored CCD[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 70-72, 76(in Chinese).

- [12] Hasinoff S W. Three dimensional reconstruction of fire from images [D]. Toronto: University of Toronto, 2002.
- [13] 李汉舟, 潘泉, 张洪才, 等. 基于数字图像处理的温度检测算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 195-199.
Li Hanzhou, Pan Quan, Zhang Hongcai, et al. Study on temperature measurement algorithm based on numerical image process[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 195-199(in Chinese).
- [14] 彭小奇, 周海叶, 宋海鹰. CCD 三色测温的插值修正方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 166-169.
Peng Xiaoqi, Zhou Haiye, Song Haiying. Interpolation correction method for temperature measurement by three-color CCD[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 166-169(in Chinese).
- [15] 王震洲, 刘教民, 贺代春. 基于彩色 CCD 的三色法测量电弧温度场分布[J]. 河北科技大学学报, 2005, 26(1): 51-53, 63.
Wang Zhenzhou, Liu Jiaomin, He Daichun. Three-color measurement of arc temperature field distribution based on CCD[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2005, 26(1): 51-53, 63(in Chinese).
- [16] 项志遴. 高温等离子体诊断技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1984: 63-71.
Xinag Zhilin. High temperature plasma diagnostics[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1984: 63-71(in Chinese).
- [17] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 52-60.
Guo Zengyuan, Zhao Wenhua. Arc and plasma[M]. Beijing: Science Press, 1986: 52-60(in Chinese).
- [18] Bockasten K. Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma[J]. Journal of the Optical Society of America, 1961, 51(9): 943-947.
- [19] 绍华, 朱丹平, 吴毅雄. 电弧等离子体温度场中 Abel

逆变换的数值算法分析[J]. 计算物理, 1995, 22(5): 431-436.

Shao Hua, Zhu Danping, Wu Yixiong. Analysis of numerical algorithm for Abel invert transform in arc plasma temperature field[J]. Computation Physics, 1995, 22(5): 431-436(in Chinese).

- [20] Deans S R. Radon and Abel transforms, the transforms and applications handbook[M]. Boca Raton: CRC Press Incorporation, 1996: 631-717.



颜湘莲

收稿日期: 2011-01-20。

作者简介:

颜湘莲(1977), 女, 博士, 研究方向为电力系统过电压、电弧试验与建模、SF₆ 开关设备故障诊断等, yanxl@epri.sgcc.com.cn;

陈维江(1958), 男, 教授级高工, 博士生导师, 主要从事电力系统防雷、过电压与绝缘配合、电磁环境和特高压建设等方面的研究工作, weijiang-chen@sgcc.com.cn;

贺子鸣(1981), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统过电压、可控避雷器等, hezim@epri.sgcc.com.cn;

王承玉(1963), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为高压开关设备的研制开发、标准制定和设备故障诊断、状态检修技术等工作, cywang@epri.sgcc.com.cn;

武建文(1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为真空开关电弧理论及应用、电器及智能控制、电力系统配电自动化、电力电子技术, wujianwen@vip.sina.com;

王景(1983), 男, 博士研究生, 主要研究领域为真空开关电弧理论及应用, wangjing8318@asee.buaa.edu.cn。

(编辑 胡琳琳)