

水介质预击穿过程液相温度纹影诊断技术研究

王亦君 张赫* 刘毅 林福昌 徐尤来
(华中科技大学 电气与电子工程学院 武汉 430074)

Schlieren Diagnosis Technology for Liquid Temperature in the Pre-Breakdown Process of Water

WANG Yijun, ZHANG He*, LIU Yi, LIN Fuchang, XU Youlai

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract To study the change of liquid temperature in the process of sub-millisecond pulsed discharge in water, a schlieren observation system suitable for pulsed discharge in water was constructed. The influencing factors and calibration method of the temperature diagnosis system for the process of pulsed discharge in water were proposed, and the radial distribution of the temperature field during the pulsed discharge in water was obtained. Comparative analysis with the finite element simulation shows that when the radial distance is less than 0.9 mm, the deviation of the temperature based on the schlieren diagnosis from the simulation results is less than 8%. It provides a technical basis for the study of the mechanism of pulsed discharge in water.

Keywords Pulsed discharge, Schlieren diagnosis, Transient temperature rise

摘要 为研究水中亚毫秒脉冲放电过程液相温度的变化,构建了适用于水中脉冲放电的纹影观测系统,提出了水中脉冲放电过程温度诊断系统的影响因素及标定方法,获得了水中脉冲放电过程温度场的径向分布。与有限元仿真对比分析表明,当径向距离小于 0.9 mm 时,纹影诊断温度相对于仿真结果的偏差小于 8%,为水中脉冲放电机理研究提供了技术基础。

关键词 脉冲放电 纹影诊断 瞬态温升

中图分类号: TM85

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202306005

水中脉冲放电产生多种活性粒子,在水处理、医疗等领域具有广泛应用前景^[1-2]。放电过程中流体在电磁热力多物理场耦合作用下发生扰动,气相和液相相互作用并伴随着复杂热效应的产生,在放电通道形成过程中起重要作用^[3-6],而流场扰动作用机制尚不清楚。建立流场纹影诊断方法,研究水介质预击穿过程中的流场变化规律,能够为工程应用提供理论指导。

水介质预击穿过程中通常会产生气相,气泡产生方式包括电子碰撞解离、电晕放电导致液体气化、热分解、静电斥力扩张等^[7]。在低电场强度(<30 kV/cm)、高电导率水(>10 μ S/cm)和大电极半径(>0.1 mm)的工况下,放电过程中产生较大的离子电流,从而产生较强的焦耳加热作用,使水沸腾

形成蒸汽^[8]。

水中脉冲放电过程通常伴随着热效应的产生,水将发生扰动,同时,水的折射率将发生变化^[6]。Adda 等人认为水的扰动过程涉及的热效应主要有热量的产生与传热两个过程,即热量由水的焦耳加热产生,并通过水的热对流过程传热^[9]。Li 等^[8]认为焦耳热是水发生扰动的主要原因,同时,在局部强电场作用下,电极附近将产生更多的 H^+ 和 OH^- ,使该区域中水的电导率增大,从而增大焦耳加热速率。Fujita 等^[10]通过计算发现,水的焦耳加热所消耗的能量与水沸腾形成蒸汽所需能量几乎相等,间接证明水可通过焦耳加热实现汽化。童得恩等^[11]通过数值模拟获取了水中脉冲放电预加热阶段的温度场分布,发现高压电极尖端处的水的温度最高,

且接近水的沸点。

由于水的焦耳加热过程伴随着水温的变化, 诊断水温的时空分布变化能够为水中放电理论提供数据支撑与佐证。水中脉冲放电过程具有温度变化速率快、液相环境复杂等特点, 水温的诊断难度较大。由于放电过程会产生强大的电磁干扰, 且热电偶等探针式传感器会破坏水中温度场的完整性, 响应时间较慢, 传统的直接测量液体温度方法难以应用于水中脉冲放电的温度测量。

纹影温度诊断法作为一种光学测温法, 通过将光线在不均匀流场中的偏折转化为图像的明暗变化, 可基于图像灰度值实现流场温度的诊断^[12]。与传统的探针测量方法相比, 具有非侵入、响应速度快、抗电磁干扰能力强等特点, 在流场温度诊断中具有潜在的优势^[13]。目前, 纹影诊断法主要用于气相温度诊断与冲击波观测^[14], 应用于水介质预击穿过程观测时, 面临气-液-固复杂光路与多因素的影响。通过纹影诊断法在水中纳秒脉冲放电过程中观测到电极附近形成低密度区, 并随后观测到冲击波的产生过程^[15]。通过该方法在水中微秒脉冲放电过程中观测到放电起始过程中水的扰动, 并解释该扰动是由水的温升与流动引起的^[9]。较高的时空分辨率和杂质噪声将使纹影成像质量降低, 从而影响纹影温度诊断精度, 因此纹影温度诊断法在水介质预击穿过程中液相温度诊断精度方面仍需深入研究。

针对上述问题, 构建水介质脉冲放电与纹影诊断平台, 分析气、液、固传播路径上光线偏折与图像

灰度值和温度变化的关系, 建立流场温度实时诊断的纹影诊断方法, 为水介质预击穿特性分析提供技术基础。

1 脉冲放电纹影诊断系统构建

水中脉冲放电实验回路如图 1 所示。220 V 交流电经调压器和变压器升压后, 经硅堆半桥整流为直流, 为电容充电, 该过程继电器处于断开状态。电容充电完毕后, 控制继电器导通, 电容经限流电阻对水间隙进行脉冲放电。

水中脉冲放电时间较短, 通常为亚毫秒级及以下, 需要纹影诊断过程具有较高的时间与空间分辨特性, 通过构建透射式纹影系统实现水中脉冲放电流场的纹影诊断。纹影系统如图 1 所示, 其包括发光二极管(Light Emitting Diode, LED)光源、聚光透镜、毛玻璃、小孔、准直透镜、待测流场、汇聚透镜、刀口、镜头和相机。光由 LED 光源产生, 聚光透镜将光线汇集至小孔, 经毛玻璃匀化后通过准直透镜形成平行光, 光线在液相扰动区中发生小角度偏折, 经汇聚透镜后在刀口处形成汇聚光斑, 刀口遮挡部分光斑, 最终在相机中成像。

本文研究设置电容器的电容量为 600 nF, 回路充电限流水电阻约为 500 k Ω , 放电回路限流电阻为 50 Ω 。放电电压为 24 kV, 针-板电极为不锈钢材质, 垂直距离为 20 mm。水的初始电导率和温度分别为 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和 10 $^{\circ}\text{C}$ 。高速相机的型号为 Phantom V2512, 其帧率和曝光时间分别设置为 254545 fps 和 3.33 μs 。

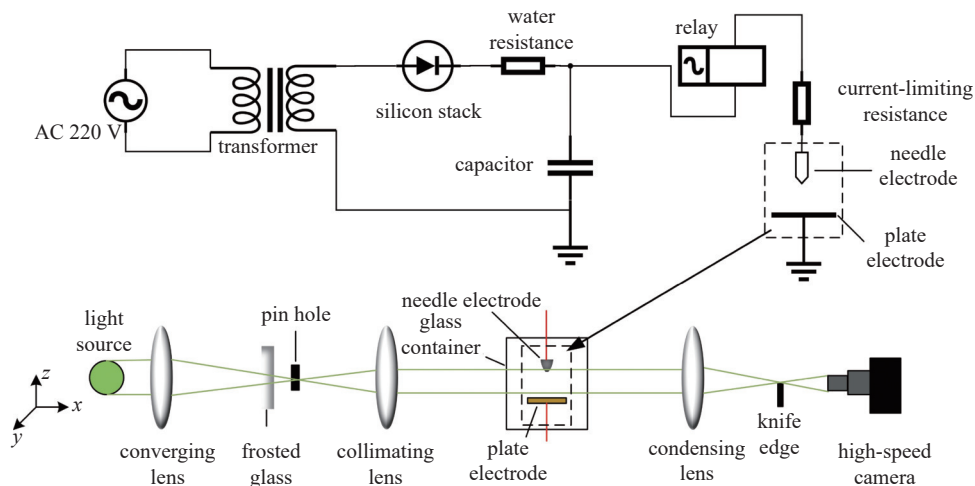


图1 水中脉冲放电综合观测平台

Fig. 1 Integrated observation platform for pulsed discharge in water

目前,纹影系统光源主要包括卤钨灯光源、氙灯光源、激光光源以及 LED 光源。卤钨灯光源具有连续光谱,简单可靠,但在曝光时间较短时无法保证高亮度。氙灯光源具有较高亮度且可在脉冲模式下正常工作,但由于其自身放电特性导致放电弧光不均匀^[16],进而导致纹影诊断时会产生一定的失真。激光光源易于准直且功率较高,可使纹影图像在短曝光时间内仍具有较高亮度,但由于激光为强相干光,其在玻璃腔体处形成衍射斑点,从而对流场成像产生干扰。LED 光源发光均匀,不易形成衍射环,发光强度能满足微秒级曝光时间下的纹影成像,因此 LED 光源是水中脉冲放电纹影系统的最优选。

光在水中传播时,光强将发生衰减,光强 I_x 随传播距离 x 的衰减可表示为

$$I_x = I_0 e^{-\varepsilon x} \quad (1)$$

式中, I_0 为初始光强, ε 为衰减系数,光强随衰减系数的增大而减小。光在蒸馏水中的衰减系数和光线波长的关系如表 1 所示^[17],衰减系数在蓝光到绿光波段较小,在橙光到红光波段较大。

表 1 蒸馏水中的光强衰减系数与光线波长的关系

Tab. 1 Relationship between the attenuation coefficient of luminous intensity and the wavelength of light in distilled water

波长/nm	衰减系数/ m^{-1}
375~450 (紫)	19~45
450~475 (蓝)	18~19
475~500 (青)	18~36
500~575 (绿)	36~109
565~590 (黄)	109~272
590~625 (橙)	272~305
625~750 (红)	305~2680

综上所述,选用波长为 532 nm 的绿色 LED 光源作为纹影系统中的光源。当光在水中传播 0.1 m 的距离时,由式(1)计算得到光强仅衰减 5%。

为了使纹影成像效果达到最优,需要使刀口恰好处于汇聚透镜的焦点位置,当刀口处的光斑直径等于小孔孔径时,可认为刀口已处于焦点位置。由于光斑直径较小,难以准确测量,故需通过纹影图像辅助判断。当纹影图像左右半区的灰度值大致相同时,可认为刀口已处于焦点位置。首先对纹影图像进行降噪处理,以消除噪声引起的纹影灰度值

分布不均,随后分别计算纹影图像左右半区的平均灰度值,若两者差值小于刀口完全不遮挡光斑时对应灰度值的 1%,则可认为刀口已位于汇聚透镜的焦点。

纹影图像是汇聚透镜和相机透镜综合成像的结果。透镜成像原理可表示为

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

式中, u 为物距, v 为像距, f 为透镜焦距。应使汇聚透镜前的物体成放大的像,以增加待测流场区域的像素点个数,从而提高纹影系统的空间分辨率,进而提高纹影诊断精度。以针电极成像为例进行成像分析,如图 2 所示,将相机透镜内部的透镜组等效为焦距为 f_0 的单个透镜。首先,汇聚透镜对针电极成像,设汇聚透镜的焦距为 f_1 ,则需使 $L_2 < f_1$,以使电极成正立放大的虚像,此时, $u=L_2$, $v=-L_3$, $f=f_1$ 。随后,相机透镜对针电极的虚像进行成像,需使 $L_3+D > 2f_0$,以使电极的像成倒立缩小的实像,此时, $u=L_3+D$, $v=L_1$,由此可实现流场位置、镜头焦距和相机位置的优化匹配。

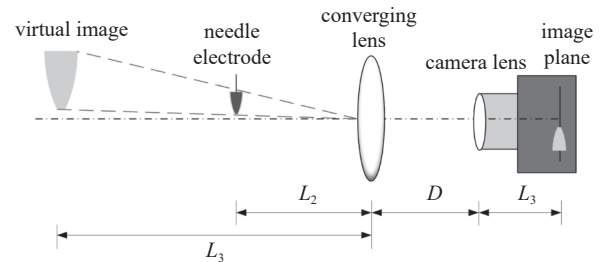


图2 针电极在纹影系统中的成像

Fig. 2 Imaging of the pin electrode in the schlieren system

纹影系统的灵敏度方程为

$$S = \frac{f_1}{I_k} \quad (3)$$

式中, I_k 为刀口的通光率。由式(3)可知可通过增大 f_1 或减小 I_k 的方式提高纹影系统的灵敏度,以提高流场密度微小变化在纹影图像中的显示程度。由于减小 I_k 将使图像灰度值降低,因此选用焦距较长的汇聚透镜是提高纹影系统灵敏度的有效手段,故选用焦距为 400 mm 的汇聚透镜。

2 纹影系统中液相成像因素分析

若扰动流场在 y 方向存在折射率梯度,且 $dn/dy < 0$,当一束平行于 x 方向的光射入该扰动流场时,光将向折射率增大的方向(即 $-y$ 方向)偏折,偏

折角 α 为

$$\alpha = \int \frac{1}{n} \frac{dn}{dy} dx \quad (4)$$

对于针-板电极形式的水间隙放电过程,形成的液相扰动区近似满足圆柱对称。设放电过程中形成的液相扰动区的半径为 R , 对称轴为 z 轴, 入射光平行于 x 轴, y 方向存在折射率梯度, 如图 3 所示。

由式(4)可得, 光线偏折角为

$$\alpha(y) = \frac{1}{n_0} \int_{-x_0}^{x_0} \frac{dn(r)}{dy} dx \quad (5)$$

假设光在扰动区边界处的偏折角为 0, 则式(5)可转换为如下形式^[18]:

$$\alpha(y) = \frac{2y}{n_0} \int_y^R \frac{dn(r)}{dy} \frac{dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} \quad (6)$$

为了对式(6)进行求解, 需对其进行 Abel 逆变换, 得

$$\frac{n(r)}{n_0} - 1 = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \alpha(y) \frac{dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \quad (7)$$

由液相扰动区射出的偏折光线的传播过程如图 4 所示。假设光线射入汇聚透镜前的偏折角为 α_a , 则其在刀口处形成的光斑将相对于刀口产生位移 a 。液相扰动区的出射光依次经过未扰动液相、玻璃腔与空气, 三者折射率存在差异, 由于偏折光线不垂

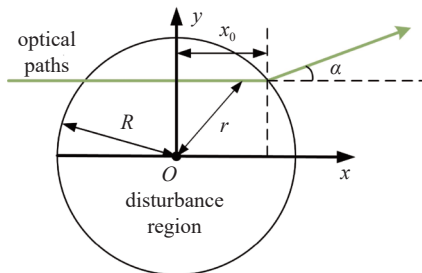


图3 光在圆形扰动区的偏折

Fig. 3 Deflection of light in the circular disturbance region

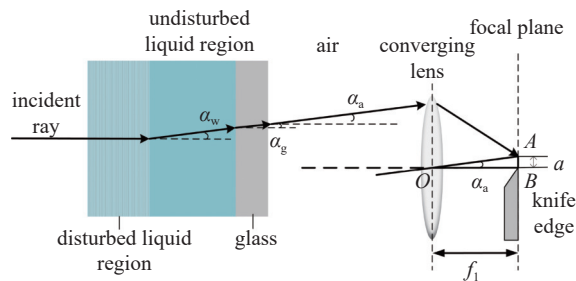


图4 扰动区至刀口的光路

Fig. 4 Optical path from the disturbance region to the knife edge

直射入玻璃, 光线将产生额外偏折。设光射入空气、未扰动液相、玻璃后的偏折角分别为 α_a 、 α_w 和 α_g , 空气、水、玻璃的折射率分别为 n_a 、 n_w 、 n_g , 则由折射定律得

$$\sin \alpha_w = \frac{n_g}{n_w} \sin \alpha_g \quad (8)$$

$$\sin \alpha_g = \frac{n_a}{n_g} \sin \alpha_a \quad (9)$$

对式(8)、式(9)进行求解, 得

$$\sin \alpha_w = \frac{n_a}{n_w} \sin \alpha_a \quad (10)$$

由于 α_w 和 α_a 很小, 所以可近似认为 $\sin \alpha_w = \alpha_w$, $\sin \alpha_a = \alpha_a$ 。则式(10)可转化为如下形式:

$$\alpha_w = \frac{n_a}{n_w} \alpha_a \quad (11)$$

扰动区至刀口的光路如图 4 所示。由透镜成像原理可知, 一束平行光以不平行于主光轴的方向入射时, 其仍能在焦平面形成汇聚光斑, 因此作辅助直线 OA, 其与入射光平行且经过光心, 并在刀口所在平面与偏折光线相交于 A 点。由几何关系可知, $\angle AOB = \alpha_a$, $AB = a$, $OB = f_1$, 进而可得

$$a = f_1 \tan \alpha_a \approx f_1 \alpha_a \quad (12)$$

3 液相温度诊断纹影系统标定

基于刀口与光斑的相对运动原理, 当流场未发生扰动时, 可通过刀口位置的移动来模拟光斑的位移, 进而获得不同刀口位置的纹影图像灰度值。获得光斑位移量等光线偏折信息与图像灰度值关系的过程称为纹影系统标定, 两者的关系曲线称为标定曲线。

在汇聚透镜作用下, 刀口处形成圆形光斑。通光面积与图像灰度值成正比。刀口位置与通光面积的关系如图 5 所示, 其中 R_s 为光斑半径, y 为刀口位置。

通光面积 S 为

$$S = 2 \int_{-R}^y \sqrt{R_s^2 - y^2} dy \quad (13)$$

解得

$$S = y \sqrt{R_s^2 - y^2} + R_s^2 \left(\arcsin \frac{y}{R_s} + \frac{\pi}{2} \right) \quad (14)$$

由于刀口进光面积与图像灰度值呈正相关, 式(14)也可以表征图像灰度值随光斑位移量的变化规律。在纹影标定过程中, 刀口从与不接触光斑的位置缓慢调节, 直至刀口完全遮挡光斑, 如图 6(a)所示, 进而得到标定曲线, 如图 6(b)所示。由于光的

衍射特性,刀口完全遮挡光斑时其对应的图像灰度值略大于 0。将所有刀口位置对应灰度值的平均值作为灰度基准值,并将刀口固定在灰度基准值对应的刀口位置处。

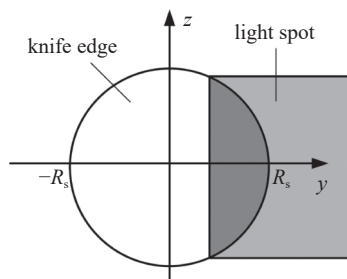


图5 刀口位移与光线通过面积示意图

Fig. 5 Schematic diagram of knife edge's displacement and light's incoming area

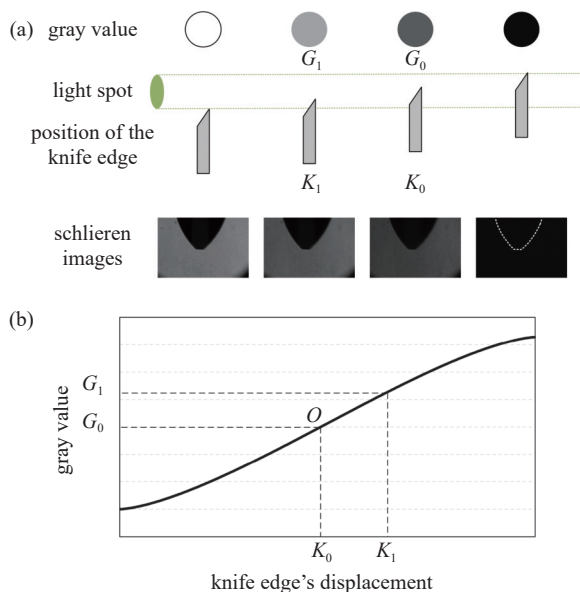


图6 纹影系统标定。(a)刀口不同位置对应的纹影图,(b)刀口位移量-灰度值关系曲线

Fig. 6 Calibration of the schlieren system. (a) Schlieren images corresponding to different positions of the knife edge, (b) relation between knife edge's displacement and gray value

图 6(b)中 K_0 点为初始刀口固定位置, G_0 为灰度基准值。以 (K_0, G_0) 点作为坐标原点。设纹影图像某像素点的灰度值为 G_1 , 根据标定曲线可求得对应的刀口位移量 K_1 , 由相对运动的等效性即可得到光斑位移量为 $K_1 - K_0$ 。

4 水中脉冲放电液相温度诊断

液相折射率 n 与液相密度 ρ 的关系满足

Lorentz-Lorenz 公式^[19], 如式(15)所示。

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{1}{\rho} = C_{LL} \quad (15)$$

式中, C_{LL} 为常数, 其值由液体性质决定。本文采用实测水的折射率-温度曲线, 如表 2 所示^[20]。

表 2 不同温度下水的折射率

Tab. 2 Refractive indices of water at different temperatures

温度/℃	折射率
10	1.33685
20	1.33612
30	1.33505
40	1.33369
50	1.33209

水中脉冲放电的典型纹影图像如图 7 所示, 在针电极附近的灰度值与远处的灰度值差异较大, 针电极右侧区域灰度大于背景灰度, 针电极左侧区域灰度小于背景灰度。左侧与右侧区域灰度以相反趋势变化的原因是折射率随 y 轴变化的方向相反。针电极右侧温度沿 y 轴正方向减小, 光线沿正方向偏折, 通光面积增大, 而左侧温度沿 y 轴负方向减小, 光线沿负方向偏折, 通光面积减小。

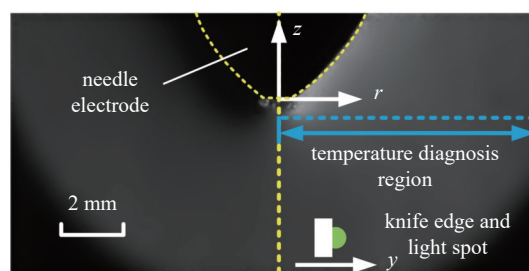


图7 水中脉冲放电纹影图像

Fig. 7 Schlieren images of pulsed discharge in water

以针电极尖端的中心为坐标原点建立圆柱坐标系, 选取针电极前方扰动区进行温度场诊断, 将 z 轴右侧区域作为温度诊断区域, 如图 7 所示。得到 $z = -0.8 \text{ mm}$ 处水温的径向分布, 如表 3 所示。

表 3 仿真边界条件

Tab. 3 Boundary conditions for simulation

边界条件	施加位置
高电势	针电极外表面
接地	板电极外表面
电绝缘	仿真域上、下、右边界
电场轴对称	仿真域左边界
热绝缘	仿真域上、下、右边界
热场轴对称	仿真域左边界

为了研究纹影诊断温度的准确性, 建立水中亚毫秒放电的二维轴对称有限元仿真模型, 如图 8 所示。可列写电场和热场方程组, 如式(16)-式(18)所示。

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (16)$$

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (17)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho C_p u_w \nabla T = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (18)$$

式中, $\mathbf{E}$ 为电场强度, φ 为电势, $\mathbf{J}$ 为电流密度, σ 为电导率, ρ 为密度, C_p 为热容, T 为温度, k 为热导率, u_w 为流速。仿真边界条件如表 3 所示。

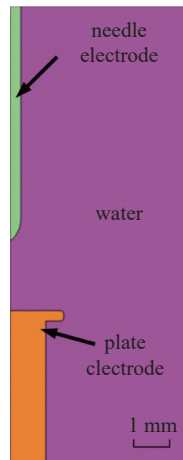


图8 水中脉冲放电仿真模型

Fig. 8 Simulation model of pulsed discharge in water

仿真温度如表 4 所示。纹影诊断温度 T 相对于仿真温度 T_s 的偏差 E_r 为

$$E_r = \frac{|T - T_s|}{T_s} \times 100\% \quad (19)$$

由表 4 可知, 在径向距离在 0–0.9 mm 范围内时, 纹影诊断温度相对于仿真结果的最大误差为 7.47%。当径向距离大于 0.9 mm 时, 纹影诊断温度相对于仿真结果的偏差小于 3%, 且随径向距离的增大而减小。温度诊断误差主要来自以下几个方面。首先, 在电场力作用下, 水会发生轻微的流动, 由此带来两方面影响, 其一, 由于焦耳加热的不均匀性, 水的流动将使灰度分布发生变化; 其二, 水的流动将引起热对流, 而仿真中进行了简化, 仅考虑了水在单一方向热对流。其次, 难以准确获得对称中心位置, 真实对称中心可能处于像素点内部, 从而使径向距离的确定过程产生误差。

以上结果表明, 本文所构建的纹影系统和温度

表 4 $z = -0.8$ mm 处水温的径向分布

Tab. 4 Radial distribution of water temperature at $z = -0.8$ mm

径向距离/mm	纹影诊断温度/℃	仿真温度/℃	纹影诊断偏差/%
0.05	17.33	16.73	3.59
0.45	17.12	15.93	7.47
0.9	15.33	14.63	4.78
1.3	13.82	13.44	2.83
1.7	12.77	12.61	1.27
2.25	11.94	12.01	0.58
2.8	11.37	11.43	0.52

诊断方法适用于水中脉冲放电过程中水温的诊断。该方法仍具有以下局限性。首先, 液相温度纹影诊断技术的应用前提是不存在其他引起密度分布变化的过程, 即液体密度变化是由温度变化唯一确定的。当液相发生剧烈流动或压强发生较大变化(如产生冲击波)时, 该方法不再适用。其次, 液相温度纹影诊断技术中需借助 Abel 逆变换, 而 Abel 逆变换的前提是诊断区域满足圆柱对称, 因此, 该技术目前仅适用于圆柱对称区域的温度诊断, 对于不满足圆柱对称区域的温度诊断有待进一步研究。

5 结论

本文构建了水中脉冲放电纹影观测系统, 并提出了脉冲放电温度诊断方法, 对水中脉冲放电温度场特性进行了定性分析, 得到了以下结论:

(1) 建立了适用于水中亚毫秒脉冲放电过程的纹影诊断系统。采用透射式刀口纹影系统, 并选用绿色 LED 光源, 降低了光强的衰减程度, 实现了纹影系统时间分辨率的提升。通过观测区域和汇聚透镜位置的合理调节, 使观测区域呈放大的像, 实现了纹影系统空间分辨率的提升。

(2) 基于纹影系统标定及光线偏折与温度的关系, 提出了水中脉冲放电的水温纹影诊断方法。水中亚毫秒脉冲放电过程中, 扰动区温度随径向距离的增大而逐渐减小, 诊断温度相对于仿真温度的偏差小于 8%, 表明所提出的纹影温度诊断法适用于水中脉冲放电的水温诊断。

本文所构建纹影系统和提出的温度诊断方法简单易行, 基于流场纹影图像的灰度值即可实现水温诊断, 为水中脉冲放电的流场特性的分析提供了有效的研究手段。

参 考 文 献

- [1] Cao Y, Qu G, Li T, et al. Review on reactive species in water treatment using electrical discharge plasma: formation, measurement, mechanisms and mass transfer[J]. *Plasma Science & Technology*, 2018, 20(10): 103001
- [2] Woloszko J, Stalder K R, Brown I G. Plasma characteristics of repetitively-pulsed electrical discharges in saline solutions used for surgical procedures[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(3): 1376–1383
- [3] Sun A, Huo C, Zhuang J. Formation mechanism of streamer discharges in liquids: a review[J]. *High Voltage*, 2016, 1(2): 74–80
- [4] Panov V A, Vasilyak L M, Vetchinin S P, et al. Slow 'thermal' and fast 'streamer-leader' breakdown modes in conductive water[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2018, 51(35): 354003
- [5] Panov V A, Vasilyak L M, Vetchinin S P, et al. Pulsed electrical discharge in conductive solution[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2016, 49(38): 385202
- [6] Touya G, Reess T, Pecastaing L, et al. Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2006, 39(24): 5236–5244
- [7] Kolb J F, Joshi R P, Xiao S, et al. Streamers in water and other dielectric liquids[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2008, 41(23): 234007
- [8] Li X, Liu Y, Zhou G, et al. Subsonic streamers in water: initiation, propagation and morphology[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2017, 50(25): 255301
- [9] Adda P, Lesaint O, Boussetta N, et al. Vapor bubble and streamer initiation in water under long duration impulses[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(5): 1967–1973
- [10] Fujita H, Kanazawa S, Ohtani K, et al. Initiation process and propagation mechanism of positive streamer discharge in water[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(21): 213301
- [11] Tong D, Zhu X, Zou X, et al. Numerical Simulation of the Preheating Process of Pulse Discharge in Water[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(5): 1461–1467 (童得恩, 朱鑫磊, 邹晓兵, 等. 水中放电预加热过程的数值模拟研究 [J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1461–1467(in chinese))
- [12] Zhao X, Yue Y, Yang Y, et al. Quantitative schlieren system and image processing method applicable to the measurement of stem temperature field[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(23): 70477057+7097 (赵贤根, 岳一石, 杨永超, 等. 适用于流注茎温度场测量的定量纹影系统及其图片处理方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 7047-7057+7097(in chinese))
- [13] Settles G S, Hargather M J. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(4): 042001
- [14] Liu X, Dong M, Deng H, et al. Movement characteristics of the gas in discharge channel after air gap breakdown[J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2021, 36(13): 2667–2674 (刘晓鹏, 董曼玲, 邓虎威, 等. 空气间隙击穿后放电通道内的气体运动特性 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2667–2674(in chinese))
- [15] Seepersad Y, Pekker M, Shneider M N, et al. On the electrostrictive mechanism of nanosecond-pulsed breakdown in liquid phase[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2013, 46(16): 162001
- [16] Ye J, Jin Y, Wu W, et al. Design method and selection of light source in schlieren technology[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011, 25(04): 94–98 (叶继飞, 金燕, 吴文堂, 等. 纹影技术中光源的选择与设计方法 [J]. 实验流体力学, 2011, 25(04): 94–98(in chinese))
- [17] Cong P. Water-color remote sensing principle and retrieval of suspended sediment concentration with satellite remote sensing method[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2002 (丛丕福. 水色遥感机理与悬浮物的卫星遥感信息识别研究 [D]. 大连海事大学, 2002(in chinese))
- [18] Du J, Liang H, Wei S. Abel transformation based adaptive regularization approach for image reconstruction[J]. *CT Theory and Applications*, 2017, 26(4): 435–44 (杜健鹏, 梁海霞, 魏素花. 基于 Abel 变换的图像重建自适应方法 [J]. CT 理论与应用研究, 2017, 26(4): 435–445(in chinese))
- [19] Wang R, Zhu X. Calculated result comparison of dispersion characteristic for light wave in pure water[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, 11(04): 258–263 (王然, 朱晓农. 光波在纯水中的色散特性理论计算结果比较 [J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(04): 258–263(in chinese))
- [20] Harvey A H, Gallagher J S, Sengers J. Revised formulation for the refractive index of water and steam as a function of wavelength, temperature and density[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1998, 27(4): 761–774