

基于灰度值的非对称等离子体弧形貌的三维重建*

郑庆余, 刘 新, 孙 晶*, 孔红领

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 等离子体加工技术在处理各类难加工材料的成形与制备方面备受关注, 其温度特性是影响加工质量的决定性因素。针对现有温度特性研究大多在弧径向对称的假设前提下间隔采样测量完成的问题, 提出了一种基于灰度值的非对称等离子体弧形貌三维重建方法。首先, 基于自行设计的图像采集系统, 给出了 CCD 空间布置方案, 同步获取了 360° 方向上加工过程中的等离子体弧数字图像; 然后, 对采集图像进行了灰度化、直方图均衡化、滤波去噪以及灰度等值线提取等预处理, 以获得良好的视觉场和测量效果; 最后, 取内六层灰度等值线进行了基于立体匹配和插值重构的数值模拟, 建立了与温度场存在相关性的等离子体弧形貌三维模型。研究结果定性描述了等离子体弧温度场的分布情况, 实现了等离子体弧形貌的非接触测量, 得到了加工过程中等离子体弧的真实形貌。

关键词: 三维重建; 非对称等离子体弧; 非接触测量; 灰度值; CCD 图像采集

中图分类号: TL65; TG669; TH16

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)07-0750-04

Three - dimensional reconstruction for non - symmetric plasma arc appearance based on gray value

ZHENG Qing-yu, LIU Xin, SUN Jing, KONG Hong-ling

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Plasma processing technology has been concerned in the forming and preparation of various difficult machining materials. The temperature of the plasma arc is the decisive factor of influencing processing quality. The most existing studies on temperature characteristic are completed by interval sampling measurement under the assumptions of arc radial symmetry. In order to solve this problem, a three-dimensional reconstruction method for non-symmetric plasma arc appearance based on gray value was presented. First of all, based on the self-developed image acquisition system, the space layout of CCD was given and the digital images of processing plasma arc in the direction of 360° were acquired synchronously. Then image preprocessing such as gray processing, histogram equalization, filtering de-noising and gray contours extraction were implemented on the digital images in order to get good visual field and measuring effect. Finally, after numerical simulation based on stereo matching and interpolation through six gray contours from inner to outer of the plasma arc, a three-dimensional model of the plasma arc appearance which has correlation with temperature field was established. The results describe the distribution of the plasma arc temperature field qualitatively, achieve the non-contact measurement of the plasma arc appearance and get the real appearance of the processing plasma arc.

Key words: three-dimensional reconstruction; non-symmetric plasma arc; non-contact measurement; gray value; CCD image acquisition

0 引 言

温度特性是等离子体弧的基本参量, 对弧密度场、

压力场和速度场的研究起决定性作用, 也是衡量弧品质的核心参数, 通过对它的研究, 可获悉弧内部的重要信息。而真实的等离子体弧三维形貌重建能够对温度

收稿日期: 2012-02-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775019); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT10JR08)

作者简介: 郑庆余(1987-), 男, 辽宁铁岭人, 主要从事非传统加工工艺与装备方面的研究. E-mail: zheng_qing_yu@126.com

通信联系人: 孙 晶, 女, 工学博士, 副教授, 硕士生导师. E-mail: sunjing@dlut.edu.cn

场的模拟起到一定的实验和理论指导作用。

到目前为止,多数研究都是以等离子体弧径向对称假设^[1-3]或弧柱相对坐标平移^[4]的前提下,通过 Abel 逆变换和光谱诊断方法^[5-6]重建等离子体弧温度场。由于等离子体弧工作时必然会受到环境干扰,弧柱无论径向还是轴向都是非对称的,所以前述方法不仅计算量大,且不能反映等离子体弧真实的工作状态。若从等离子体弧三维形貌的角度着手研究其温度场分布,不仅能大大减少工作量,还可以真实反映等离子体弧的工作状态,可以很好地解决非对称的问题,但到目前为止,有关实际应用的非对称等离子体弧三维形貌的研究未见报道。

本研究基于自行搭建的图像采集装置,采集真实加工状态下的等离子体弧图像,经过图像预处理,利用 Matlab 对等离子体弧进行基于灰度值的形貌三维重建,重建结果能够反映其真实的工作状态,为非对称等离子体弧温度场的三维重建奠定实验和理论基础。

1 图像采集系统

1.1 图像采集系统设计

作为实验测量对象的等离子体弧由 RILAND WS250A 等离子体焊机产生,其参数如表 1 所示,等离子体弧实验参数如表 2 所示。

表 1 RILAND WS250A 等离子体焊机参数

额定电压/V	额定功率/kVA	电流调节范围/A	电压调节范围/V	空载电压/V
380 ± 15%	9.5	20 ~ 250	20.8 ~ 30	62

表 2 等离子体弧实验参数

电流/A	离子气体流量/(L · min ⁻¹)	喷嘴到工件距离/mm
120	1.5	12

图像采集实验装置如图 1 所示。它由等离子体弧发生器、光学系统和计算机实现等离子体弧形貌的非接触测量。光学成像系统主要由:光学透镜、中性密度滤光片、窄带干涉滤光片和型号为 MV-VD030SC 的 CCD 构成。本研究通过中性密度滤光片和调节光圈控制光通量大小以获得图像良好的亮度分辨率;利用干涉滤光片获得特定颜色下的等离子体弧图像;由 CCD 自带的光学放大系统可获得较好的弧柱空间分辨率^[7-8]。CCD 采集等离子体弧图像并将光信号转换为数字信号,经过图像预处理得到适合三维重建的弧图像,以供后续处理。

1.2 CCD 空间布置方案

CCD 空间布置方案如图 2 所示。等离子体发生

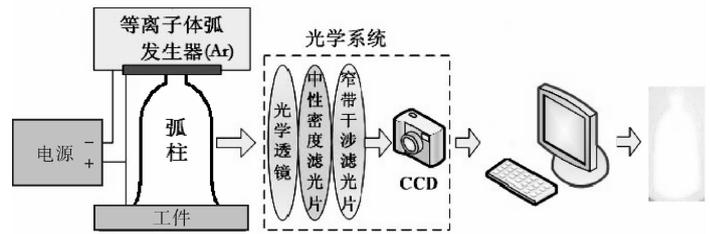


图 1 图像采集系统示意图

器固定在水平旋转工作台上,其周围 360°方向上均匀布置 3 个 CCD 相机,并使 3 个 CCD 的中心处在同一平面,确保等离子体的某一部分在拍摄的每张图像上有相同的高度。图 2 中实拍区的每条射线代表一个拍摄位置,相互间隔为 10°,工作台每次旋转 10°,3 个 CCD 相机同步地进行一次拍摄。由于等离子体弧对称方向观测效果相同,图 2 中对称区域无需拍摄,只需在实拍区的 18 个位置连续拍摄 18 幅图像,即可采集到等离子体弧数字图像的完整信息。

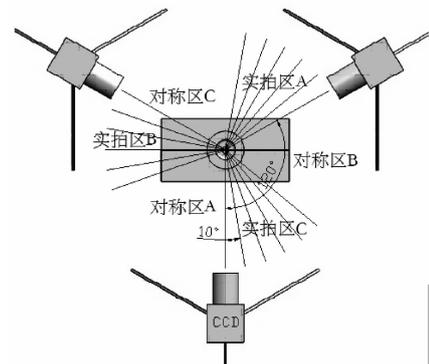


图 2 CCD 空间布置方案

2 图像预处理

在实际测量过程中,由于环境背景噪声的干扰、操作误差以及 CCD 不同像元间对光照响应的不一致^[9]等因素的影响,图像采集系统中由 CCD 采集到的等离子体弧数字图像会存在扰动;同时弧光到达镜头之前经过一段距离的空气和尘埃,也会使弧图像发生无法估量的损失和干扰。除此之外,采集系统的稳定性和效率等都会对等离子体弧数字图像质量产生影响。因此,有必要对采集到的图像进行预处理,以获得良好的视觉场和测量效果。本研究采用 Matlab 对采集到的数字图像进行预处理,预处理内容包括:图像灰度化、灰度直方图均衡化、图像滤波去噪以及灰度等值线提取。

CCD 拍摄的等离子体弧图像如图 3(a)所示,其对应的灰度图像如图 3(b)所示。由图 3(b)可以看出,

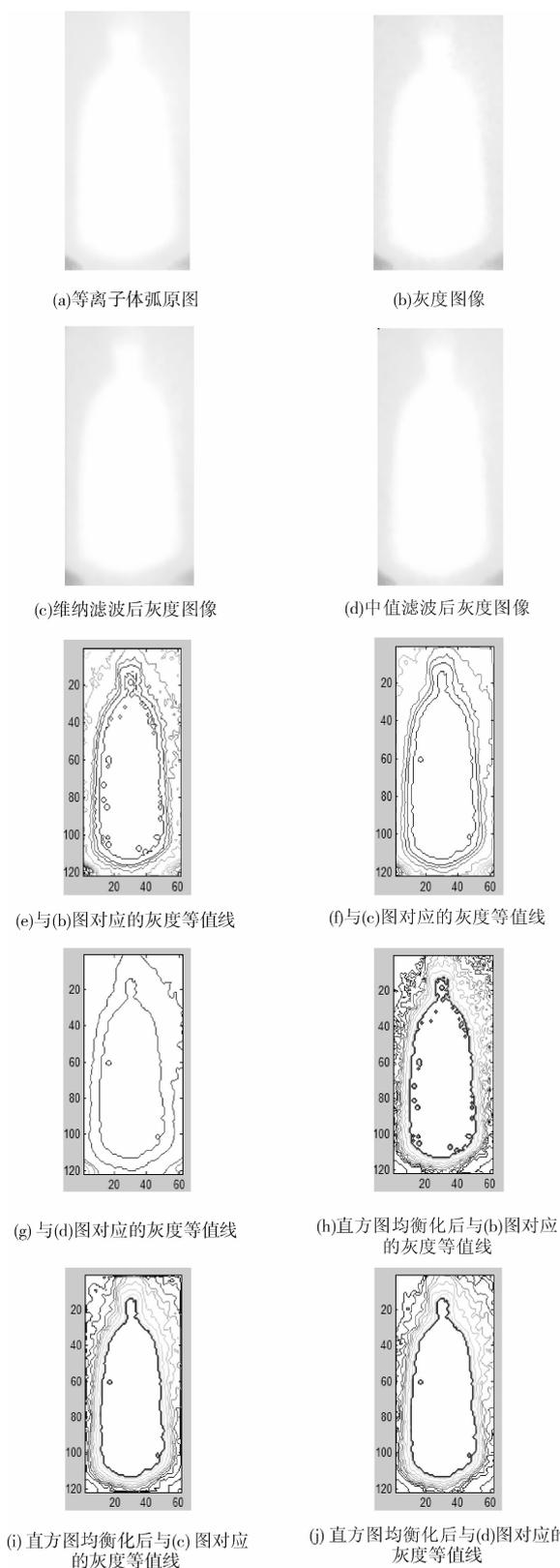


图 3 等离子体弧图像的预处理

由于实验过程中噪声的干扰,采集到的等离子体弧图像直接灰度化后弧柱区与背景的边界很模糊。但经过维纳滤波和中值滤波后,可以明显地看出对比度增强,边界变清晰了,如图 3(c)、3(d)所示。图 3(b)、

3(c)、3(d)对应的灰度等值线图如图 3(e)、3(f)、3(g)所示,图 3(e)清楚地反映出噪声干扰对图像的影响;中值滤波后虽然能使弧边界清晰,但是图像的层次感明显变差,如图 3(g)所示;从图 3(f)可以看出维纳滤波对等离子体弧图像的处理效果较好。直方图均衡化处理后图 3(b)、3(c)、3(d)对应的灰度等值线图如图 3(h)、3(i)、3(j)所示,与图 3(e)、3(f)、3(g)对比后可以发现,经过直方图均衡化处理后图像的层次感变得更强了。

由此可见,通过等离子体弧数字图像的一系列预处理过程,可获得良好的视觉效果,为后续等离子体弧三维轮廓重建提供了更多的细节。

3 等离子体弧形貌三维重建及分析

3.1 重建原理

等离子体弧温度很高,中心温度可达 20 000 K 以上,其辐射亮度已远远超过工业 CCD 相机的接收范围。即使使用多层滤光片组成光学系统进行衰减,CCD 相机拍摄出的图像中心也同样没有亮度梯度,等离子体弧原图如图 3(a)所示。由于多数等离子体加工技术都依赖于其外边缘温度,对于等离子体弧外缘温度场的研究也具有实际意义。等离子体辐射图像的亮度值与辐射体的温度高低有一定对应关系^[10],而图像灰度值与亮度值也有确定的对应关系,因此基于灰度值的等离子体弧三维形貌重建在一定程度上反映了等离子体弧外缘温度场的分布状态。

3.2 重建方法

等离子体弧的 30 层灰度等值线如图 4 所示。由图 4 可见:内 6 层等值线收敛,从第 7 层开始发散,这是由于从第 7 层开始已不属于等离子体弧本身,其表现出来的温度为等离子体向外辐射的热量所致。所以本研究取内 6 层等值线进行数值模拟,基于立体匹配^[11]与三维插值原理^[12]建立起与温度相关的形貌重构模型。

具体重建方法如图 4 所示。第 80 行直线与最内层灰度值为 255 的等值线有两个交点 A、B,利用 Photoshop 可知 A、B 两点像素坐标,结合定标因子计算出这两点的实际坐标值,那么从 18 幅图像中可读出 36 个点的坐标值。通过上述 36 个坐标值即可绘制出第 80 行灰度值为 255 的截面形状(如图 5 所示)。图 5 中,A'、B'为图 4 中 A、B 的对应点,C'、D'为与图 4 拍摄点相邻位置拍摄的图像的第 80 行直线与最内层灰度值为 255 的等值线的两个交点的对应点。直线 A'B'与

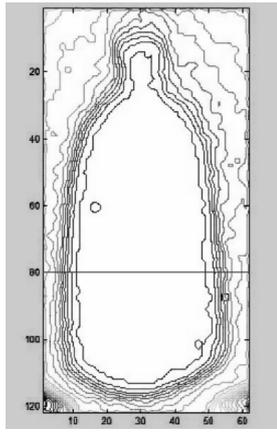


图 4 等离子体弧的灰度等值线

$C'D'$ 相交成 10° ,与相邻拍摄位置角度相同,这也验证了实验过程的准确性。以此类推,第 80 行其他 5 个灰度值的截面形状也可绘出,然后本研究将每一行的截面图像以插值的方式重构,最终得出真实的等离子体弧表层形貌三维重构模型。

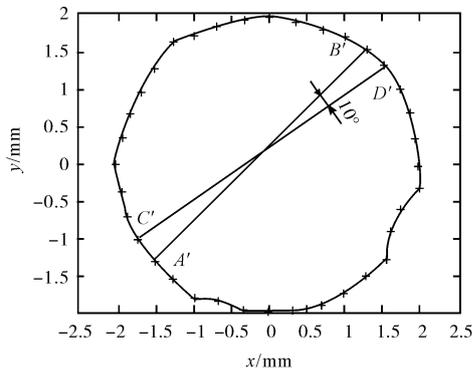


图 5 第 80 行灰度值为 255 的截面形状

3.3 结果分析

本研究在已搭建的图像采集装置上进行等离子体弧的采集工作,获得 18 幅不同角度的弧图像,经过图像预处理、坐标值计算后重构出等离子体弧的三维形貌,重建结果如图 6 所示。

与以往研究相比,本研究侧重于对真实的、非对称的等离子体弧的研究,所以已有经验与算法没有太多参考价值,必须提出一种新的、适用于非对称等离子体温度场的重建算法,即研究等离子体弧图像中灰度值与温度的对应关系,通过灰度值重建温度场。从这一理念着手,本研究基于灰度值对非对称等离子体弧形貌进行三维重构,重构结果与温度场的定性分布存在对应关系。根据 3.1 节中的原理分析可知,由里到外的 6 层温度值呈依次递减趋势。另外,最内层里面是大片的空白区,并没有可见梯度,这是由于等离子体弧中心温度太高,即使使用光学衰减系统,其辐射亮度依

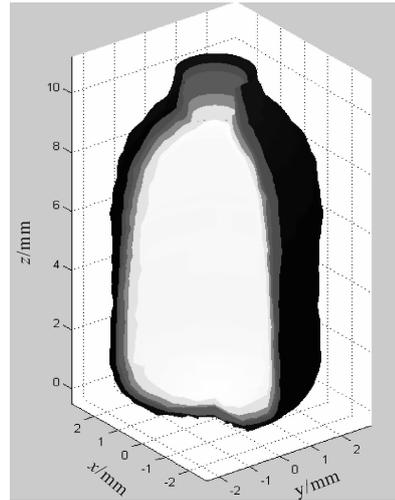


图 6 等离子体弧形貌三维重建结果

然远远超出现有 CCD 相机的接收范围。由图 6 可知,该重构图像无论是轴向还是径向都是非对称的,与以往研究中计算出的径向对称的等离子体温度场分布有本质区别,符合等离子体弧的实际形状,较好地反映了其真实的工作状态。

4 结束语

本研究采用基于灰度值的数值模拟方法重建出加工用非对称等离子体弧三维形貌。主要结论如下:

- (1) 图像采集系统的设计能够快速采集到各方向处于加工状态中的等离子体弧图像;
- (2) 从模拟结果可知,该方法成功还原出等离子体弧的真实形状,实现了加工状态非对称等离子体弧形貌的非接触测量;
- (3) 模拟结果定性地表达了等离子体弧的温度场分布情况,对于非对称等离子体弧温度场的定量分析具有一定的理论和实验指导意义。

参考文献 (References):

[1] 赵家瑞,赵菁,孙栋,等. 图像处理法快速诊断电弧等离子体的研究[J]. 计量学报, 1988, 9(4):267-274.

[2] 蒋文波,唐晓春. CCD 数字图像处理电弧温度场测量系统的研究[J]. 光电技术应用, 2007, 22(1):41-43.

[3] 张杨,金星,王广宇,等. 基于激光等离子体实验数据重建三维温度场的方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(1):150-109.

[4] YUICHI Y, KATSUYUKI M, SHUN-ICHI H, et al. A new numerical method for asymmetrical abel inversion [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1981, 9(1): 18-21.

(下转第 776 页)

理后得到的电磁阀线圈电流变化曲线如图 5 所示。

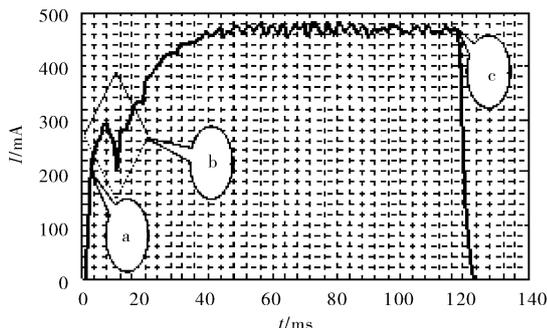


图 5 电磁阀线圈电流变化曲线图

为分析出电磁阀打开的时间点,本研究向电磁阀线圈两端连接可调稳压电源,当直流电压加到 5.20 V 时,才听到阀体动作的声音。因此,可以由图 5 分析得出电磁阀线圈电流的具体变化情况。图 5 中,a 处表示电磁阀阀芯打开点,大概需要 1.6 ms 的时间,此时电流约为 200 mA。b 处电流变化比较大,一开始电流继续上升,但斜率比之前要小,这是因为高压部分撤离,但高压没有完全消失,较弱的高压和低压使电流以较小的斜率继续上升;当高压完全消失的时候,电流就转为下降,这就是 b 段中间部分变化的原因;当电流下降后,因为低压的一直存在,所以最后部分在低压驱动下电流又开始上升,直到到达保持电流。c 处是电磁阀关闭点,虽然此时电压已经切断,但电流不能马上降为零,故电磁阀阀芯真正被关断也有一定的延时。

5 结束语

本研究设计了喷气织机电磁阀的高速驱动控制系统,并对电磁阀线圈电流进行了检测。用微处理器作核心控制,以 CPLD 扩展输出口线,设计了高、低压复合的高速驱动电路。本研究在驱动回路串联精密小电

阻,以检测电磁阀线圈电流。织机运行时,通过适时打开与关闭电磁阀,以得到电流变化数据。

试验结果表明,电磁阀电流曲线变化情况与实际相符,阀工作性能优良,高压开启、低压保持的驱动电路能实现喷气织机电磁阀的快速开闭,整个控制电路符合织机系统稳定、高效的设计要求。

本研究通过控制与检测两方面的结合,有利于提高和改善电磁阀响应性能,确保了织机引纬的稳定和高速,可为喷气织机国产化程度的提升提供参考。

参考文献 (References) :

[1] 孙燕华,孙信松. 喷气织机喷嘴控制电磁阀性能测试仪的研究[J]. 上海纺织科技,2010,38(12):57-59.

[2] 宋 军,李书泽,李孝禄,等. 高速电磁阀驱动电路设计及试验分析[J]. 汽车工程,2005,27(5):546-549.

[3] VAUGHAN N D, GAMBLE J B. Modelling and simulation of a proportional solenoid valve[J]. **American Society of Mechanical Engineers**, 2002(25):30-34.

[4] 叶洪伟,王 涛,金 鑫. 高速电磁阀驱动控制策略的研究[J]. 电工电气,2011(7):18-20.

[5] 张鸣芸,张伯珩,边川平,等. 基于单片机和 CPLD 的控制系统的设计[J]. 科学技术与工程,2007,17(7):4508-4511.

[6] 严鹤群,戴继光. 喷气织机原理与使用[M]. 2 版. 北京:中国纺织出版社,2006.

[7] SMITH M J S. On the circuit analysis of the Schmitt trigger [J]. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, 1988,23(1):292-294.

[8] 姚茂群,沈继忠,朱志刚. 单稳态触发器的结构及其开关级设计原理[J]. 电路与系统学报,2005,10(6):85-87.

[9] HARIRAK A, SANGWONGWANICH S. A novel source - current detection type active filter equivalent to load - current detection type[J]. **IEEE Industry Application**, 2005(2):1205-1212.

[10] 李 伟. 基于 STC89C58RD + 的电磁阀检测系统设计 [D]. 武汉:武汉科技大学信息科学与工程学院,2010.

[编辑:张 翔]

(上接第 753 页)

[5] 张 琳,冯红艳,吴 蓉,等. 瞬态小尺寸等离子体的判断及光谱表征[J]. 兵工学报,2009,30(11):1435-1439.

[6] GAO Yi-qing, YU Qiu-xiang, JIANG Wen-bo , et al. Reconstruction of three-dimensional arc-plasma temperature fields by orthographic and double-wave spectral tomography [J]. **Optics & Laser Technology**, 2010, 42:61-69.

[7] 李志钢. 等离子体弧图像采集及温度场诊断研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2007.

[8] SUN Jing, XU Wen-ji, WANG Chun-yan. Characteristic analysis of plasma arc adjusted by a magnetic field [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2011,44-47:1812-1816.

[9] 张丕壮,路宏年. 面阵 CCD 微光像传感器图像的校正[J]. 兵工学报,2000,21(4):361-363.

[10] 李汉舟,张敏贵,潘 泉,等. 基于面阵 CCD 图像的温度测量研究[J]. 仪器仪表学报,2003,24(6):654-655.

[11] 汪 伟,卢科青,王 文. 基于坐标测量机的轴向立体视觉测量方法研究[J]. 机电工程,2010,27(11):17-20.

[12] ZHOU Xue-li, WAN Wang-gen, ZHOU Zheng-hua, et al. A novel interpolation algorithm for 3D reconstruction of medical images [J]. **IEEE Audio Language and Image Processing (ICALIP)**, 2010(23-25):797-801.

[编辑:罗向阳]