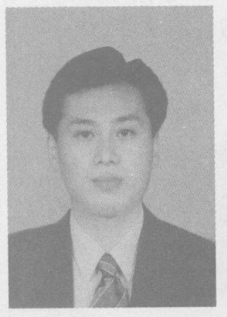


熔池图像质心算法的焊缝位置测量模型

高向东， 度坤， 宋要武， 赵传敏
(广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006)



高向东

摘 要: 建立了一种基于熔池图像质心的焊缝位置测量模型, 通过视觉传感器获取焊接区熔池图像, 选择熔池前端为处理区域, 对该区域进行中值滤波与图像灰度变换, 并计算该区域的熔池图像质心值及相对应的焊缝偏差。在不同的焊接条件下, 获取多组熔池图像及对应的样本数据, 应用最小二乘法建立熔池图像质心与焊缝偏差之间的关系, 得到基于熔池图像质心的焊缝位置测量数学表达式。在此基础上, 通过分析比较各数学表达式之间的关系, 建立焊缝位置测量数学模型。计算机仿真及焊接工艺试验结果表明, 该模型可有效地检测焊缝位置。
关键词: 熔池图像质心; 焊缝位置; 测量模型
中图分类号: TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2007)03-001-04

0 序 言

自动焊接是一种非常重要的金属连接工艺, 保证焊接质量的前提是控制系统需要准确地获取焊缝位置信息。随着 CCD(charge coupled device)硬件技术和图像处理等技术的发展, 视觉传感法成为很有发展前途的焊缝检测方法, 但目前大都是根据图像边缘检测法来获得焊缝位置信息^[1, 2]。这种方法一般要求焊缝与其周围有较大的灰度层次差别, 而实际焊接过程中, 受强烈弧光影响, 很难直接获取较清晰的焊缝图像, 因此严重制约了视觉传感法的应用推广。为此, 提出通过熔池图像质心获得焊缝位置的方法^[3], 不同于传统方法仅分析焊缝边缘信息, 图像质心方法分析熔池图像区域并提取图像质心作为变量, 通过分析图像质心特征来间接获取焊缝位置信息。从图像处理技术角度而言, 获取图像质心要比直接获取焊缝位置容易得多, 所以该方法为焊缝位置的测量提供了一条新的途径。为提高焊缝识别精度和可靠性, 进一步研究图像质心算法特性, 建立一种实用的、运算量较低的图像质心与焊缝位置关系理论模型, 并从试验上加以验证。

1 试验方法

1.1 试验装置

试验装置采用气体保护钨极电弧焊 GTAW(gas tungsten arc welding), 包括 CCD 视觉传感器、图像采集系统、运动控制系统、工业控制计算机等, 系统结构如图 1 所示。工控机通过控制电机转动, 并经过滚珠丝杠传动机构实现工作台在(x, y)两个方向上运动控制。CCD 传感器在焊接过程中实时采集焊接图像, 为减少弧光干扰, 在 CCD 前端装有滤光装置, 利用电弧和熔池自身的光谱辐射, 通过选择特定的辐射频域, 获取焊接熔池图像。

收稿日期: 2006-11-08
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60375012); 广东省自然科学基金资助项目 (020176, 6021444)

图 1 焊接试验装置示意图

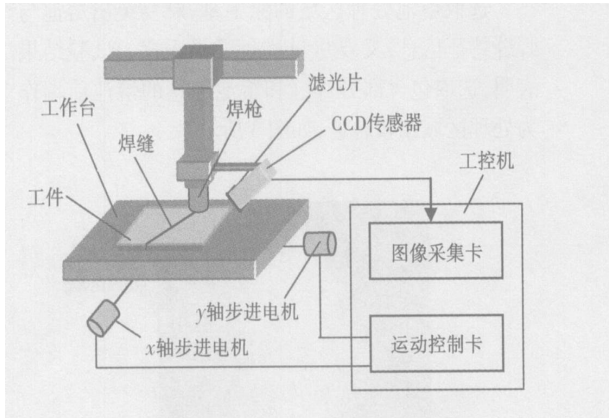


图 1 焊接试验装置示意图
Fig. 1 Configuration of experiment equipment

1.2 熔池图像的获取

在焊接过程中, 电弧的辐射强度远远超过了熔池自身的辐射强度, 如不采取适当的措施, 熔池信息会被弧光淹没。如果只简单地采用普通中性减光法, 则在抑制弧光的同时, 也大大降低了熔池图像的对比度, 甚至无法分辨熔池的细节信息。利用光谱

分析仪测定电弧光在 200 ~ 1100 nm 区间的光谱分布, 结果表明 602 ~ 697 nm 区域和 922 nm 以上的近红外区域是较为理想的取像区域^[4]。试验系统采用中心波长为 650 nm 的窄带滤光系统获得了较为理想的熔池图像, 如图 2 所示。图 2a 为采用普通中性减光法的图像, 熔池及周围信息基本上被弧光淹没。图 2b 为采用窄带滤光系统获得的图像, 熔池及周围区域特征十分突出。

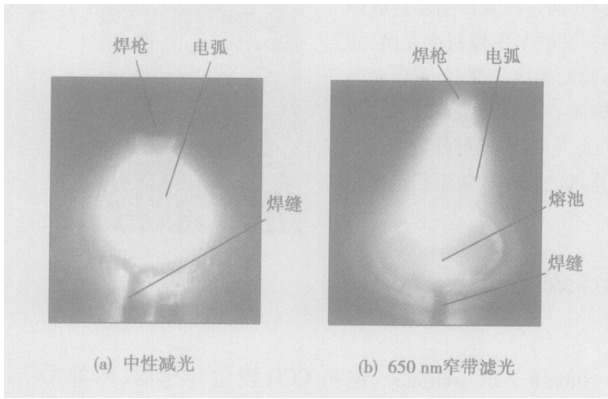


图 2 不同滤光方法的熔池图像

Fig. 2 Pool images with different filtering methods

2 熔池处理区域选取及图像质心计算

2.1 熔池处理区域选取及图像预处理

选取熔池处理区域的原则是, 既要突出熔池与焊缝特征信息, 又要尽量避免弧光干扰。试验结果表明, 选取包含部分焊缝和熔池信息的熔池前端作为处理区域比较合适, 如图 3 所示。

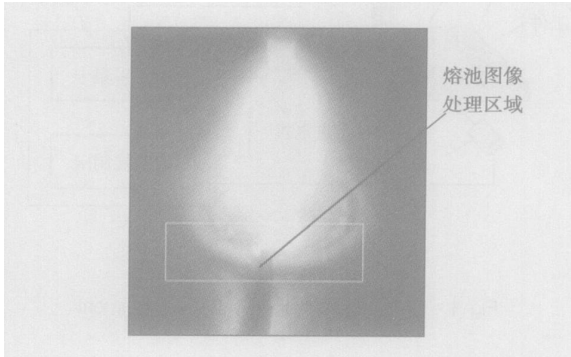


图 3 熔池图像处理区域示意图

Fig. 3 Processed region of weld pool image

为减小噪声干扰, 对所选取的图像区域进行了中值滤波和图像灰度变换等预处理, 加大图像的动态范围, 以增强熔池与焊缝的对比度。

2.2 熔池图像质心计算

熔池图像质心即熔池灰度图像的重心, 设 i, j 为图像的两个方向, M, N 分别为 i, j 方向像素的数量, $g(i, j)$ 为像素点 (i, j) 处的灰度值, 则图像质心在 X 方向的位置坐标^[3] 为

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g(i, j) \times i}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n g(i, j)}, \tag{1}$$

式中: X 为图像质心坐标。

图像质心反映了焊缝相对于电弧的偏差情况。当电弧对准焊缝时, 熔池图像的灰度是对称分布的, 此时熔池质心对应中心值; 当电弧偏离焊缝时, 熔池图像的灰度分布将不再对称, 此时熔池质心将偏离中心值。所以只要建立图像质心与焊缝位置之间的定量关系, 就可通过熔池图像质心来间接计算出焊缝相对于电弧的偏差(焊缝偏差)情况。

3 回归模型建立及显著性分析

3.1 试验数据的获取

试验条件见表 1, 焊枪起始位置与焊缝基本对中, 逐渐沿着 x 方向上偏离焊缝, 在不同焊接电流条件下各采样 500 幅图像。图 4 给出了焊接电流 80 A 时的图像质心值, 图 5 为对应的电弧与焊缝中心的偏差值。

表 1 焊接试验条件
Table 1 Welding experimental conditions

焊件 Q235 mm×mm ×mm	氩气流量 $q/(L \cdot \min^{-1})$	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	采样周期 T/ms	像素当量 $C/$ (mm·pixel ⁻¹)
200×150×2	9	80	1.813	40	0.033

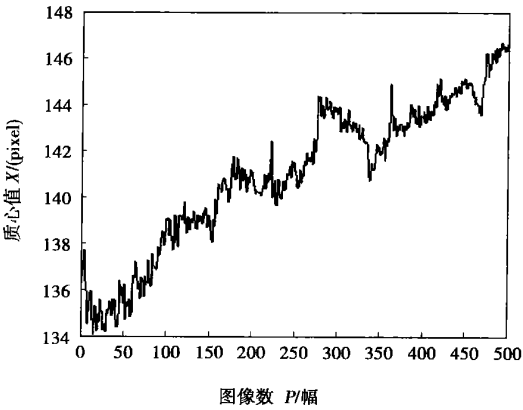


图 4 焊接电流为 80 A 时的图像质心值

Fig. 4 Pool image centroid values with welding current 80 A

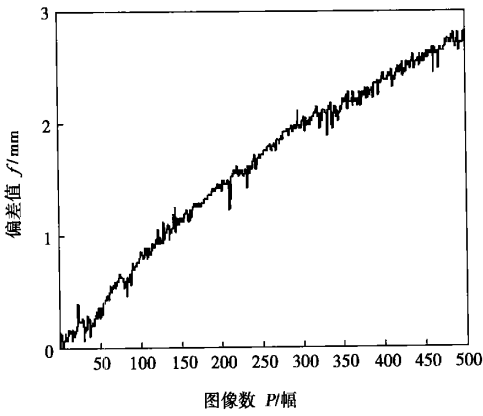


图 5 焊接电流为 80 A 时的焊缝偏差
Fig. 5 Seam deviations with welding current 80 A

从试验结果可以看出, 随着焊缝偏差的增大, 熔池图像质心值也呈现一种递增的趋势, 所以两者之间必然存在某种对应的关系。

3.2 焊缝偏差回归模型的建立

根据采样图像计算出每幅图像的质心值与焊缝偏差值, 并对 500 对数据进行最小二乘法曲线拟合, 得出每一工艺条件的焊缝偏差回归数学表达式。

最小二乘法是根据采样得到的数据点坐标 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, N)$, 选取线性无关的函数族 $(1, x, \dots, x^n)$, 寻找一个函数

$$\rho(x) = a_0 \times 1 + a_1 \times x + \dots + a_n \times x^n. \quad (2)$$

使得 $\sum_{i=1}^N \omega(x_i) [y_i - \rho(x_i)]^2$ 达到最小^[3], 其中 $\omega(x_i)$ 为权系数, 可取 $\omega(x_i)$ 始终为 1; x_i, y_i 分别为熔池图像的质心偏差值 (每幅熔池图像质心与起始熔池图像质心之差) 及其相应的电弧与焊缝的偏差值。从而得到焊缝位置的数学表达式为

$$f(x) = 0.238x + 0.534, \quad (3)$$

式中: x 为熔池质心偏差值; $f(x)$ 为焊缝偏差值。图 6 为拟合的结果, 横坐标为熔池图像质心偏差, 纵坐标为焊缝偏差值。

为验证所建回归模型的通用性, 进行了电流为 70 A 条件下的焊接试验, 采用相同的分析方法, 所得焊缝位置数学表达式及其拟合曲线分别如式(4)与图 7 所示。

$$f(x) = 0.196x + 0.412. \quad (4)$$

在考虑相同起始位置的情况下, 式(3)与式(4)的常数项可以忽略不计, 两式分别可写为

$$f(x) = 0.238x, \quad I = 80 \text{ A}. \quad (5)$$

$$f(x) = 0.196x, \quad I = 70 \text{ A}. \quad (6)$$

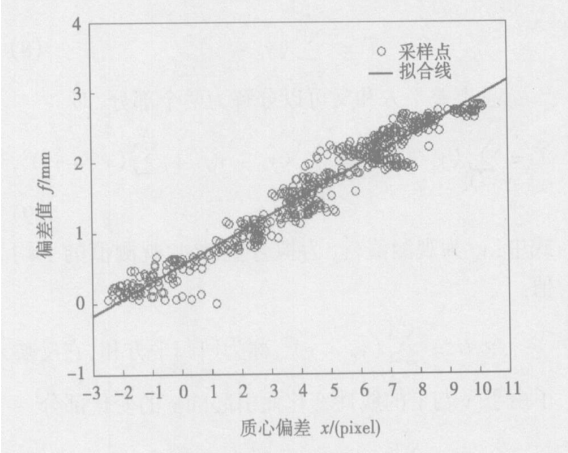


图 6 焊接电流为 80 A 时的拟合曲线
Fig. 6 Regressive curve with welding current 80 A

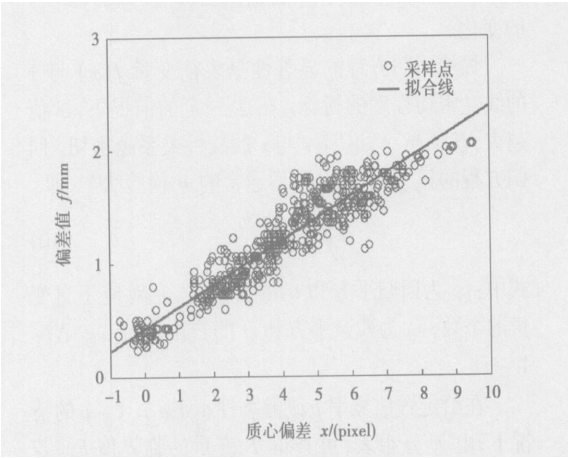


图 7 焊接电流为 70 A 时的拟合曲线
Fig. 7 Regressive curve with welding current 70 A

在实际焊接中, 焊缝偏差值的变化通常不会太大, 质心值的相应变化范围大致为 $[-1\text{pixel}, 1\text{pixel}]$, 此时式(5)与式(6)相差较小, 相差范围为 $[-0.042 \text{ mm}, 0.042 \text{ mm}]$ 。为此, 可取式(5)与式(6)一次项系数的平均值, 得到焊缝位置回归模型为

$$f(x) = 0.217x + \epsilon, \quad (7)$$

式中: ϵ 为焊缝偏差初始值。事实上, 应用式(7)又分别对焊接电流 73 A 和 75 A 的情况下进行了试验和分析, 结果表明该模型具有一定的代表性。

3.3 回归模型的显著性检验

观测值 y_1, y_2, \dots, y_N 之间的变化, 一般有两个方面引起, 自变量 x 取值的变化, 试验误差等因素的影响。为了对回归模型方程进行检验, 必须把它们各自所引起的变化从 y , 即 $f(x)$ 的总变化中分离开来。 N 个观测值之间的变化, 可以使用观测值与它们的算术平均值 \bar{y} 的差平方和表示, 称为总离差平方和^[6], 即

$$T = \sum_{c=1}^N (y_c - \bar{y})^2. \tag{8}$$

总离差平方和又可以分解为两个部分,即

$$T = \sum_{c=1}^N (y_c - \bar{y})^2 = \sum_{c=1}^N (\hat{y}_c - \bar{y})^2 + \sum_{c=1}^N (y_c - \hat{y}_c)^2, \tag{9}$$

式中: y_c 为观测值; \hat{y}_c 为拟合值; \bar{y} 为观测值的平均值。

令 $U = \sum_{c=1}^N (\hat{y}_c - \bar{y})^2$, 称为回归平方和, 它反映了由于 x 与 y 的线性变化而引起的 y 的变化部分。

令 $Q = \sum_{c=1}^N (y_c - \hat{y}_c)^2$, 称为残余平方和, 是所有观测点距离回归曲线的残余误差平方和。它是除了 x 以外的其它一些因素(包括试验误差)而引起的 y 的变化。

焊缝回归方程的显著性是表征变量 $f(x)$ 与 x 的线性密切程度的指标。在 T 一定的前提下, U 值越大, Q 值越小, 说明 y 与 x 的线性关系越密切。回归方程的显著性检测, 采用通常的 F 检验法^[6], 即

$$F = \frac{U/v_U}{Q/v_Q}, \tag{10}$$

式中: v_U 为回归平方和 U 的自由度, 它对应于自变量的个数; v_Q 为残余平方和 Q 的自由度, $v_Q = N - 1 - v_U$ 。

在给定置信概率 p 或显著性水平 $\alpha = 1 - p$ 的情况下, 由 F 分布表, 可查得 F 变量的临界值 F_α 。若 $F > F_\alpha$, 则认为该回归效果是显著的; 反之, 则不显著。焊缝回归模型取置信概率为 99%, 即 $\alpha = 0.01$, 所得结果如表 2 所示。表中的方差用来衡量所有随机因素对 $f(x)$ 的一次性观测的平均变差的大小, 作为应用回归方程的精度参数。

表 2 回归方程显著性检验

Table 2 Significance test of regression equations					
偏离来源	平方和	自由度	方差	F	$F_{0.01}$
回归	312.026	1	0.039	8078.03	6.64
残余	19.236	498			
总和	331.262	499			
			显著		

由表 2 可以看出, 在取显著性 $\alpha = 0.01$ 的情况下, 焊缝回归模型方程可通过检验, 故所建立的回归模型是有意义的。

4 结 论

(1) 焊缝位置或焊缝与电弧的偏差与熔池图像质心值有直接的关系。选取包含焊缝信息特征的熔池图像前端为处理区域, 计算图像质心值并作为焊缝位置检测的变量。通过图像质心偏差来获取焊缝偏差的方法克服了在强烈弧光下直接提取焊缝位置的困难。

(2) 根据熔池图像质心偏差和焊缝偏差试验样本数据, 利用最小二乘法建立了焊缝位置回归模型, 并验证了其通用性。通过回归分析表明, 所建模型具有较好的显著性, 且计算量小, 具有一定的实用性, 可用于 GTAW 自动控制过程的焊缝位置测量。

参考文献:

[1] Saeed G, Lou M, Zhang Y M. Computation of 3D weld pool surface from the slope field and point tracking of laser beams[J]. Measurement Science Technology, 2004(15): 389—403.

[2] Bae K Y, Lee T H, Ahn K C. An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120: 458—465.

[3] Gao X D, Na S J. Detection of weld position and seam tracking based on Kalman filtering of weld pool images[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2005, 24(1): 1—12.

[4] 闫志鸿, 张广军, 邱美珍, 等. 脉冲熔化极气体保护焊熔池图像的检测与处理[J]. 焊接学报, 2005, 26(2): 37—40.

[5] 李 红. 数值分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.

[6] 王武义. 误差原理与数据处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.

作者简介: 高向东, 男, 1963 年出生, 博士, 教授。主要从事机器视觉和自动控制等研究工作, 发表论文 50 余篇。

Email: gaoxd666@126.com

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Weld position measuring model based upon weld pool image centroid arithmetic

GAO Xianglong, DING Duku, SONG Yaowu, ZHAO Chuanmin (Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China). p1—4

Abstract A weld position measuring model based on the weld pool image centroid was studied. During the welding process the weld pool images were acquired by a vision sensor. The fore region of the weld pool was chosen as a processed image area which was processed by the median filter and image gray transformation. Also, the image centroid coordinates corresponding to this processed image area and the seam deviations between the torch and weld could be obtained. Several groups of the weld pool images and the experiment as data including the image centroids and seam deviations were collected in different welding conditions. Then the relationship between the weld pool centroids and the seam deviations was researched by using of the least square regression arithmetic, and the mathematical equations for calculating the weld position by the weld pool centroid were deduced. Finally, by analyzing these mathematical equations a common model was established for measuring the weld position based on the weld pool centroid. The computer simulation and real experiment results showed that the weld position could be effectively detected by this measuring model.

Key words: weld pool image centroid; weld position; measuring model

High-speed soft-switching twin-wire pulsed MAG welding equipment

HUANG Shisheng, JIANG Xiaoming, XUE Jiaxiang, LI Yuanbo, WANG Zhenin (South China University of Technology, Guangzhou 510640, China). p5—8

Abstract: By combining the CAN (controller area network) bus technology, soft-switching technology, pulsed welding technology etc., a compacted, integrative and synergic controlled tandem equipment is designed. Based on analysis of the technology requirements of twin-wire welding, the novel double-closed-loop control mode is introduced in which realizes the dynamic characteristic and external characteristic suitable for double-wire welding. In order to decrease the interference between two arcs, the CAN bus technology is applied in the communication of the twin-wire welding equipment and a synergic control device is designed. Experiments show that all the electric performance meet the design requirements, and the merits of the twin-wire high-speed welding are stable welding process, little splash, perfect weld appearance, high welding speed, little thermal input and small deformation.

Key words: twin-wire welding; double-closed-loop control; controller area network bus; soft-switching; synergic control

Collaborative mode for remote welding robotic system based on computer-supported cooperative work

GAO Sheng^{1,2}, WU Lin² (1. School of Mechanical Science and Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China; 2. National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p9—12

Abstract In a remote welding robotic system, the activity between master site and slave site can be defined as a computer-supported cooperative work (CSCW). A remote welding collaborative model (RWCM) for remote welding is proposed on the basis of Petri nets. Its definition, components design, and concrete implementation are respectively given. Since RWCM can describe the collaborative relationship and mechanism between the master site and the slave site, it can provide valuable reference for the development and realization of system software.

Key words: remote welding; robot; computer supported cooperation work; collaborative mode

Microstructure and fracture properties of carbon/carbon composite and TC4 titanium alloy joints

QIN Youqiong, FENG Jikai, ZHANG Lixia (Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p13—16

Abstract C/C composites and TC4 titanium alloy were joined using AgCu filler metal at brazing temperature of 820-900 °C for 10min. Interface microstructures and fracture surfaces were investigated by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and EDS energy spectrum. The results showed the typical interface microstructure of C/C composite and TC4 brazed joints could be expressed as C/C composite/TiC + C/TiCu/Ag(s, s) + Cu(s, s) + Ti₃Cu₄/Ti₃Cu₄/TiCu/Ti₂Cu/Ti₂Cu + Ti(s, s)/TC4. The shear strength of the brazed joints was 38 MPa at 850 °C for 10min. The analysis of fracture surface showed that the situation of fracture surface was related to the orientation of carbon fiber and brazing temperature. When carbon fiber was parallel to the joining surface, the joints were fractured in the composites. When carbon fiber was vertical to the joining surface, the joints were mainly fractured in the C/C composite/filler metal interface with low brazing temperature. Meanwhile, the joints were fractured in the C/C composite/filler metal interface and filler metal/TC4 interface with high brazing temperature.

Key words: C/C composite; TC4 titanium alloy; brazing; interface; microstructure; fracture property

Microstructure and property of long-time run T91/G102 dissimilar steel welded joint

SONG Xiping¹, ZHANG Bei², ZHANG Dongwen³ (1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083,