

脉冲熔化极气体保护焊熔池的视觉传感与实时控制

陈善本¹, 曹建明², 徐晨明³, 吴 林³

(1. 上海交通大学 焊接研究所, 上海 200030; 2. 中国科学院 电工研究所, 北京 100080;
3. 哈尔滨工业大学 焊接系, 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究对脉冲熔化极气体保护焊(GMAW)熔池过程采用视觉传感与实时控制方法的可行性问题。由于 GMAW 过程的熔滴过渡现象的复杂性, 尝试模拟焊工通过观察熔池变化等因素来调整焊接参数获取满意的焊缝成形的行为。建立了脉冲 GMAW 过程熔池视觉传感系统, 宏观上将熔滴过渡对熔池特征的影响作为黑箱过程处理, 根据脉冲 GMAW 弧光光谱分布和熔池图像特征提取, 实现对脉冲 GMAW 熔池动态过程的实时检测。采用辨识算法建立焊接动态过程的数学模型, 进而设计脉冲 GMAW 熔宽的 PID 控制器, 实现对脉冲 GMAW 熔池宽度的实时控制。试验表明, 建立的视觉传感系统、图像处理算法以及控制器设计检测与控制熔池变化在一定程度上能够满足脉冲 GMAW 焊缝宽度的实时性与精度要求。

关键词: 脉冲熔化极气体保护焊; 熔池动态; 视觉传感; 实时控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2002)04-17-04



陈善本

0 序 言

熔化极气体保护焊(GMAW), 作为一种重要焊接工艺方法由于其较高的生产效率为工程界所重视^[1]。GMAW 过程的熔滴过渡现象的存在, 不仅使焊接电弧行为发生变化, 而且对焊接过程的稳定性, 焊缝成形及熔深等方面产生很大的影响。

近年来, 国内外学者从各方面尝试了多种检测和控制手段, 对脉冲 GMAW 动态过程检测与控制进行研究并取得了一定的成果^[2,3]。就目前对 GMAW 的质量控制而言, 通过精确控制熔滴过渡的方法尚存在本质困难^[1,2-3]。而在焊接实践中, 注意到熟练的焊工主要是通过观察熔池变化等因素来调整焊接参数以获取满意的焊缝成形。因此, 是否可能主要采用视觉传感检测熔池变化, 宏观上暂将熔滴过渡对熔池特征的影响作为黑箱过程处理, 实现对 GMAW 过程的实时控制, 这对人工智能途径用于 GMAW 质量智能控制的方向将是一个有意义的初步尝试。

1 脉冲 GTAW 熔池过程视觉传感和图像处理

收稿日期: 2002-01-14
基金项目: 黑龙江省博士后启动基金资助项目; 焊接国家重点实验室开放课题基金资助项目

1.1 试验系统

脉冲 GMAW 动态过程检测和焊缝成形控制试验系统组成包括焊机、焊接工作台等附属设备。日本 MM-350 焊机, 可以实现一脉一滴稳定的和飞溅极小的脉冲 GMAW 过程。对焊机的电流设定部分进行了改造, 以适应熔池图像信号的检测和控制的需要。系统核心部分为 Celeron300 微机, 试验系统硬件框图如图 1 所示。

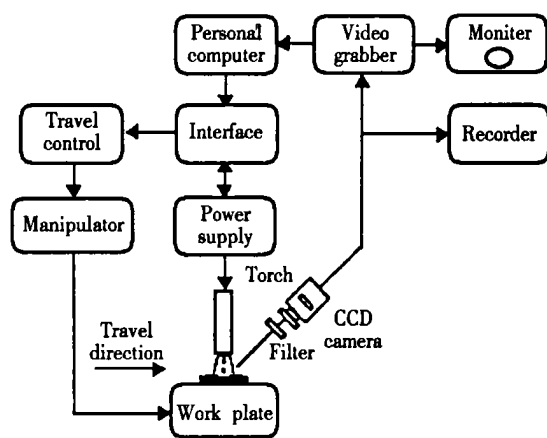


图 1 试验系统结构框图

Fig. 1 Experiment systems block diagram

1.2 基于计算机视觉的图像传感系统组成

该系统主要由成像的光路系统、光信号转变成视频信号的摄像系统以及视频信号的监控和数字化系统等三部分组成。利用电弧和熔池的自身光谱

辐射,通过选择特定的辐射频域,根据光谱分布^{6,7}分析及尝试不同波长滤光片,采用复合滤光技术来解决弧焊区图像易受到弧光的强烈干扰问题。利用电弧光照亮熔池和工件对电弧光的反射成像,实现从单一信号源中获取清晰的熔池图像。

利用所建立的脉冲 GMAW 焊接试验系统及图像采集系统,在低碳钢 Q235 板上进行了堆焊试验。保护气体为 Ar95% + CO₂5%,焊丝材料为 H08Mn2SiA,焊丝直径为 $\phi 1.2$ mm,焊接速度 v_w 为 4 mm/s,喷嘴到工件距离 W_h 为 17 mm,其它焊接条件如表 1 所示。

表 1 脉冲 GMAW 试验条件

Table1 Experiment conditons of pulsed GMAW	
Peak current I_p/A	400
Base current I_b/A	50
Peak time t_p/ms	4
Gas flux $q/(L \cdot min^{-1})$	10
Workpiece size/(mm $\times$ mm $\times$ mm)	220 $\times$ 100 $\times$ 4.5

图 2 为脉冲基值期间得到的熔池正面图像。其中 I_{av} 为焊接的平均电流。从图像上看,电弧在熔池中前部受到抑制,熔池液态金属及熔池后方已凝固,焊道与图像其它部分有较高的对比度,这些均有利于提取熔池宽度。

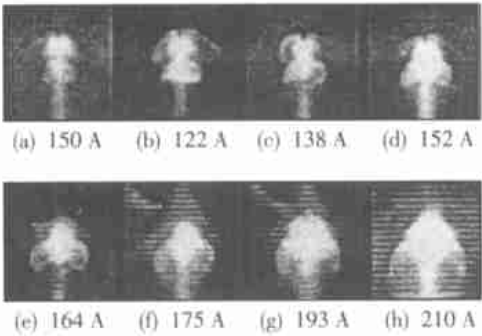


图 2 不同 I_{av} 时脉冲基值期间熔池图像

Fig. 2 Different weld current I_{av} pool images during pulsed base period

1.3 熔池图像的处理及熔宽的提取

1.3.1 取像时刻与电流脉冲时序关系分析

周知,普通 CCD 采用标准的视频信号传输,即帧传输方式,一帧图像由取像间隔时间 20 ms 的两场图像组成。脉冲 GMAW 过程是一个周期很短的动态过程,一般周期小于 25 ms。这样从 CCD 传输回来的一帧图像可能是由不同周期内的两场图像组成,所以在脉冲 GMAW 过程中要对图像帧场分解,从两场图像中选取为基值图像的一场进行分析处理。用该

方法存在两个问题:(1)保证在摄取的一帧图像中至少有一场为基值图像;(2)获取图像与焊接过程存在的时滞要满足焊接过程闭环实时控制的要求。

设电流的脉冲周期为 t ,其中峰值时间为 t_p ,基值时间为 t_b ,CCD 摄像机摄取一帧图像耗时为 $2t_s$,视频图像采集卡可以实时传递图像,要保证每帧图像中包含基值图像,则只需考虑第一场图像为峰值时确保第二场图像为基值,即取像时刻为峰值时保证第二场落在电流基值区。图 3 所示为取像时刻分别为脉冲峰值上升沿和下降沿时保证第二场为基值时的极限情况。与图 3 对应,并结合焊机特点,则摄取的一帧图像中至少包括一场基值图像满足的不等式组为

$$\begin{cases} m(t_p + t_b) + t_p < t_s, \\ (m + 1)(t_p + t_b) - t_p > t_s, \end{cases} \tag{1}$$

式中: $m \in N$, N 为自然数。

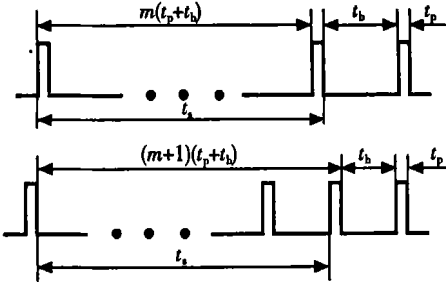


图 3 CCD 与脉冲电流同步示意图

Fig. 3 Synchronization of CCD taking image and pulsed current

只要适当选择脉冲周期参数 t_p 和 t_b ,使其满足不等式组(1)即可保证一帧图像中至少有一场基值图像。而且场图像可以有效地去除帧图像中的干扰和模糊等现象,提高基值图像清晰度。

1.3.2 熔池图像预处理及熔宽提取

根据上述原理,开发了一套熔池图像处理算法。

(1)图像的分解。由图像卡捕捉的每帧图像是由 t 时刻和 $t + 20$ ms 时刻的奇数场和偶数场两场图像交叉显示的合成图像,如图 4 所示,帧场分离后的灰度图像如图 5 所示。

(2)图像的平滑和边缘增强。

(3)图像边缘提取及分割。针对图像边缘变化剧烈的特点,采用类 Sobel 算子提取图像边缘,结果如图 6a 所示。对图像二值化处理并细化处理结果如图 6b 所示。

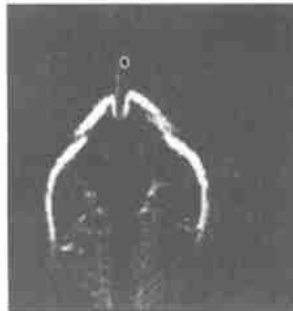
(4)熔宽的确定。将上述得到的不同扫描线上熔宽数据用最小二乘法拟合出熔宽变化曲线,根据



图 4 原始弧焊区图像
Fig. 4 Original welding region image



图 5 帧场分解后的图像
Fig. 5 Image decomposed by frame and field



(a) Edge image picked-up by sobel operator



(b) Edge image by binaryzation

图 6 熔池图像处理结果

Fig. 6 Weld pool image processing results

2 脉冲 GMAW 熔池动态模型与控制器设计

2.1 基于正面熔宽对焊接电流阶跃响应的辨识数学模型

根据焊接过程阶跃响应, 利用 Matlab 开发了面积法辨识程序, 获得了熔宽对于脉冲电流 (电压) 响应过程的传递函数, 即

$$G(s)=4.296\times\frac{1.0}{0.070\ 3s^2+0.880\ 26s+1.0}。 \quad (2)$$

从图7中可以看出辨识所得传递函数的阶跃响

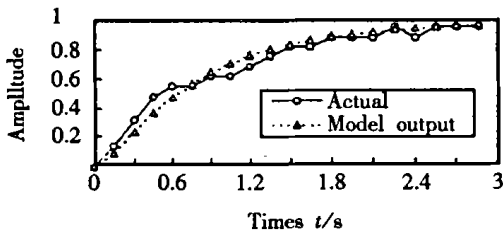


图 7 辨识模型的阶跃响应和原始阶跃曲线的对比

Fig. 7 Comparing identified model step-response with original experiment response

应过程基本上和实际过程吻合。

2.2 基于辨识模型的熔宽 PID 控制器设计

根据所建立的传递函数式 (2), 设计了改进后的增量型 PID 算法如下

$$u(k)=K_p\left\{e(k)+\frac{t}{t_i}\left[-\frac{e(0)+e(k)}{2}+\sum_{i=0}^K e(k)\right]+\frac{t_d}{t}\left[e(k)-e(k-1)\right]\right\}, \quad (3)$$

式中: K_p 为比例系数; t_i 为积分时间常数; t_d 为微分时间常数; t 为采样周期。

3 控制系统试验结果

文中以焊接电流为控制量, 以正面熔宽为被控制量进行了脉冲 GMAW 过程熔宽闭环系统实时控制试验, 试验条件与表 1 相同。

3.1 熔宽控制开环试验

文中采用图 8 的变板厚工件进行堆焊试验。试件中部板厚由 4.5 mm 变为 3.5 mm, 模拟试件散热条件在中间部分发生突变。

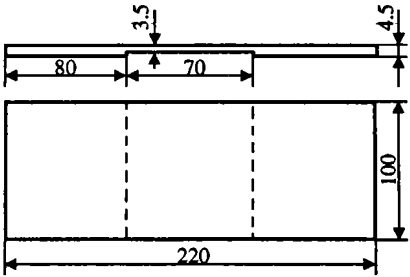


图 8 变板厚工件示意图

Fig. 8 Varying thick work piece sketch map

图 9 为采用恒规范焊接时正面熔宽变化曲线, 焊接过程进行到中间部分时熔宽明显增大。

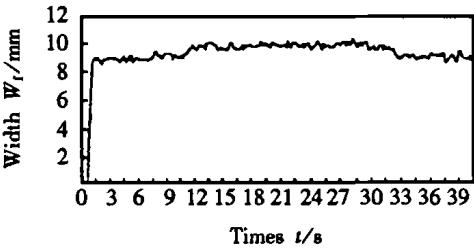


图 9 开环恒焊接规范熔宽曲线

Fig. 9 Weld bead width response of open-loop with constant weld current

3.2 熔宽 PID 闭环实时控制试验

图 10 为采用作者设计的 PID 控制的控制曲线, 给定期望熔宽值为 9.0 mm, 控制参数 $K_p=1.499$, $t_i=0.739$, $t_d=0.013\ 6$, 采用的控制周期为 150 ms。从图中可以看出, 焊接电压 (电流) 在散热条件差的中间部分降低, 减少热输入, 实际熔宽围绕给定值上下波动。而实际熔宽基本维持在给定值周围, 最大

误差为 0.42 mm, 平均误差为 0.16 mm。在变散热刚开始阶段, 由于系统有时滞存在, 所以在图 10b 中变散热开始和结束阶段熔宽有短暂的增大和减小的过程, 在其它阶段平稳运行, 波动较小。图 11 为对应的焊接实物照片。从 PID 熔宽控制试

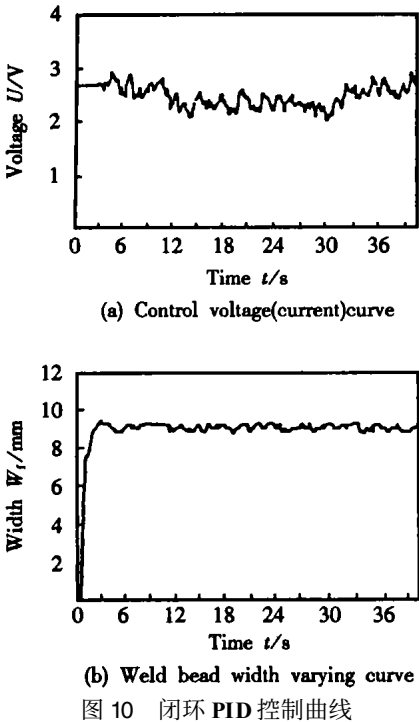


图 10 闭环 PID 控制曲线

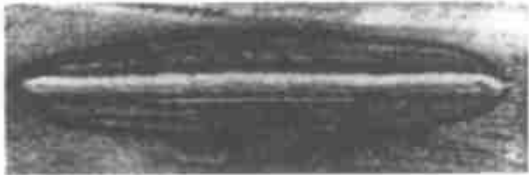


图 11 闭环 PID 控制变板厚工件照片

Fig. 11 Varying thick work-piece photo under closed-loop PID control of pulsed GMAW

验结果可以看出, 只要选择合适的参数, PID 控制器可以在一定范围满足要求, 起到恒定熔宽的作用。

4 结 论

(1)控制试验表明, 在不微观考虑熔滴过渡的情况下, 采用视觉传感熔池图像与闭环控制焊接电流的途径可以在一定程度上控制脉冲 GMAW 焊缝成形一致。

(2)作者对于脉冲 GMAW 过程质量控制研究仅是初步的工作, 因此对 GMAW 过程熔滴过渡等复杂不确定性因素影响的高级智能控制方法的研究尚在进行中。

参考文献:

[1] Harry, Sadler. A look at the fundamentals of gas metal arc welding [J]. Welding Journal, 1999, 78(5): 45 ~ 47.

[2] Chen W, Chin B A. Monitoring joint penetration using infrared sensing techniques [J]. Welding Journal, 1993, 69(4): 181s ~ 185s.

[3] Oslima K, Morita M. Observation and digital control of molten pool in pulsed MIG welding [J]. Welding International, 1988, 2(3): 234 ~ 240.

[4] 陈 强, 潘际銮, 吴志强. CCD 图像传感器对焊缝背面横向温度场的实时检测[J]. 清华大学学报, 1990, 30(2): 45 ~ 53.

[5] 王克争, 大岛健司. MIG 焊接熔池的图像处理和数字控制系统 [J]. 清华大学学报, 1990, 10(4): 22 ~ 29.

[6] 李鹏九. 焊接过程弧光传感的应用基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997.

[7] 宋永伦, 李俊岳. 弧焊区图像信息的光谱传感技术[J]. 焊接学报, 1994, 13(2): 127 ~ 132.

作者简介: 陈善本, 1956 年 12 月出生, 工学博士, 教授, 博士生导师, 教育部长江学者奖励计划特聘教授。现主要从事机器人焊接智能化技术, 焊接过程智能控制和不确定系统鲁棒控制理论方向及其学科交叉领域的研究。在 Welding Journal 和 IEEE Transactions 等国际杂志发表论文 10 余篇。

Email: rwlab@sjtu.edu.cn