

文章编号:1006-2467(2009)01-0061-04

无模型自适应控制方法在脉冲 TIG 焊中的应用

吕凤琳, 陈华斌, 樊重建, 陈善本

(上海交通大学 焊接工程研究所, 上海 200240)

摘要: 在脉冲 TIG 焊系统中, 应用多输入单输出的无模型自适应控制方法, 通过同时调节焊接峰值电流及送丝速度, 将熔池的背面熔宽控制到期望值. 结果表明, 只需对控制变量进行较小幅值的调整, 则能够快速控制背面熔宽至期望值, 从而提高其效率, 且有利于背面熔宽的稳定成形. 同时, 通过实验进一步验证了该方法的有效性.

关键词: TIG 焊; 熔池; 背面熔宽; 无模型自适应控制

中图分类号: TG 409

文献标识码: A

Application of Model-Free Adaptive Control to Impulse TIG Welding

LÜ Feng-lin, CHEN Hua-bin, FAN Chong-jian, CHEN Shan-ben

(Institute of Welding Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The multi-input single output (MISO) model-free adaptive control method was applied in pulsed TIG welding system. The backside width of weld pool was arrived at the desired value by adjusting welding peak current and wire feeding speed at the same time. Because of using two parameters, the desired value could be got by adjusting only a little value of control variable. This method could not only improve efficiency but also be helpful to the forming of backside width.

Key words: TIG welding; weld pool; backside width; model-free adaptive control(MFAC)

熔透是保证焊接质量的前提, 可以采用焊缝背面熔化宽度(即背面熔宽)来表示. 背面熔宽的均匀性和稳定性对熔透以及焊缝质量十分重要. 焊接过程存在高噪声干扰、较大时滞和动态突变性, 无法得到其精确的数学模型, 通常依赖于被控对象模型的控制方法, 难以实现对熔池背面熔宽的控制.

20 世纪 90 年代提出的无模型自适应控制(model-free adaptive control, 简称 MFAC)^[1]是一种不依赖于被控对象数学模型的方法. 该方法仅采

用被控对象的输入和输出数据来设计控制器, 且简单、有效, 具有广泛适用性的先进控制策略以及很强的鲁棒性, 已成功地应用于很多复杂过程中^[2,3]. 文献[4]中已对 MFAC 方法进行了初步研究, 并以脉冲 TIG 焊为对象进行了多输入单输出 MFAC 方法的仿真研究. 在此基础上, 本文将多输入单输出 MFAC 方法用于脉冲 TIG 焊的实际应用中, 通过同时调节焊接峰值电流以及送丝速度, 将熔池的背面熔宽控制到期望值.

收稿日期: 2008-04-30

基金项目: 上海市科委“登山计划”重点基础研究项目资助(06JC14036)

作者简介: 吕凤琳(1979-), 女, 河南洛阳人, 博士生, 主要从事智能控制及焊接过程自动化等研究.

陈善本(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-34202740; E-mail: sbchen@sjtu.edu.cn.

1 传感及实验系统

1.1 系统组成

所用铝合金填丝脉冲 TIG 焊系统硬件主要包括行走机构、焊接电气单元、中央控制器及视觉传感器^[8]. 在中央控制器作用下, 整个系统可以完成起弧、焊接、收弧、视觉传感及行走等功能. 其中视觉传感器采用被动视觉原理, 仅依靠电弧光照明, 经过特殊的滤光子系统可以获得清晰的熔池图像. 图 1 所示为填丝脉冲 TIG 焊实验系统结构示意图.

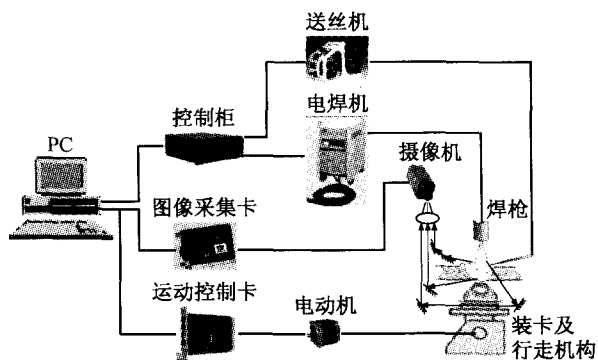


图 1 填丝脉冲 TIG 焊系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the experimental system for filler impulse TIG welding

1.2 熔池特征参数的提取

1.2.1 熔池特征参数的定义 利用视觉传感方式对铝合金脉冲 TIG 焊的焊缝成形进行控制, 获取能反映焊缝过程和焊缝成形的信息. 通过图像处理的方式获得可描述熔池状态的特征参数. 图 2 所示为利用所建立的视觉传感系统实时获取的多方位完整熔池图像, 其中左上方是焊缝正后方的熔池图像, 右上方是焊缝正前方的图像, 下方是焊缝背面的熔池图像.

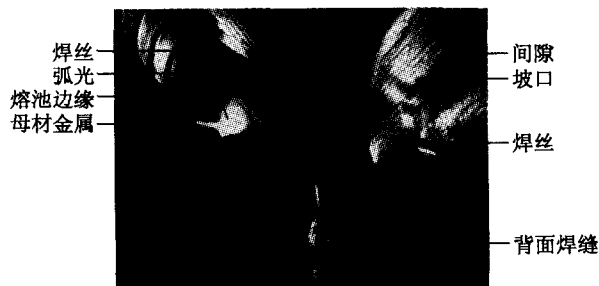


图 2 铝合金脉冲 TIG 焊缝的多方位完整熔池图像

Fig. 2 A frame of complete multi-direction weld pool image

在铝合金脉冲 TIG 焊过程中, 正面熔池的宽度、长度、面积以及熔池的下塌和反面焊缝的宽度均可作为描述铝合金 TIG 焊接过程的特征参数. 鉴于

本文的传感方式, 采用文献[5]中的方法, 定义铝合金 TIG 焊熔池图像的特征参数为熔池正面宽度 W_t , 熔池正面长度 L_t , 半长比 R_{hl} , 熔池背面宽度 W_b , 如图 3 所示. 在图 3(a) 中, 以熔池顶点为原点, 沿焊接反方向为 x 轴方向, 与焊接垂直方向为 y 轴方向. 熔池正面长度 L_t 和半长比 R_{hl} 分别定义为 $R_{hl} = L_u/L_t$, $L_t = L_{th} + L_u$.

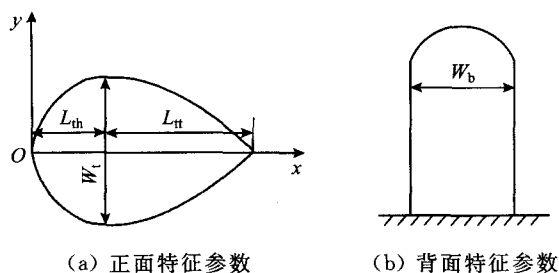


图 3 熔池正反面特征参数示意图

Fig. 3 Schematic of the geometry size of front and back welding pool

1.2.2 图像处理 图像处理的目的是提取熔池的几何特征参数而控制熔透. 在铝合金脉冲 TIG 焊接过程中, 由于受到电流极性变换、电弧稳定性和稳弧脉冲等因素的干扰, 所得熔池图像的噪声污染严重, 同时还存在图像退化现象, 由此增加了动态图像处理的难度. 因此, 所开发的图像处理算法必须具有良好的适应性, 以保证在各种条件下都能得到可靠的熔池图像几何特征参数. 本文采用文献[6, 7]的方法对熔池图像数据特征进行分析, 并通过退化恢复、边缘增强和监测、二值化、面积阈值、细化、剔除伪边缘及曲线拟合几个步骤来完成特征参数的提取.

2 无模型自适应控制算法

2.1 泛模型

考虑一般的 MISO 离散时间非线性系统为 $y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_y-1), U(t-1), U(t-2), \dots, U(t-n_u-1))$ (1) 式中: $U(t) \in R^{n_u}$, $y(t) \in R^{n_y}$, 分别表示系统的输入和输出; $t \in \{0, 1, \dots, T\}$; n_u 和 n_y 表示未知的系统阶数; $f(\dots)$ 表示未知的非线性函数.

对式(1)给出如下假设:

假设 1 式(1)为输入、输出可控制且可观测的, 即对于某一系统, 有界的期望输出信号 y^* 存在有界的可控制输入信号, 使得系统此时的输出等于系统的期望输出值.

假设 2 $f(\dots)$ 对系统的控制输入信号 $U(t-1)$ 具有连续的偏导数.

假设 3 式(1)为广义 Lipschitz 的,即在任意 $\Delta U(t) \neq 0$ 时,有

$$\|\Delta y(t)\| \leq b \|\Delta U(t-1)\| \quad (2)$$

定理 1 若式(1)满足假设 1~3,则 $\Delta U(t) \neq 0$ 时存在 1 个伪偏导数 $\varphi(t)$,使得

$$\Delta y(t) = \varphi(t-1)^T \Delta U(t-1)$$

且 $\|\varphi(t)\| \leq b$ (b 为常数^[8]).

2.2 无模型自适应控制算法

考虑的控制输入准则函数为

$$J(\Delta U(t)) = (y^*(t+1) - y(t+1))^T (y^*(t+1) - y(t+1)) + \lambda \Delta U(t)^T R \Delta U(t) \quad (3)$$

式中, R 为对角线权重矩阵,引入 $\Delta U(t)^T R \Delta U(t)$ 项,使得控制输入量的变化受到限制.

最小化性能指标是为求解满足最优控制量变化

$$\frac{\partial J}{\partial (\Delta U(t))} = 0 \quad (4)$$

可得控制算法

$$U(t) = U(t-1) + \frac{\rho \hat{\varphi}(t)}{\lambda + \|\hat{\varphi}(t)\|^2} \cdot (y^*(t+1) - y(t)) \quad (5)$$

式中, ρ 为步长序列.

2.3 伪偏导数估计算法

利用与求解控制算法相同的方法,定义伪偏导数估计准则函数为

$$J(\varphi(t)) = (y^*(t+1) - y(t) - \varphi(t) \Delta U(t))^2 + \mu (\varphi(t) - \varphi(t-1))^2 \quad (6)$$

用伪偏导数估计准则函数对 $\varphi(t)$ 求导,令其等于零,得参数估计算法为

$$\hat{\varphi}(t) = \hat{\varphi}(t-1) + \frac{\eta \Delta U(t)}{\mu + \|\Delta U(t)\|^2} \cdot (y^*(t+1) - y(t) - \hat{\varphi}(t-1) \Delta U(t)) \quad (7)$$

由于在 t 时刻 $\Delta U(t)$ 未知,故采用 $\Delta U(t-1)$ 代替 $\Delta U(t)$,由此可得伪偏导数的估计算法为

$$\hat{\varphi}(t) = \hat{\varphi}(t-1) + \frac{\eta \Delta U(t-1)}{\mu + \|\Delta U(t-1)\|^2} \cdot (y^*(t+1) - y(t) - \hat{\varphi}(t-1) \Delta U(t-1)) \quad (8)$$

3 实验验证

工业过程中存在的干扰形式多种多样,其在焊接过程中可以用不同散热条件的变化来体现.因此,本文设计了渐变哑铃形形状的变散热工件,以代表实际焊接过程中的干扰.主要是应用 PID 控制和无模型自适应控制 2 种方法对变散热工件的控制方式进行比较.

实验所用材料为 LD10,工件厚度 4 mm,开坡

口,接头形式为对接,采用脉冲送丝形式.由于铝合金散热快,在中厚板 TIG 焊过程中,如果采用正常的焊接规范且在起弧后立即施加一定的焊接速度,则在焊缝的起始位置不易焊透.为了保证初始位置的熔透,在焊接过程中采用起弧后停留一段时间,熔透后再施加焊接速度的方法.根据经验,在焊接的起始阶段停留 5 s.

在焊接成形的控制过程中,期望尽可能得到均匀的背面焊缝,也就是使背面熔宽保持在某一恒定值.而影响背面熔宽的直接因素是焊接电流与送丝速度.因此,本文的控制器输入是背面熔宽,控制器输出是焊接电流及送丝速度,式(8)、(5)构成了无模型控制器算法.在实际焊接过程中,2 种控制方法的起始焊接参数相同,即脉冲峰值电流 $I_p = 223$ A,送丝速度 $v_i = 10$ mm/s,焊接速度 $v = 2.8$ mm/s,背面熔宽 W_b 期望值为 6 mm.根据经验及多次实验,确定电流及送丝的 PID 控制器参数分别为: $K_{P1} = 0.1$, $K_{I1} = 2.5$, $K_{D1} = 1.5$, $K_{P2} = 4$, $K_{I2} = 17$, $K_{D2} = 0.5$.

控制结果如图 4~7 所示.可见,在 PID 焊接方法的控制下,系统输出的超调量较大,不利于系统的稳定.从控制曲线及最终的控制效果来看:峰值电流随着散热条件的变差而减小,随着散热条件的好转而增大;而送丝速度的变化趋势正好与峰值电流相反,即随着散热条件的变差而增大,随着散热条件的好转而减小.无论是渐变哑铃形还是突变哑铃形工件,在无模型自适应控制作用下,工件焊缝背面熔宽的输出均较稳定,而且超调量和稳态误差均小于



(a) 正面



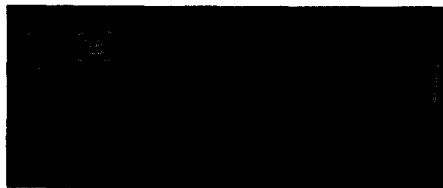
(b) 背面

图 4 采用 PID 控制的渐变哑铃形工件形貌照片

Fig. 4 Photographs of the graded dumbbell-shaped workpiece using PID controller



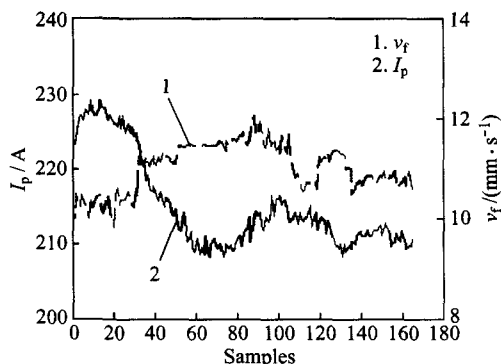
(a) 正面



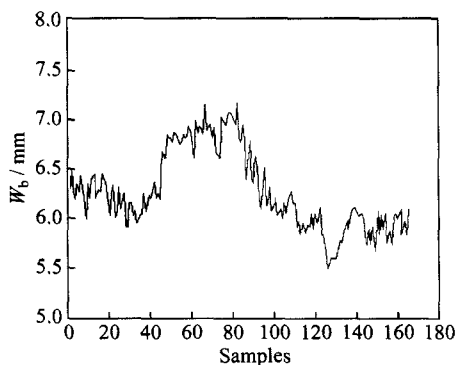
(b) 背面

图5 采用无模型自适应控制的渐变哑铃形工件形貌照片

Fig. 5 Photographs of the graded dumbbell-shaped workpieces using model-free adaptive controller



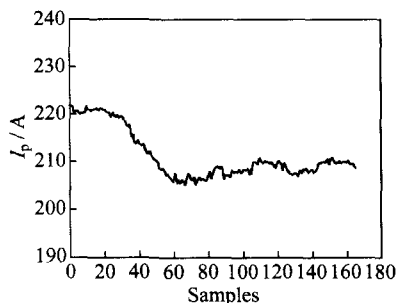
(a) 控制作用



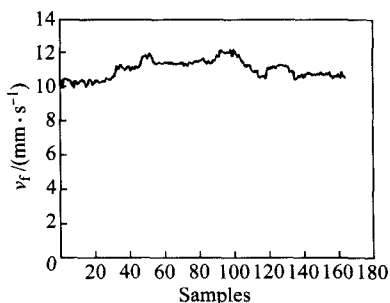
(b) 系统输出

图6 采用PID控制的渐变哑铃形工件焊接过程的电流和熔宽曲线

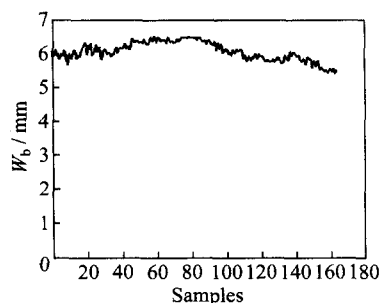
Fig. 6 The control curves of graded dumbbell-shaped workpiece using PID controller



(a) 峰值电流



(b) 送丝速度



(c) 系统输出

图7 采用无模型自适应控制的渐变哑铃形工件焊接过程曲线

Fig. 7 The control curves of graded dumbbell-shaped workpiece using model-free adaptive controller

PID 控制方法. 由于采用了电流与送丝同时调节的控制方法, 有效防止了焊缝切割现象的发生.

4 结 语

本文将无模型自适应控制方法应用于脉冲 TIG 焊中, 通过同时调节焊接峰值电流与送丝速度, 将变散热工件的背面熔宽控制到期望值. 同时, 通过与 PID 控制方法进行对比, 验证了其有效性. 由于同时调节 2 个焊接参数, 控制变量只需进行较小的幅值调整, 就能快速将背面熔宽控制到期望值, 从而提高了焊接成形的效率, 有利于背面熔宽的稳定成形.

参考文献:

- [1] Hou Zhong-sheng, Huang Wen-hu. The model-free learning adaptive control of a class of SISO nonlinear systems [C]//**Proceedings of the American Control Conference**. New Mexico Press, 1997: 343-344.
- [2] Han Zhi-gang, Yu Xing-huo. An adaptive model free control design and its applications. Industrial Informatics [C]//**Proceedings of 2004 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics 24th-26th**. Berlin, Germany: IEEE Press, 2004: 243-247.

(下转第 70 页)

4 结 语

本文针对多道次热轧中厚板的生产特点建立了三维弹塑性热力耦合有限元模型,开发了等效空心弹性轧辊模型,在保证计算精度的前提下节约了计算时间,为热轧中厚板多道次连续模拟奠定了基础.模拟所得轧辊变形及轧件厚度沿宽度方向的分布曲线符合实际轧制特点,准确地反应了轧辊弹性变形对轧件变形的影响,有利于进行板形研究.

所开发的网格重划分模块及参数传递模块避免了网格畸变所带来的计算困难,并使后一道次的模型建立在前一道次的计算结果之上,解决了热轧中厚板多道次连续模拟中的困难,实现了多道次热轧过程的连续模拟.模拟所得各道次的轧制力、温度结果与现场实测数据吻合并具有较高精度.

参考文献:

- [1] Dyja H, Korczak P. The thermal-mechanical and micro-structural model for the FEM simulation of hot-plate rolling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 30:463-467.
- [2] 董洪波, 康永林. 有限元模拟技术在板带钢轧制中的应用[J]. *轧钢*, 2004, 21(2): 44-47.
DONG Hong-bo, KANG Yong-lin. Application of finite element simulation in hot rolling of strip [J]. *Steel Rolling*, 2004, 21(2): 44-47.
- [3] 姚林龙. 大型工业轧机的三维板带轧制解析[J]. *北京科技大学学报*, 2003, 25(1): 57-61.
YAO Lin-long. Three-dimension analysis of strip rolling in a large production mill [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2003, 25(1): 57-61.
- [4] 喻海良, 刘相华. 多道次立-平轧制热力耦合有限元分析[J]. *热加工工艺*, 2007, 36(1): 85-88.
YU Hai-liang, LIU Xiang-hua. Coupling analysis of multipass V-H rolling process by FEM [J]. *Hot Working Technology*, 2007, 36(1): 85-88.
- [5] 刘 才, 崔振山. 板材热轧热力耦合有限元模拟[J]. *机械工程学报*, 1998, 34(4): 35-39.
LIU Cai, CUI Zhen-shan. Thermo mechanical coupled finite-element modeling of slab hot rolling [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1998, 34(4): 35-39.
- [6] GUO Zhong-feng, LI Chang-sheng, XU Jian-zhong. Analysis of temperature field and thermal crown of roll during hot rolling by simplified FEM [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 13(6): 27-30.
- [7] 单辉祖. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [8] 张金玲, 崔振山, 胡宏勋. 多道次中厚板热轧过程的综合数值解析法模拟[J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(1): 32-36.
ZHANG Jin-ling, CUI Zhen-shan, HU Hong-xun. Simulation of multi-pass plate hot rolling by a mixed numerical and analytic method [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(1): 32-36.
- [9] 朱谷君. 工程传热传质学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.
- [10] 陈如欣, 胡忠明. 塑性有限元法及其在金属成形中的应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [11] 陈火红. Marc有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(上接第 64 页)

- [3] 蒋爱萍, 韩志刚, 韩 丹. 无模型控制系统在加热炉温度控制中的应用[J]. *控制工程*, 2004, 11(5): 388-391.
JIANG Ai-ping, HAN Zhi-gang, HAN Dan. Application of model free control systems to temperature control of heat furnace [J]. *Control Engineering of China*, 2004, 11(5): 388-391.
- [4] LÜ F L, CHEN S B, DAI S W. A model-free adaptive control of pulsed GTAW [C]//*Lect Notes Contr Inf*. Berlin: Springer Press, 2007, 362: 333-339.
- [5] 王建军. 铝合金脉冲 TIG 焊熔池动态特征的视觉信息获取与自适应控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [6] Fan Chong-jian, LÜ Feng-lin, Chen Shan-ben. A visual sensing system for seam tracking and welding control in aluminum gas tungsten arc welding [C]//*The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Taiwan: IEEE Press, 2007: 2700-2705.
- [7] 樊重建, 王建军, 陈善本. 铝合金钨极弧焊熔池被动视觉信息传感[J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(1): 42-45.
FAN Chong-jian, WANG Jian-jun, CHEN Shan-ben. Passive visual sensing in aluminum alloy weld pool in gas tungsten arc welding [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(1): 42-45.
- [8] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 134-140.