

基于熔池背面图像的薄壁筒体熔透自整定PID控制系统

代克杰^{1,2}, 王勤³, 赵丽¹, 曾申波¹, 张富巨¹

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072; 2. 平顶山学院 电气信息工程学院, 河南 平顶山 467000;

3. 苏州热工研究院有限公司 在役检查中心, 江苏 苏州 215001)

摘要: 在薄壁筒体环缝焊接中, 工艺参数及坡口尺寸的波动都会导致焊接熔透状态的变化. 为保证稳定的熔透, 需要对焊接熔透状态进行实时检测和控制. 本文针对薄壁筒体环缝钨级惰性气体保护焊(TIG焊), 建立了基于视觉传感的直接传感法, 获取了清晰的熔池背面图像, 经图像处理得到了满足熔透要求的熔池背面熔宽范围, 并通过自整定PID控制器实时调节焊接速度对熔透状态进行自适应控制. 结果表明: 该方法提取熔透状态信号可靠, 基本消除了熔透状态间接传感法的控制盲区.

关键词: 薄壁筒体环缝; 熔透状态; 背面熔池图像处理; 自整定PID

中图分类号: TP216 **文献标识码:** A

Self-tuning PID control of welding penetration in thin-walled cylinder based on rear molten pool image

DAI Ke-jie^{1,2}, WANG Qin³, ZHAO Li¹, ZENG Shen-bo¹, ZHANG Fu-ju¹

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China;

2. College of Physics and Electric-Information Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan Henan 467000, China;

3. Center of In-service Inspection, Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou Jiangsu 215001, China)

Abstract: The fluctuations of process parameters and groove dimensions lead to the variations of weld penetration of the girth welding for the thin-walled cylinder. In order to ensure a stable penetration, the penetrations are needed to be detected and controlled in real-time. A vision-based direct-sensing equipment is installed for the thin-walled cylinder TIG(tungsten inert gas) welding to obtain a clear rear pool image. The processed image gives the rear width-range of the melt pool for desired penetrations. A self-tuning PID controller controls the penetration by properly adjusting the welding speed. Experiment results show that the penetration signal obtained by this method is reliable, practically eliminating the insensitive zone in indirect sensing.

Key words: thin-walled cylinder girth weld; penetration state; backside molten pool image processing; self-tuning PID

1 引言(Introduction)

钨级惰性气体保护焊(TIG焊)由于其电弧稳定、无飞溅、焊缝成形美观等优点, 在小直径薄壁筒体环缝焊接领域得到日益广泛的应用. 对于薄壁TIG焊(单面焊双面成形)而言, 衡量焊缝成形质量最主要的指标是焊缝的熔透状态. 本文研究在TIG工艺下将两个薄壁圆筒型结构焊接在一起构成某重要产品的部件. 在传统工艺下, 该类焊缝在焊接过程中容易受到焊接电流、电压、焊接速度、坡口尺寸等众多因素的影响. 工程中对这类焊缝要求完全熔透, 未焊透(含刚刚熔透)与过透(含焊缝明显下塌或烧穿)都是不允许发生的.

比例-积分-微分(PID)控制器在焊接领域已经得到了广泛的应用. 许多学者已经将PID控制器成功

地应用于焊接过程的熔透控制中^[1~3]. 针对薄壁筒体环缝脉冲TIG焊接的特点, 本文提出采用熔池背面的自热光辐射图像作为熔透状态的实时输入信号, 通过图像处理获得熔池背面图像满足正常熔透状态的宽度范围; 利用一种新的PID参数自适应整定方法, 通过背面熔宽信号实时整定PID控制器参数来调节焊接速度, 从而控制熔池背面的最大宽度来实现对薄壁筒体环缝熔透状态的闭环控制. 结果表明: 该控制系统能够很好地实现TIG焊熔透控制的目的, 且具有较好的稳定性, 控制自适应性和较高的控制精度.

2 熔透信息视觉检测(Penetration information visual detection)

计算机视觉以其信息量大、精度高、通用性好、

检测范围广等特点,在熔透控制中得到越来越广泛的应用^[4,5].薄壁筒体单面焊双面成形脉冲TIG焊条件下,采用熔池背面的自热光辐射图像的几何信息来监控熔透状态,相对于利用熔池正面的二维/三维图像而言,不存在任何盲区.因为所有工艺参数、工件尺寸的波动都将很快地被熔池背面的图像信息直接且准确的反映出来,所以用熔池背面尺寸信息表征薄壁筒体单面焊双面成形条件下的熔透状态更准确且更直接.

本研究条件下的脉冲TIG焊熔池的背面图像为一前部宽后部窄的近椭圆形(图1),采用熔池背面最大长度 L_b ,最大宽度 W_b 作为熔池背面几何特征量来描述熔池的几何特征(图2).根据图像计算熔池特征参量的实际尺寸,首先须对视觉传感系统进行标定,系统标定后,获得图像系 X 和 Y 两个方向上的单位像素分别代表的实际物体同方向上的宽度 W 和长度 L ,标定结果如下:

$$W = 0.0460 \text{ mm/pixel},$$

$$L = 0.0495 \text{ mm/pixel}.$$

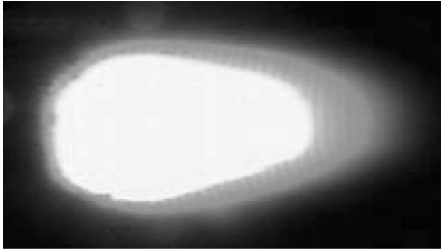


图1 熔池反面图像

Fig. 1 Backside molten pool image

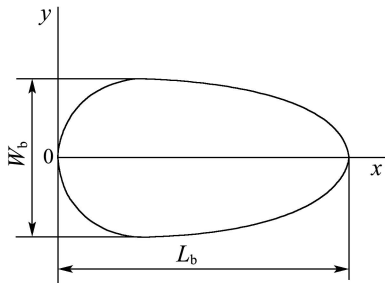


图2 熔池背面形状几何特征参量

Fig. 2 Backside molten pool geometric characteristics parameters

为实现熔透状态的控制,还需要从熔池背面图像中提取熔池边缘,获得背面宽度的准确信息^[6].检测熔宽的算法设计如下:

1) 熔池背面图像的灰值化处理.将CCD摄像机及视频采集卡采集到的24Bit真彩位图采用加权平均法转换为256级灰度;

2) 设计对边缘具有较大响应的3*3非线性最小值滤波法对图像进行增强处理,突出熔池边缘;

3) 对熔池背面图像进行灰度直方图最大灰度值的90%进行阈值分割,分割成对象物和背景物两个区域,并检测出熔池边缘;

4) 用逐列搜索图像的边缘点算法,计算当前熔池宽度:

最大宽度:

$$W_b = \text{width}_{\max} = \max \{ \text{width}[i] \} * W \text{ mm}.$$

最大长度:

$$L_b = \text{length}_{\max} = \max \{ \text{length}[i] \} * L \text{ mm}.$$

熔池背面图像经处理后如图3所示.

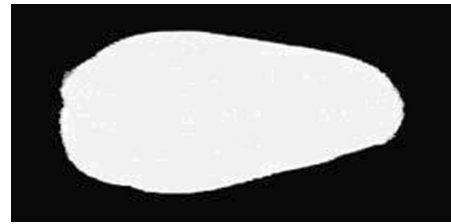


图3 处理后的熔池背面图像

Fig. 3 Processed backside molten pool image

3 参数自适应整定(Parameters self-tuning)

传统PID控制器在整个控制过程中参数都保持恒定,具有较差的适应性.薄壁筒体TIG焊过程中充满大量不确定因素,同时又要求控制系统能够快速响应且具有一定的自适应性,为了获得良好的控制效果,控制参数(K_p , K_i , K_d)必须随着误差和误差变化率的变化而变化,即这些参数可以在线实时自适应调整.

自适应PID参数调节如下式所示:

$$\begin{cases} K_p = a_p + b_p(1 - \sec h(c_p \cdot e(t))), \\ K_i = a_i \cdot \sec h(c_i \cdot e(t)), \\ K_d = a_d + \frac{b_d}{1 + c_d \cdot \exp(d_d \cdot e(t))}. \end{cases} \quad (1)$$

$a_p, b_p, c_p, a_i, c_i, a_d, b_d, c_d, d_d$ 都是正值,它的设定需要根据实际情况来确定, $\sec h$ 是双曲正割,它的表达式如下所示^[7,8]:

$$\sec h(x) = \frac{2}{\exp(x) + \exp(-x)}. \quad (2)$$

以上仅考虑了误差因素对控制参数的影响(尤其是 K_p),并没有考虑误差微分(de)对控制器的影响,考虑到de对 K_p 的重大影响,PID参数的实际设定做如下修改:

$$\begin{cases} K_p = a_p + b_p(1 - \sec h(c_p \cdot e(t))), \\ K_i = a_i \cdot \sec h(c_i \cdot e(t)), \\ K_d = a_d + b_d \cdot \sec h(c_d \cdot e(t)). \end{cases} \quad (3)$$

这里: a_p, b_p, a_i, a_d, b_d 是正的常数, c_p, c_i 是和 e 相

关的变量, c_d 是和 de 相关的变量, 它们根据控制系统来设定. 对比式(1), 表达式(3)中 c_d 的设定会对系统的抗干扰性有很大的提高.

4 自适应整定PID算法在薄壁筒体熔透控制中的应用(Self-tuning PID algorithm applied in thin-walled cylinder penetration control)

设计的薄壁筒体数字脉冲TIG自动焊接系统组成如图4所示. 系统主要包括视觉传感、数据采集与控制平台和执行机构3部分. 焊接过程中, 视觉传感器对熔池背面的自热光辐射图像进行拍摄, 图像采集卡采集CCD传感器的图像信号, 对其进行实时处理, 并根据处理结果输出控制信号到执行机构, 执行机构接受控制信号, 通过调节焊接速度作用于焊接过程, 从而实现闭环控制. 其中速度信号通过串口输出到PLC, 由PLC控制焊接速度.



图4 数字控制薄壁筒体自动焊接系统

Fig. 4 Digital control thin-walled cylinder automatic welding system

在进行PID控制器的设计之前, 需要通过工艺试验确定在保证薄壁筒体正常熔透时, 熔池背面图像的宽度范围, 并以此范围作为PID控制器的设定值. 设计如下试验确定焊缝背面熔宽范围. 试验条件为: 焊接速度在正常范围值分别向上和向下适度延伸, 环缝两侧母材分别为20钢, 35钢, 尺寸为 $\Phi 108 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm}$, 保护气体为氩气 8 L/min , 脉冲焊接电流参数分别为: 脉冲基值 50 A , 脉冲峰值 160 A , 频率 5 Hz , 占空比 50% , CCD摄像机与工件垂直距离为 40 mm . 测量焊后工件背面熔池宽度, 最佳的熔宽范围为 $3.2 \text{ mm} \sim 3.5 \text{ mm}$.

焊接是复杂的热作用过程. 整个过程存在由于机械惯性和热惯性引起的时间上的滞后. 依据传统控制理论, 考察脉冲TIG焊熔池动态特性, 利用试验数据采用系统辨识的方法求取其熔池特征动态性能的数学模型^[9]. 它的开环传递函数可以简化为下式:

$$G(s) = \frac{e^{-0.416s}}{0.0004s^2 + 0.02s + 1}. \quad (4)$$

这里输入信号为熔池背面最大宽度, 输出为脉冲TIG焊的焊接速度. 速度信号可以通过拖动筒体旋转的伺服电机反馈的编码器信号来获取, 熔池反面最大熔宽信号可以通过第2部分介绍的方法获取.

系统中所允许的最大熔宽为 3.5 mm , 允许的最小熔宽为 3.2 mm , $3.2 \text{ mm} \sim 3.5 \text{ mm}$ 之间的熔宽表示熔透良好的区域, 当熔宽在该范围内变化时, 控制器会依据误差的变化进行控制参数的自适应调整.

参数自适应规则按如下设定:

$$a_p = 1.25, b_p = 0.48, a_i = 0.3, a_d = 2.1,$$

$$b_d = 3, T = 0.005 \text{ s}, T \text{ 为采样时间},$$

$$K_p = 1.25 + 0.48(1 - \sec h(c_p \cdot e(t))) \cdot$$

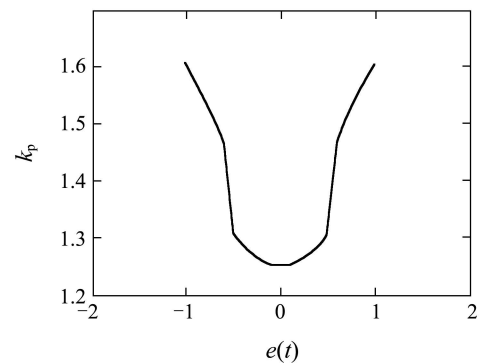
$$\begin{cases} |e(t)| \leq 0.6, c_p = 1, \\ |e(t)| \geq 0.6, c_p = 2, \end{cases}$$

$$K_i = 0.3 \cdot \sec h(c_i \cdot e(t)) \begin{cases} |e(t)| \leq 0.2, c_i = 1, \\ |e(t)| \geq 0.2, c_i = 2, \end{cases}$$

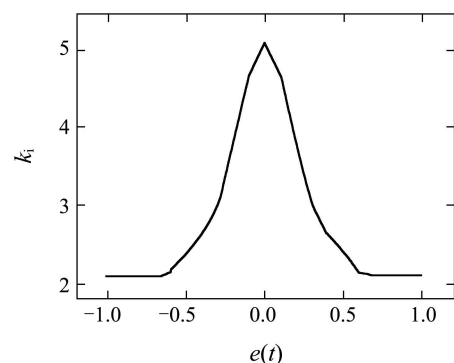
$$K_d = 2.1 + 3 \cdot \sec h(c_d \cdot e(t)) \cdot$$

$$\begin{cases} \left| \frac{de(t)}{dt} \right| \geq 10, c_d = 10, \\ \left| \frac{de(t)}{dt} \right| \leq 10, c_d = \frac{de(t)}{dt}. \end{cases}$$

控制器参数随误差变化规则如图5所示.



(a)



(b)

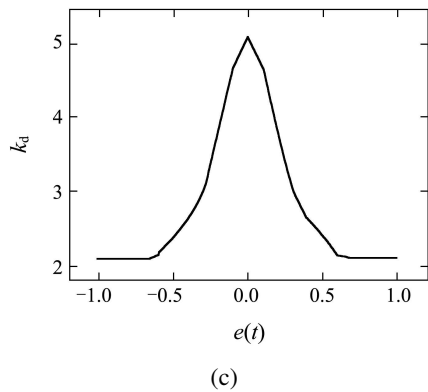
图5 自整定PID控制器参数 e 变化规则

Fig. 5 Self-tuning parameters PID controller changed rules

从图5可以得到如下控制规则:

1) 在系统响应初始阶段 e 非常大, K_p 比较大, K_i , K_d 非常小, 这些可以从(a)(b)(c)图中看出, PID控制退化为PD控制, 可以在初始阶段快速的跟踪误差的变化;

2) 随着控制过程的进行, K_p 逐渐变小, K_i , K_d 逐渐变大, PD控制器退化为PI控制器, 可以使系统消除静差, 且保持一定的抗干扰性;

3) 当误差逐渐接近零的时候, K_p 逐渐接近最小值, K_i , K_d 逐渐接近最大值, 控制器恢复为PID控制器.

常规PID控制的闭环系统响应图如图6所示, 控制器参数的整定依据Ziegler和Nichlos方法, 采用增量式PID算法, 仿真信号为阶跃信号(0s~0.5s), 正弦波加随机干扰信号(0.5s~1s)来模拟熔池背面宽度的变化. 仿真结果如图6所示, 超调量为16.2%, $t_{5\%}$ 和 $t_{2\%}$ 误差调节时间分别为0.1108s和0.1665s, 输出能够在10个采样周期内跟踪输入信号.

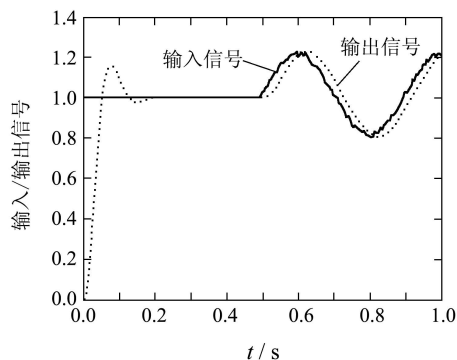


图6 传统PID控制的系统响应图

Fig. 6 Response of tradition PID controller

从图7可以看到, 采用自整定PID控制器后系统的控制品质得到了很大的提升, 超调量消除了, $t_{5\%}$, $t_{2\%}$ 调节时间缩短为0.01s和0.047s, 系统呈现出很好的适应性和快速响应性, 响应信号可以在3个采样周期(0.015s)内跟踪输入信号的变化.

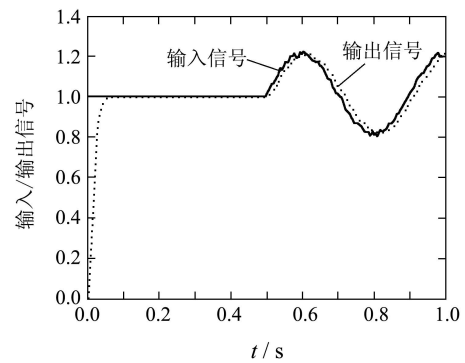


图7 自整定参数PID控制器的响应图

Fig. 7 Response of self-tuning parameters PID controller

5 实时控制试验(Real-time control experiment)

同上工件和工艺参数, 焊接过程中实时检测背面熔宽, 控制器依据第4部分所述的控制规律在线实时整定参数, 以焊接速度为控制量, 控制目标为保持背面熔宽最大值在3.3mm, 控制结果如图8所示, 图中纵坐标为熔池背面宽度最大值, 可以看到整个焊接过程平稳、跳动很小, 背面熔宽最大值基本保持在3.2mm~3.5mm之间, 图9为对应的焊缝成形及断面照片.

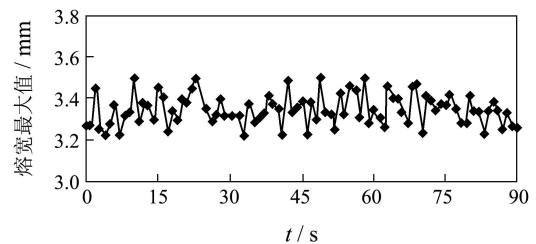
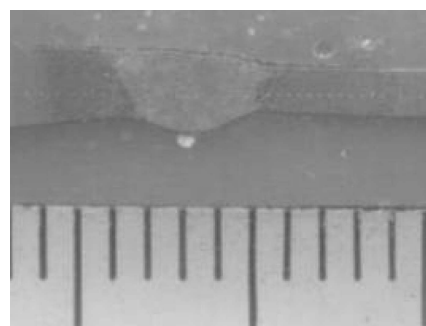


图8 熔宽变化曲线

Fig. 8 Weld width change curve



(a)



(b)

图9 闭环控制下焊缝成形及断面

Fig. 9 Weld formation and section in closed loop control

6 结论(Conclusion)

1) 建立了基于熔池背面自热光辐射的视觉传感和工控机的熔透状态实时检测与控制系统;

2) 自整定PID控制算法在仿真环境下得到了验证, 结果显示该算法具有很好的实时性、稳定性和强鲁棒性;

3) 在薄壁筒体环缝脉冲TIG焊接过程中验证了自整定PID控制器的有效性, 以背面熔宽最大值为控制目标, 采用调节焊接速度的方法获得了良好的控制效果, 基本消除了熔透状态间接表示法带来的控制盲区, 获得了熔透可靠、背面熔宽均匀的焊缝。

参考文献(References):

- [1] LI L Y, WANG Y. Penetration control methods and experiment evaluation on top face information of temperature field in arc welding[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(12): 116 – 120.
- [2] ZHAO D B, CHEN Q, CHEN S B, et al. Single-variable intelligent control for bead shape of pulsed GTAW with wire filler[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2001, 41(11): 39 – 41.
- [3] HUANG S S, QIN J T, SONG Y L. Auto-tuning PID control system for molten pool in TIG welding[J]. *Hanjie Xuebao*, 1994, 15(2): 122 – 129.
- [4] YAN Z H, ZHANG G J, GAO H M, et al. Visual sensing of P-GMAW penetration information from multiple view angles[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(8): 47 – 50.
- [5] SHUANG Y Q, CHEN W Z, WANG K J, et al. Vision system for closed-loop control of the penetration in laser-MIG hybrid welding[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2008, 48(11): 1891 – 1894.
- [6] GE J G, GAO J Q, CHEN L G, et al. Data extraction methodology of molten pool front-side geometrical parameters and black-bearded width[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2004, 38(7): 1113 – 1117.
- [7] 沈炯, 陈来九. 多变量PID控制器的在线自整定[J]. *控制理论与应用*, 1995, 12(4): 509 – 514.
(SHEN Jiong, CHEN Laijiu. On-line automatic tuning of a multivariable PID controller[J]. *Control Theory & Applications*, 1995, 12(4): 509 – 514.)
- [8] 李敏远, 都延丽, 姜海鹏. 智能自整定PID在药剂温度控制系统中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(5): 805 – 808.
(LI Minyuan, DU Yanli, JIANG Haipeng. Application of intelligent self-tuning PID in temperature control system of medicament[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(5): 805 – 808.)
- [9] 王兵, 陈善本, 黎文航, 等. 基于粗糙集理论的焊接过程建模方法[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(3): 411 – 414.
(WANG Bing, CHEN Shanben, LI Wenhong, et al. Modeling method of the welding process based on rough set theory[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(3): 411 – 414.)

作者简介:

代克杰 (1980—), 男, 博士研究生, 主要从事焊接过程控制及电磁兼容方面的研究工作, E-mail: dkj671@163.com;

王勤 (1979—)男, 硕士, 工程师, 主要从事焊接工艺与无损检测方面的研究工作, E-mail: wangqin671@163.com;

赵丽 (1975—), 女, 博士研究生, 主要从事焊接工艺与组织转变方面的研究工作, E-mail: zl075310@sohu.com;

曾申波 (1979—), 男, 硕士, 主要从事焊接设备与工艺方面的研究工作, E-mail: shenbo_zeng@163.com;

张富巨 (1951—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接自动化控制及装备方面的研究工作, E-mail: fjzhang@whu.edu.cn.