

基于自适应的容器内壁堆焊焊炬高度跟踪技术研究*

张 宁, 薛瑞雷, 夏 磊, 康 峰

(新疆大学智能制造现代产业学院(机械工程学院), 新疆乌鲁木齐 830046)

摘 要: 焊炬高度跟踪是立式容器内壁自动化堆焊修复的关键技术, 针对堆焊过程中焊炬高度实时跟踪困难等问题, 设计了一种基于积分项的模型参考自适应(model reference adaptive control, MRAC)堆焊焊炬高度跟踪控制器, 引入积分项增强控制器的跟踪电流抗干扰能力, 并采用无限脉冲响应滤波器(infinite impulse response, IIR)对采集的堆焊电流进行滤波处理, 建立横焊的焊炬高度-焊接电流数学模型计算焊炬高度偏差, 利用积分项 MRAC 控制器进行焊炬高度纠偏。试验结果表明, 采用积分项 MRAC 控制方法的最大跟踪误差为 ± 0.34 mm, 满足容器内壁自动化堆焊的焊接质量控制要求。

关键词: 容器内壁修复; 自动化堆焊; 模型参考自适应控制; 高度跟踪

中图分类号: TG441.7 文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.01.019



全文在线

Research on adaptive torch height tracking technology for overlay welding on inner walls of containers

ZHANG Ning, XUE Ruilei, XIA Lei, KANG Feng

(Intelligent Manufacturing Modern Industry (College of Mechanical Engineering),

Xinjiang University, Urumqi 830046, CHN)

Abstract: The torch tracking height is a critical technology for the automated cladding repair of the inner wall of vertical containers. Addressing the issue of real-time tracking difficulty of the torch height during the cladding process, a model reference adaptive control (MRAC) torch height tracking controller based on an integral term was designed. The integral term enhances the controller's ability to resist tracking current interference. An infinite impulse response (IIR) filter was used to filter the collected cladding current. A mathematical model of the relationship between torch height and welding current was established to calculate the torch height deviation. The integral term MRAC controller was then used to correct the torch height deviation. Experimental results show that the maximum tracking error using the integral term MRAC control method is within ± 0.34 mm, meeting the welding quality control requirements for the automated cladding of the inner wall of containers.

Keywords: vessel inner wall repair; automated cladding; model reference adaptive control; tracking height

中国化工产业快速发展带动了大型立式容器的广泛应用, 但其内壁易腐蚀受损。传统人工焊接修复效率低, 且质量难以保证。相比之下, 自动堆焊工艺更高效、安全, 且质量可控^[1-2]。

目前, 自动化焊接和智能化焊接主要通过传感器感知焊接过程中声、光、温度等信息, 以实现焊接质量的监控与控制。王志江等^[3]利用工业相机采

集实时焊接图像, 并结合图像监控软件对焊缝进行实时纠偏。XIA L 等^[4]使用宽动态范围相机捕捉窄间隙熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)焊接中的焊枪与熔池图像, 实现焊炬在坡口的水平偏差调整。虽然视觉传感器可以直观地获取焊缝信息, 但易受弧光、磁偏吹、焊丝弯曲等影响。邹焱飏等^[5]针对焊接过程中飞溅、弧光等干扰,

* 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上基金项目(2022D01C391); 新疆大学“优秀博士研究生创新项目”(XJU2022BS092)

设计了能够实时检测焊缝特征并自动跟踪的激光视觉传感器。但成本较高且对环境敏感。曾露等^[6]结合脉冲 GMAW 焊接过程的基值电流，计算焊炬与焊缝的相对位置偏差，通过精准测量和调整焊炬，实现实时焊缝跟踪。周灿丰等^[7]利用高速摆动电弧传感器采集焊接电流信号，进行焊炬高度与水平焊缝跟踪。相较而言，电弧传感器具有实时性强、抗干扰能力强和成本低的优势，适用于各种复杂环境。

本文利用电弧传感器，搭建了自动化堆焊平台，并提出了一种基于模型参考自适应的容器内壁堆焊焊炬高度跟踪方法，能够持续有效地提取堆焊焊接电流信息，准确计算焊炬与工件的高度偏差，实现实时、准确的焊炬高度跟踪。

1 堆焊焊接试验平台

本文通过自主研发的 GMAW 自动堆焊焊接平台，实现了立式容器内壁堆焊修复，如图 1 所示。堆焊平台采用预制轨道和焊接小车结构，焊接机头携带有摆动机构的焊枪，在铺设好的容器内壁轨道行走，实现容器内壁堆焊。焊机型号为 POWER-WAVE-S500，其特点为以功率模式输出能量，送丝机为林肯焊机电源的配套设备，遥控器界面和电气控制柜均独立设计研究，整个焊接系统使用 Trio 运动控制卡作为控制单元，焊接前，运动控制卡通过以太网通讯接收上位机工艺参数管理软件下达焊接参数。遥控器用来控制堆焊过程的起弧与熄弧，并控制焊接小车和机头的水平运动和垂直运动。

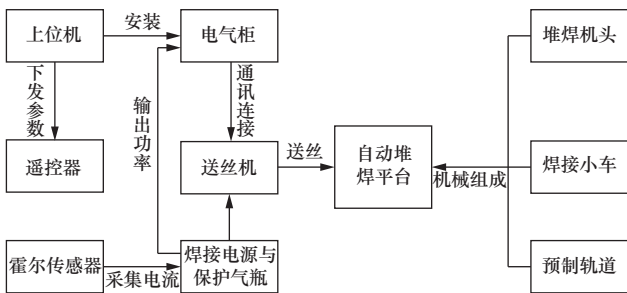


图 1 GMAW 自动堆焊平台
Fig. 1 GMAW automatic welding platform

本文试验材料均为 Q235 碳钢板，板厚 12 mm，焊丝材料为 304L，直径为 1.2 mm。试验保护气体为 80%Ar+20%CO₂，气体流量为 25 L/min，焊接参数见表 1。

表 1 焊接参数

Tab. 1 Welding parameters

功率/ kW	层高/ mm	摆宽/ mm	摆频/ Hz	焊接速度/ (mm/s)	送丝速度/ (m/min)
4.2	3.8	5	8	9	6.7

2 堆焊焊炬高度跟踪系统

2.1 电弧高度跟踪工作原理

在焊接小车沿着容器内壁预制轨道行走并焊接时，如图 2 所示，在大型罐壁修复堆焊过程中，焊炬根据设定的焊接参数摆动前进，罐壁因腐蚀损伤会出现凹凸不平，当电弧随着焊炬沿着轨道到内壁进行扫描时，电弧长度和干伸长会随之变化，焊接过程的电流电压也会引起相应改变。

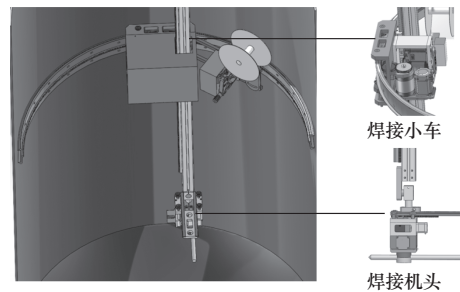


图 2 罐壁堆焊设备工作图

Fig. 2 Working diagram of tank wall welding equipment

罐壁堆焊过程焊炬高度变化俯视图如图 3 所示，在 A 工作点开始起弧焊接，此时电弧长为 H_0 ，焊接电流为 I_0 ，当焊炬运动到 B 工作点电弧发生阶跃变化，电弧长被伸长为 H_1 ，焊接电流为 I_1 ，此时电弧长变化量 $\Delta H = H_1 - H_0$ ，焊接电流变化量 $\Delta I = I_1 - I_0$ 。同样在焊炬由工作点 B 运动到工作点 C 过程中，电弧长变化量 $\Delta H = H_0 - H_1$ ，焊接电流变化量 $\Delta I = I_0 - I_1$ 。因此，焊炬运动到不同工作点，电弧长度和焊接电流会不断变化，从而可以获取焊炬高度偏差信息，通过设计控制器对焊炬高度进行实时调整，实现利用焊接电流进行焊炬高度跟踪的目标。

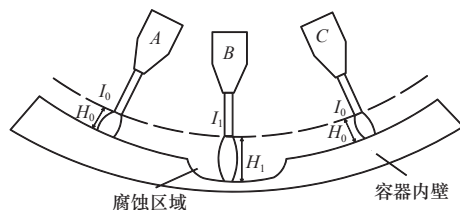


图 3 罐壁堆焊过程焊炬高度变化俯视图

Fig. 3 Top view of the height variation of the welding torch during the tank wall welding process

2.2 信号的采集与预处理

在作业现场进行容器内壁堆焊时，由于受到电弧突变、飞溅等干扰，采集到的电流信号会包含大量的噪声信号^[8]，因此有必要对采集到的原始电流信号进行滤波处理，来提高电流信号的信噪比。

IIR 可以有效地剔除电弧噪声、电磁干扰等高频干扰信号，提高焊接电流信号的信噪比。IIR 滤波器可以以较少的阶数实现相似频域响应效果，具有较窄的过渡带宽度。IIR 的特点是单位冲激响应为无限长序列，一般输出函数 $H(z)$ 为

$$H(z) = \frac{\sum_{r=0}^M b_r z^{-r}}{1 - \sum_{k=0}^N a_k z^{-k}} \quad (1)$$

式中： z 为不同的频率成分； z^{-r} 代表焊接电流信号在时域中延迟 r 个样本； r_z 为信号延迟的数量； b_r 为前向系数； a_k 为传递函数的分母系数； k 为对反馈项系数 a_k 的索引。

图 4 所示为原始电流数据和 IIR 滤波后的电流信号对比。

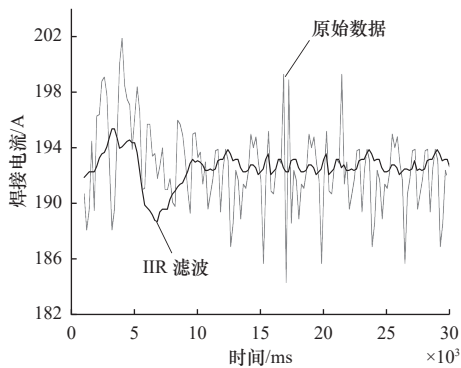


图 4 原始电流数据和 IIR 滤波后对比图

Fig. 4 Comparison between raw current data and IIR filtered data

2.3 焊炬高度-焊接电流模型

在用 IIR 滤波处理原始焊接电流信号之后，建立焊炬高度检测模型计算实时焊炬高度。

在焊接过程中，电弧并不是单独工作，而是焊接电源、送丝、保护气体、焊炬高度等诸多因素共同决定的，在焊接过程中，焊接电极尖端到工件表面的距离称为电弧弧长。在常见的等速送丝系统中，弧长的决定性因素一般为焊丝熔化速度^[9-10]。

焊丝熔化速度 V_m 和送丝速度 V_f 之间具有平衡关系：

$$V_m = V_f \quad (2)$$

KIM J W 等^[11] 探讨了干伸长 L_s 对焊丝熔化速度

V_m 的经验公式为

$$V_m = K_1 I + K_2 I^2 L_s + C_m \quad (3)$$

式中： K_1 为电弧热的作用影响系数； I 为焊接电流； $K_2 I^2 L_s$ 为焊丝电阻热引起的熔化速率，其中， K_2 为焊丝熔化系数； C_m 为常数。

通过式 (2) 和式 (3) 可得到干伸长 L_s 和弧长 L_a 为

$$L_s = \frac{1}{K_2 I^2} (V_f - K_1 I - C_m) \quad (4)$$

$$L_a = L_0 + K_0 I - \frac{K_s (V_f - C_m)}{K_2 K_a} I^{-1} \quad (5)$$

式中： $L_0 = \frac{1}{K_a} (U_0 - U_c + \frac{K_s K_1}{K_2})$ ； L_0 为弧长的初始值； K_0 为焊炬高度调节常数， $K_0 = -\frac{K_d + K_n}{K_a}$ ，其中， K_d 为微分控制参数， K_n 为比例控制参数； K_s 为焊丝单位长度的电阻； K_a 为电弧弧柱的电位梯度； U_0 、 U_c 为常数。

焊炬高度 H 为

$$H = L_a + L_s \quad (6)$$

由此可得焊炬高度模型 H_i ^[12] 为

$$H_i = L_0 + K_0 I + K_1 I^{-1} + K_2 V_f I^{-1} + K_3 I^{-2} + K_4 V_f I^{-2} \quad (7)$$

式中： $K_1 = -\frac{K_1}{K_2}$ ， $K_2 = -\frac{K_s}{K_2 K_a}$ ， $K_3 = -\frac{C_m}{K_2}$ ， $K_4 = \frac{1}{K_2}$ ， K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为电源特性、焊接材料等外部系数。

对上述式子进行线性化处理，可得焊炬高度 H -焊接电流 I 模型，即

$$H = KI + C \quad (8)$$

式中： K 为比例因子； C 为常数。

为计算式 (8)，在图 5 设置不同的初始焊炬高度 H 之后，分别采集 10 组稳定焊接时的电流，并采用最小二乘法来对数学模型进行线性回归。

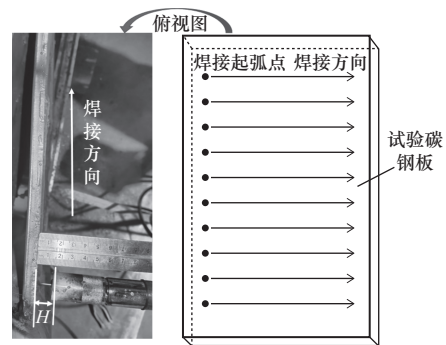


图 5 焊炬板材俯视图与正视图

Fig. 5 Top view and front view of welding torch plate

由图 6 可知， H - I 模型线性回归为

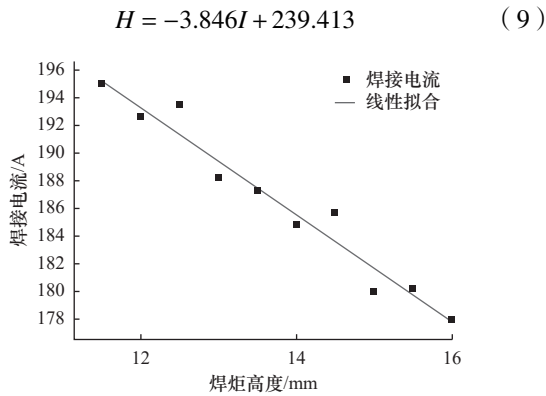


图6 堆焊 H-I 模型
Fig. 6 Welding H-I model

3 堆焊焊炬高度跟踪算法

3.1 模型参考自适应控制器总体设计

GMAW 堆焊过程具有较强的非线性^[13]，而模型参考自适应控制可以在非线性建模和非线性系统中有较好的控制效果，通过对比堆焊系统参考模型与被控对象的输出来获取电流偏差信息，再根据焊炬高度-焊接电流模型计算焊炬高度偏差，最后利用引入积分项的 MRAC 控制器来控制焊炬进行高度纠偏。积分项 MRAC 控制可以辨识由施工环境造成的焊接参数变化和焊接设备本身的特征变化的共同影响，从而使系统输出保持较好的水平。该控制系统主要由参考模型、控制器和自适应律组成，如图 7 所示。

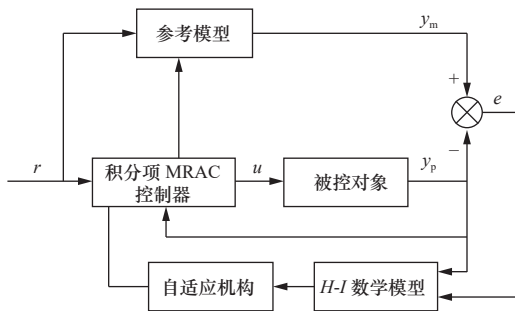


图7 模型参考自适应控制系统结构
Fig. 7 Model reference adaptive control system structure

具体控制流程如下。

第一步：当焊接指令 r 同时给到参考模型和被控对象焊炬的积分项 MRAC 控制器，此时焊炬高度跟踪控制器的参数是一个初始的参数，它会根据这个初始参数给出一个焊炬高度控制量 u 输入到被控对象焊炬，被控对象作出对应的电流响应 y_p ，同时参考模型也根据指令作电流响应 y_m 。

第二步：由于焊接设备自身系统误差等影响，被控对象焊炬具有不确定性，其输出与参考模型之间存在一定的焊接电流偏差 $e = y_m - x_p$ 。

第三步：焊炬高度控制系统在得到焊接电流偏差 e 后传递到 $H-I$ 数学模型，计算焊炬高度对应的焊接电流，输出焊炬高度状态，经过自适应机构更新控制参数之后传递给控制器，在下一个采样时刻，控制器用新的参数计算状态反馈、指令计算控制量，并输出给被控对象。

第四步：整个参数更新过程一直循环，当被控对象输出和参考模型一致时停止更新。

3.2 选取参考模型

参考模型作为堆焊 MRAC 控制系统输出期望焊接电流的部分，直接决定了控制器的超调量、响应时间等性能。选取的参考模型性能过高，控制量的大小和焊接设备反应速度跟不上，达不到高度跟踪效果，性能过低则不能体现 MRAC 控制的优越性。结合堆焊焊接设备与过程特点，参考模型 $W_p(s)$ 为

$$W_p(s) = \frac{K_p}{1 + a_1s + a_2s^2} \quad (10)$$

式中： K_p 为增益常数； a_1 、 a_2 为系数； s 为拉普拉斯变换变量。

由参考模型可得被控对象的微分方程为

$$y_p + a_1\dot{y}_p + a_2\ddot{y}_p = K_p u = K_p K_c r \quad (11)$$

式中： \dot{y}_p 为 y_p 的一阶导数； \ddot{y}_p 为 y_p 的二阶导数； K_c 为控制器增益常数。

令 $\begin{cases} x_{p1} = y_p \\ x_{p2} = \dot{x}_{p1} = \dot{y}_p \end{cases}$ ，则由式 (11) 转化为状态空间形式，即

$$\dot{x}_{p2} = \dot{x}_{p1} = \dot{y}_p = -\frac{1}{a_2}x_{p1} - \frac{a_1}{a_2}x_{p2} + K_p K_c r \quad (12)$$

式中： x_{p1} 为系统输出的响应电流； \dot{x}_{p1} 为 x_{p1} 的一阶导数； \ddot{x}_{p1} 为 x_{p1} 的二阶导数； x_{p2} 为响应电流的变化量； \dot{x}_{p2} 为 x_{p2} 的一阶导数； \ddot{y}_p 为 y_p 的二阶导数。

这样，控制器的可调系统的状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_p = A x_p + B K_p K_c r \\ y_p = x_{p1} \end{cases} \quad (13)$$

式中： \dot{x}_p 为 x_p 的一阶导数，其中， x_p 为实际焊接的状态； $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{a_2} & -\frac{a_1}{a_2} \end{bmatrix}$ ， $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{a_2} \end{bmatrix}$ 。

则焊炬高度跟踪系统的参考模型的状态空间为

$$\begin{cases} \dot{x}_m = Ax_m + BK_m r \\ y_m = x_{m1} \end{cases} \quad (14)$$

式中： x_m 为参考模型的状态； \dot{x}_m 为 x_m 的一阶导数； K_m 为参考模型的增益参数； y_m 为参考模型的输出； x_{m1} 为参考模型的响应。

3.3 积分项 MRAC 控制器设计

控制器包括被控对象焊枪的前馈控制器和反馈控制器，可以根据参考模型和实际系统输出之间的焊接电流偏差，来调整自身参数以使被控系统输出与参考模型输出保持一致。本文为了增强整个焊接控制系统的抗干扰能力，在常规 MRAC 控制器中引入积分项，则控制输入 $u(t)$ 为

$$u(t) = \theta^T \phi(t) + k_i \int e(t) dt \quad (15)$$

式中： θ 为调整的参数向量； $\phi(t)$ 为回归向量，包含状态和输入信息； $e(t)$ 为电流偏差； k_i 为积分增益。

3.4 自适应律设计

自适应律用来确保控制器的参数能够根据堆焊系统的运行状态和 $H-I$ 模型计算电流偏差与焊炬高度，以实时调整焊炬高度，实现稳定的跟踪效果。本文以李雅普诺夫稳定性理论 (Lyapunov stability theory) [14] 设计积分项 MRAC 控制器可以增强焊炬高度跟踪的稳定性。

令 $\begin{cases} \tilde{K} = K_m - K_c K_p \\ e = x_m - x_p \end{cases}$ ，由式 (14) 可得焊接电流偏差 e 的运动方程为

$$\dot{e} = Ce + D\tilde{K}r \quad (16)$$

式中： \tilde{K} 为增益状态偏差； C 、 D 为误差动态方程中的系数矩阵。

为了得到 K_c 的比例积分型调节规律，选取 Lyapunov 函数 [15]，即

$$V = e^T P e + \lambda (\tilde{K} + \gamma_e K_p M)^2 \quad (17)$$

式中： P 为正定矩阵； λ 和 γ_e 为用来调整控制律的参数， $\lambda > 0$ 、 $\gamma_e > 0$ ； M 为系统中间变量， $M = Ke^T P D r$ ， $K = \eta \frac{K_p}{K_m}$ ， η 为比例常数。

之后计算 V 对焊接时间 t 的导数 \dot{V} ，即

$$\dot{V} = e^T (C^T P + PC) e + 2e^T P D \tilde{K} r + 2\lambda (\tilde{K} + \gamma_e K_p M) (\dot{\tilde{K}} + \gamma_e K_p \dot{M}) \quad (18)$$

为了使得 Lyapunov 函数递减，选择 K_c 的自适应律满足

$$\dot{\tilde{K}} + \gamma_e K_p \dot{M} = -K_p M \quad (19)$$

同时取 $\lambda K K_p = \lambda \frac{\eta K_p^2}{K_m} = 1$ ，则有

$$\dot{V} = -e^T P e - 2\lambda K_p^2 \gamma_e M^2 < 0 \quad (20)$$

因此，当焊接时间 $t \rightarrow \infty$ ， $e(t) \rightarrow 0$ 。 K_c 的自适应律 \dot{K}_c 为

$$\dot{K}_c = \gamma_e \dot{M} + M \quad (21)$$

式中： \dot{M} 为系统中间变量 M 的一阶导数。

由式 (21) 可知，通过引入比例-积分自适应律，可以提高整个焊炬高度跟踪系统的性能，确保焊接电流能够稳定地跟踪参考模型的输出，提升系统的响应速度和抗干扰能力。

4 GMAW 堆焊试验验证

4.1 高低跟踪验证方案

为验证所设计的基于 MRAC 的容器内壁堆焊焊炬高度跟踪系统的跟踪效果与可靠性，本文采用常规 PID 算法和积分项 MRAC 算法分别进行了验证试验，焊接参数见表 1。本次试验为单层多道堆焊，为减少焊接过程中的热变形，试验采用厚 12 mm 大直径微弯碳钢板，在焊前将工件左右固定好，放置在垂直于焊枪的竖直方向，如图 8 所示，枪在 A' 点时焊炬高度为 0，沿着罐壁轨道移动到 C' 点，此时焊炬离板材距离为 $B'C'$ ，也就是分别为制造板材与罐壁轨道之间的高度差 H' ，作为焊炬高度跟踪偏差。共设计两组试验，用来验证焊炬高度跟踪效果，分别设置工件高度偏差为 3 mm 和 5 mm，都采用横焊方式进行焊接。图 9 所示为往复焊接焊炬轨迹与未开启高度跟踪焊炬轨迹示意图。

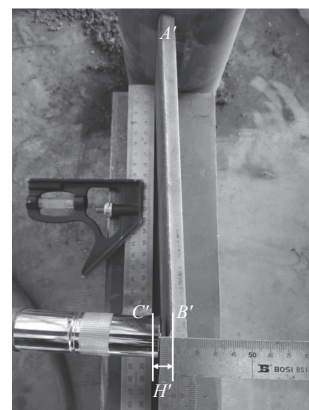


图 8 堆焊高度跟踪试验工件俯视图

Fig. 8 Top view of welding height tracking test workpiece

4.2 试验结果

试验在往复堆焊焊接过程中，电流数据采样时间间隔均为 20 ms。分别得到了在堆焊过程中的焊接电流、焊炬高度跟踪高度偏差与堆焊表面成形情况。

由方案1的试验结果可知,如图10a所示,试验刚开始起弧成功后,焊接电流值变化幅度较大,采用常规PID算法进行堆焊过程的电流跟踪,电流波动为 $\pm 15.8\text{ A}$,而采用积分项MRAC算法跟踪时,提取到的跟踪电流波动为 $\pm 5\text{ A}$,且往复堆焊的每一道之间的平均电流优化后更为稳定,热输入更为聚集,如图10b所示,且响应速度快,变化幅度较为平缓,说明本文设计的积分项MRAC控制器可以增强跟踪电流的抗干扰能力,减小堆焊过程中的焊接电流波动幅度,能够满足堆焊的焊接电流跟踪要求。

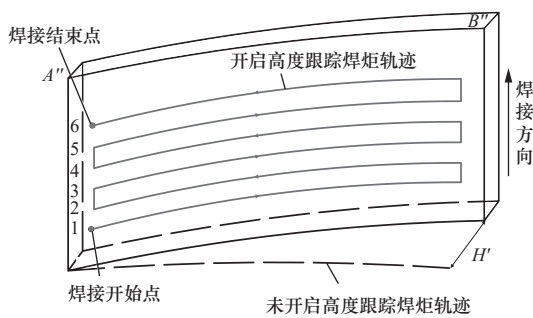
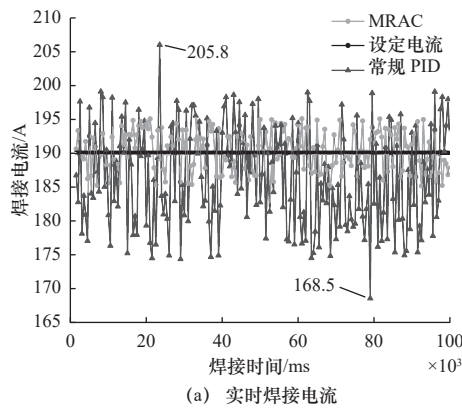


图9 堆焊焊炬轨迹示意图

Fig. 9 Schematic diagram of welding torch trajectory for overlay welding



(a) 实时焊接电流

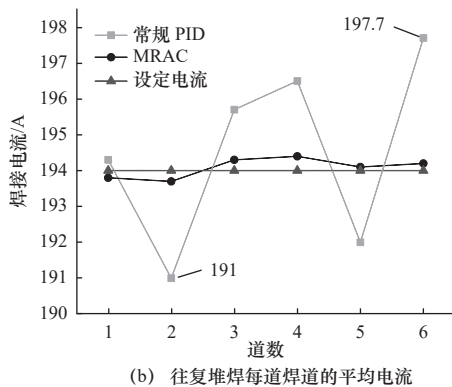
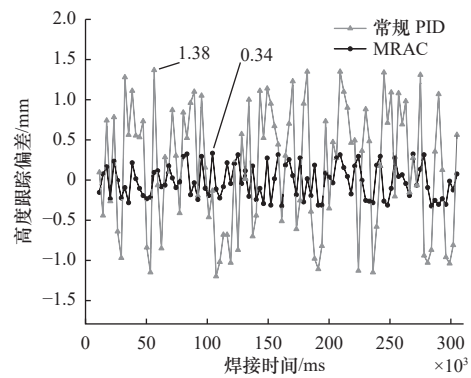


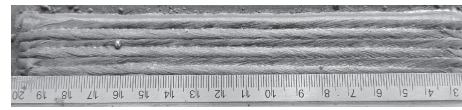
图10 工件高度差3mm焊接电流

Fig. 10 Workpiece height difference of 3 mm, welding current

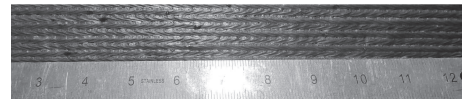
在堆焊过程中,采用建立的数学模型实时计算焊炬高度并利用积分项MRAC控制器进行高度偏差处理。焊炬高度跟踪偏差如图11a所示,焊枪初始高度设为15mm。由图中可以看出,使用常规PID跟踪时,焊炬高度在堆焊过程变化较为剧烈,稍有滞后,高度跟踪偏差为 $\pm 1.38\text{ mm}$,变化幅度较大,且焊道成型表面不平整,出现坑状焊道,如图11b所示;使用积分项MRAC跟踪时,焊炬高度跟踪偏差为 $\pm 0.34\text{ mm}$,焊炬高度变化较为平缓,此跟踪误差下的焊道表面成形平整,无明显凸起,如图11c所示,满足容器内壁修复堆焊工艺要求。



(a) 焊炬高度跟踪偏差



(b) 常规PID控制焊道成形



(c) 积分项MRAC控制焊道成形

图11 工件高度差3mm焊炬跟踪偏差与堆焊焊道成形

Fig. 11 Workpiece height difference of 3 mm, tracking deviation of welding torch and formation of weld bead

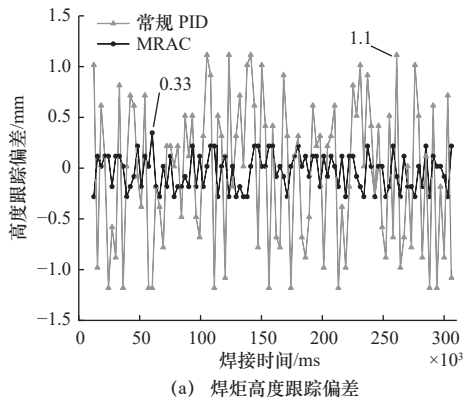
改变板材高度差进行试验2,再次验证积分项MRAC控制器的跟踪效果。采用常规PID控制的焊炬高度跟踪偏差为 $\pm 1.1\text{ mm}$,采用积分项MRAC控制器后焊炬高度跟踪偏差为 $\pm 0.33\text{ mm}$,如图12a所示,且相比PID控制,焊道表面平整,无明显缺陷,如图12b和图12c所示,实现了堆焊过程的稳定与精确控制。

5 结语

(1) 本文针对立式容器内壁堆焊修复问题,搭建了自动化堆焊平台,主要由GMAW堆焊设备、信息采集设备和运动控制设备组成。

(2) 由于噪声的影响,使得采集的原始电流蕴含大量噪声,经过 IIR 滤波对电流信号预处理后,波形较为理想,并采用积分项 MRAC 控制方法解决了容器内壁堆焊焊炬高度实时跟踪困难问题。

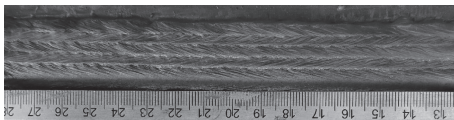
(3) 通过试验验证了积分项 MRAC 焊炬高度跟踪控制的跟踪效果与及时性,焊炬高度实时跟踪偏差为 ± 0.34 mm,满足容器内壁堆焊质量控制要求。



(a) 焊炬高度跟踪偏差



(b) 常规 PID 控制焊道成形



(c) 积分项 MRAC 控制焊道成形

图 12 工件高度差 5 mm 焊炬跟踪偏差与堆焊焊道成形

Fig. 12 The height difference of the workpiece is 5 mm, and the tracking deviation of the welding torch is related to the formation of the weld bead

参 考 文 献

- [1] 任艳艳, 张国赏, 魏世忠, 等. 我国堆焊技术的发展及展望 [J]. 焊接技术, 2012(6): 1-5.
- [2] 黄智泉, 贺定勇, 刘仁培, 等. 堆焊技术发展及应用综述 [J]. 电焊机, 2023(4): 56-62.
- [3] 王志江, 薛坤喜, 吴定勇, 等. 基于视觉传感的机器人焊缝纠偏控制系统 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 48-55.
- [4] XIA L, ZHOU J P, XUE R L, et al. Real-time seam tracking during narrow gap GMAW process based on the wide dynamic vision sensing method [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 101: 820-834.
- [5] 邹焱飏, 周卫林, 王研博. 基于概率连续模型的激光视觉焊缝自动跟踪 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 70-78.
- [6] 曾露, 孟正大, 龚焯飞. 脉冲 GMAW 焊的摆动电弧传感信号处理 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(增刊 2): 329-333.
- [7] 周灿丰, 吴金锋, 罗雨, 等. 基于高速摆动电弧传感器的 GMAW 焊缝跟踪技术研究 [J]. 焊接, 2013(9): 14-17, 70.
- [8] 杨园洲, 薛瑞雷, 刘宏胜, 等. 基于 EKF 的 GMAW 实时焊缝跟踪研究 [J]. 制造技术与机床, 2024(4): 44-50.
- [9] LIU W J, LI L Y, HONG Y, et al. Linear mathematical model for seam tracking with an arc sensor in P-GMAW processes [J]. Sensors, 2017, 17(3): 591.
- [10] 叶艳辉, 张华, 高延峰, 等. 电弧传感器静态数学模型的试验研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44(9): 185-186, 190.
- [11] KIM J W, NA S J. A self-organizing fuzzy control approach to arc sensor for weld joint tracking in gas metal arc welding of butt joints [J]. Welding Journal, 1993, 72: 60-63.
- [12] 廖宝剑, 吴世德, 潘际鑫. 电弧传感器理论模型及信息处理 [J]. 焊接学报, 1996(4): 263-271.
- [13] 田耀华, 薛瑞雷, 吴立斌, 等. 基于模糊 PID 的焊炬高低跟踪系统研究 [J]. 制造技术与机床, 2023(8): 113-118.
- [14] 胡凤宝, 戴士杰, 季文彬, 等. 基于 MRAC+PID 算法的机器人打磨力跟踪控制研究 [J]. 现代制造工程, 2024(4): 57-65, 79.
- [15] 嵇登臣. 基于模型参考自适应控制的电子节气门控制方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.

第一作者: 张宁, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 研究方向为智能焊接机器人。E-mail: 3370800232@qq.com

通信作者: 薛瑞雷, 男, 1967 年生, 高级工程师, 国务院特殊津贴专家, 研究方向为长输管道自动化焊接、机器视觉图像处理、人工智能。E-mail: 1981907557@qq.com

(编辑 高扬)

(收修改稿日期: 2024-07-24)