

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.05.014

基于外加磁场偏摆 TIG 电弧实现焊缝的跟踪控制

岳建锋¹, 陈豪杰¹, 邢恩成¹, 周 浩¹, 黄军芬²

(1. 天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387; 2. 北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102617)

摘 要: 针对在非熔化极惰性气体保护电弧焊(TIG)过程中由于钨极与工件的距离短, 摆动焊接时钨针与工件易发生干涉碰撞导致钨针受损的问题, 通过外加横向交变磁场作用于 TIG 电弧, 使电弧发生柔性偏摆, 实现焊枪中心偏差信号提取; 通过扩展卡尔曼滤波算法完成 TIG 焊弧压信号的良好去噪, 通过去噪后的弧压信号可获得焊缝坡口的位置特征信息; 利用弧压信号的左右区间积分差值法, 建立焊枪位置偏差数学模型; 利用模糊自整定 PID 控制算法实现 TIG 焊接过程中焊枪的稳定纠偏和抗干扰能力。结果表明: 本文方法可以对焊缝偏差准确地识别与补偿, TIG 焊接效率与焊缝跟踪精度明显提升, 最大误差控制在 0.25 mm 以内。

关键词: 非熔化极惰性气体保护电弧焊(TIG); 弧焊跟踪; 横向磁场; 信号滤波

中图分类号: TG409

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)05-0093-07

Tracking and control of weld seam based on external magnetic field swing TIG arc

YUE Jianfeng¹, CHEN Haojie¹, XING Encheng¹, ZHOU Hao¹, HUANG Junfen²

(1. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: In tungsten inert gas (TIG) welding, the short distance between the tungsten electrode and the workpiece makes the electrode susceptible to collision with the workpiece during swing welding, especially in seam tracking applications. To address this issue, a transverse alternating magnetic field is applied to induce flexible swing of the TIG arc, enabling non-contact sensing of the torch position relative to the weld seam. The welding voltage signal is processed using an extended Kalman filter (EKF) to effectively suppress noise and extract feature information of weld seam. Based on the integral difference of the left and right voltage signals during arc swing, a mathematical model is established to correlate the voltage variation with the torch deviation from the weld centerline. A fuzzy self-tuning PID control algorithm is then employed to achieve real-time correction of the torch position, improving both tracking stability and disturbance rejection ability. The experimental results demonstrate that the proposed method can accurately identify and compensate for weld deviations. The welding efficiency and weld seam tracking accuracy are significantly enhanced, with the maximum tracking error controlled within 0.25 mm.

Key words: tungsten inert gas welding (TIG); arc welding tracking; transverse magnetic field; signal filtering

非熔化极惰性气体保护电弧焊 (tungsten inert gas welding, TIG) 具有可靠性高、热输入稳定和焊接质量高等优势^[1-3], 广泛应用于精密工件、小尺寸薄壁件等适用特殊环境要求产品的加工制造。但目前 TIG 焊大多为手工焊接或者机器人 TIG 示教方式焊接, 存在效率低、自动化程度不高的问题^[4], 而焊缝跟踪技术对于

提升 TIG 焊的生产效率和自动化水平起到重要作用, 是实现智能化焊接的前提。

焊缝跟踪按照工作方式来划分, 主要分为激光视觉传感和电弧传感。其中, 激光视觉传感主要利用激光三角法原理, 获取线结构光在焊缝边缘的图像特征信息, 通过图像处理获取焊枪位置偏差信息^[5]。该方法

收稿日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1733125); 光机电装备技术北京市重点实验室开放项目(BIPT-OMET-2022-01)

通信作者: 岳建锋(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为焊接自动化。E-mail: billyue@163.com

工作原理简单,具有精度高、图像采集不受焊接过程影响的优点,在工程中获得广泛应用。应用电弧作为传感器进行焊缝跟踪的方案首先由德国 Aachen 工业大学 Eichhorn F 和 Platz J 于 20 世纪 70 年代末提出,并迅速引起了国内外学者的广泛重视。电弧跟踪传感主要利用焊接过程中电弧弧长的变化规律,来实现焊枪相对坡口中心的位置求解^[6]。相对于激光视觉传感,电弧跟踪具有成本低、不影响焊枪工作空间、受电弧光反射影响小等优势,在工程应用中优势明显,但相关技术有待进一步突破。清华大学潘际銮教授课题组^[7-8]首先对电弧传感焊缝跟踪技术进行了系统研究,建立了电弧传感的基本理论基础。毛志伟等^[9]建立了考虑 T 形和 V 形接头的熔池形状高速旋转电弧传感器的数学模型。近年来,人们把机器人的姿态与电弧传感器模型结合起来,研究焊炬空间姿态对偏差识别精度的影响、焊枪位姿的提取方法等^[10-11]。针对不断发展的焊接电源技术,Kim^[12]建立了推拉丝熔化极气体保护焊(GMAW)焊接的电弧传感模型。

电弧传感主要用于熔化极气体保护焊(GMAW)方式,其焊丝为柔性体,即便与工件短路接触也不会导致焊枪损伤。而 TIG 焊方式中焊枪与工件工作距离短,一般为 3~5 mm,摆动焊接非常容易发生钨极与坡口的干涉碰撞,导致钨针受损问题的发生,这制约了 TIG 焊电弧跟踪的广泛应用。为解决上述问题,本文将磁控电弧技术应用到 TIG 焊缝跟踪中,开发了一款新型磁控电弧传感器,利用外加横向交变磁场作用于焊接电弧,实现柔性电弧的往复摆动。利用提取的弧压信号获取焊枪实时位置的偏差,通过模糊 PID 控制实时调节焊枪位置,以实现良好的焊缝跟踪效果。

1 工作原理

焊接电弧由焊枪与工件之间正负极激发出的电荷形成弧柱区,内部带电等离子体运动形成焊接电流^[13]。当施加外部横向磁场作用于焊接电弧时,外部磁场将与电弧的带电等离子相互作用,产生一定方向的洛伦兹力 F ,可表示为:

$$F = m \frac{dv}{dt} = qvB \quad (1)$$

式中: m 为电荷质量(kg); v 为电荷运动速率(m/s); B 为磁感应强度(T); q 为带电粒子的电荷量(C)。

控制外加的横向磁场交替改变方向,焊接电弧因受到交变的电磁力,将以一定频率摆动,如图 1 所示。根据电弧理论,弧压会随着摆动中心位置的变化而发生规律性变化。基于此,本文研究焊枪摆动中心与焊

缝中心之间的位置偏差以及该偏差与弧长调整引发的弧压信号变化规律,进而建立弧压-焊缝偏差模型,利用该模型调整焊枪位置纠偏,实现 TIG 焊缝的自动跟踪。

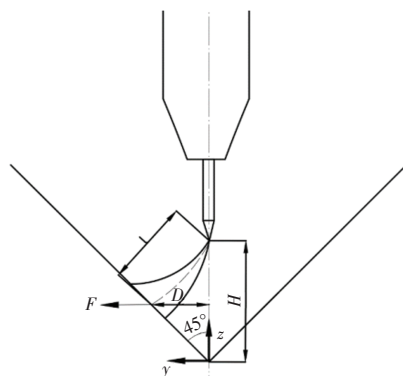


图 1 V 型焊缝外加横向磁场的电弧摆动

Fig.1 Arc oscillation with transverse magnetic field applied to V-welding seam

基于上述理论分析,本文开发了横向交变磁场励磁装置,如图 2 所示。

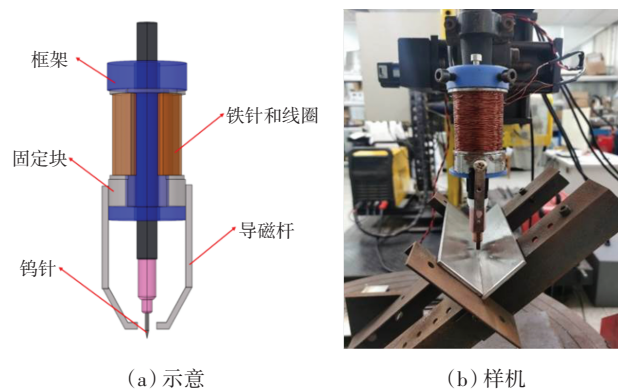


图 2 横向交变磁场励磁装置

Fig.2 Transverse alternating magnetic field excitation equipment

图 2(a)所示的 TIG 电弧交变励磁装置,由框架、导磁杆、固定块、钨针、铁针和线圈组成。励磁交变电流施加到左右两侧线圈上,通过导磁杆将磁场传递到钨针末端两侧,控制电弧摆动,装置样机如图 2(b)所示。试验中主要通过调节励磁电流的大小来改变电弧的摆幅,通过比较焊接过程中的弧压差值来获取偏差信息。

2 电弧弧压信号去噪分析

准确采集弧压信号是实现 TIG 焊接跟踪的前提。受焊接恶劣电磁干扰因素影响,采集的弧压信号存在噪声大、非线性严重等问题,采用平均值等常规滤波算法无法实现噪声干扰的有效处理和信号特征的准

确提取。针对上述问题,本文研究了 LMS 自适应滤波和扩展卡尔曼滤波算法对弧压的降噪效果,并对处理结果进行了对比分析。

2.1 LMS 自适应滤波

自适应滤波器是把上一时刻得到的滤波参数作为基准,自动调节当前时刻的参数,从而获得最佳的去噪效果和信号特性^[14]。与传统维纳滤波器相比,自适应滤波器参数是时变的,更适用于非平稳的信号处理,且迭代过程简单。

首先确定步长参数 μ 和滤波器阶数 L , 输入信号矢量 $\mathbf{x}(n)$ 和由 $L+1$ 个权系数构成的权系数矢量 $\mathbf{w}(n)$ 可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(n) = [x(n) x(n-1) \cdots x(n-L)]^T \\ \mathbf{w}(n) = [w_0(n) w_1(n) \cdots w_L(n)]^T \end{cases} \quad (2)$$

输出信号 $y(n)$ 可表示为:

$$y(n) = \mathbf{x}^T(n) \mathbf{w}(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n) \quad (3)$$

利用最陡下降算法,沿着性能曲面负梯度方向调整滤波器权向量,搜索性能曲面的最小点。利用瞬态均方差对滤波器系数求梯度:

$$\begin{aligned} \hat{\nabla} J &= \frac{\partial (e^2(n))}{\partial \mathbf{w}(n)} = [2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial w_1(n)}, 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial w_2(n)}, \dots, \\ &2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial w_L(n)}] = -2e(n) \mathbf{x}(n) \end{aligned} \quad (4)$$

系数向量的迭代公式为:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu e(n) \mathbf{x}(n) \quad (5)$$

2.2 扩展卡尔曼滤波

扩展卡尔曼滤波是卡尔曼滤波在非线性情况下的一种扩展,其基本思想是利用泰勒级数将非线性系统线性化,通过卡尔曼滤波框架完成对目标的滤波估计等处理^[15-16]。

首先将卡尔曼滤波的状态方程、测量方程变为非线性随机差分方程的形式:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}_k$ 为状态向量; $\mathbf{z}_k$ 为观测向量; $\mathbf{w}_k$ 为系统噪声, $\mathbf{v}_k$ 为观测噪声, $\mathbf{w}_k$ 和 $\mathbf{v}_k$ 是不相关的均值为 0 的高斯随机变量; 协方差分别为 $\mathbf{Q}_k$ 和 $\mathbf{R}_k$ 。状态方程中的非线性函数 $\mathbf{f}$ 将 k 时刻的状态映射到 $k+1$ 时刻。

将非线性函数 $\mathbf{f}(\mathbf{x}_k)$ 在 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ 处进行一阶泰勒展开:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_k) = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_k) + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}_k} (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k) + o(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k) \quad (7)$$

其中 $o(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k})$ 为高阶项, 令 $\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}_k} = \mathbf{F}_k$, 忽略高阶项, 状态方程化简为:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}) + \mathbf{F}_k (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}) + \mathbf{w}_k \quad (8)$$

状态与测量间的互协方差矩阵为:

$$\mathbf{P}_{xz, k+1|k} = E[(\mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k})(\mathbf{z}_{k+1} - \hat{\mathbf{z}}_{k+1})^T] = \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T \quad (9)$$

状态增益矩阵为:

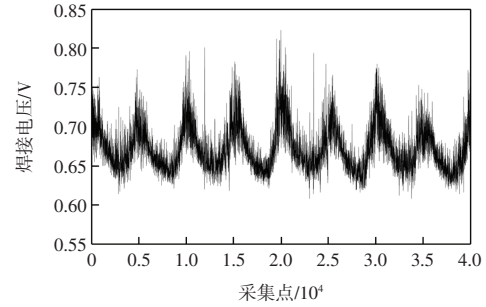
$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{xz, k+1|k} (\mathbf{P}_{zz, k+1|k})^{-1} = \\ &\mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T (\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{P}_{k+1})^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

$k+1$ 时刻后验状态估计误差协方差矩阵为:

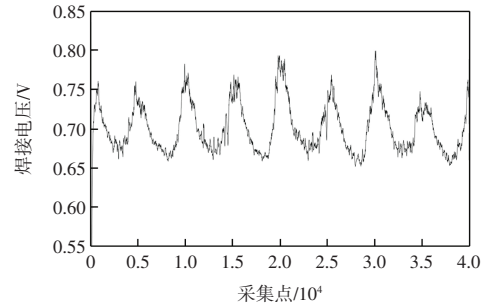
$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k+1|k+1} &= E[(\mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1})(\mathbf{x}_{k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1})^T] = \\ &(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}) \mathbf{P}_{k+1|k} \end{aligned} \quad (11)$$

2.3 弧压信号降噪效果分析

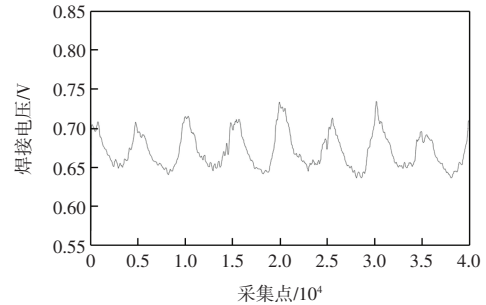
图 3 所示为原始弧压信号和分别经 LMS 自适应滤波和扩展卡尔曼滤波处理后的弧压信号。



(a) 采集的原始弧压信号



(b) LMS 滤波



(c) 扩展卡尔曼滤波

图 3 弧压信号原始数据及其滤波处理结果

Fig.3 Raw arc voltage signal raw data and their filtering processing results

由图 3 可知,经过 LMS 自适应滤波算法处理过的信号曲线去噪效果明显,且保留了原有信号的特征,但波形上仍然保留了一些高频干扰噪声;经过扩展卡尔曼滤波算法处理后可以获得更加平滑的信号处理效果,且最大程度保留了原有信号的特征,为后续处

理提供了便利,与 LMS 滤波算法相比,可更为有效地去除噪声的影响。

3 摆动电弧压信号的位置特征分析

TIG 焊枪在 V 型坡口中焊接时,焊枪处于左偏 2 mm、对中和右偏 2 mm 不同偏差位置时,电弧形态如图 4 所示。

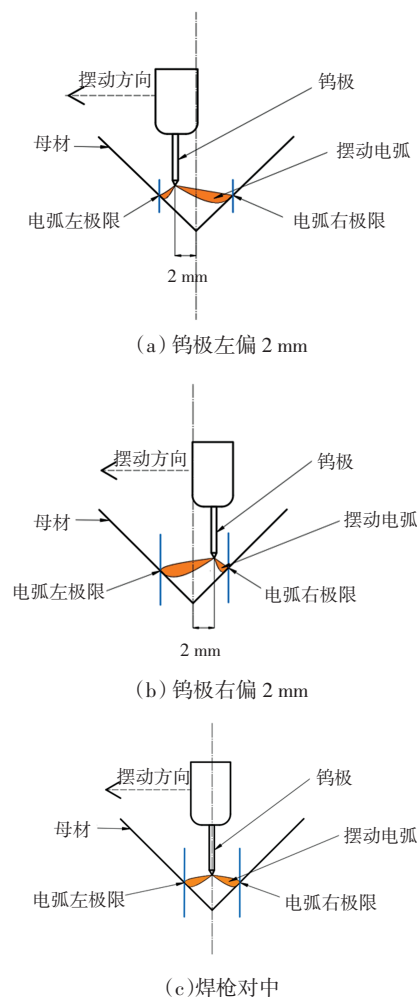


图 4 V 型坡口焊枪在不同偏差位置的电弧摆动

Fig.4 Arc oscillation of V-bevel torch at different deviation positions

本文针对上述 3 种位置偏差进行摆动试验,并进行弧压信号的采集和滤波处理,获得了具有明显坡口位置特征的弧压信号,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,受外加磁场影响,弧压信号发生周期性变化。 A 点位置对应摆动周期初始位置处的弧压值, B 点位置对应焊枪摆到左极限的弧压值, C 点位置为焊枪摆到右极限的弧压值, $A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow A$ 表征了一个摆动周期,这与焊接过程中弧压信号变化的实际物理变化规律是相符的。

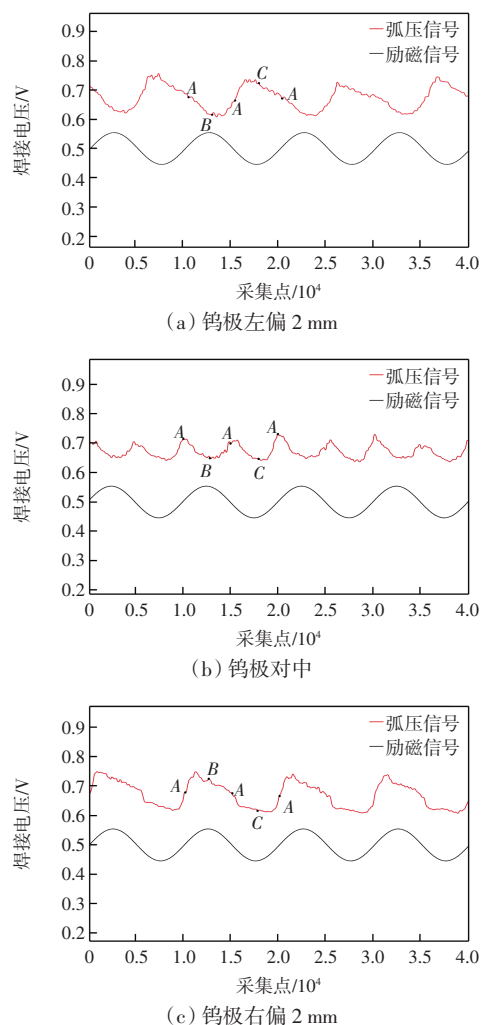


图 5 弧压信号曲线

Fig.5 Curves of arc voltage signal

4 偏差模型与模糊控制策略

图 6 所示为左右区间的数值积分。

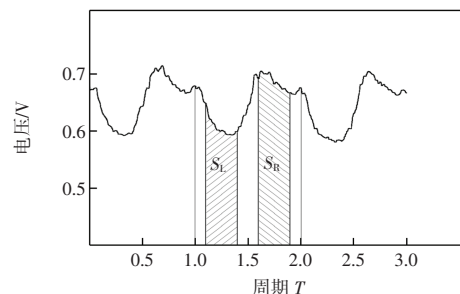


图 6 左右区间的数值积分

Fig.6 Numerical integration of left and right intervals

采用图 6 所示左右区间积分差值法构建焊枪位置偏差数学模型,具有受随机噪声信号影响较小、计算速度快、可满足实时焊缝跟踪等优势^[17]。通过外加横向磁场来驱动焊接电弧摆动,励磁电流信号和电弧摆

动存在着良好对应关系,根据励磁信号确定积分的起始时刻。分别计算左右区域的弧压数值积分,如果左积分值 $S_L >$ 右积分值 S_R ,说明焊枪相对焊缝中心偏右;如果 $S_L < S_R$,则焊枪相对于焊缝中心偏左。

表 1 分别为焊枪相对于焊缝对中以及左偏 1、2、3 mm 时的区间积分结果。试验发现积分差值 $\Delta S = S_R - S_L$ 随着偏差的增大而相应增加。

表 1 焊枪左偏不同程度积分

Tab.1 Integration of different degrees of leftward deviation of welding torch

积分	偏差/mm			
	3	2	1	0
S_L	1 875.8	1 916.3	1 932.5	1 967.8
S_R	2 192.4	2 131.6	2 039.3	1 976.0
ΔS	316.6	215.3	106.8	8.2

为了进一步提升积分差值与偏差之间的模型准确性,在焊枪左偏 1、2、3 mm 情况下分别开展了 10 组摆动试验,如表 2 所示。

表 2 焊枪左偏不同位置的积分差值

Tab.2 Integral difference between distinct positions of left deviation of welding torch

积分差值	偏差/mm		
	3	3	1
ΔS_1	303	230	115.3
ΔS_2	324	206.3	109.2
ΔS_3	346.1	209.4	123.8
ΔS_4	316.6	227.4	128.6
ΔS_5	312.8	216.9	131.2
ΔS_6	317.5	207.2	106.8
ΔS_7	326	208.6	119.5
ΔS_8	334.8	215.3	126.7
ΔS_9	333.5	210.5	136.2
ΔS_{10}	307.6	194.6	132.8

根据表 2 构建了积分差值 ΔS 与焊枪位置偏差 D 的一元线性回归方程(式(12)),数据拟合结果见图 7。

$$\Delta S = 101.23D + 16.26 \quad (12)$$

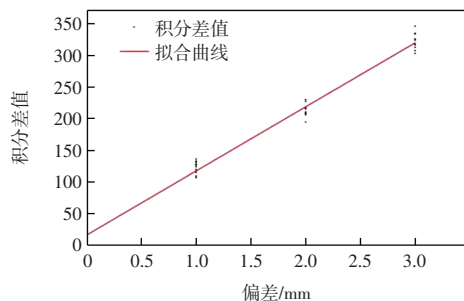


图 7 焊枪位置偏差与积分差值数据的线性回归

Fig.7 Linear regression between torch position deviation and integral difference data

5 模糊自整定 PID 控制

TIG 焊左右跟踪一般常用于角焊缝和 V 型坡口焊接,对跟踪的精度要求较高。其中电弧位置的判断、区间的精确划分都会影响积分算法计算结果的精度,导致跟踪效果差的问题。

针对上述问题,在 TIG 焊跟踪中提出模糊自整定 PID 控制算法,该算法将 PID 控制与模糊控制进行融合,以偏差 E 和偏差变化率 EC 作为输入,经过参数模糊化、制定模糊控制表、模糊推理、解模糊化,实现 PID 参数的实时变更^[18-20],以适应 TIG 焊对跟踪精度和稳定性的要求,控制系统结构如图 8 所示。

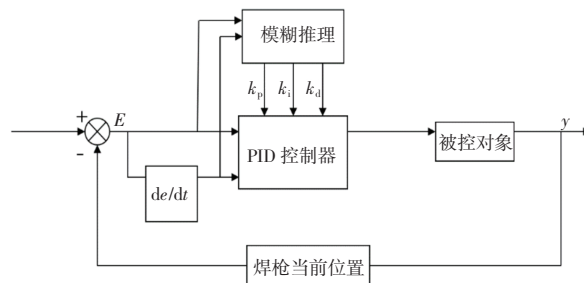


图 8 参数模糊 PID 控制器结构

Fig.8 Structure of parametric fuzzy PID controller

利用 Simulink 控件开展了模糊 PID 控制仿真,仿真结果如图 9 所示,并与传统 PID 控制做比较,红色曲线和蓝色曲线分别为模糊 PID 控制和 PID 控制。由图 9 可以看出,模糊 PID 控制明显具有更快的响应速度,它通过模糊控制对 PID 参数进行修正,提升了控制系统的抗干扰能力,更能满足工况复杂的 TIG 焊缝跟踪。

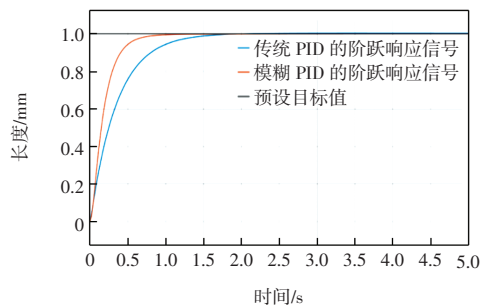


图 9 阶跃信号响应对比

Fig.9 Comparison of step signal response

6 试验验证

为了验证算法的有效性,利用设计的横向交变磁场励磁装置,开展了角焊缝中心右偏 10° 的焊缝跟踪试验,如图 10 所示,相关焊接工艺参数见表 3。

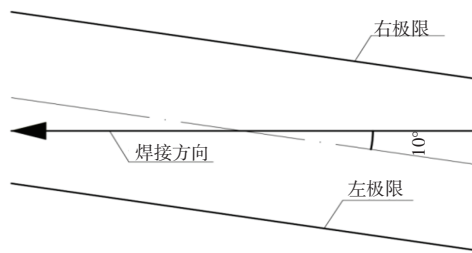


图 10 角焊缝跟踪实验

Fig.10 Fillet weld tracking experiment

表 3 左右跟踪焊接工艺参数

Tab.3 Parameters of left and right tracking welding process

工艺参数	值
焊接电流/A	100(恒流)
母材厚度/mm	5(不锈钢板)
坡口形状	90°角焊缝
焊缝偏转角/(°)	10
焊接速率/(mm·s ⁻¹)	1.5
送丝速率/(cm·min ⁻¹)	35
氩气流量/(L·min ⁻¹)	12
励磁电流/A	6(交流)
励磁频率/Hz	1
励磁输出波形	正弦波

试验发现,采用积分差值直接输出,一旦焊接过程中出现较大干扰,积分差值激增或急剧降低,极易发生焊枪与工件的碰撞。

采用模糊 PID 控制算法,能准确将焊枪调回焊缝中心位置,焊枪左右摆动剧烈现象得到较好解决,可靠性明显提升,跟踪的焊枪纠偏效果如图 11 所示。

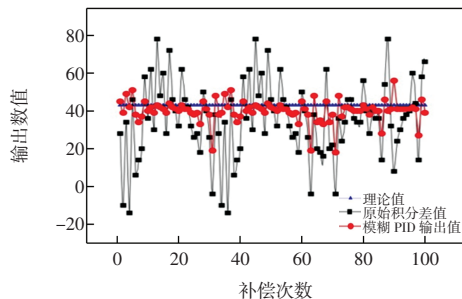


图 11 模糊 PID 控制算法的纠偏效果

Fig.11 Correction effect of fuzzy PID control algorithm

围绕试验结果,进一步开展了算法控制效果的误差分析,如表 4 所示。

积分差值算法的误差相对分散,只有 37%的数据误差控制在 ± 0.1 mm 内,且最大误差达到 0.53 mm。经过模糊 PID 优化处理后,94%的数据误差能控制在 ± 0.1 mm 内,最大误差仅为 0.25 mm。由此说明,采用本文方法可以获得较好的跟踪效果。

表 4 角焊缝跟踪误差

Tab.4 Fillet weld tracking error

数据误差范围/mm	数据误差比例/%	
	原始数据	优化数据
[0~0.1)	37	94
[0.1~0.2)	34	3
[0.2~0.3)	15	3
[0.3~0.4)	5	0
[0.4~0.5]	9	0

7 结 语

开发了用于 TIG 焊接电弧的横向磁场励磁装置,通过施加交变励磁电流,实现了焊接电弧的柔性摆动,大幅降低钨针与焊缝坡口碰撞,可实现焊枪中心偏差信号提取;通过扩展卡尔曼滤波算法,完成了 TIG 焊弧压信号的良好去噪,通过去噪后的弧压信号可获得焊缝坡口的位置特征信息;基于区间差分算法实现了焊接偏差的有效识别,采用模糊 PID 算法控制,实现了 TIG 焊接过程中焊枪的稳定纠偏,最大误差控制在 0.25 mm 以内,为下一步该技术的工程应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王晓军, 杨健, 周栋, 等. Q345/316L 异种钢 K-TIG 焊接接头的组织及性能[J]. 电焊机, 2021, 51(1): 66-72, 121.
WANG X J, YANG J, ZHOU D, et al. Microstructure and properties of K-TIG welded joint of Q345/316L dissimilar steel[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(1): 66-72, 121 (in Chinese).
- [2] 吴懿萍, 周志纲, 刘蜜, 等. TIG 焊接工艺参数对 AZ61D 镁合金接头组织及力学性能的影响[J]. 长沙大学学报, 2022, 36(2): 20-26.
WU Y P, ZHOU Z G, LIU M, et al. Effects of TIG welding parameters on microstructure and mechanical properties of AZ61D magnesium alloy joint[J]. Journal of Changsha University, 2022, 36(2): 20-26 (in Chinese).
- [3] 马兆炫, 刘一搏, 王建峰, 等. 双相不锈钢水下局部干法 TIG 焊接工艺[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 48-54.
MA Z X, LIU Y B, WANG J F, et al. Underwater local dry TIG welding of duplex stainless steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4): 48-54 (in Chinese).
- [4] DONEGÁ T J, COSTA T F, ARENCIBIA R V, et al. Comparison of thermal efficiency between A-TIG and conventional TIG welding[J]. Welding International, 2016, 30(4): 255-267.

- [5] 席保龙, 张峻铭, 邓小龙, 等. 基于激光视觉焊缝跟踪的空心叶片自动焊研究[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 89-94.
XI B L, ZHANG J M, DENG X L, et al. Automatic welding of hollow blade based on laser vision weld tracking[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 89-94 (in Chinese).
- [6] 梅遨宇, 安伟, 刘建新, 等. 基于电弧跟踪技术的转向架构架焊接机器人焊接工艺[J]. 焊接技术, 2021, 50(10): 66-69.
MEI A Y, AN W, LIU J X, et al. Welding robot welding technology of bogie frame based on arc tracking technology[J]. Welding Technology, 2021, 50(10): 66-69 (in Chinese).
- [7] PAN J L. Arc sensing system for automatic weld seam tracking (II)[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2001, 44(4): 389-397.
- [8] 洪宇翔, 都东, 潘际銮, 等. Seam-tracking based on dynamic trajectory planning for a mobile welding robot[J]. 中国焊接, 2019, 28(4): 46-50.
HONG Y X, DU D, PAN J L, et al. Seam-tracking based on dynamic trajectory planning for a mobile welding robot[J]. China Welding, 2019, 28(4): 46-50 (in Chinese).
- [9] 毛志伟, 陈斌, 周少玲, 等. 基于实际熔敷形状的旋转电弧传感器数学模型[J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 26-30, 162.
MAO Z W, CHEN B, ZHOU S L, et al. Mathematical model of rotating arc sensor based on actual deposited metal of the weld pool[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(2): 26-30, 162 (in Chinese).
- [10] 李湘文, 吴宏宝, 洪波, 等. 旋转电弧机器人 V 形坡口焊缝跟踪模型与仿真[J]. 焊接学报, 2020, 41(8): 85-89, 102.
LI X W, WU H B, HONG B, et al. V-groove weld tracking model and simulation of rotating arc robot[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(8): 85-89, 102 (in Chinese).
- [11] LE J, ZHANG H, CHEN X Q, et al. Identification of the space posture of arc welding guns with rotational arc sensors in GMAW[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9): 3447-3459.
- [12] KIM C. Through arc sensing for reciprocating wire feed gas metal arc welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(9): 1557-1565.
- [13] 尉增强, 杜方静. 螺旋埋弧焊管生产中磁场对焊接质量的影响[J]. 焊管, 2014, 37(2): 59-63.
WEI Z Q, DU F J. Affect of magnetic field to quality in the production of SAWH pipe[J]. Welded Pipe and Tube, 2014, 37(2): 59-63 (in Chinese).
- [14] 崔旭涛, 何友, 杨日杰. 自适应滤波算法的仿真及工程实现[J]. 现代电子技术, 2009, 32(18): 179-181, 184.
CUI X T, HE Y, YANG R J. Simulation and engineering realization of adaptive filter algorithm[J]. Modern Electronics Technique, 2009, 32(18): 179-181, 184 (in Chinese).
- [15] FU X Y, SONG X M. Distributed maximum correntropy Kalman filter with state equality constraints in a sensor network with packet drops[J]. Signal Processing, 2023, 213: 109218.
- [16] 王学斌, 徐建宏, 张章. 卡尔曼滤波器参数分析与应用方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(6): 212-215.
WANG X B, XU J H, ZHANG Z. On analysis and application approach for Kalman filter parameters[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(6): 212-215 (in Chinese).
- [17] 李毅, 邓耀文, 洪波, 等. 基于双周期积分差值法的摆动电弧焊缝跟踪方法[J]. 热加工工艺, 2020, 49(13): 123-127.
LI Y, DENG Y W, HONG B, et al. Swing arc weld seam tracking method based on double periodic integral difference method[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(13): 123-127 (in Chinese).
- [18] NGUYEN T A. Research on the sliding mode-PID control algorithm tuned by fuzzy method for vehicle active suspension[J]. Forces in Mechanics, 2023, 11: 100206.
- [19] FENG X L, HU J. Discrete fuzzy adaptive PID control algorithm for automotive anti-lock braking system[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021 (4): 1-10.
- [20] SHI Y L, QIAO Z Y, BAI K Q, et al. A fuzzy adaptive PID control algorithm with improved quantification factor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1828(1): 012154.

本文引文格式:

岳建锋, 陈豪杰, 邢恩成, 等. 基于外加磁场偏摆 TIG 电弧实现焊缝的跟踪控制[J]. 天津工业大学学报, 2025, 44(5): 93-99.

YUE J F, CHEN H J, XING E C, et al. Tracking and control of weld seam based on external magnetic field swing TIG arc[J]. Journal of Tiangong University, 2025, 44(5): 93-99 (in Chinese).

(责任编辑:程晓英)