

基于坡口形态视觉感知的焊接参数自主优化研究

马志¹, 刘冲², 程永超¹, 闫朝阳², 陈树君²

1. 中车工业研究院有限公司 北京 100071

2. 北京工业大学 北京 100124

摘要: 为应对机器人焊接智能化升级的挑战, 创新性地提出一种基于坡口形态视觉感知的焊接参数自主优化策略, 重点增强焊接系统对大尺寸坡口的动态适应能力。通过构建几何约束驱动的摆动模型, 并集成激光视觉传感器实现坡口形貌的实时捕捉, 系统能够依据坡口特征动态调整摆动轨迹。研究采用对比试验与轮廓精度分析双重验证方法, 结果表明: 该摆动模型有效降低了焊缝热密度, 同时将焊缝宽度精准控制为11.0~12.1mm, 显著提升了焊接工艺的稳定性 and 成形质量。

关键词: 智能焊接; 视觉感知; 焊接控制; 摆动模型

Research on autonomous optimization of welding parameters based on visual perception of groove shape

MA Zhi¹, LIU Chong², CHENG Yongchao¹, YAN Zhaoyang², CHEN Shujun²

1. CRRC Industrial Academy Co., Ltd., Beijing 100071, China

2. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: To address the challenge of intelligent upgrading of robotic welding, this study innovatively proposes an autonomous optimization strategy for welding parameters based on visual perception of groove morphology, focusing on enhancing the dynamic adaptability of the welding system to large-scale grooves. By constructing a geometric constraint-driven swing model and integrating a laser vision sensor to achieve real-time capture of groove topography, the system can dynamically adjust the swing trajectory based on groove characteristics. The study used a dual verification method of comparative experiments and contour accuracy analysis, and the results showed that the swing model effectively reduced the heat density of the weld, while accurately controlling the weld width within the range of 11.0~12.1mm, significantly improving the stability and forming quality of the welding process.

Keywords: intelligent welding; visual perception; welding control; swing model

1 序言

随着自动化程度的提升, 智能焊接在现代制

造业中占据核心地位, 显著提高了生产效率、焊接质量及一致性^[1]。自适应焊接技术尤为亮眼, 通过

基金项目: 国家自然科学基金(52205322); 北京市自然科学基金(3242001)。

第一作者: 马志, 硕士, 高级工程师, 主要从事智能制造、智能焊接技术研究, E-mail: mazhi1110@126.com。

通信作者: 闫朝阳, 博士, 副教授, 主要从事智能焊接、电弧熔丝增材制造研究, E-mail: yanzzy@bjut.edu.cn。

实时调整焊接参数，有效抵御人为及不可预见因素的干扰，极大地提升了焊接质量^[2-4]。但其大规模应用仍面临较大挑战，主要包括：①传统方法依赖焊接电流、电弧电压等单变量调整，易导致热密度分布不均匀，动态热输入控制不足。②一种自适应模型往往只匹配一种焊接场景，环境适应性较弱。③系统集成复杂度较高^[5]。

早期智能焊接研究聚焦于焊前离线示教技术，但该技术高度依赖焊工经验，易导致视觉疲劳、反应迟缓及技能受限等问题，影响焊接操作稳定性^[6, 7]。为克服应用局限，远程监测与自动焊缝跟踪技术受到广泛关注^[8, 9]。SOARES等^[10]开发了自动焊缝跟踪与几何分析系统，利用图像识别算法提升自主焊接能力，并为焊接质量评估提供了有效工具，但该方法仍难以满足焊接的实时自适应要求。

为了提高焊接的自动化与智能化水平，焊接参数自主优化技术的发展显著提高^[11, 12]。YAN等^[13]提出基于物理与数据双驱动模型的焊接参数自主优化方法，并通过试验验证了其有效性，但该方法采用直接增大电流和降低机器人进给速度的传统方法，虽然在一定程度上能有效提高填充量，但是焊接作为多物理场耦合的复杂热力学过程，在应对大坡口时，焊接参数的变化往往会导致局部热密度激增，从而产生焊穿或未熔合缺陷^[14, 15]。因此，亟需一种既能避免焊穿又能增强自适应参数优化能力的方法。本文创新性地提出了一种基于坡口形态视觉感知的焊接参数自主优化策略，通过高精度激光视觉传感器实时提取坡口几何特征，构建几何约束驱动的摆动模型，结合PC与激光传感器与电动机的协议实现焊接参数与摆动轨迹的协同优化。该方法突破传统参数调节的局限性，通过动态热输入分配与熔池流场控制，在避免焊穿的同时实现大坡口的满填充焊接，为复杂工况下的智能化焊接提供理论支撑。

2 试验平台与焊接工艺

焊接参数自主优化试验系统及坡口形貌提取示意如图1所示。该系统包括IPC-610L工业计算机（配置i7-7700处理器/16GB内/2TB×2内存）、OSL-50A激光视觉传感器、KUKA机器人及其控制柜、Simens电动机及其控制器（误差公差为

$\pm 0.1\text{rad}$ ）、FRONIUS焊接电源和工作台。OSL-50A激光视觉传感器几何精度0.1mm，能够适应复杂焊缝形态，并提供实时监测与反馈，以其高精度和实时性能为特点，用于检测焊缝形态参数并实现与工业计算机的实时数据交换。

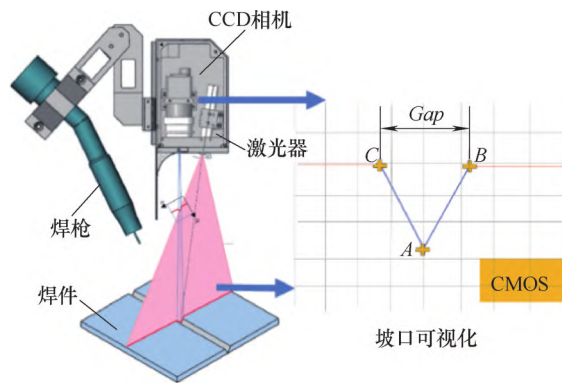


图1 焊接参数自主优化试验系统及坡口形貌提取示意

试验采用金属惰性气体（MIG）焊接工艺，使用了Fronius电源系统中集成的G3Si1焊接工艺包。保护气体为80%Ar+20%CO₂的混合气体。基础材料为10mm厚度、30°坡口角度的Q355低碳钢板。填充材料选用直径为1.2mm的THQ-50C焊丝。母材和填充焊丝的化学成分见表1。

表1 母材和填充焊丝的化学成分（质量分数）（%）

材料	C	Mn	Si	P	S	Fe
Q355	≤0.20	≤1.70	≤0.50	≤0.035	≤0.035	余量
THQ-50C	0.06~0.15	1.40~1.85	0.80~1.15	≤0.025	≤0.035	余量

3 摆动模型建立

在传统焊接熔覆过程中，对于对称坡口，焊枪往往设置在坡口中轴线位置（标定零点）。在这种安装方式下，为了增加坡口的填充量，往往减小机器人的进给速度且增加焊接电流、电弧电压等过程参量。这种调节方式虽然能够补偿填充量，但是对于尺寸较大的坡口，仅调节焊接过程参量可能导致热密度过大，母材被焊穿的现象；除此之外，由于焊枪的安装位置位于坡口中心位置，对于大尺寸坡口，焊缝往往在铺展完全之前便已经凝固，从而导致焊缝存在咬边现象。基于上述问题，为了均衡单位面积上的热输入及实现焊缝的完全铺展，提出了一种基于几何约束的摆动策略，将电动机安装

在KUKA机器人第六轴末端以增加第七轴作为摆动轴，通过激光视觉传感器提取坡口上表面间隙，焊

枪自适应匹配摆动幅度与摆动频率，摆动控制策略流程如图2所示。

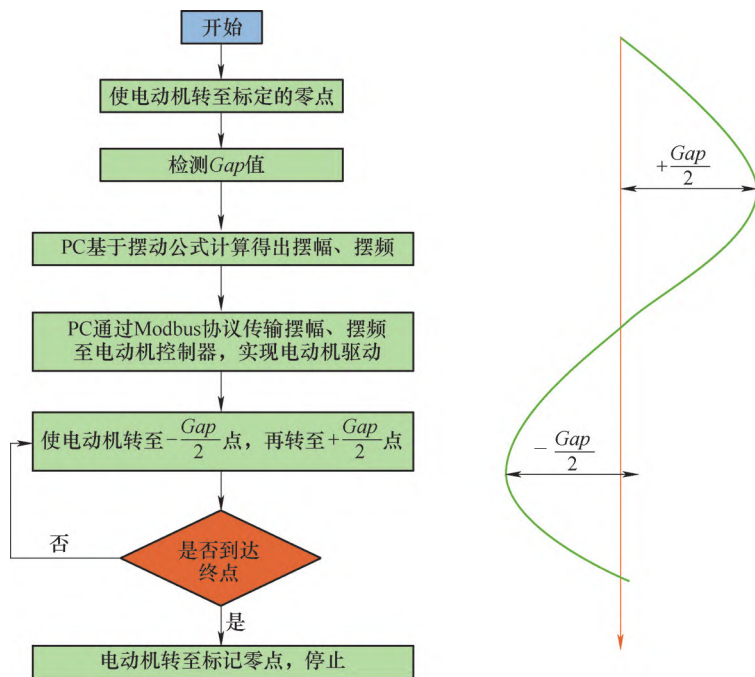


图2 摆动控制策略流程

为实现摆动，将坡口上表面间隙 Gap 作为几何约束，为了实现焊缝覆盖区域恰好为坡口区域，可得摆幅 Am 与 Gap 存在如下关系，即

$$Am = \frac{1}{2}Gap \quad (1)$$

将满足满填充下的摆频作为因变量，基于大量试验对自变量与因变量进行最小二乘法拟合，可得 Gap 与摆频（Frequency）的经验公式，即

$$Frequency = 0.0142Gap + 0.5234$$

$$R^2 = 0.7167 \quad (2)$$

其中， R^2 为决定系数，部分数据见表2。

表2 满填充下 Gap 与摆幅、摆频参数对照

Gap/mm	摆幅/mm	摆频/Hz
8	4	0.625
10	5	0.67
12	6	0.69
14	7	0.70
16	8	0.83
18	9	0.78
20	10	0.80

4 摆动控制过程

4.1 在线数据交互

实现机器人焊接参数自适应优化的关键在于确

保数据交互的实时性与准确性。本文基于TCP、Modbus通信协议，分别进行PC与激光视觉传感器、PC与电动机控制器间数据的实时交互。在PC与激光传感器的通信过程中，将PC作为客户端，激光传感器作为服务端，匹配二者的IP与端口号；在PC与电动机控制器的通信过程中，将PC作为主站，电动机作为从站，进行PC与电动机控制器之间的通信参数配置，包括从站地址、端口、波特率及校验方式等数据的交互，如图3所示。

4.2 系统操作过程

焊接作业前，机器人需进行坐标系标定与激光传感器标定。随后，基于焊缝特征进行离线轨迹规划。轨迹确定后，启动焊接工艺。

在机器人焊接过程中，固定于机器人第六轴末端的激光传感器实时扫描焊缝。激光传感器将坡口的上表面间隙 Gap 传输至PC，经摆动系统基于上表面间隙 Gap 输出焊枪的摆幅和摆频，并将相应信息传输给电动机控制器以进行实时摆动控制，实现自适应填充，直至到达示教轨迹终点。焊接系统操作流程如图4所示。

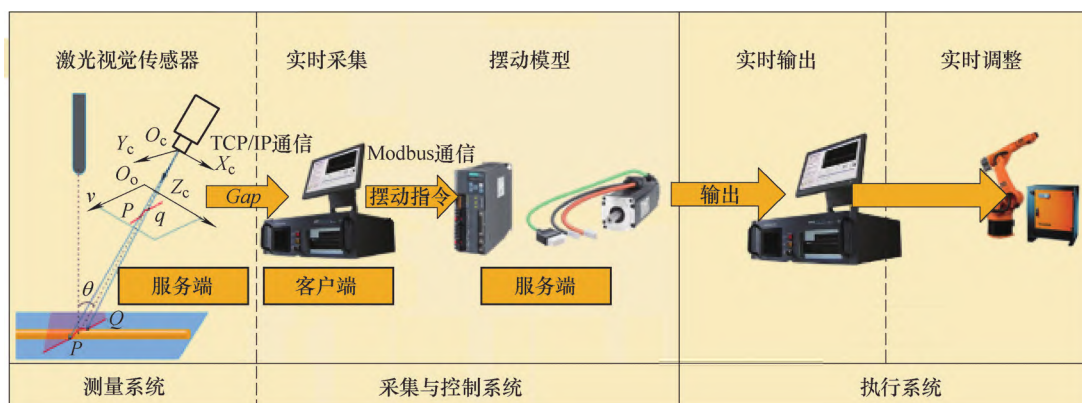


图3 在线数据交互示意

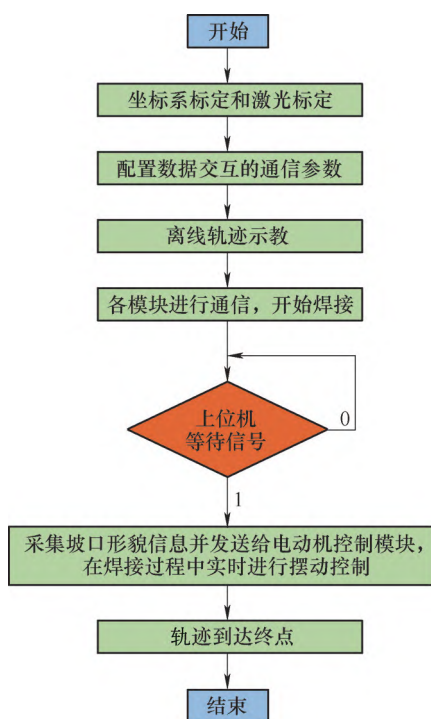


图4 焊接系统操作流程

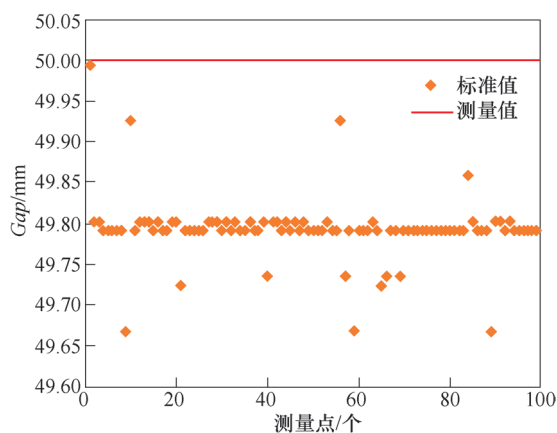


图5 测量结果

<1%的综合误差, 满足测量系统的精度要求。

5.2 结果

为验证所提方法的可行性, 进行方法验证试验。其中a、b组进行热量控制对比验证试验, c、d组进行形貌对比验证试验, 两组采用同一批次的测试板材, 焊接参数见表3。

为了对比摆动模型对热密度的控制效果, 将a组设为无摆动控制组, b组设置为摆动控制组, 以表3中对应焊接参数分别在试板上进行焊接试验, 试验结果如图6a、b所示。其中, a组因无摆动控制, 导致热密度过大, 从而导致焊板被击穿; b组由于有摆动控制, 对热密度进行了控制, 避免了焊板被击穿的情况, 因此焊接效果显著提升。

为了对比摆动模型对焊缝形貌的控制效果, 将c组设为无摆动控制组, d组设置为摆动控制组, 分别在试板上进行焊接试验, 试验结果如图6c、d所示。其中, c组因无摆动控制, 焊缝在凝固前无法进行完整铺展, 从而导致出现咬边现象; d组由于进行了摆动控制, 使焊缝更有利于铺展完全, 从而消除了咬

5 系统验证与结果

5.1 测量系统精确度验证

为了验证测量系统的测量精度, 进行测量系统精度验证试验, 利用激光传感器对上表面间隙为50mm的坡口进行测量, 并将测量的100组数据进行记录, 结果如图5所示。

基于标准数据 $\hat{y}_i$, 对测量数据 y_i 进行平均绝对百分比误差 (MAPE) 计算, 即

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中 n ——数据点的总数。

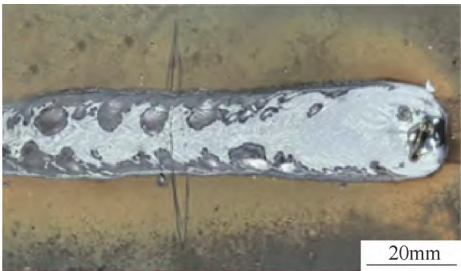
由式 (3) 可得, 测量数据的MAPE为0.46%,

表3 不同组别的焊接参数

组号	Gap/mm	工件厚度/mm	坡口角度/(°)	焊接速度/(m/min)	焊接电流 /A	电弧电压 /V
a	11.5	10.0	30	0.15	240	27.0
b	11.5	10.0	30	0.15	240	27.0
c	11.5	10.0	30	0.3	240	27.0
d	11.5	10.0	30	0.3	240	27.0



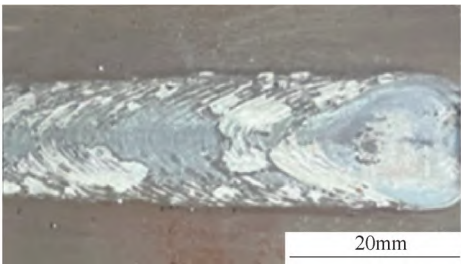
a) a组试样



b) b组试样



c) c组试样



d) d组试样

图6 焊接结果

边的现象，因此焊接效果显著提升。

为了进一步分析焊缝的铺展情况，分别对c、d组的焊缝宽度进行测量，采用游标卡尺每隔20mm为一个测量点，每个点测量3次取平均值作为最终测量结果，见表4。焊缝形貌测量结果如图7所示。

表4 焊缝宽度测量结果 (mm)

组号	焊缝位置				
	0	20	40	60	80
	焊缝宽度				
c	9.0	9.7	9.8	9.7	9.8
d	11.0	11.8	12.1	11.6	11.9

由图7可得，c组未进行控制下的焊缝宽度 < Gap，焊缝未铺展完全；在摆动模型控制下，焊缝

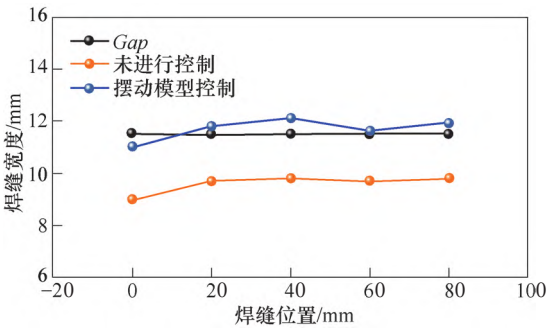


图7 焊缝形貌测量结果

宽度 > Gap，焊缝铺展完全实现满填充，焊缝效果最好。

6 结束语

本文提出了一种创新的基于坡口形态视觉感知的焊接参数自主优化策略，通过激光视觉传感器进行坡口特征提取，分别建立基于TCP、Modbus协议

的激光传感器、电动机与PC端的数据交互方式,实现了PC对焊缝坡口形貌的实时提取。建立了基于坡口形貌的摆动模型,针对焊接过程中获取的坡口形貌,对摆动的幅度与频率进行自适应调整,减小了热密度,并使得焊缝可在较大尺寸的坡口内润湿铺展,提高焊接的填充效果。试验结果表明,所开发的摆动模型可显著降低焊缝的热密度,同时控制焊缝宽度为11.0~12.1mm。

参考文献:

- [1] CHEN C, LV N, CHEN S B. Welding penetration monitoring for pulsed GTAW using visual sensor based on AAM and random forests[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 63: 152-162.
- [2] XUE K X, WANG Z J, SHEN J Q, et al. Robotic seam tracking system based on vision sensing and human-machine interaction for multi-pass MAG welding[J]. Journal of Manufacturing Processes 2021, 63: 48-59.
- [3] GE J M, DENG Z H, LI Z Y, et al. Adaptive parameter optimization approach for robotic grinding of weld seam based on laser vision sensor[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 82: 102540.
- [4] ZHANG Y M, LI Q, WANG J, et al. Adaptive intelligent welding manufacturing[J]. Weld Journal, 2021, 100: 63-83.
- [5] 贾剑平, 徐坤刚, 李志刚. 改进型BP网络在优化焊接工艺参数中的应用[J]. 热加工工艺, 2008 (21): 98-100.
- [6] SHEN H Y, CHEN S B, LIN T, et al. Arc welding robot system with seam tracking and weld pool control based on passive vision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39: 669-678.
- [7] TSUZUKI R. Development of automation and artificial intelligence technology for welding and inspection process in aircraft industry[J]. Welding in the World, 2022, 66: 105-116.
- [8] 蒋宝, 徐冬至, 黄瑞生, 等. 基于视觉传感的焊接机器人焊缝识别跟踪技术研究现状[J]. 金属加工(热加工), 2021 (1): 10-17, 21.
- [9] WANG X W, ZHOU X, XIA Z L, et al. A survey of welding robot intelligent path optimization[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 63: 14-23.
- [10] SOARES L B, WEIS A A, RODRIGUES R N, et al. Seam tracking and welding bead geometry analysis for autonomous welding robot; 2023 IEEE International Conference on Industrial Robotics[C]. USA: IEEE, 2023.
- [11] ROUT A, DEEPAK B B V L. Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56: 12-37.
- [12] 许曦, 张兆彪, 李俊渊, 等. 基于3D视觉的船体构件智能焊接研究及应用[J]. 电焊机, 2024, 54 (12): 35-41.
- [13] YAN Z, LIU C, LI T, et al. Autonomous optimization technology for welding parameters based on a dual-driven model incorporating physics and data[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 135: 131-141.
- [14] 张明. 智能焊接技术在大型港口机械制造中的应用研究[J]. 中国机械, 2024 (31): 76-79.
- [15] 李田, 严佑锐凌, 张明军, 等. 基于8字形摆动的钢/铝激光焊接头组织和性能[J]. 焊接学报, 2025, 46 (2): 112-119, 135.

(收稿日期: 20250509)