

引用格式:包仁东,李炳尘,马勇,等.基于焊缝视觉传感的自适应多层多道 GMAW 研究[J].热加工工艺,2025,54(22):197-200+207.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232425
<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

基于焊缝视觉传感的自适应多层多道 GMAW 研究

包仁东¹, 李炳尘¹, 马勇², 徐陈², 陈曦^{1,3}, 姜梦¹, 陈彦宾¹

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 湖北三江航天万山特种车辆有限公司, 湖北 孝感 432000; 3. 哈尔滨工业大学(深圳)材料科学与工程学院, 广东 深圳 518055)

摘 要:在实际生产中,机器人焊接大多采用“示教-再现”和“离线编程”的方法控制焊接过程。这两种方法缺少对实际工况变化的感知,导致焊接质量不良并且降低焊接效率。结合焊缝视觉传感系统,开发了自适应 GMAW 技术及装备,并研发了通用智能焊接软件。利用线结构光传感器提取工件的轮廓数据。结果表明:视觉传感系统能够实现对工件的全局三维扫描,获得三维点云图并智能识别焊缝位置。结合焊接工艺参数数据库,实现了基于三维立体视觉的工件识别和定位、焊接任务分解和焊接任务执行。

关键词:焊缝视觉传感;线结构光;自适应 GMAW;智能焊接软件;三维点云

中图分类号: TG441.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)22-0197-04

Research on Adaptive Multi-layer and Multi-pass GMAW Based on Weld Vision Sensing

BAO Rendong¹, LI Bingchen¹, MA Yong², XU Chen², CHEN Xi^{1,3}, JIANG Meng¹, CHEN Yanbin¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Hubei Sanjiang Space Wanshan Special Vehicle Co., Ltd., Xiaogan 432000, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

Abstract:In practical production, robotic welding is mostly controlled by "teaching-reproduction" and "offline programming". Both of these methods lack the ability to recognize changes in actual working conditions, resulting in poor welding quality and reduced welding efficiency. The adaptive GMAW technology and corresponding equipment were developed based on the weld vision sensing system, and the general intelligent welding software was developed. The contour of the workpiece was extracted by a linear structured light sensor. The results show that the vision sensing system can conduct the global 3D scanning of the workpiece, obtain the 3D point clouds and intelligently identify the weld position. By combining the welding process parameters database, the workpiece identification and positioning, welding task decomposition and welding task execution based on three-dimensional stereovision are finally realized.

Key words:weld vision sensing; linear structured light; adaptive GMAW; intelligent welding software; three-dimensional point cloud

熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)具有焊接效率高、适用范围广、易于实现自动化控制的优势,在许多金属构件的制造生产中得到实际应用,也成为机器人焊接领域中应用广泛的焊接方

法^[1-5]。在实际生产中主要采用“示教-再现”和“离线编程”的方式实现焊接机器人的焊接路径规划和工艺参数设定。

传统的示教-再现模式在目前的机器人智能焊接中发挥着重要作用。然而,由于工件装配误差和加工尺寸误差的影响,在实际焊接生产过程中,工件无法始终保持理想的设定形状。同时,焊接过程中存在一些不可避免的干扰信息,示教-再现模式无法感知这些变化,对实际焊接工况缺乏一定的灵活适应性^[6]。离线编程模式通过构建工作环境和标定工具

收稿日期:2023-10-12 修回日期:2025-01-10

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2018B090905003)

作者简介:包仁东,男,工程师,主要研究方向:激光焊接;

E-mail:baorendongtt@126.com

通讯作者:陈曦,男,助理教授,博士,主要研究方向:激光加工技术;

E-mail:chenxi_laser@hit.edu.cn

中心点而完成焊接机器人的任务仿真、防碰撞检测、运动指令生成和路径规划。离线编程只适用于结构化的生产环境。随着工作环境趋于复杂和非结构化,高精度、实时的虚拟焊接环境构建面临着巨大的挑战,离线编程模式的三维路径编程效率受到了影响。另外,与示教-再现模式类似,离线编程模式同样缺乏一定灵活性,无法感知焊接工况的变化^[7]。

对于中厚板的多层多道焊接,示教-再现模式需要焊工对每一条焊道进行手动程序示教,严重降低了机器人焊接的效率。离线编程模式虽然可以减少人工示教次数,但在实际生产中,相同的母材会采用不同的坡口形式来满足不同生产需求,每存在一种坡口形状就需要编写一套离线程序,焊接效率仍然存在较大的提升空间。

焊缝视觉传感技术采用视觉传感器直接获得待焊区域或焊缝的图像信息,具有再现性好、响应快、寿命长等优点^[8]。其中,激光主动视觉传感以激光作为辅助光源,以激光发射器作为传感器的重要元件,能够实现焊缝寻位和坡口几何特征的提取,在机器人焊接领域中已得到较为广泛的应用^[9-10]。在自动化焊接过程中,为了获得良好的焊缝成形,焊接工艺参数及焊枪运动轨迹需要根据坡口尺寸、坡口角度等接头几何特征的变化而调整,即自适应焊接^[11]。

本文开发了基于焊缝视觉传感的自适应多层多道 GMAW 方法,实现了机器人焊接效率的进一步提升,同时能够在工件装配存在误差和坡口尺寸加工出现偏差的情况下获得成形良好、稳定的焊接接头,保证了焊缝成形的一致性和稳定性。

1 试验材料与方法

母材采用厚度为 30mm 的 Q235 钢,坡口形式为 V 形坡口,坡口角度为 40°。母材的化学成分如表 1 所示。弧焊电源采用 LORCHS5Pulse 自动弧焊机,焊接机器人型号为 KUKA KR70 HA,选用直径为 $\phi 1.2\text{ mm}$ 的 ER50-6 焊丝进行 GMAW 焊接,保护气体为 80%Ar+20%CO₂。试验前先使用角磨机去除试样表面油污和锈蚀,再用丙酮清理母材的待焊表面。在焊接数据库中调用的焊接工艺参数范围为焊接电

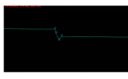
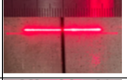
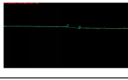
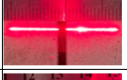
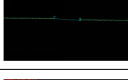
表 1 Q235 钢的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of Q235 steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.22	0.35	1.4	0.045	0.050

流 120~230 A、电弧电压 19.3~27.9 V、焊接速度 0.27~0.3 m/min。

采用基于线结构光的传感器进行工件间隙、错边几何特征检测。其原理是通过线结构激光扫描待焊焊道表面,获取其轮廓线,并利用单轮廓线拟合或者多轮廓线组合的方法来识别待焊焊道表面缺陷。线结构激光传感器作用是提取轮廓数据,和上位机软件图像处理算法配合,完成各种类型的焊缝特征识别。选择 Servo-Robot QUANTA-S/LF 激光传感器进行工件间隙、错边等几何特征信息的在线检测。通过与机器人控制架构的集成,可以自动自适应控制焊接过程条件和参数。采用 Servo-Robot QUANTA-S/LF 激光传感器对典型焊缝接头特征进行在线检测验证,具体结果如表 2 所示。可以看到,在不同工况条件下,激光传感器均能够较为准确地检测到间隙和错边,并在检测界面输出检测到的坡口表面面貌轮廓。线结构激光难以与待焊位置完全垂直,可能导致了检测的误差,但检测值未影响实际焊接过程。该传感器准确识别工件的间隙和错边等特征信息后,将该信息传递给上位机作为自适应焊接的初始状态输入。

表 2 激光传感器检测结果
Tab.2 Laser sensor detection results

序号	实际间隙值/mm	实际错边值/mm	检测间隙值/mm	检测错边值/mm	工件信息	检测界面
1	0	0	0.08	0.09		
2	1	0	1.0	0.10		
3	2	0	2.05	0.10		
4	0	1	0.2	1.17		
5	0	2	0.09	2.27		

基于全局视觉传感的自适应焊接系统主要由焊接机械臂单元、地轨行走单元、3D 视觉单元和集控柜单元等组成,如图 1 所示。焊接机械臂单元包括机械臂本体及控制柜、焊接电源、焊枪、送丝机、冷却水箱、清枪站等。3D 视觉单元包含全局视觉传感器和结构光焊缝传感器。结构光对母材进行扫描,利用相机提取结构光的形状,自主开发的智能焊接软件将

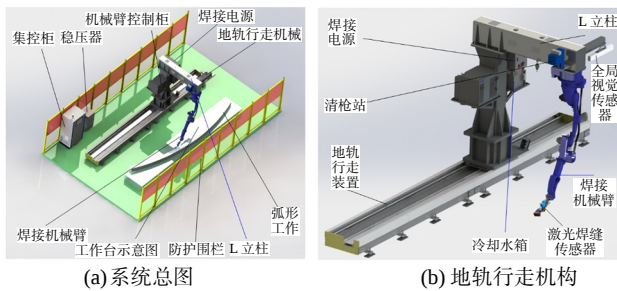


图1 基于全局视觉传感的自适应焊接系统示意图
Fig.1 Schematic diagrams of adaptive welding system based on global visual sensing

相机所提取的结果转化为三维点云。

图2为基于全局视觉传感的自适应焊接过程,主要包含以下步骤:

(1) 基于三维立体视觉的工件识别、定位

首先确定焊接对应的工件实物和对应三维模型,焊接工艺师将三维模型导入 iPlan 软件后,软件自动对模型进行预处理和焊缝提取,如可实现对于工件潜在焊缝的自动提取、标注,将其输入数据库。在此基础上,支持协助人工规划/配置各焊缝的工艺参数和作业轨迹规划及仿真,生成作业任务,并将任务下发给焊接现场集控端 iWeld 软件。

(2) 焊接任务分解

焊接执行端 iWeld 软件接收到任务后,自主进行任务分解。工件上料至作业范围后,系统针对工件

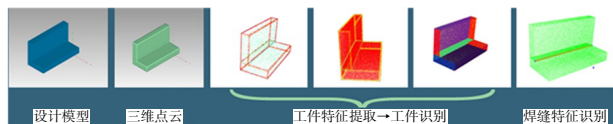


图2 基于全局视觉传感的自适应焊接技术步骤
Fig.2 Procedures of adaptive welding technology based on global visual sensing

的全局三维扫描,在获取工件全局点云基础上进行工件识别和工件位置、姿态定位;并根据工件实际的位置姿态,自动校正工件作业轨迹并自主编程机器人执行程序。

(3) 焊接任务执行

针对具体焊缝,利用激光焊缝传感器进行焊缝识别和精确定位,在后台执行焊接轨迹自主校正,控制焊枪针对工件焊缝实际分布位置自适应精确执行焊接任务。机器人将收到的数据和预设的数据库进行比对,确定当前工况对应的数据库参数。随后机器人将对应的参数传输给激光器和焊机,然后执行焊接,焊接过程中动态修改激光功率和焊接电流,并不断地进行循环,直到焊接完成。

2 试验结果及讨论

2.1 智能焊接软件

根据多层多道自适应焊接自主开发了通用智能焊接软件,能够实现基于待焊接工件三维模型进行焊缝分析、提取、工艺参数配置、作业轨迹规划和机器人(含外部轴)程序自主编程。利用该软件可对焊接工件进行配置、作业任务生成和任务仿真(模拟)。与传统示教-再现焊接机器人相比,采用该软件进行自适应焊接无需繁琐的人工示教,可大幅降低焊接机器人操作人员的工作量,常规焊接过程无需人工介入,大幅提升焊接效率。与传统的离线编程相比,大幅降低了离线编程工作量和作业时现场操作人员根据模型校准点位的工作量和耗时。智能焊接软件分为作业规划预处理软件 iPlan 和焊接现场集控软件 iWeld。其中,iPlan、iWeld 软件功能如表3所示。

表3 智能焊接软件功能表
Tab.3 Function list of intelligent welding software

序号	功能类别	功能名称	功能描述
1	iPlan 系列 预处理端 软件包	焊缝自动提取软件包	潜在焊缝自动提取、排序
		作业路径规划功能包	扫描路径规划及轨迹仿真
		焊接工艺辅助规划功能包	焊接工艺及参数配置、辅助规划
		工艺管理功能包	工艺参数 JOB 分组管理、配置
		作业任务规划功能包	路径任务规划、生成
2	iWeld 系列 执行端 软件包	工件识别定位功能包	基于全局点云待焊工件识别、定位
		作业路径自适应校正功能包	根据 3D 检测结果自主校正作业轨迹
		焊缝寻位功能包	工件焊缝焊前识别、定位
		外设集控功能包	机械臂、视觉相机、焊缝跟踪等外设集中控制
		外设驱动功能包	机械臂、视觉相机、焊缝跟踪等外设集中驱动
		数据库功能包	工件作业数据库管理
		人机交互功能功能包	任务选择及确认、参数设置、设备监控等人机交互
		自主编程功能包	机械臂及外部扩展轴运动自编程、检测及焊接任务自主编程

2.2 自适应焊接过程

在实际应用场景中可能出现坡口加工精度较低的情况,如坡口角度不一致、钝边尺寸不一致、组对后间隙不一致等。因此,对于相同尺寸的工件,其焊接轨迹、焊接层道数并不固定,需要根据满足上游工序来料质量的具体工件状态,进行状态检测及自适应规划。对于试验中的 60mm 厚的开 V 形坡口的 B750 钢,利用自适应焊接技术的焊接自动布层布道处理流程如图 3 所示。输入待焊接的工件的模型后,定义焊缝属性为多层多道。调用焊接数据库来进行布道规划和生成焊接任务。随后进行焊缝寻位,并扫描获得三维点云,提取坡口形貌特征。每焊接一道之后,进行一次三维点云扫描,提取焊缝的形貌特征,从而获得下一道焊缝的修正量。如此循环直至完成焊接。

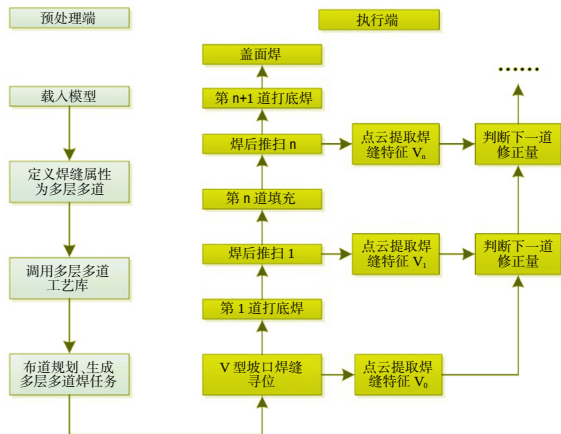


图3 自动布层布道处理流程

Fig.3 Process flow of regulation of welding layers and passes

图4为各层道焊接过程三维点云,标号1~3为第1、2、3层(各1道);4-1代表第4层第1道;4-2代表第4层第2道;依次类推。在焊缝规划的过程中,将焊缝分为3类:打底焊、贴边焊和填充焊,如图5所示。

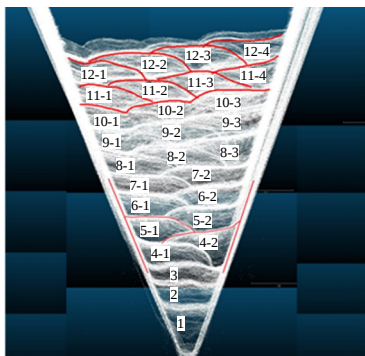


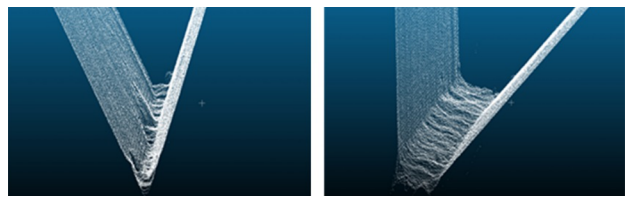
图4 某V形坡口多层多道焊接的各层点云示意图
Fig.4 Point cloud diagram of each layer of a V groove multi-layer multi-pass welding



图5 焊缝规划示意图

Fig.5 Schematic diagrams of weld planning

打底焊接前对工件进行三维扫描,获得打底焊接前三维点云数据(图6(a)),在此基础上规划该焊缝理论布层布道规划。根据检测结果,校正规划理论焊接轨迹,执行打底焊接,焊后点云如图6(b)所示。每次焊接完成后,在此基础上扫描以获得当前层道状态下的三维点云,并据此更新规划下一道焊接层道。当前层所需焊接道数超过1时,在贴近坡口的位置需要进行贴边焊。贴边焊前后工件的三维点云如图7所示。可看出,当前层所需焊接道数超过2时,在坡口两侧贴边焊道之间需要进行填充焊。填充焊前后工件的三维点云如图8所示。依此步骤逐层逐道进行焊接,直至盖面焊接完成。



(a) 打底焊前工件三维点云 (b) 打底焊后工件三维点云

图6 打底焊前后工件三维点云

Fig.6 3D point cloud of the workpiece before and after backing welding



(a) 贴边焊前工件三维点云 (b) 贴边焊后工件三维点云

图7 贴边焊前后工件三维点云

Fig.7 3D point cloud of the workpiece before and after welt welding



(a) 填充焊前工件三维点云 (b) 填充焊后工件三维点云

图8 填充焊前后工件三维点云

Fig.8 3D point cloud of the workpiece before and after filling welding

(下转第 207 页)

- [40] Wu Q, Zhao R Y, Ma Q S, et al. Effects of degree of chemical interaction between carbon fibers and surface sizing on interfacial properties of epoxy composites [J]. Composites Science and Technology, 2018, 163: 34-40.
- [41] Yan F, Liu L, Li M, et al. Preparation of carbon nanotube/copper/carbon fiber hierarchical composites by electrophoretic deposition for enhanced thermal conductivity and interfacial properties[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53: 8108-8119.
- [42] Lee W, Lee J, Cha H, et al. Partially reduced graphene oxide as a multi-functional sizing agent for carbon fiber composites by electrophoretic deposition [J]. RSC Advances, 2013, 3: 25609-25613.
- [43] 张成, 刘兆政, 孙明娟, 等. 低温等离子体碳纤维表面处理技术研究[J]. 材料导报, 2018, 32(Z1): 294-296.
- [44] 陈永乐. 聚醚醚/环氧树脂/短切碳纤维复合材料的制备与表征[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
- [45] 杨高峰. 聚酰亚胺/滑石粉/碳纤维复合薄膜的界面性能研究[J]. 橡塑技术与装备, 2019, 45(2): 43-52.
- [46] 聂会捷. 功能化短切碳纤维增强碳纤维/环氧复合材料的制备及其力学性能研究[D]. 常州: 常州大学, 2021.
- [47] 李晨颖. 基于热可逆 Diels-Alder 反应优化碳纤维复合材料界面及界面机理研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
- [48] Mimura K, Ito H, Fujioka H. Improvement of thermal and mechanical Properties by control of morphologies in PES-modified epoxy resins[J]. Polymer, 2000, 41: 4451.
- [49] 刘建秀, 贾旭钢, 樊江磊, 等. 碳纤维表面处理对铜基摩擦材料性能的影响[J]. 热加工工艺, 2024, 53(16): 143-147.
- [50] Schaefer J D, Guzman M E, Lim C S, et al. Influence of functionalized carbon nanofibers on the single carbon fiber-epoxy matrix interface[J]. Composites: Part B, 2013, 55(12): 41-47.
- [51] 李娜. 碳纤维表面碳纳米材料修饰及其复合材料界面性能研究[D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2021.
- [52] 武栋良. 纳米材料接枝改性碳纤维及其界面活化设计[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [53] 杨雨轩, 卢少微, 李伟. 碳纤维增强碳纳米管/环氧多尺度复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(2): 32-37.
- [54] 何敬宗, 陈师, 马政坤, 等. 碳纳米管/碳纤维/环氧树脂界面的原位热拉曼成像与应力分析[J]. 新型炭材料, 2024, 39(4): 703-714.
- [55] Deng C, Jiang J J, Liu F, et al. Effects of electrophoretically deposited graphene oxide coatings on interfacial properties of carbon fiber composite [J]. Journal of Materials Science, 2015, 50: 5886-5892.
- [56] Qian H, Bismarck A, Greenhalgh E S, et al. Carbon nanotube grafted carbon fibers: a study of wetting and fiber fragmentation [J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2010, 41(9): 1107-1114.
- [57] 陈鹏, 李晓屿, 廉兆龙, 等. 碳纳米材料修饰碳纤维及其复合材料界面性能的研究进展[J]. 塑料科技, 2022, 50(12): 117-121. 

(上接第 200 页)

3 结论

(1) 自主开发了通用智能焊接软件, 该软件能够实现基于待焊接工件三维模型进行焊缝分析、提取、工艺参数配置、作业轨迹规划和机器人(含外部轴)程序自主编程, 可大幅降低焊接机器人操作人员的工作量, 大幅提升焊接效率。

(2) 开发的基于焊缝视觉传感的自适应多层多道 GMAW 系统主要由焊接机械臂单元、地轨行走单元、3D 视觉单元和集控柜单元等组成。借助自主研发的智能焊接软件, 实现了基于三维立体视觉的工件识别和定位、焊接任务分解和焊接任务执行。

参考文献:

- [1] 江祥胜, 许燕, 周建平, 等. 基于 GMAW 堆焊成形的堆焊层焊道搭接量及力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(11): 28-31.
- [2] 李然. 基于主动视觉传感的 GMAW 焊缝成形智能控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [3] 何振宇. 磁控 Plasma-GMAW 复合焊接工艺及匙孔行为研究

[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.

- [4] 金礼. 铝合金双脉冲 MIG 焊热输入控制及焊缝组织性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [5] 杨春利, 林三宝. 电弧焊基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [6] Yang L, Liu Y, Peng J. Advances techniques of the structured light sensing in intelligent welding robots: a review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(3/4): 1027-1046.
- [7] Mitsi S, Bouzakis K D, Mansour G, et al. Off-line programming of an industrial robot for manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(3): 262-267.
- [8] 郭志鹏, 于治水, 张培磊, 等. 基于视觉传感的焊缝跟踪系统研究现状[J]. 轻工机械, 2016, 34(5): 95-100.
- [9] 赖延辉. 基于激光视觉信息的机器人多层多道焊接自主规划及其在线修正[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [10] 刘希鹏, 陈兴, 陈华斌, 等. 基于激光视觉传感的船舶型材机器人焊接焊道编排及系统研制[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(S1): 44-46.
- [11] 刘文吉, 杨嘉昇, 岳建锋, 等. 基于 P-GMAW 摆动电弧传感的窄间隙坡口宽度自适应焊接[J]. 材料科学与工艺, 2023, 31(6): 29-36. 