

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.05

基于协作机器人的智能焊接系统设计

王 帅¹, 石敬宇¹, 董传阳², 刘云乾¹, 苏立虎¹

1. 唐山松下产业机器有限公司, 河北 唐山 063020

2. 唐山开元自动化焊接研究所, 河北 唐山 063020

摘要: 面对工业自动化与智能制造对传统焊接技术提出的效率与精度挑战, 设计了一种基于协作机器人的智能焊接系统。该系统通过集成协作机器人与先进控制算法, 旨在提升焊接作业的智能化程度。探讨了协作机器人应用于智能焊接系统的必要性和可行性, 阐述了系统设计理念、架构与核心技术。深入分析了协作机器人的选型标准、焊接任务自动化规划方法及用户界面设计。通过搭建实验平台进行系统测试, 通过对比分析协作机器人、工业机器人和手工焊接在不同维度(如部署时间、学习时间、示教时间、焊接效率、焊缝成形和一致性)的表现, 评估系统的有效性和实用性。结果表明, 协作机器人在部署时间和学习时间上显著优于工业机器人, 焊接效率和焊缝成形表现良好。尽管工业机器人的焊接率略高, 但协作机器人在整体效率和稳定性上更具优势。实验还验证了系统在实际应用中的可靠性, 显示其在多种测试环境下均能稳定工作, 满足工业焊接的质量要求。未来的工作将集中在提升系统的自适应能力和优化人机交互体验上, 以更好地服务于现代制造业的发展需求。

关键词: 协作机器人; 智能焊接系统; 自动化; 控制算法; 人机交互

中图分类号: TP242.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0034-06

Design of Intelligent Welding System based on Collaborative Robot

WANG Shuai¹, SHI Jingyu¹, DONG Chuanyang², LIU Yunqian¹, SU Lihu¹

1. Tangshan Panasonic Industrial Machine Co., Ltd., Tangshan 063000, China

2. Tangshan Kaiyuan Automatic Welding Research Institute, Tangshan 063000, China

Abstract: In response to the challenges of efficiency and precision posed by industrial automation and intelligent manufacturing to traditional welding technology, an intelligent welding system based on collaborative robots is proposed and designed. This system aims to enhance the intelligence level of welding operations by integrating collaborative robots with advanced control algorithms. The necessity and feasibility of applying collaborative robots in intelligent welding systems are discussed, and the system design philosophy, architecture, and core technologies are elaborated upon. A thorough analysis of the criteria for selecting collaborative robots, methods of automated planning for welding tasks, and user interface design is provided. Through constructing an experimental platform for system testing, and by comparatively analyzing the performance of collaborative robots, industrial robots, and manual welding in different dimensions (such as deployment time, learning time, teaching time, welding efficiency, and consistency of weld formation), the effectiveness and practicality of the system are evaluated. The results indicate that collaborative robots significantly outperform industrial robots in terms of deployment and learning time, with good performance in welding efficiency and weld formation. Although the welding rate of industrial robots is slightly higher, collaborative robots have advantages in overall efficiency and stability. The experiment also verifies the reliability of the system in practical applications, demonstrating its stable operation in various test environments and meeting the quality requirements of industrial welding. Future work will focus on enhancing the adaptive capabilities of the system and optimizing the human-machine interaction experience to better serve the development needs of modern manufacturing.

Keywords: collaborative robot; intelligent welding system; automation; control algorithm; human - computer interaction

收稿日期: 2024-09-06 修回日期: 2024-12-11

作者简介: 王 帅(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事焊接电源的研发工作。E-mail: wangshuai@tsmi.cn。

引用格式:王帅,石敬宇,董传阳,等. 基于协作机器人的智能焊接系统设计[J]. 电焊机,2025,55(4):34-39.

Citation:WANG Shuai, SHI Jingyu, DONG Chuanyang, et al. Design of Intelligent Welding System based on Collaborative Robot[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 34-39.

0 引言

随着制造业逐步向智能化、自动化转型,传统的焊接技术难以适应现代工业生产对高效率及高精度要求的挑战。作为材料连接的关键技术之一,焊接的质量直接关系到最终产品性能的可靠性及其使用寿命。协作机器人的兴起为此类技术的创新带来了全新的视角^[1]。这些机器人不仅能够与人类工作人员在同一环境中安全地共存,还能执行复杂的工作任务,并且拥有便捷的编程与灵活的再配置能力,从而显著增强了生产线的灵活性与适应性。鉴于此,探讨并研发基于协作机器人的智能焊接系统,对于促进焊接工艺向自动化与智能化方向发展,具有深远的理论价值和实际意义^[2-3]。

目前,国际上多个研究机构和企业正积极投入到将协作机器人应用于焊接行业的研究之中^[4]。此类研究的核心议题涵盖了协作机器人的路径规划、焊接参数优化及人机互动等多个方面^[5]。不过,尽管取得了一定进展,但多数研究依然局限于实验室环境或是小规模的实际应用,未能形成一套全面的设计方案以指导大规模工业生产。相比之下,我国在此领域的探索虽起步稍晚,但近年来呈现出快速发展的态势^[6]。多所高等院校与科研单位已开始涉足协作机器人在焊接领域应用的研究,并获得了初步成效^[7]。安川电机联合伏能士智能设备(上海)有限公司共同推出的HC系列协作机器人,凭借其优化后的焊接路径与参数设置,成功将焊接缺陷率减少了超过20%。优傲机器人则专注于提升协作机器人的灵活性与用户友好度。而KUKA的研究重点在于增强协作机器人的智能化程度,特别是其开发的LBR iiwa型号,具备强大的感知与自我决策能力,能够根据焊接现场的具体情况自动调整操作策略,确保高质量的焊接输出。此外,上海交通大学机器人焊接智能化技术实验室一直在探索基于视觉数据的焊接环境自动识别、焊缝追踪引导以及焊接熔池动态特性智能控制等领域,并取得了显著成

就。大族机器人也致力于将机器人技术融入更广泛的焊接应用场景。

本文聚焦于基于协作机器人的智能焊接系统的设计研究,主要内容涵盖:(1)深入剖析协作机器人在焊接行业应用中的技术背景及其优势;(2)构建智能焊接系统的总体架构,明确各功能模块的划分;(3)依据协作机器人的特性,探索焊接作业的自动化规划策略;(4)设计直观易用的人机交互界面,促进高效的人机协同工作;(5)建立实验平台,开展系统测试,并对测试结果进行深入分析。本研究旨在为智能焊接技术的进一步发展提供一套行之有效的解决方案。

1 协作机器人技术概述

1.1 协作机器人的定义与特点

在《机器人技术基础》一书中,协作机器人被定义为一种能够与人类工作者在同一空间内安全共存并协同工作的机器人^[8]。这类机器人通常具备轻量化、灵活性高、易于编程和安全性好的特点。

与传统工业机器人相比,协作机器人能够在无需额外安全防护措施的情况下与人类近距离工作,这得益于其内置的力控制和碰撞检测机制。此外,协作机器人通常体积较小,便于移动和重新部署,从而适应多变的生产需求。

1.2 协作机器人的关键技术

协作机器人的核心技术主要包括感知与认知技术、运动控制技术、人机交互技术和安全保障技术。感知与认知技术使机器人能够理解周围环境并作出响应,运动控制技术确保机器人动作的准确性和流畅性,人机交互技术提供直观的操作界面,而安全保障技术则保证在人机共存的环境中机器人操作的安全性。这些技术的融合使得协作机器人能够在复杂多变的工作环境中稳定运行。

1.3 协作机器人在焊接领域的应用现状

在焊接领域,协作机器人的应用正在逐渐增

多。它们被用于执行精确的焊接任务,如汽车制造、航空航天和精密设备组装等行业。协作机器人可以搭载不同的焊接工具头,根据预设程序或实时反馈调整焊接参数,以保证焊缝的质量。同时,它们还能通过视觉系统识别工件位置,自动调整焊接轨迹。尽管协作机器人在焊接领域的应用仍处于发展阶段,但其展现出的巨大潜力已经引起了工业界的广泛关注。

2 智能焊接系统的总体设计

2.1 系统设计要求与目标

智能焊接系统的设计旨在整合协作机器人的灵活性与先进焊接技术的稳定性,以满足现代制造业对焊接质量和效率的双重要求。本系统的设计目标包括:实现高精度的焊接操作,确保焊缝质量符合工业标准;提高焊接过程的自动化程度,减少人工干预;增强系统的适应性和灵活性,以应对多变的生需求;以及优化人机交互体验,降低操作难度。为实现这些目标,系统需要具备高度的模块化和可扩展性,以便于未来的升级和维护。

2.2 系统架构设计

智能焊接系统架构设计采用分层的思想,主要分为物理层、控制层和应用层。物理层包括协作机器人、焊接设备和其他辅助硬件;控制层负责处理传感器数据、执行运动控制算法和焊接参数优化;应用层则提供用户界面和高级决策支持。系统通过高速通信网络连接,确保数据传输的实时性和准确性。协作机器人智能焊接系统架构如图1所示。

2.3 系统功能模块划分

智能焊接系统的功能模块划分为以下几个主

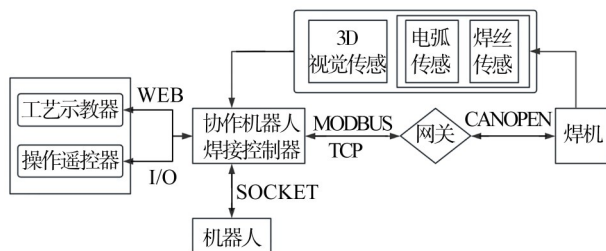


图1 协作机器人智能焊接系统架构

Fig. 1 Architecture diagram of intelligent welding system for collaborative robot

要部分。

工艺示教器:提供工艺参数设置和程序编写的功能,允许用户设定焊接工艺参数和路径规划;操作遥控器:用于远程操控整个系统,可以发送指令给协作机器人焊接控制器。

协作机器人焊接控制器:接收来自工艺示教器和操作遥控器的信息,负责协调整个焊接过程。使用MODBUS TCP协议与网关进行数据交换,将焊接参数传输给焊机。

焊机:根据接收到的焊接参数执行实际的焊接工作。

3D视觉传感:提供三维空间内的物体定位和轨迹追踪,帮助机器人准确地确定焊接位置和姿态^[9];电弧传感:监测焊接过程中电弧的状态,根据电弧状态进行焊缝跟踪;焊丝传感:利用焊丝接触形成回路进行传感,实现寻位。

机器人:通过SOCKET连接到协作机器人焊接控制器,接收焊接路径和参数,执行具体的焊接动作。

系统的设计考虑了实时性和准确性,通过集成各种传感器和通信协议,实现了对焊接过程的全面监控和控制。利用了协作机器人的特性,使得机器人能够在有限的空间内与人类共同工作,降低了操作风险。

3 协作机器人的选型与集成

3.1 协作机器人的选型依据

在选择适用于智能焊接系统的协作机器人时,需考虑多个关键因素。首要的是负载能力和工作范围,这决定了机器人能否携带所需的焊接设备并覆盖足够的作业区域;其次,重复定位精度和速度是评估焊接质量的重要指标;再者,机器人的易用性和灵活性也不可忽视,这涉及编程的简便性以及在不同焊接任务间的切换能力。最后,安全性是协作机器人的核心特性之一,必须确保在任何情况下都能保障操作人员的安全。

3.2 协作机器人的集成策略

集成协作机器人至智能焊接系统的策略包括硬件集成和软件集成两个方面。硬件集成涉及将焊接工具头、传感器和其他必要附件安装到机器人

上,并确保所有组件的兼容性和稳定性。软件集成则需要将机器人控制系统与焊接控制单元、传感器数据处理模块以及人机交互界面无缝对接,实现数据的实时传输和指令的准确执行。此外,还需考虑系统的可扩展性,以便未来引入新的技术或改进现有功能。

3.3 协作机器人的运动控制

运动控制是协作机器人在智能焊接系统中的关键功能,它直接影响到焊接的精度和效率。运动控制算法需要能够处理来自传感器的实时数据,并根据这些数据调整机器人的运动轨迹和速度。此外,运动控制还应具备一定的自适应能力,能够根据焊接过程中的变化自动优化参数。为了实现这一点,可能需要采用机器学习等先进技术来提高运动控制的智能化水平。通过精确的运动控制,协作机器

人能够在各种复杂环境下完成高质量的焊接作业。

4 智能焊接任务规划与执行

4.1 焊接任务的自动规划方法

智能焊接系统的自动规划方法旨在提高焊接任务的规划效率和准确性。该方法协作示教模板库,包括焊接路径规划库和焊接工艺数据库,利用算法自动生成焊接顺序、路径和参数。首先,系统通过解析三维模型获取焊缝信息^[10],然后结合材料特性和焊接要求,利用优化算法确定最佳的焊接序列^[11]。接着,路径规划算法计算出每条焊缝的具体行进路线,最后系统根据这些信息自动调节焊接参数,如电流、电压和速度等,以确保焊接质量。轨迹规划的算法流程如图2所示。

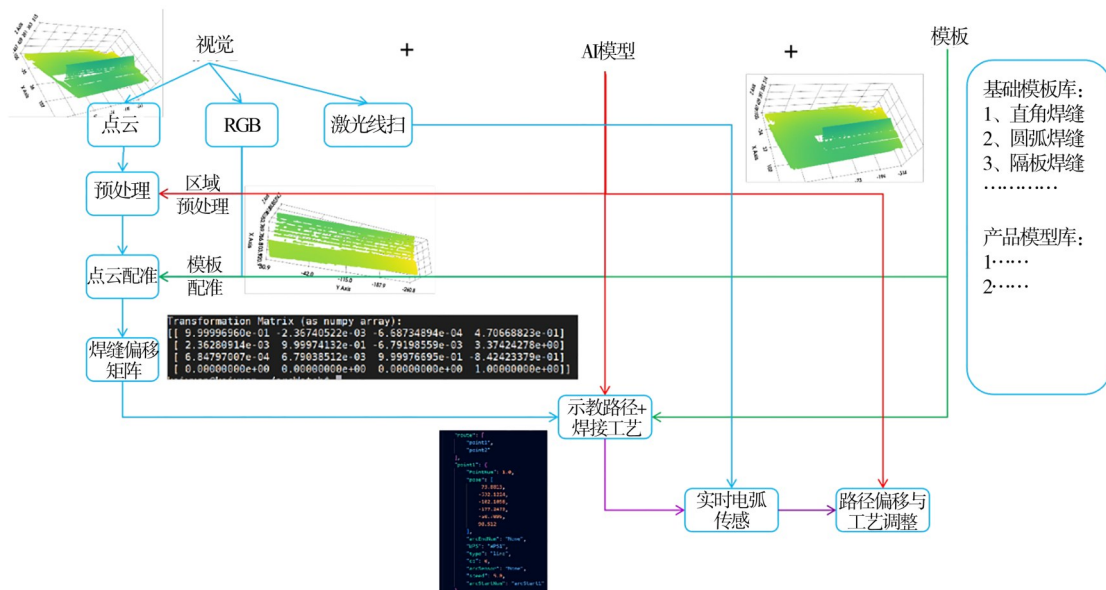


图2 轨迹规划算法流程

Fig. 2 Flow chart of the trajectory planning algorithm

4.2 实时监控与质量控制

实时监控与质量控制是智能焊接系统中不可或缺的一环。系统通过安装在协作机器人上的传感器实时收集焊接过程中的数据,如温度、电流、电压和焊缝形态等。这些数据被传输至控制单元进行分析,以监控焊接状态并及时调整参数。此外,系统还采用电弧跟踪技术对焊缝进行实时检测,识别并纠正偏差,确保焊缝质量符合预定标准。通过这种方式,智能焊接系统能够在焊接过程中持续优

化性能,提高成品率。

4.3 人机交互界面设计

人机交互界面是智能焊接系统与操作者沟通的桥梁。界面设计应简洁直观,能够轻松设定焊接任务、监控进程和调整参数。界面可显示实时的焊接状态、历史数据记录和系统警告信息。为提高交互效率,界面可采用触摸屏操作。通过人机交互界面,智能焊接系统能够更好地服务于操作者,提高工作效率和用户体验。人机交互界面如图3所示。



图3 人机交互界面

Fig. 3 Human-computer interaction interface

5 系统测试与性能评估

5.1 测试环境的搭建

为全面评估智能焊接系统的性能,搭建了一个包含实际工业环境的测试平台。该平台模拟了典型的焊接工作站,配备了必要的安全设施和监控设备。测试环境包括多种材质和厚度的工件,以及不同类型和规格的焊材。系统的测试平台如图4所示。



图4 系统测试平台

Fig. 4 System testing platform

5.2 测试方案与实施步骤

测试方案旨在验证智能焊接系统在实际工况下的表现。测试分为三个阶段:第一阶段为基本功能测试,确保系统各模块正常工作;第二阶段为性能测试,评估系统的焊接精度、速度和稳定性;第三阶段为用户操作测试,检验人机交互界面的友好性和实用性。为综合评价测试结果,分别从工业机器人、协作机器人、手工焊的易用性角度,工业机器人、协作机器人和手工焊接效率角度,工业机器人、协作机器人及手工焊接焊接品质三个角度进行数据对比分析。对比结果如表1所示。

表1 不同焊接方式效果对比

Table 1 Comparison table of the effect of different welding methods

项目	部署时间/h ^①	学习时间/h ^②	示教时间/h ^③	焊接效率 ^④	焊缝成形	一致性
协作机器人	0.3	0.2	0.25	0.85	良好	良好
工业机器人	4	12	0.2	0.88	良好	良好
普通焊工	—	—	—	0.75	一般	一般
高级焊工	—	—	—	0.75	优秀	优秀

注:①部署时间:系统从到达现场,到安装完成,可以使用所需要的时间;②学习时间:现场培训操作人员,从0基础开始,到能够正常操作机器人所需要的时间;③示教时间:操作人员培训完成后,示教8条长度为300 mm的直线焊缝所需要的时间;④焊接效率:以4 h为计算单位,统计设备实际焊接总时间(不计入示教时间)。

5.3 测试结果分析与讨论

通过对比分析可以发现:从部署时间来看,协作机器人系统的效率最高,只需要0.3 h;而工业机器人的部署时间则为4 h。学习时间和示教时间方面,协作机器人系统也明显优于工业机器人。

在焊接率上,工业机器人的焊接率为88%,略高于协作机器人系统的85%。然而,在焊缝成形和一致性方面,两者都表现出良好的性能。

相比之下,普通焊工和高级焊工的焊接率均为75%,然而大部分普通焊工的焊缝成形和一致性表现一般。这表明虽然人工焊接可能在某些方面具有优势,但在整体效率和稳定性上,协作机器人系

统更胜一筹。

在国内的桥梁钢结构、工程机械等行业的重点公司测试验证后,收到良好使用效果。现场使用情况如图5所示。现场焊接实际产品效果如图6所示。

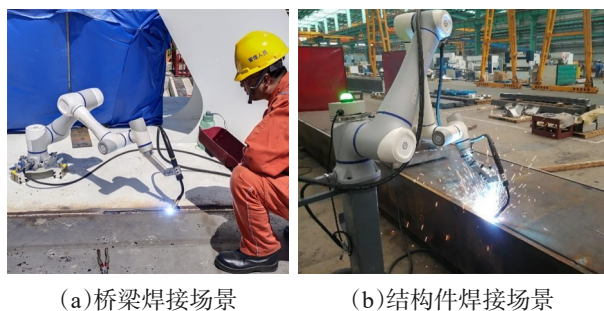


图5 系统试用场景

Fig. 5 System trial scenario



(a)产品焊缝成形 (b)多层焊缝品质

图6 现场焊缝成形与品质

Fig. 6 Field weld forming and quality

6 结论与展望

6.1 研究成果总结

本文成功设计并实现了一套基于协作机器人的智能焊接系统。该系统整合了先进的协作机器人技术、自动化控制算法和人机交互设计,以提高焊接作业的智能化水平和生产效率。通过对系统架构的合理规划和功能模块的细致划分,确保了系统的高效运行和良好的用户体验。实验结果表明,该系统在多种测试环境下均能稳定工作,满足工业焊接的质量要求。

6.2 存在的问题与不足

尽管智能焊接系统在测试中表现良好,但仍存在一些问题和不足。例如,在处理复杂焊接任务时,系统的自适应能力和决策速度有待提高。此外,人机交互界面虽然直观,但在特定情况下的操

作复杂度仍需优化。这些问题可能源于算法的局限性或硬件性能的约束。

6.3 未来工作展望

未来的工作将集中在提升系统的自适应能力和优化人机交互体验上。计划引入更先进的机器学习算法来增强系统的决策能力,使其能够更好地应对多变的焊接环境和任务。同时,将对人机交互界面进行迭代设计,简化操作流程,进一步提升用户体验。此外,还将探索系统的模块化和标准化设计,以便于未来的扩展和维护。通过持续的研究和改进,期望智能焊接系统能够更好地服务于现代制造业的发展需求。

参考文献:

- [1] 刘成,盖玉先,李磊,等. 面向航天器数字孪生装配的协作机器人关键技术综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(18):368-386.
LIU C, GAI Y X, LI L, et al. Overview of Key Technologies for Collaborative Robots in Spacecraft Digital Twin Assembly [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(18), 368-386.
- [2] 王青,张奇峰,胡成华,等. 基于深度强化学习的多机器人协作搬运方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(01): 240-250.
WANG Q, ZHANG Q F, HU C H, et al. Multi-robot Collaborative Transportation Method Based on Deep Reinforcement Learning [J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2023, 44(01):240-250.
- [3] 王猛,陈殿生,王刚,等. 水下多机器人非对称双向领航者-跟随者编队控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(11):3005-3016.
WANG M, CHEN D S, WANG G, et al. Asymmetric Two-way Leader-follower Formation Control of Underwater Multi-robots [J]. Control and Decision, 2023, 38(11):3005-3016.
- [4] 赵强,刘晓东,王海涛. 协作机器人在汽车制造中的应用与展望[J]. 机器人技术与应用, 2022, 38(05):45-50.
ZHAO Q, LIU X D, WANG H T. Application and Prospect of Collaborative Robots in Automobile Manufacturing [J]. Robot Technology and Application, 2022, 38(05):45-50.
- [5] 王丽,陈明,刘洋. 协作机器人在船舶焊接中的应用研究[J]. 船舶工程, 2022, 44(03):112-118.
WANG L, CHEN M, LIU Y. Research on the Applica-