

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.12.07

舰船高反光小组立构件智能机器人焊接系统研究

马 韬¹, 孙宏伟^{1*}, 罗进友², 房咨辰¹, 林航羲², 李启明¹

1. 江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222000

2. 中船黄埔文冲船舶有限公司 广东省舰船先进焊接技术重点实验室, 广东 广州 510715

摘要: 目前国内舰船制造企业的铝制小组立等高反光工件焊接主要以人工为主, 自动化程度不高, 对人力资源和能源浪费严重。加快研发面向高反光工件的智能焊接机器人系统, 在铝制舰船建造过程推广应用小组立焊接机器人, 实现铝制小组立的智能制造具有重要意义。针对国内某骨干船厂的铝制小组立工件智能焊接需求, 设计了适用于高反光铝合金工件的智能机器人焊接系统, 该系统采用双目工业相机和线激光传感器相结合的方案, 实现焊缝的粗定位和精定位, 并通过高精度相机标定算法、灰度分割和Harris角点检测算法实现焊缝智能识别。同时, 系统采用基于标定板指导图的双相机标定法, 保证了全局图像一致性。通过在船厂的实际生产应用, 验证了系统的高效性和可靠性, 焊缝质量良好, 有效提升了舰船制造的自动化水平和生产效率。

关键词: 小组立; 机器视觉; 焊缝定位; 智能机器人焊接系统; 高反光铝合金工件

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)12-0042-07

Research on Intelligent Robot Welding System for High-Reflective Small Assembly Parts of Ships

MA Tao¹, SUN Hongwei^{1*}, LUO Jinyou², FANG Zichen¹, LIN Hangxi², LI Qiming¹

1. Jiangsu Automation Research Inst., Lianyungang 222000, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology for Ships, CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Co., Ltd., Guangzhou 510715, China

Abstract: At present, the welding of high-reflective aluminum components in domestic ship manufacturing enterprises mainly relies on manual labor, with a low degree of automation, leading to significant waste of human resources and energy. Accelerating the development of intelligent welding robot systems for high-reflective components, and promoting the application of group standing welding robots in the construction process of aluminum ships, is of great significance for realizing the intelligent manufacturing of aluminum group standing. In response to the intelligent welding needs of aluminum group standing components in a domestic backbone shipyard, an intelligent robot welding system suitable for high-reflective aluminum alloy components was designed. This system adopts a combination of binocular industrial cameras and line laser sensors to achieve coarse and fine positioning of the weld seam, and realizes intelligent recognition of the weld seam through high-precision camera calibration algorithms, grayscale segmentation, and Harris corner detection algorithms. Meanwhile, the system adopts a dual-camera calibration method based on calibration plate guidance maps, ensuring global image consistency. Through actual production applications in the shipyard, the system's efficiency and reliability have been verified, with good weld quality, effectively improving the automation level and production efficiency of ship manufacturing.

Keywords: preliminary assembly; machine vision; weld positioning; intelligent robotic welding system; highly reflective aluminum alloy workpiece

引用格式: 马韬, 孙宏伟, 罗进友, 等. 舰船高反光小组立构件智能机器人焊接系统研究[J]. 电焊机, 2024, 54(12): 42-48.

收稿日期: 2024-05-31 修回日期: 2024-11-20

基金项目: 科技部重点研发计划(2023YFE0201500); 广东省舰船先进焊接技术企业重点实验室基金(2023B1212070026)

作者简介: 马 韬(1990—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事智能机器人控制系统及机器视觉技术研究。

通讯作者: 孙宏伟(1982—), 男, 研究员, 博士, 主要从事智能机器人及高端装备研究工作。E-mail: sunhw_hit@126.com

Citation: MA Tao, SUN Hongwei, LUO Jinyou, et al. Research on Intelligent Robot Welding System for High-Reflective Small Assembly Parts of Ships[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(12): 42–48.

0 引言

随着我国装备制造业向智能制造方向发展,焊接机器人成为智能焊接加工工艺过程的主要技术手段之一。回首焊接机器人的发展历程,可以将其归纳为三个主要阶段^[1-4]:(1)第一阶段,多为基于5或6自由度手臂式示教再现工作方式的焊接机器人,可用于流水线上重复性的焊接工作;其适应性不强,受人为因素影响较大,严重依赖于人工示教,对焊接产品的规格尺寸要求极高;(2)第二阶段,基于传感器技术的离线编程焊接机器人,随着传感器和离线编程技术的日益改进和完善,这种离线编程机器人现已处于实际应用中;(3)第三阶段,多传感器、具有高度自适应能力的智能化焊接机器人,依靠智能化技术完成焊缝的智能识别与自动化焊接。

焊接机器人在舰船小组立制造中应用广泛,其焊缝自主识别能力尤为重要,直接影响到焊接机器人的自动化水平。目前针对焊缝智能识别及定位主要采取三种手段:(1)机械结构定位。通常使用装夹、固定限位等方式将待焊工件固定在指定位置,这种方法成本较低且易于实现,但存在单一机械结构适应工件种类和尺寸少、无法适应工件加工误差及焊接热变形、维护周期短等问题。(2)工件模型匹配。首先通过提取待焊工件特征点将工件模型与实际姿态进行匹配,进而定位焊缝,随后对焊接机器人进行离线编程,实现自主焊接。(3)机器视觉定位。根据使用的传感器分为二维视觉和三维视觉。二维视觉即使用CCD/CMOS传感器,采集物体某个方向上的透视图,通过对该透视图进行形态学分析来定位焊缝^[5]。三维视觉主要采用线/面阵激光雷达测量给定空间某一方向上的最高面点云,包含基于传感器坐标系的行列坐标、深度、颜色等信息,通过处理这些点云来实现焊缝定位^[6-9]。国内外的机器视觉定位技术常为大场景激光雷达扫描或是机械结构粗定位结合焊接机器人末端传感器焊缝跟踪,这里的末端传感器可以是线激光传感器或电磁传感器^[10-11]。

小组立是舰船分段制造中的一个阶段,一般是指在固定的场地加工舰船初期的船体结构件,例如拼装T型材、肋板上安装加强材等。针对多品种、小批量、小尺寸的舰船小组立工件,传统的机械结构定位适应性差,影响焊接机器人的可达性,而工件模型匹配技术耗时耗力,无法实现焊缝的高效自主识别。因此采用机器视觉技术进行焊缝的检测和定位已成为目前舰船小组立结构件智能识别的主要策略。焊缝智能识别技术的核心在于图像处理与分析。研究人员致力于开发先进的算法以提升图像处理的精度和速度,边缘检测、图像分割和模式识别技术被广泛应用于焊缝识别。机器学习和深度学习技术的引入,使得自动化图像分析更加高效和准确。然而目前已有小组立焊接机器人的焊接对象以碳钢类工件为主,针对舰船铝合金等高反光小组立结构件尚缺乏有效的解决方案,特别是铝合金工件的焊缝自主识别技术是一个主要难点。铝合金表面对光的反射率很高,容易产生光斑和反射干扰,降低视觉传感器采集的图像质量。此外,铝合金表面容易形成氧化层,这不仅影响焊接质量,还会干扰焊缝识别,增加图像处理难度。

本研究针对铝合金工件的高反光特性,开发了一套铝合金焊缝智能识别系统。系统创新性地采用双目工业相机+线激光传感器的组合方式分别实现焊缝的粗定位和精定位,其次研发了高精度的工业相机标定算法,减少了双目相机在工件不同位置的成像精度差异。随后将经典的灰度分割和Harris角点检测算法与本文研发的系统进行融合,实现了大场景下的铝合金工件焊缝定位。最后设计了基于线激光传感器的焊缝滤波与拐点检测算法,实现了焊缝的精确定位,有效解决了单纯依赖激光视觉带来的噪声干扰和高计算耗时问题。

1 系统组成及工作流程

舰船高反光小组立构件智能机器人焊接系统主要完成铝制三角T型肘板、铝制平直T型材等小



组件的焊接。焊缝形式主要包括平角焊缝和平躺曲线角焊缝。工作站采用单机器人双工位的布局。工作站主要由焊接平台、视觉识别单元、焊接机器人、信息处理单元等构成。焊接平台上设有气动夹具,可根据不同板厚调整压紧力;视觉识别单元配置工业相机,其可自动扫描工件,提取焊缝轨迹,发送给信息处理单元,同时视觉识别单元还配置了线激光传感器,可实现焊缝寻位和焊接过程跟踪;焊接机器人选用 KUKA KR16 R2010-2 机器人;信息处理单元能够处理视觉扫描的焊缝轨迹信息,自动生成焊接程序指令,匹配焊接工艺参数,分配焊接任务;此外,工作站还配置焊烟净化器、安全防护栏、警示标牌、三色灯和安全门等安全环保设施,满足安全和环保的要求。系统外观如图 1 所示。



图 1 系统外观

Fig. 1 System appearance

该系统工作的核心控制策略概括为“视觉识别+线激光寻位+线激光跟踪”。系统工作流程如下:①人工将组装完成的工件按规定要求放置在焊接作业平台上;②操作人员按下平台控制按钮,气动夹具自动夹紧工件,确保工件固定;③在总控软件界面选择所需焊脚尺寸,系统自动匹配焊接工艺参数;④点击“开始”按钮,启动工业相机采集工件三维数据;⑤相机识别结束,自动将采集的工件图像与位置信息传输至中央控制系统,生成焊接任务,自主规划焊接顺序,并形成焊缝布置图;⑥机器人自动开启线激光寻位功能,根据预设的焊接任务自动开始焊接作业,焊接过程中自动开启线激光跟踪功能,进行实时纠偏;⑦所有焊接任务完成后,机器人归位;⑧当前工位焊接任务完毕,进行另一工

位的焊接,重复①~⑦。

2 焊缝识别系统设计

焊缝识别系统采用两台工业相机对整个工作场景进行三维重构,并实现焊缝的粗定位;而后采用线激光传感器精确识别局部焊缝信息,并实现焊接过程跟踪。为了确保图像坐标与机器人坐标之间的准确转换,工业相机在使用前必须进行标定。

2.1 工业相机标定

为获得全局一致的相机内外参数,提出一种基于标定板指导图的双相机标定法,具体为:

(1)制作双标定板。将两块相同的标定板固定在同一块长条板上,确保两块标定板的中线在同一条直线上且中心相对距离为 $Distance$ 。测量双标定板标定面相对于待测平台的高度差 $DiffHeight$ 和世界坐标系下的像素精度 $PixelSize$ 。

(2)标定板放置与图像采集。将双标定板置于两台相机视野下,分别记为左相机 C1 和右相机 C2,采集到的图像分别为引导图 $ImgGuide1$ 、 $ImgGuide2$ 和待拼接图 $Img1$ 、 $Img2$ 。测量双引导图在列方向的重叠比例 $OverlapInPercnet$ 、行方向的交错比例 $BorderInPercent$ 。以两图中标定板中心为坐标原点,分别求得对应的外参 $Pose1$ 和 $Pose2$ 。计算两相机各自的像素坐标系-世界坐标系投影变换矩阵 P :

$$P = K [R|t] \quad (1)$$

式中 K 为相机内参矩阵; $[R|t]$ 为相机外参。

$$Pose = \begin{bmatrix} Trans \\ Rot \\ Direction \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $Trans = \begin{bmatrix} TransX \\ TransY \\ TransZ \end{bmatrix}$ 描述平移, $Rot = \begin{bmatrix} RotX \\ RotY \\ RotZ \end{bmatrix}$ 描

述旋转, $Direction$ 描述旋转方向,取 1 或 0。

像素坐标到世界坐标系的转换式如下:

$$z_c \cdot P_x = K \cdot [R|t] \cdot P_w \quad (3)$$

式中 z_c 为相机深度; $P_x = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$ 为像素坐标; $P_w = \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}$

为世界坐标。

在 *ImgGuide1* 中, 根据 *BorderInPercent* 裁剪掉多余的行以确定左上顶点, 并以 $0.5 * \text{OverlapInPercent}$ 确定右下顶点, 确定新的左上顶点和右下顶点的坐标分别为 $(\text{LeftX}, \text{UpperY})$ 和 $(\text{RightX}, \text{LowerY})$ 。定义 *C1* 新的外参:

$$\begin{aligned} \text{PoseNew1} &= \text{Pose1} \cdot \begin{bmatrix} E & \text{LeftX} & \text{UpperY} & \text{DiffHeight} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \text{RotNew1} \\ \text{TransNew1} \\ \text{DirectionNew1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

对于 *ImgGuide2*, 定义矩阵:

$$\text{cp1Hur1} = \begin{bmatrix} & \text{RightX} & & \\ E & \text{UpperY} & & \\ & \text{DiffHeight} & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{cp1Hcp2} = \begin{bmatrix} & \text{Distance} & & \\ E & 0 & & \\ & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

对 *cp1Hcp2* 求逆, 得到 *cp2Hcp1*, 将 *Pose2* 转换为 4×4 阵:

$$\text{cam2Hcp2} = \begin{bmatrix} & \text{Rot} & & \text{Trans} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将 *cp2Hcp1* 和 *cp1Hur1* 做积, 再转化为 *C2* 新的外参:

$$\text{PoseNew2} = \begin{bmatrix} \text{RotNew2} \\ \text{TransNew2} \\ \text{DirectionNew2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据 *PoseNew1* 和 *PoseNew2* 分别对 *Img1* 和 *Img2* 做行方向上的拼接, 得到拼接结果图 *ImgRes*, 如图 2 所示, 拼接具体效果如图 3 所示。与一般标定方法相比, 本文通过多次高精度的采集和计算来统筹并消除标定过程中的误差, 减少了拼接过程中带来的图片畸变影响, 保证了全局图像的一致性, 传统标定算法会导致相机拍摄的图像产生畸变(枕型、纺锤型等), 尤其会造成图像边缘失真。在实际应用中, 该标定方法能够实现单像素的拼接精度。

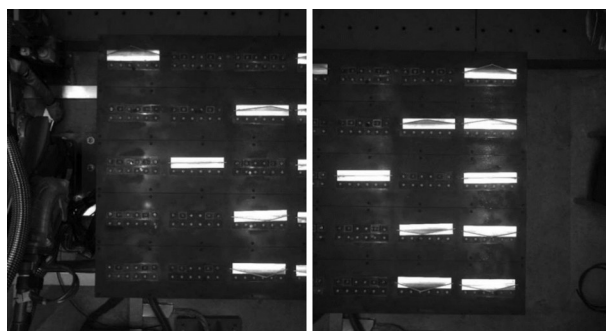


图 2 相机拍摄原图(待拼接图)

Fig. 2 Original image taken by camera

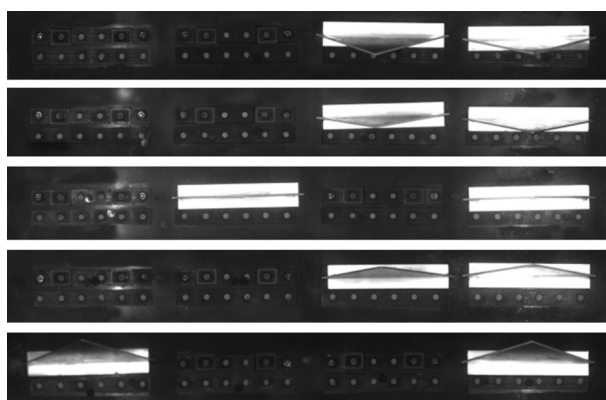


图 3 拼接效果

Fig. 3 Splicing effect diagram

2.2 基于灰度分割和 Harris 角点检测的焊缝粗定位

基于灰度分割和 Harris 角点检测的工件特征点集计算过程具体包含以下步骤:

(1) 对肘板件底板区域进行精确提取。首先采用 HDR 算法融合不同曝光下的场景拼接图片以降低环境光干扰, 然后对融合后的图像进行中值滤波和形态学开闭操作, 滤除噪声和细小区域后采用阈值分割提取出肘板件底板区域。

(2) 对肘板件底板区域外轮廓进行 Harris 角点检测, 由此计算出对应的工件特征点集 *VectorF*。进一步计算 *VectorF* 中两两相邻点的斜率, 形成斜率集合 *VectorK*。设定筛选阈值, 从 *VectorF* 中剔除 *VectorK* 中斜率小于阈值对应的点。

(3) 根据工件底板的形状确定特征点的位置, 使用对应的方法求出特征点集。本文以矩形底肘板件为例, 如图 4 所示, 该工件特征点集为矩形底的四个角点。该工件标准模型中焊缝位置为矩形底两短边的中点连线, 可通过特征点求得焊缝位置, 如图 5 所示。



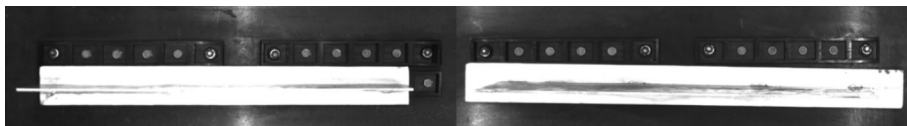


图4 矩形底肘板件

Fig. 4 Rectangular bottom bracket



图5 特征点识别结果

Fig. 5 Feature point recognition results

2.3 基于线激光传感器的焊缝精定位

线激光传感器采集到的焊缝数据如图6所示。

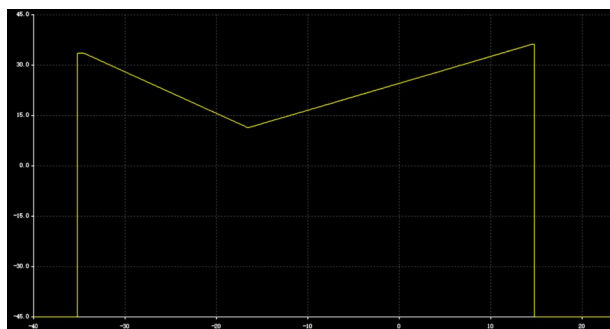


图6 线激光传感器采集的焊缝数据

Fig. 6 Weld seam data collected by line laser sensor

首先对线激光传感器采集到的原始焊缝点集进行中值滤波处理,本文采用7点中值滤波,即滤波窗口长度 $L=7$ 。在线激光器获取的焊缝点集的某一位置,窗口内的样本表示为:

$$\{(x_{i-N}, y_{i-N}), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_{i+N}, y_{i+N})\} \quad (9)$$

对这 L 个坐标点数据进行从大到小的顺序排列后,其中的中值定义为中值滤波的输出值:

$$y_i = \text{Med}\{y_{x(i-N)}, \dots, y_{si}, \dots, y_{s(i+N)}\} \quad (10)$$

原始焊缝点集中各点依次进行中值滤波处理,得到滤波后的点集:

$$\text{Profile} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) \dots (x_n, y_n)\} \quad (11)$$

遍历该点集,选取间隔为 n 的两个点A、B计算斜率:

$$k = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (12)$$

得到斜率集合:

$$\text{ProfileK} = \{(k_1, x_{B1}, y_{B1}), (k_2, x_{B2}, y_{B2}), (k_3, x_{B3}, y_{B4}), \dots, (k_n, x_{Bn}, y_{Bn})\} \quad (13)$$

设定阈值对 ProfileK 进行筛选,获得拐点即焊缝底点坐标。

3 控制系统开发

控制系统的核心是总控软件,该软件是整个系统的软件控制中枢,是系统运行的起点,不仅负责与其他软硬件之间统一的数据交互,同时承担人机交互与状态展示功能。软件主要由机器人控制模块、工艺查询模块、外部通信模块及状态监控系统组成,软件与系统其他各部分软硬件的接口关系如图7所示。

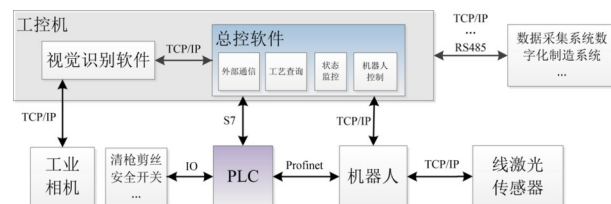


图7 总控软件与系统其他软硬件接口

Fig. 7 Interface of the master control software

软件界面如图8所示。用户点击“开始”按钮,视觉识别系统自动开始采集工作区图像并计算焊缝位置,可视化模型区域可直观展示焊缝俯视图。焊接顺序和焊接工艺由系统根据焊缝位置及工艺要求自动分配,用户也可以自由选择焊缝,调整焊接顺序、焊接工艺,或删除焊缝。

4 应用效果

本文研究的智能机器人焊接系统已在国内某

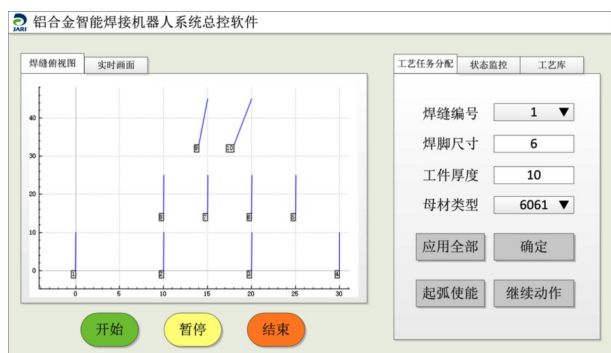


图 8 人机交互界面

Fig. 8 Interactive interface

骨干船厂实现应用,焊缝一次成形美观、光顺,焊缝均匀饱满,无缺口凹坑、焊瘤等外观缺陷,如图9所示。通过采用游标卡尺测量机器人末端定位点与焊缝起始点的偏差,可以验证该系统的焊缝识别精度优于0.5 mm。采用秒表计时,软件的图像识别处理耗时低于5 s。综上所述,研究的智能机器人焊接系统能够满足高速高精度焊接需求。

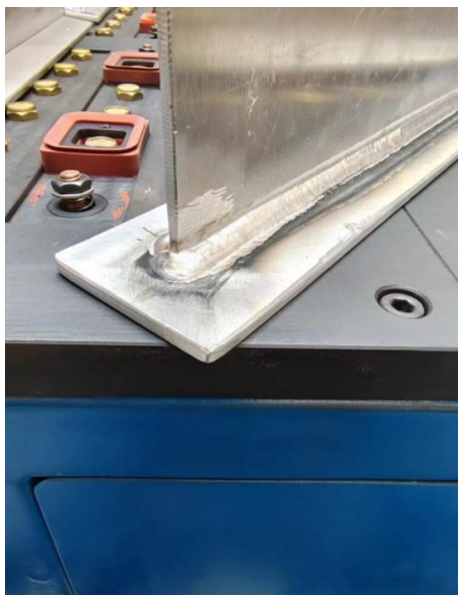


图 9 实际焊接效果

Fig. 9 Actual welding effect

5 结论

针对舰船高反光小组立构件的智能焊接需求,提出一种基于机器视觉的智能机器人焊接系统,该系统融合了双目工业相机和线激光传感器,实现了焊缝的粗定位和精定位,并开发相应的图像处理算

法和控制系统,能够高效完成铝制三角T型肘板、铝制平直T型材等舰船小组立件的焊接。

(1)针对多品种、小批量、小尺寸的工件特点,设计了基于焊缝自主识别系统的焊接机器人系统架构,满足舰船小组立件的高效自主焊接需求。

(2)针对铝合金工件高反光特点,采用了双目相机视觉粗定位结合激光视觉精细定位,有效解决了完全使用激光视觉所带来的噪声问题和高计算耗时问题。

(3)开发了双目工业相机高精度标定算法,保证了全局图像一致性。

(4)通过在船厂进行实际生产应用,验证了系统的焊缝识别精度和焊接效果,焊缝一次成形美观、光顺,焊缝均匀饱满,无外观缺陷。

未来团队将重点研究针对舰船任意类型复杂构件的全自主智能焊接机器人系统,进一步拓宽已有焊接系统的应用范围,提升舰船复杂构件焊接作业效率。

参考文献:

- [1] 陈健,苏金花,张毅梅.《中国制造2025》与先进焊接工艺及装备发展[J]. 焊接,2016(03):1-5.
CHEN J, SU J H, ZHANG Y M. "Made in China 2025" and the development of advanced welding technology and equipment [J]. Welding and Joining, 2016 (03): 1-5.
- [2] 李成栋,宁飞龙,李阳,等. 焊接机器人在船舶建造中的应用与发展[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2023,32(4):75-83.
LI C D, NING F L, LI Y, et al. Application and Development of Welding Robots in Ship Construction [J]. Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition), 2023, 32(4): 75-83.
- [3] 肖润泉,许燕玲,陈善本,等. 焊接机器人关键技术及应用发展现状[J]. 金属加工(热加工), 2020(10): 24-31.
XIAO R Q, XU Y L, CHEN S B, et al. Key technologies and application development status of welding robots [J]. MW Metal Forming, 2020(10): 24-31.
- [4] 顾小燕,黎文航,祁凯,等. 船舶焊接机器人技术的研究现状及应用[J]. 科技视界, 2020(03): 233-235.
GU X Y, LI W H, QI K, et al. Research status and application of ship welding robot technology [J]. Science



and Technology Vision, 2020(03):233-235.

- [5] 张然. 基于视觉传感的曲线焊缝提取与轨迹规划[D]. 辽宁:沈阳工业大学, 2023.

ZHANG R. Curve weld extraction and trajectory planning based on visual sensing[D]. Shenyang University of Technology, 2023.

- [6] 戴漩领. 船舶焊接机器人的焊缝识别研究[D]. 湖北:武汉理工大学, 2023.

DAI X L. Research on weld recognition of marine welding robot[D]. Hubei: Wuhan University of Technology, 2023.

- [7] 陆燕辉, 刘华. 船舶小组立复杂结构智能焊接装备应用方案[J]. 造船技术, 2021(4):78-83.

LU Y H, LIU H. Application scheme of intelligent welding equipment for complex structures of shipbuilding groups[J]. Marine Technology, 2021(4):78-83.

- [8] 黄敏健, 谢新, 郅金波, 等. 船舶分段制造装备智能化需求分析[J]. 造船技术, 2021(12):68-85.

HUANG M J, XIE X, QIE J B, et al. Analysis of intelligent demand for ship block manufacturing equipment

[J]. Marine Technology, 2021(12):68-85.

- [9] 朱昱颖, 孙宏伟, 朱加雷, 等. 船舶中小组立焊接机器人的发展与应用现状[J]. 船舶工程, 2022(1):104-111.

ZHU Y Y, SUN H W, ZHU J L, et al. Development and application status of small-scale welding robots in ships [J]. Ship Engineering, 2022(1):104-111.

- [10] 赵超奇, 习俊通. 船舶小组立焊接工位特征提取和检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(8):76-80.

ZHAO C Q, XI J T. Feature extraction and detection of ship group welding stations [J]. Modular Machine Tools and Automation Manufacturing Technology, 2021(8):76-80.

- [11] Kim J W, Shin J H. A Study of a dual-electromagnetic sensor system for weld seam tracking of I-butt joints [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217(9):1305-1313.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第27页

106.

LI S, GONG L F, XIAO Q L, et al. Study on porosity suppression technology of hand-held laser welding of electrical distribution box [J]. MW Metal Forming, 2024(04):103-106.

- [8] 徐赫唯, 王子欣, 刘春柏, 等. 手持激光焊技术焊接汽车涂层钢板的试验研究[J]. 汽车工艺与材料, 2021(01):15-19.

XU H W, WANG Z X, LIU C B, et al. Research on Handheld Laser Welding Technology for Welding Auto-

mobile Coated Steel Plate [J]. Automobile Technology&Material, 2021(01):15-19.

- [9] 徐军伟, 吴广辉, 冯焕钦, 等. 手持激光焊在城轨车辆侧墙产品中的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46(05):120-123.

XU J W, WU G H, FENG H Q, et al. Application of Handheld Laser Welding in the Side Wall Products of Urban Rail Vehicles [J]. Electric Locomotive and Urban Rail Vehicle, 2023, 46(05):120-123.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

