DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0122-05

LNG装卸臂智能化对接装置的研究与设计

尚延伟[1,2], 曾庆化[1]

(1.南京航空航天大学 自动化学院,南京 210016;2.连云港杰瑞自动化有限公司,江苏 连云港 222006)

摘　要:目前液化天然气(liquefied natural gas,LNG)槽车装卸作业中,LNG装卸臂拖拽与管道法兰对接工作仍依靠人工操作完成,整体作业自动化水平偏低,极大阻碍了LNG接收站智能运维体系的建设发展。当前行业普遍采用的单臂改造方案存在施工难度大、建设成本高、运行稳定性弱、实际应用性价比偏低等诸多现实问题,因此行业迫切需要研发新型智能对接作业技术。跳出传统单臂逐个改造的固有设计思维,创新性地提出一对多智能对接整体架构,搭载集成机械臂与视觉识别单元的自动导引车(automated guided vehicle,AGV)作业平台,融合AGV全场地自主巡航移动、槽车及法兰接口视觉精准定位识别、机械臂自适应精准对接等多项核心技术,实现单套设备完成多组LNG装卸臂对接作业任务。研究结合理论推演、三维实体建模、动力学仿真分析与实体样机试验等多种手段,充分验证了LNG装卸臂智能对接设备的实际应用可行性。该技术打破传统单臂改造模式的技术瓶颈,无需为每套LNG装卸臂单独配置驱动执行机构与视觉检测系统,有效缩减设备改造成本与现场施工难度,全面提高LNG槽车装卸流程的自动化、智能化水平,设备运行稳定性与工程应用性价比优势突出,能够有效推动LNG接收站装卸作业场景智能化升级。

关键词:LNG;装卸臂;鹤管;槽车装卸;管道对接;LNG接收站;智能化装卸

中图分类号:TP242.2;TP391;TH137　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1003-7241(2026)08-0122-05

Research and design of intelligent connection device for LNG loading arm

Shang Yanwei[1,2], Zeng Qinghua[1]

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics&Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Lianyungang Jari Automation Co., Ltd., Lianyungang 222006, Jiangsu, China)

Abstract: In current liquefied natural gas (LNG) tank truck loading and unloading operations, the dragging of LNG loading and unloading arm and pipeline flange connection are still completed manually. The overall operational automation level remains low, which greatly hinders the construction and development of intelligent operation and maintenance systems for LNG terminals. It is widely adopted that single-arm renovation scheme in the industry suffers from prominent drawbacks such as high construction difficulty, high investment cost, poor operational stability and low practical cost-effectiveness. Accordingly, it is urgent to develop new intelligent docking operation technologies. Different from the conventional design idea of renovating individual arms one by one, this paper innovatively proposes a one-to-many intelligent docking framework. An automated guided vehicle (AGV) platform integrated with manipulators and visual recognition units is adopted. By integrating core technologies including full-site autonomous cruising of AGVs, accurate visual positioning and identification of tank trucks and flange interfaces, as well as adaptive precise docking of manipulators, a single set of equipment can fulfill docking tasks for multiple groups of LNG loading and unloading arms. The practical application feasibility of the intelligent docking device for LNG loading and unloading arm is fully verified through theoretical deduction, three-dimensional solid modeling, dynamic simulation analysis and prototype experiments. This technology breaks the technical bottleneck of the traditional single-arm renovation mode. There is no need to equip each LNG loading and unloading arm with independent driving actuators and visual detection systems, which effectively reduces renovation costs and on-site construction difficulty. It comprehensively elevates the automation and intelligence degree of LNG tank truck loading and unloading processes, and features superior operational stability and engineering application cost performance. It can effectively promote the intelligent upgrading of loading and unloading scenarios in LNG terminals.

Keywords: LNG; loading arm; loading arm; tank truck loading and unloading; pipeline docking; LNG terminal; intelligent loading and unloading

随着智能化和数字化概念的推广和普及,对LNG接收站的自动化水平也提出了更高的要求。目前,低温介质在生产、储存和转运等环节的自动化程度已经很高,但在LNG装卸环节仍然存在明显短板。LNG装卸臂为无动力臂[1],由5个旋转接头及对应管道等组成,与LNG槽车[2]对接时仍然采用人工操作,需要人工拖拽LNG装卸臂将

收稿日期:2024-12-08;**录用日期**:2025-02-21

作者简介:尚延伟(1984—),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为LNG装卸设备的研发与设计。

引用本文:尚延伟, 曾庆化. LNG装卸臂智能化对接装置的研究与设计[J]. 自动化技术与应用,2026,45(8):122-126. (Shang Yanwei, Zeng Qinghua. Research and design of intelligent connection device for LNG loading arm[J]. Techniques of Automation and Applications,2026,45(8):122-126.)

其与槽车接口法兰对齐,并且需要人工拆装法兰,自动化程度极低,严重制约了 LNG 接收站的智能化水平[3]。如图 1 所示。



图 1　LNG 装卸臂与槽车对接

Fig. 1　Docking of LNG loading arm and tanker

1 个 LNG 接收站通常配套 20 套左右的 LNG 装卸臂,如何实现这 20 套 LNG 装卸臂与槽车的自动化对接已成为行业难题。

目前,行业内通过给 LNG 装卸臂上的 10 个旋转接头增加气动、液压或电机驱动等方式,将 LNG 装卸臂由无动力臂升级为动力臂[4],虽然实现了 LNG 装卸臂自动运行,但升级改造后的 LNG 装卸臂体积增大、重量增加、刚性降低、精度不高,性价比很低,实际效果并不理想。

本研究内容跳出了传统单臂改造的技术路线,不再针对单个具体的 LNG 装卸臂进行改造,而是站在整个 LNG 装卸站的角度,纵览所有 LNG 装卸臂,进行全面布局,采用 1 台 AGV(配套机械手和视觉)即可实现 20 套 LNG 装卸臂的驱动和对接,为后续整个 LNG 接收站的智能化和数字化打下基础[5]。

1　传统的单臂改造技术

LNG 装卸臂分液相臂和气相臂,每根臂由 5 个旋转关节组成,传统的单臂改造技术路线通过对这 10 个旋转接头增加驱动装置实现 LNG 装卸臂自动化。如图 2 所示。

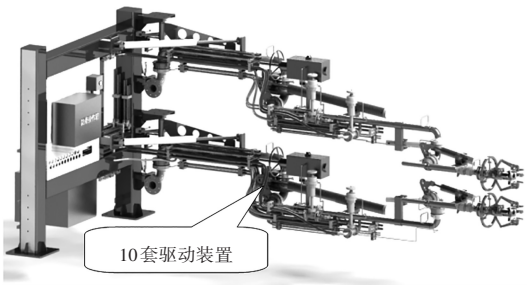


图 2　单臂驱动方案

Fig. 2　Single-arm drive solution

目前,传统的单臂改造技术路线将焦点放在 LNG 装卸臂上的 10 个旋转接头上,通过给旋转接头增加驱动装置实现 LNG 装卸臂自动化。常用的驱动方式有气动、液压和电动等,常用的传动机构有齿轮、连杆等。如图 3 所示。

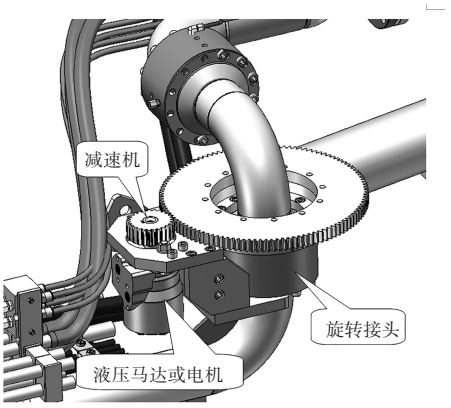


图 3　旋转接头驱动示意图

Fig. 3　Schematic diagram of rotary joint drive

由于每个臂增加了 5 套驱动和传动装置,造成 LNG 装卸臂体积大、重量大,刚性变差,末端接口法兰处的重复路径精度和重复定位精度都比较低,实际效果并不理想,性价比很低,很难大面积推广使用。

2　智能化对接装置研究与设计

本研究内容从全局出发,针对整个 LNG 接收站所有 LNG 装卸臂进行统一考虑,抛弃了传统的单臂改造技术路线,借助 1 台 AGV(配套机械手和视觉)[6],实现一套装置满足 20 套 LNG 装卸臂的智能化对接需求。

LNG 装卸臂智能化对接装置由 LNG 装卸臂(现有)、AGV(1 台)、机械手(1 台)、槽车及接口法兰视觉识别与定位系统、法兰快速连接装置和控制系统等组成。AGV 相当于人的腿脚,机械手相当于人的手臂,视觉相当于人的眼睛,将三者融合在一起[7],用机器模仿人的动作,实现了 LNG 装卸臂的智能化对接。如图 4 所示。

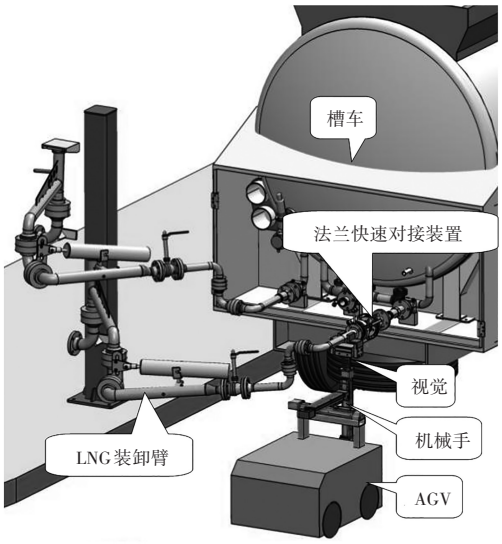


图 4　LNG 装卸臂与三轴机械手

Fig. 4　LNG loading arm and three-axis manipulator

将机械手安装在 AGV 上,由 AGV 带着机械手在 LNG 接收站所有鹤位之间来回中转,机械手驱动 LNG 装卸臂,实现 LNG 装卸臂与槽车自动对接。视觉系统由 3D 视觉

和2D视觉组成,实现槽车及接口法兰口位置识别和定位。法兰快速连接装置利用弹簧实现自锁功能,利用万向球实现自适应功能,实现两片管道法兰的自动连接[8]。控制系统用来实现现场设备的本地和远程控制。

当槽车停靠在指定鹤位后,AGV行走至槽车接口法兰处,视觉识别槽车接口法兰位置,然后机械手抓住LNG装卸臂将其拖拽至槽车接口法兰处,利用法兰快速连接装置实现LNG装卸臂与槽车接口法兰的自动连接,最终实现LNG装卸臂与槽车自动对接。

AGV可以根据调度计划和实际工况,自动规划路径,自动选择对应鹤位,实现LNG装卸环节的智能化运行。

LNG装卸臂智能化对接装置涉及的关键技术有LNG装卸臂(带末端三轴驱动)技术、槽车及接口法兰视觉识别与定位技术、AGV和机械手技术。

2.1 LNG装卸臂机构分析

LNG装卸臂有5个旋转副,末端三轴机械手有3个移动副,将两者组合在一起形成一个8轴并联运动机构,其中3个移动副为驱动机构,而5个旋转副为自由跟随机构。如图5所示。

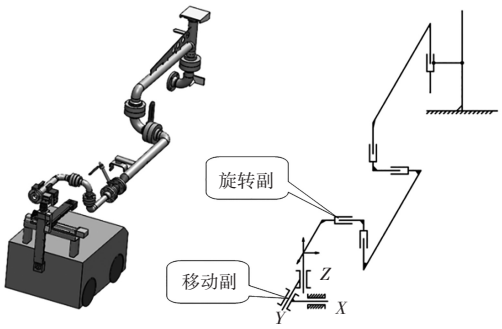


图5 LNG装卸臂(带末端三轴驱动)机构

Fig. 5 Mechanism of LNG loading arm (with end three-axis drive)

LNG装卸臂的自由度为5,而LNG装卸臂(带末端驱动)的自由度为8,正常情况下需要8个独立的运动数目,原有的5关节LNG装卸臂和新增的三轴驱动机构组成并联机构,LNG装卸臂(带末端驱动)不再驱动LNG装卸臂的5个旋转轴,而是采用新增的三轴驱动机构直接驱动末端刚体,最终实现机构在运动过程中有一个确定的运动路径。另外,利用三轴驱动装置末端的无动力浮动装置实现角度自适应,不再单独增加旋转驱动装置。

根据D-H参数法[9],五关节的LNG装卸臂变换矩阵为

$$ {}^{0}_{5}\boldsymbol{T} = ({}_{0}\boldsymbol{T})({}^{0}_{1}\boldsymbol{T})({}^{1}_{2}\boldsymbol{T})({}^{2}_{3}\boldsymbol{T})({}^{3}_{4}\boldsymbol{T})({}^{4}_{5}\boldsymbol{T}) \tag{1} $$

三轴机械手变换矩阵为

$$ {}^{0}_{3}\boldsymbol{T} = ({}_{0}\boldsymbol{T})({}^{0}_{1}\boldsymbol{T})({}^{1}_{2}\boldsymbol{T})({}^{2}_{3}\boldsymbol{T}) \tag{2} $$

式中,${}^{0}_{n}\boldsymbol{T}$代表目标坐标系n相对于参考坐标系0的位姿变换矩阵。

三轴机械手只涉及3次坐标系变换,而且只有平移变换,因此,机械手的运动学方程大幅简化,其正解和逆解的计算难度也大幅降低[10-11]。综上,LNG装卸臂采用末端三轴机械手驱动的方式更为简单可行。

2.2 槽车及法兰识别与定位

采用3D视觉识别槽车位置,采用2D视觉识别槽车接口法兰,视觉装置安装在AGV上,实现20套LNG装卸臂共用一套视觉装置。如图6所示。

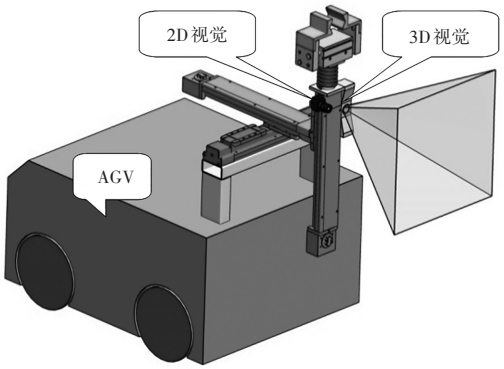


图6 视觉装置安装示意图

Fig. 6 Schematic diagram of vision device installation

采用3D相机扫描LNG槽车尾部,得到点云数据文件,运用点云切片投影、聚类、特征拟合等方法,提取槽车大概位置。如图7所示。

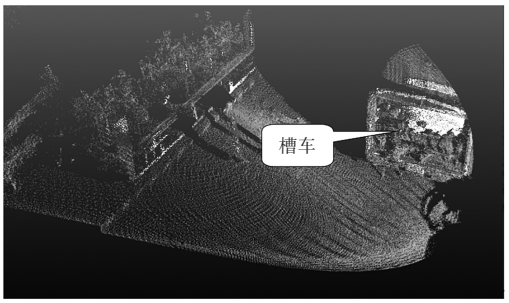


图7 3D视觉识别LNG槽车轮廓

Fig. 7 3D vision recognition of LNG tanker contour

2.3 AGV+机械手的研究与设计

2D相机对LNG槽车接口法兰进行拍照,识别该法兰的平面位置坐标(X,Y)和法兰外径尺寸,通过将此法兰外径尺寸和基准法兰尺寸进行对比,计算出此法兰与相机之间的距离,进而得到法兰Z方向的坐标,最终得到该法兰的位置坐标(X,Y,Z)。如图8所示。

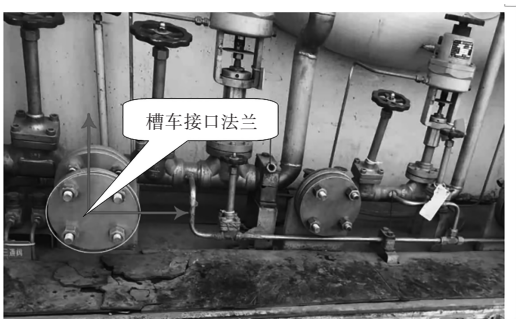


图8 2D视觉识别LNG槽车接口法兰

Fig. 8 2D vision recognition of LNG tanker interface flange

采用HALCON组件模型匹配函数(find_component_model)识别法兰,然后使用area_center()函数输出法兰中心点位置坐标。如图9所示。

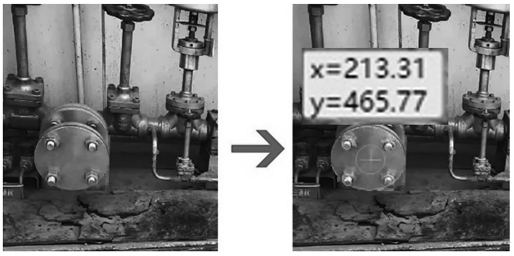


图 9　HALCON 软件 2D 视觉识别法兰模拟效果

Fig. 9　Simulation result of flange 2D visual recognition based on HALCON software

视觉装置获取法兰位置坐标后,控制系统根据机械手坐标系和视觉坐标系之间的变换关系,控制机械手运动到法兰真实的位置,实现 LNG 装卸臂与槽车接口法兰的准确对接。如图 10 所示。

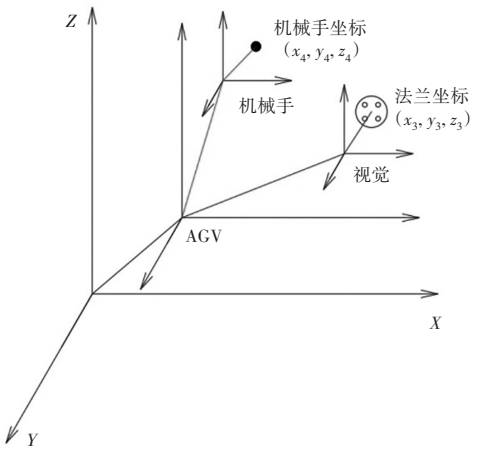


图 10　法兰和机械手之间的坐标系变换关系

Fig. 10　Coordinate transformation relationship between flange and manipulator

通过 AGV+三轴机械手拖拽 LNG 装卸臂。LNG 装卸臂与槽车对接过程中,LNG 装卸臂末端接口法兰需要具备 *X*/*Y*/*Z* 三轴平移和角度浮动功能。如图 11 所示。

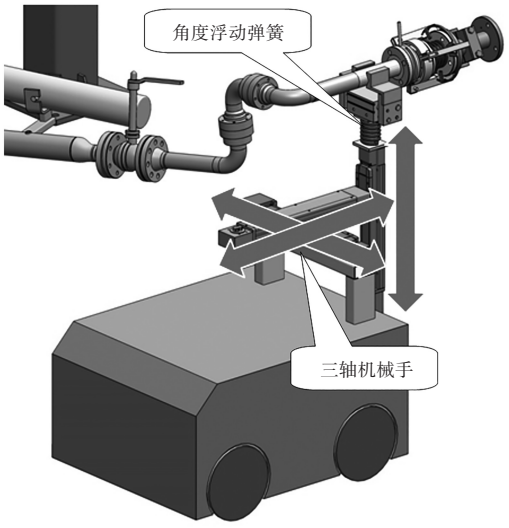


图 11　三轴机械手拖拽 LNG 装卸臂状态图

Fig. 11　State diagram of three-axis manipulator towing LNG loading arm

机械手卡爪前端设置一个角度浮动装置,用于适应并自动补偿法兰角度偏差。浮动装置主要由内筒、外筒和扭力弹簧组成,当 LNG 装卸臂法兰与 LNG 槽车法兰有轻微角度偏差时,可以依靠浮动装置来自动纠正,避免干涉和碰撞。

将机械手安装在 AGV 上,打破了工位限制,机械手的工作范围不再局限在单工位,而是整个 LNG 接收站任意一个工位,而视觉装置可以识别槽车和接口法兰的位置,通过 AGV、机械手和视觉等技术的融合[12-14],实现 1 套装置满足 20 套 LNG 装卸臂的智能化对接。

3　仿真与试验

3.1　动作仿真模拟

利用三维设计软件对 LNG 装卸臂智能化对接装置及其相关配套进行 3D 建模,建立虚拟应用场景,通过在虚拟应用场景中改变各装置的状态来模拟真实世界的操作[15],并生成仿真动画视频,经验证 LNG 装卸臂智能化对接装置的动作、流程、运动范围等都能满足应用要求,虚拟场景动作仿真模拟见图 12 和图 13 所示。

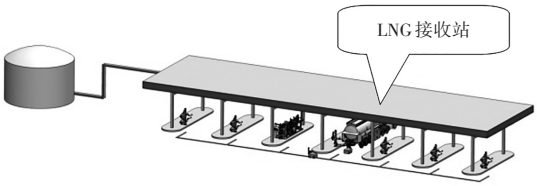


图 12　LNG 接收站虚拟场景模拟

Fig. 12　Virtual scene simulation of LNG terminal

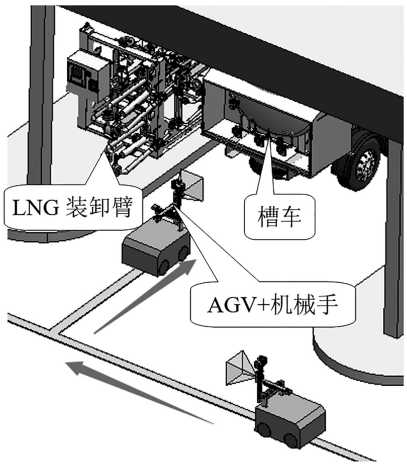


图 13　LNG 装卸臂智能对接装置动作仿真模拟

Fig. 13　Motion simulation of intelligent docking device for LNG loading arm

3.2　视觉系统试验

3D 视觉和槽车就位后,3D 视觉连续对槽车进行 10 次识别,实测位置偏差值小于 5 cm。2D 视觉连续对槽车接口法兰进行 10 次识别,实测位置偏差小于 0.3 mm。综上,视觉系统可以满足应用需求。激光雷达和 2D 相机(均带防爆外壳)实物见图 14 所示,槽车识别点云图和法

兰轮廓拟合曲线见图15所示。



图14 激光雷达(左)和2D相机实物(右)

Fig. 14 LiDAR (left) and 2D camera physical(right)



图15 槽车识别点云图和法兰轮廓拟合曲线

Fig. 15 Point cloud map of tanker recognition and fitting curve of flange contour

3.3 AGV+机械手动作试验

AGV带着机械手可以实现各个工位中转,机械手单轴直线运动重复定位精度可达±0.2 mm,在2D视觉的辅助下,机械手可以根据视觉反馈的位置数据自动调整运动轨迹,拖动LNG装卸臂,最终实现LNG装卸臂与槽车的准确对接。AGV+机械手实物见图16所示。



图16 AGV+机械手实物图

Fig. 16 AGV and manipulator

4 结论

本研究内容从全局出发,针对整个LNG接收站所有LNG装卸臂进行统一考虑,抛弃了传统的单臂改造方案,借助1台AGV(配套机械手和视觉),实现20套LNG装卸臂的自动对接。本研究内容打破传统思路,提出了一对多的解决思路,在尽量减少现有设备改造的前提下,以最可行的解决方案、最低的改造成本和最安全的方式,实现了全站LNG装卸臂与LNG槽车的智能化对接,并且借助远程和本地控制系统,实现了LNG装卸环节的自动化和智能化运行。本研究已实现LNG装卸臂与槽车的智能对接,考虑到实际项目成本控制,本研究内容中的可行走装置选用了AGV,执行装置选用了三轴机械手,后续研究方向可以考虑使用更加智能的机器狗甚至仿人机器人,机器狗不但可以实现全场行走,还能适应复杂路况,而仿人机器人可以模仿人类动作,完成更复杂的工作。

参考文献

[1]中国计划出版社,液体装卸臂工程技术要求:HG/T 21608—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.

[2]杨庆威,邹豫涛,田旭涛,等. LNG槽车装卸技术综合分析[J].石油和化工设备,2023,26(9):49-53.

[3]周树辉,宋坤,蔡主斌. 新型槽车智能化充装橇安全性分析研究[J].石油和化工设备,2022,25(12):127-133,138.

[4]吴斌,王勇,潘旭冉,等. LNG半自动化装卸臂应用研究[J]. 机械工程与技术,2022,11(6):699-707.

[5]鲁亚雄. 信息化、智能化在LNG槽车充装中的应用[J].现代工业经济和信息化,2021,11(6):103-105.

[6]Nizam H S M,Nurul S L,Mohd F A,et al. Vision based row guidance approach for navigation of agricultural mobile robots in orchards[J]. Modern Applied Science,2024,18(1):60.

[7]叶文枭. 多AGV无冲突路径规划及其在作业车间的应用研究[D].郑州:中原工学院,2025.

[8]梅杰. 基于TRIZ理论的LNG卸料臂自动对接技术的研究[D].舟山:浙江海洋大学,2023.

[9]柴勇,刘福华. 基于D-H算法的四轴焊缝跟踪机械臂的设计及应用[J].无线互联科技,2023,20(22):122-127.

[10]闫超. 工业机器人的机械手运动学建模分析[J].集成电路应用,2023,40(10):366-367.

[11]李长武,周晓宇,高苇,等. 视觉及多传感器数据融合的关键技术研究[J].自动化技术与应用,2024,43(4):103-107.

[12]张成. 基于视觉的登机桥自动对接飞机舱门技术研究[D].成都:电子科技大学,2021.

[13]黄松涛. 基于机器视觉的电力巡检机器人自动化系统设计[J].自动化技术与应用,2024,43(1):35-38,43.

[14]Lu C,Mingdi N,Shengxi W,et al. A robust object tracking and visual servo method for mobile robot[C]//China:2022 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics(RCAR),Guiyang:IEEE,2022:151-156.

[15]赵久龙,赵爽. 搭载虚拟现实的汽车车间三维物流仿真系统[J].装备机械,2024,(4):9-13,30.