

基于模糊控制的导轨型码垛机器人设计与实现

刘永勋^{1,2}, 千红涛¹

(1.河南工学院 机械工程系, 新乡 453003; 2.西安交通大学 机械学院, 西安 710049)

摘要: **目的** 针对传统码垛机器人只能在某一固定位置实现货物搬运, 严重限制了码垛机器人的应用范围, 无法实现灵活变更工作区域这一问题, 提出一种导轨型码垛机器人。**方法** 通过将导轨与机器人的结合, 来拓宽码垛机器人的工作范围, 使单个机器人可以实现多功能化应用, 以提高机器人的应用效率。**结果** 采用模糊控制方法提高了导轨滑块停靠精度, 实验表明停靠精度稳定在 ± 1.5 mm, 机械手最大误差球形半径为 1.5 mm, 满足应用需求。**结论** 导轨型码垛机器人可以最大化利用现有机器人系统, 提升了码垛效率, 节约了成本, 具有一定的应用前景。

关键词: 模糊控制; 导轨; 码垛机器人; 程序设计; 多功能化

中图分类号: TB486; TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0170-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.028

Design and Implementation of a Guideway Type Palletizing Robot Based on Fuzzy Control

LIU Yong-xun^{1,2}, QIAN Hong-tao¹

(1.Department of Mechanical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2.School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a kind of guideway type palletizing robot regarding the situation that the traditional palletizing robot can only carry goods at a certain fixed position, which seriously restricts the application range of the palletizing robot and cannot change the working area flexibly. The combination of guideway and robot greatly widened the working scope of palletizing robot to achieve the multifunctional application of a single robot, to improve the efficiency of robot application. The stop precision of guideway slider was improved in the method of fuzzy control. The experiment showed that the stop precision was stabilized at ± 1.5 mm, and the maximum error spherical radius of the manipulator was 1.5 mm, which satisfied the application demand. The guideway type palletizing robot can maximize the existing robot system, enhance palletizing efficiency and save cost, and has certain application prospects.

KEY WORDS: fuzzy control; guideway; palletizing robot; programming; multifunctional

在近代工业生产过程中, 自动化成为了首要目标。生产线上, 加工和装配等工作还需要依靠人力, 这严重限制了整个生产过程的效率, 因此码垛机器人的引入必将极大提高工厂生产效率、节约生产成本。

针对如何高效合理运用码垛机器人这一问题, 康瑞芳、刘鑫等^[1]提出一种嵌入式码垛机器人控制系统, 该系统具有良好的可扩展性, 但是码垛机器人只

能处于某一固定位置工作, 应用范围非常局限。王吉岱、王明鹏等^[2]提出一种视觉码垛系统, 该码垛系统就有较强的产品分类性能, 应用前景良好。李红果、刘新乐等^[3]提出一种多垛型码垛机器人控制系统, 该系统对垛型具有更强的适应性, 但是依然没有考虑应用范围问题。目前, 大多数文献资料大多针对码垛机器人精度控制研究, 很少涉及如何拓宽单个码垛机器人工作范围领域, 因此, 文中提出一种导轨型码垛机

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (16A460015)

作者简介: 刘永勋 (1980—), 男, 硕士生, 河南工学院讲师, 主要研究方向为机械设计仿真与检测。

机器人系统，充分利用码垛机器人，使得一台机器人可以实现多台机器人码垛功能。

导轨滑块停靠精度和 ABB 机械手抓取精度是整个导轨型码垛机器人系统设计的关键，对于 ABB 机械手模块，可以满足应用定位精度要求，因此文中重点针对导轨滑块，采用模糊控制的方法实现高精度重复定位功能。

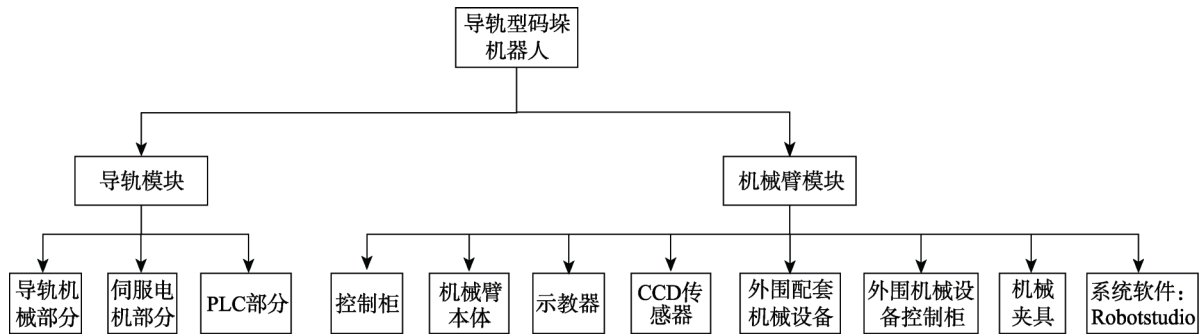


图 1 导轨型码垛机器人系统构成
Fig.1 System structure of guideway type palletizing robot

2 导轨模糊控制策略

导轨型码垛机器人可以有效扩大单个机械手的作业范围，并且前期投入很小，在中小型企业中应用前景非常好^[5-6]。由于导轨移动精度的控制是必须要考虑的问题，因此单纯地依靠 PLC 控制导轨停靠很难满足应用需求。模糊控制在电机控制方面具有良好应用效果，并且其不需要精确的数学模型，实现简便。文中将模糊控制方法引入到 PLC 控制中，以实现导轨高精度定点停靠^[7-8]。

导轨模糊控制系统主要由 2 个部分构成：三菱的 FX5U 系列 PLC 和伺服控制系统^[9-10]。控制系统原理见图 2。

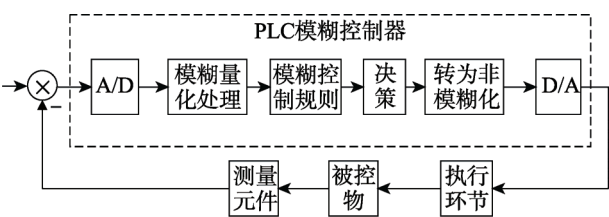


图 2 模糊控制系统原理
Fig.2 Principle of fuzzy control system

导轨控制系统，码垛机器人安装在滑块的上面，滑块的位置偏差 e 和偏差变化率 Δe 作为系统的输入，滑块位置信号 u 作为系统的输出，设计一款两输入单输出的模糊控制系统，提高导轨滑块移动控制精度，对存在的位置偏差及时纠正。

位置偏差 e 的理论取值范围为 $(-\infty, +\infty)$ ，但是在实际的导轨应用过程中，位置偏差取值过大时，位

1 导轨型码垛机器人构成

导轨型码垛机器人主要由两大模块构成：导轨模块和机械臂模块。导轨模块主要由导轨机械部分、伺服电机部分、PLC 部分构成；机械臂模块主要由 8 个部分构成^[4]。整个导轨型码垛机器人系统构成见图 1。

置检测元件将无法获得滑块位置信息，所以文中给定 e 的取值范围为 $[-120, +120]$ ，单位取值为 mm。考虑到模糊控制系统等原因，系统的模糊集和计算过程中将不再标明变量的单位，位置偏差 e 和偏差变化率 Δe 的值域设为 $\{-120, -70, -20, 0, 20, 70, 120\}$ ，控制量 u 的值域设为 $\{-30, -20, -10, 0, 10, 20, 30\}$ 。取模糊子集 $\{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\}$ 分别与模糊控制系统中的 3 个变量的值域对应，进而可以获得变量的模糊定义子集^[11-12]。

输入变量的隶属度函数见表 1。

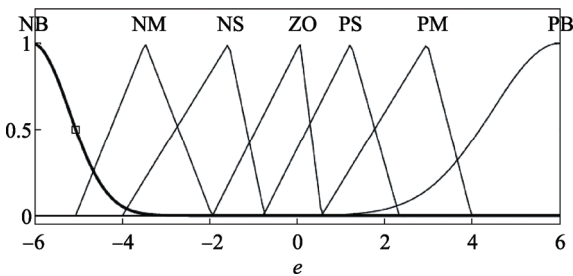


图 3 输入量 e 的隶属度函数
Fig.3 The membership function of the input e

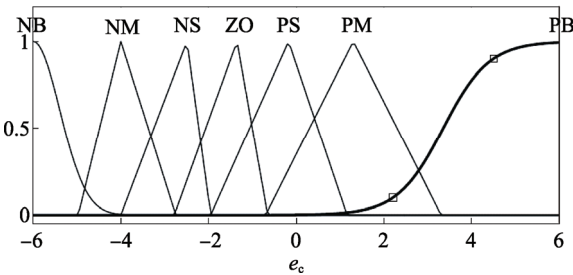


图 4 输入量 Δe 的隶属度函数
Fig.4 The membership function of the input Δe

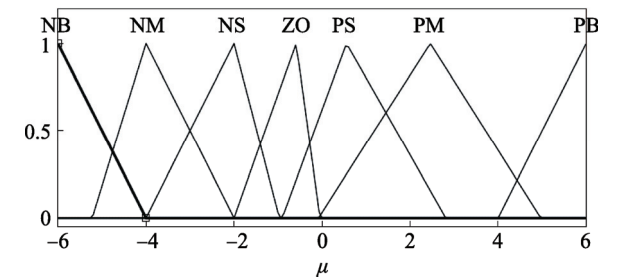


图 5 输出量 u 的隶属度函数
Fig.5 The membership function of the output u

表 1 2 个输入的隶属度
Tab.1 Membership of two inputs

e	u											
	-120	-100	-80	-60	-40	0	40	60	80	100	120	
NL	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
NM	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	
NS	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	
ZO	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	
PL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	

模糊规则的确立是创建模糊控制器的关键环节。模糊控制器是仿人类思维方式的工业控制方法,模糊规则是仿人类时间经验和众多实践所设定。判断是模糊控制规则常用的表达方式,如 IF A IS B AND C IS D THEN E IS F 等判断语句。根据导轨运行方式可以得到 49 条模糊控制规则见表 2。

表 2 模糊逻辑规则
Tab.2 Fuzzy logic rules

Δe	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PM	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

为了转变成导轨可控量,需要对模糊控制系统去模糊化处理,把模糊输出量转变成具体的控制数值。加权平均法是常用去模糊化处理方法,见式(1)。

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot \mu(U_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(U_i)} \tag{1}$$

式中: C_i 为输出隶属度函数的中心值; $\mu(U_i)$ 为输出隶属度函数的值。

3 机械臂配置

3.1 3 个重要数据创建

创建工具数据,由于此夹具较为简单,结构对称,所以采用直接赋值的方式来创建工具数据,将其命名为 tGripper。创建的工具坐标系框架相对于 tool 0(初始夹具)来说,只是在 z 方向偏移了 527 mm,其坐标轴方向沿用 tool 0 方向。整个夹具质量为 20 kg,夹具重心在 z 方向偏移 tool 0 150 mm,之后在示教器将各项参数依次输入来完成工具数据 tGripper 的创建。

通过示教器来操纵机械臂利用三点法来创建工作件坐标系^[13]。由于使用三点法,所以需要依次将 tcp 原点移动到 3 个点,但是夹具在 tcp 处没有实物的尖点,所以在实际应用中,为了准确标定工件坐标系,在机械臂末端装一个校准针,校准针的针尖与 tcp 相重合,这样在实际应用过程中,用针尖去依次找到需要标定的 3 个点,能保证标定精度。

案例中产品质量为 20 kg,当夹具将产品拾取之后,产品的重心相对于创建的工具坐标系 tGripper,沿着其 z 方向偏移了-277 mm,利用此数据就可以来创建有效载荷数据 LoadFull。

3.2 I/O 口配置及指令解析

该工作站中,要用到的数字输入信号有两侧的产品到位信号,两侧的码盘到位信号等;数字输出信号有控制夹具的夹板钩爪的信号^[14]。两侧满载输出信号等,此外还需要设置系统输入输出,如“启动”“停止”“急停复位”等。

根据上述所需信号来配备 IO 通讯方式,此工作站为两进两出,所需信号比较多,选取 ABB 标准 IO 板 DSQC652,其为 16 个数字输入,16 个数字输出^[9]。

表 3 I/O 信号配置
Tab.3 I/O signal configuration

名称	信号类型	映射单元	I/O 信号注释
Di00_BoxInPos_L	Digital Input	0	左传送链产品信号
Di01_BoxInPos_R	Digital Input	1	右传送链产品信号
Di02_PalletInPos_L	Digital Input	2	左码盘到位信号
Di03_PalletInPos_R	Digital Input	3	右码盘到位信号
Do00_ClampAct	Digital Output	0	控制夹板
Do01_HookAct	Digital Output	1	控制钩爪
Do02_PalletFull_L	Digital Output	2	左码盘满载信号
Do03_PalletFull_R	Digital Output	3	右码盘满载信号
Di08_Start	Digital Input	8	程序开始执行
Di09_Stop	Digital Input	9	称苏停止执行

表 4 系统输入输出
Tab.4 System input and output

类型	信号	相关联的系统	注释
System Input	Di07_MotorOn	Motors On	马达上电
System Input	Di08_Start	Start	程序开始执行
System Input	Di09_Stop	Stop	程序停止执行
System Input	Di10_StartAtMain	Start at Main	从主程序开始
System Input	Di11_EstopReset	Reset	急停复位
System Output	Do05_AutoOn	Auto On	马达上电状态
System Output	Do06_Estop	Emergency Stop	急停状态
System Output	Do07_CycleOn	Cycle On	程序正在运行
System Output	Do08_Error	Execution error	程序报错

根据上述列表中的信息,在虚拟示教器中一一写入 I/O 信号,将整个 I/O 配置加载到系统中,之后执行热启动,信号就会生效。

1) TriggL 触发指令。事件触发原理如图 6 所示。TriggL 为在线性运动过程中,在指定位置准确地触发事件(如置位输出信号,激活中断),可以定义多重类型的触发事件,如 TriggLO(触发信号),TriggLEquip(触发装置),TriggLnt(触发中断)等。这里以触发装置类型为例:

```
VAR triggdata Gripopen;           //定义触发数据 Gripopen
TriggLEquip Gripopen, 10, 0.1、DOp:=doGripOn,1;//定义触发事 Gripopen, 在距离指定目标点前 10mm 处,并提前 0.1 s (用于抵消设备延迟时间)。触发的指定事件是将数字输出信号 doGripOn 置为 1
TriggLp1, v500, Gripopen, z50, Tgripper; //执行 TriggL, 调用触发事件 Gripopen
```

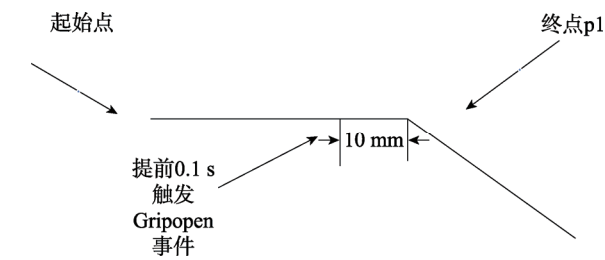


图 6 事件触发原理
Fig.6 Event trigger principle (not mentioned herein)

2) 复杂数据赋值指令。多数类型的程序数据均是组合型数据,即里面包含了多项数值或字符串,可以对其中的任意一项参数进行赋值。这里以目标点数据为例:

```
PERS robtarget p10:= [[0,0,0],[1,0,0,0],[0,0,0,0],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9 9E9]];
PERS robtarget p20:= [[100,0,0],[0,0,1,0],[1,0,1,0],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9 9E9]];

```

目标点数据里面包含了 4 组数据,从前往后依次为 TCP 位置数据[0,0,0] (trans),姿态数据[1,0,0,0] (rot),轴配置数据[0,0,0,0] (robconf),外部轴数据(如果没有外部轴,则数据为[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9 9E9]) (extax)。

分别对该数据的各项数值进行操作,如:
p10.trans.x:=p20.trans.x+50;
p10.trans.y:=p20.trans.y-50;
p10.trans.z:=p20.trans.z+100;
p10.rot:=p20.rot;
p10.robconf:=p20. Robconf;
赋值后则 p10 为 p10:=[[150, -50, 100], [0, 0, 1, 0], [1, 0, 1, 0],[9E9,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9 9E9]]。通过这种方法,可以对复杂数据的单一数值进行操作。

3.3 运动流程

ABB 机器人在搬运工作时的任务流程见图 7^[15]。



图 7 搬运流程
Fig.7 Transport flow chart

4 实验及分析

首先为了验证加入模糊控制后导轨运行精度,导轨滑块分别以 0.5 m/s 和 1 m/s 速度匀速行驶并定点停靠 200 次,测试匀速停靠精度,然后以加速度为 0.8 m/s^2 启动停靠 200 次测试导轨停靠性能。文中采用的导轨实验平台见图 8。因为机械臂体积较大,测试导轨停靠性能时,选用与机械臂同密度的铁块代替进行停靠测试实验。上述 2 种情况的测试结果见图 9。

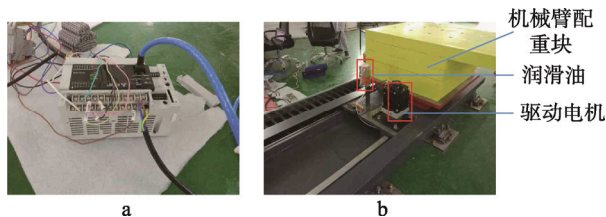
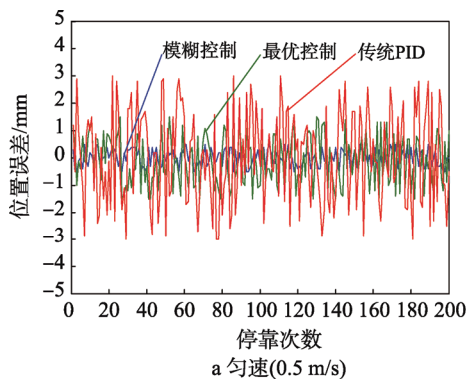
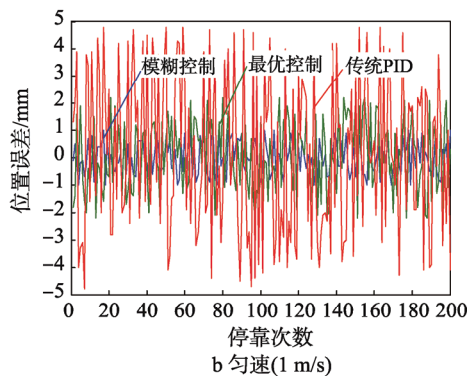


图 8 导轨实验平台

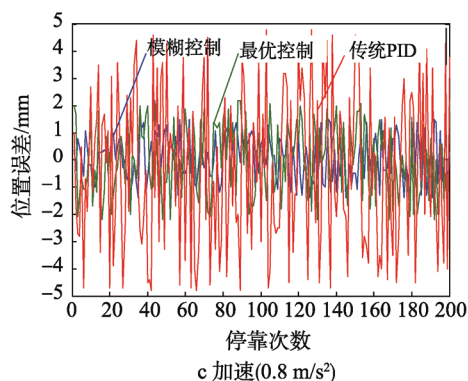
Fig.8 Guideway experimental platform



a 匀速(0.5 m/s)



b 匀速(1 m/s)



c 加速(0.8 m/s^2)

图 9 行驶停靠实验

Fig.9 Stopping experiment

从 3 种停靠实验结果可以看出,采用模糊控制的位置停靠精度明显高于最优控制和传统 PID 控制精度,当速度为 0.5 m/s 匀速行驶状态下停靠精度最高,模糊控制精度在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 之内,而最优控制精度只能维持在 $\pm 1.5 \text{ mm}$ 以内,传统 PID 控制精度为 $\pm 3 \text{ mm}$ 远远达不到应用要求。虽然随着速度的提升控制精度会不同程度降低,但是导轨的移动速度一般不会高于 1 m/s,并且从图 10 中,可以看出当速度为 1 m/s 时,精度仍然维持在 $\pm 1 \text{ mm}$,完全可以满足实际应用需求,传统 PID 控制精度最差为 $\pm 4.3 \text{ mm}$ 。图 9c 以加速度为 0.8 m/s^2 测试停靠位置精度,因为在实际应用中需要尽可能地快速启动以提高码垛效率,测试精度稳定在 $\pm 1.5 \text{ mm}$,满足设计要求,最优控制和传统 PID 控制精度为 $\pm 2.2 \text{ mm}$ 和 $\pm 4.8 \text{ mm}$,明显劣于模糊控制精度。

其次,分别设置了 3 个停靠点测试,机械臂重复定位精度见图 10。重复定位精度最差的误差球形区域半径为 1.5 mm,完全满足实际应用中的码垛精度要求。

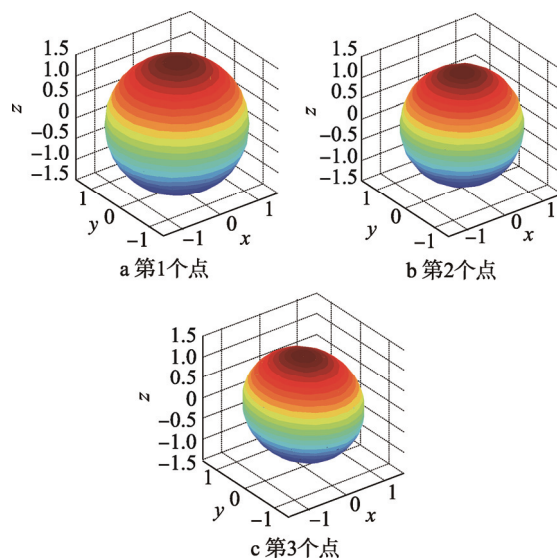


图 10 3 个定位点重复定位精度

Fig.10 Repeated positioning accuracy of three positioning points

5 结语

设计了一种导轨型码垛机器人系统。利用导轨实现码垛机器人可以在大的工作区域内自由移动,拓宽了单台码垛机器人的工作应用场合。采用基于 PLC 的模糊控制方法实现导轨滑块高精度定点停靠。导轨以 1 m/s,加速度为 0.8 m/s^2 行驶时定位精度稳定在 $\pm 1.5 \text{ mm}$ 与机械臂联合操作精度在半径为 1.5 mm 的球形区域内波动,满足一般应用需求,效率和成本都得到了显著改善,应用前景良好。

参考文献:

- [1] 康瑞芳, 刘鑫. 包装码垛机器人嵌入式控制系统设计[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 132—135.
KANG Rui-fang, LIU Xin. Design and Implementation of the Multi-box Grasping End Effector for Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 132—135.
- [2] 王吉岱, 王明鹏. 基于视觉引导的自动码放生产线设计[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 148—152.
WANG Ji-dai, WANG Ming-peng. Design of Automatic Stacking of Production Line Based on Visual Guidance[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 148—152.
- [3] 李红果, 刘新乐, 徐德众, 等. 一种多垛型机器人码垛系统的设计[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 40—44.
LI Hong-guo, LIU Xin-le, XU De-zhong, et al. Design of Palletizing Robot System for Multiple Stack Types[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 40—44.
- [4] HAO J, XU H, LIN J. Virtual Simulation Design of Robot Palletizing Workstation Based on RobotStudio[J]. Automation & Information Engineering, 2017, 2(4): 31—34.
- [5] SHI Z, HAN F, YIN H. Parameters Optimization of Bagged Cement Robot Palletizer With Mechanism Speed Performance Indicators Theory[J]. Machine Design & Research, 2017, 6(5): 43—47.
- [6] ZHANG D. Based on ABB Robot Palletizing Control System Design[J]. World of Inverters, 2016, 8(5): 88—91.
- [7] 王汝贵, 陈辉庆, 戴建生. 新型可控变胞式码垛机器人机构动态稳定性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 39—47.
WANG Ru-gui, CHEN Hui-qing, DAI Jian-sheng. Dynamic Stability Study of a Novel Controllable Metamorphic Palletizing Robot Mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 39—47.
- [8] 贺莹, 梅江平, 方志伟, 等. 一种高速重载码垛机器人机座的多目标优化设计[J]. 机械设计, 2017(7): 1—9.
HE Ying, MEI Jiang-ping, FANG Zhi-wei, et al. Multi-objective Optimization Design for the Machine Base of a High Speed and Heavy Load Palletizing Robot[J]. Journal of Machine Design, 2017(7): 1—9.
- [9] 李坤全, 邵凤翔. 全自动包装码垛机器人控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2017(4): 259—262.
LI Kun-quan, SHAO Feng-xiang. Design of Fully Automatic Packaging Palletizing Robot Control System[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(4): 259—262.
- [10] 张鑫龙, 原思聪. 码垛机器人位置精度测试与分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(3): 73—77.
ZHANG Xin-long, YUAN Si-cong. Test and Analysis of Palletizing Robot Position Accuracy[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(3): 73—77.
- [11] ZHANG X, LIMING W U, CAO J. Vision System Design of Palletizing Robot[J]. Journal of Jishou University, 2018, 1(4): 45—48.
- [12] HUANG K, HONG J, SUN S. Dynamics Analysis and Control of Palletizing Robot Based on Constraints of Trajectory[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2018, 1(6): 7—12.
- [13] 程远超. 基于动力学的HMD80型码垛机器人结构优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
CHENG Yuan-chao. Structure Optimization of HMD80 Palletizing Robot Based on Dynamics Analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [14] 孙汉文, 杜燕飞, 曹昂, 等. 滑台丝杠式四自由度码垛机械臂[J]. 工程技术(全文版), 2016(10): 244—245.
SUN Han-wen, DU Yan-fei, CAO Ang, et al. Four Degree of Freedom Palletizing Arm with Slide Table[J]. Engineering Technology(Full Text Edition), 2016(10): 244—245.
- [15] 李蓉娟, 吴新伟. 基于PLC的全自动包装码垛生产线控制系统设计[J]. 科技通报, 2017, 33(7): 167—170.
LI Rong-juan, WU Xin-wei. Design of Automatic Packaging and Palletizing Line Control System Based on PLC[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(7): 167—170.