

# 新型四轴码垛机器人机构设计与动力学仿真分析

董海涛<sup>1</sup>, 武文革<sup>2</sup>

(1.山西机电职业技术学院, 山西 长治 046011; 2.中北大学 机械工程学院, 太原 030051)

**摘要:** **目的** 针对生产线码垛作业, 设计一种四轴码垛机器人以满足货物搬运需求。**方法** 利用平行四边形机构对码垛机器人进行结构设计。根据码垛机器人的结构特点, 采用运动 D-H 方法对该机器人进行运动学分析, 通过 SolidWorks 建立码垛机器人实体模型, 并将其导入 Matlab 中, 在仿真环境中调整相应参数, 得到机器人的动力学仿真模型, 再利用 Simulink 添加控制模块、驱动模块和检测模块, 建立完整的仿真模型。通过 SolidWorks 与 Matlab 两者的结合进行机器人动力学仿真分析。**结果** 运用 SolidWorks 与 Matlab 联合仿真, 可以缩短设计周期, 有效地获取其动力学特性参数。**结论** 四轴码垛机器人可以有效解决生产线上的码垛作业问题。

**关键词:** 码垛机器人; 运动学; 动力学仿真

**中图分类号:** TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)03-0176-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.027

## Mechanism Design and Dynamics Simulation of a New Four-axis Palletizing Robot

DONG Hai-tao<sup>1</sup>, WU Wen-ge<sup>2</sup>

(1. Shanxi Institute of Mechanical & Electrical engineering, Changzhi 046011, China;

2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a new type of four-axis palletizing robot for palletizing operation of the production line. The parallelogram mechanism was used to design the structure of the palletizing robot. According to structural characteristics of the palletizing robot, the kinematics analysis of the robot was carried out by the MDH method. The robot solid model was established by SolidWorks and imported into Matlab. The corresponding parameters were adjusted in the simulation environment to obtain the dynamic simulation model of the robot. Then Simulink was used to add control module, driving module and detection module to establish a complete simulation model. Through the combination of the two, the robot dynamics simulation analysis was carried out. Co-simulation with SolidWorks and Matlab can shorten the design cycle of the robot and effectively obtain the dynamic characteristic parameters of the robot. The new four-axis palletizing robot can effectively solve the problem of palletizing operations on the production line.

**KEY WORDS:** palletizing robot; kinematics; dynamics simulation

随着自动化仓库的出现, 生产线出现了纸板箱、塑料盒、袋子、油桶、罐等的托盘装载自动化的趋势, 码垛机器人的应用变得越来越普遍。目前, 欧洲、美国和日本的码垛机器人占码垛市场的 90% 以上<sup>[1]</sup>。

目前国内外学者对制造、生产、运输用的码垛机器人展开了非常深入的研究。周根荣等<sup>[2]</sup>进行了码垛机器人运动学分析和控制系统设计。马志德等<sup>[3]</sup>基于 Matlab-SimMechanics 对 MJR 混联码垛机器人的

收稿日期: 2019-06-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51875533); 山西省教育科学“十三五”规划“1331 工程”研究专项课题 (ZX-18125)

作者简介: 董海涛 (1974—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为模具设计与制造。

运动控制进行了建模和仿真。应万明等<sup>[4]</sup>提出了一种水平多关节型码垛机器人结构设计。孙祥溪等<sup>[5]</sup>针对工业码垛机器人结构进行了运动学仿真。马丽<sup>[6]</sup>进行了一种基于 Matlab 的小型码垛机器人的机构设计与仿真。

传统的六轴码垛机器人,其货物搬运和码放的工作都是简单的动作重复,虽然六轴机械设计具有灵活性,但是无法全面发挥其功能,对于货物搬运和码放的基本工作需求,采用传统六轴码垛机器人无疑是一种工作能力的浪费<sup>[7-10]</sup>。文中针对六轴码垛机器人性能的浪费问题,设计开发四轴码垛机器人,减少 2 个轴的电机及其驱动装置,在保证机器人使用性能满足要求的基础上,有效降低成本,提升机器人的搬运码垛效率。

## 1 码垛机器人方案概述

目前市场常见码垛机器人类型主要有六轴码垛机器人和四轴码垛机器人。根据码垛任务的实际需要,将码垛机器人设定为四自由度。与一般垂直型六自由度串联工业机器人的结构不同,在码垛机器人的肩部同时串联 2 个平行四边形的机械结构,确保机器人的腕关节的旋转轴始终保持在与地面垂直的状态,保证被抓取的货物时刻保持在水平;腕部的结构比较简单,不需要进行复杂的姿态调整。SRM160A/300A 系列产品采用先进的 4 轴设计,结合 165~300 kg 的有效载荷,在作业空间、动力状态等方面皆具有优异的性能,防护等级 IP65 适应恶劣生产环境,在粉尘较大的室内外均可正常工作,在化工、食品、食料等行业的码垛应用达到了最佳绩效,是高负载机器人在码垛领域的优越之选<sup>[11-15]</sup>。

### 1.1 码垛机器人方案描述

在对国外 160, 300 kg 四轴码垛机器人性能和结构特点进行比较分析的基础上,确定本方案的设计原则如下所述。

1) 1 轴选用的是中空结构,在底座下方布置电机,按照反方向安装,扩大腰座上方的空间,对缸体的平衡更加有利,利于 3 轴配重和驱动曲柄布置,腰座可以采用一体结构,使结构更加简单紧凑,降低了设计、加工和装配的难度。

2) 3 轴驱动单元布置在腰座上,3 轴的电机布置在大臂的下部,和 2 轴的电机对称布置,降低前臂和大臂部分的重量,提升 2 轴和 3 轴的移动速度和灵敏度,降低对 2 轴电机驱动力的要求。

3) 平衡缸体布置在腰座之上,缸体体系灵活,平衡力更大,对电机的要求降低,与此同时外观与 165 kg 的通用型机器人产品保持风格一致。

4) 4 轴驱动电机在末端手腕位置布置,采用中空结构的减速器,并与电机直接相连,这种结构能够为线路布置预留足够的空间,为手腕末端布置提供便利。

5) 3 轴部件部分增加配重单元,确保运动平衡,有效降低电机的负载。

6) 本体全钢结构。

四轴码垛机器人设计方案见图 1。图 1 中的圆圈位置为码垛机器人的 4 个轴,分别按照 4 个轴建立坐标系,各个元件按照上述方案布置。图 1 中的平行四边形为码垛机器人平行四连杆机构,这种机构的特点之一是相对杆始终保持平行,且两连杆的角位移、角速度和角加速度也始终相等,它既能帮助渡过运动不确定位置,又能增加最大启动牵引力。

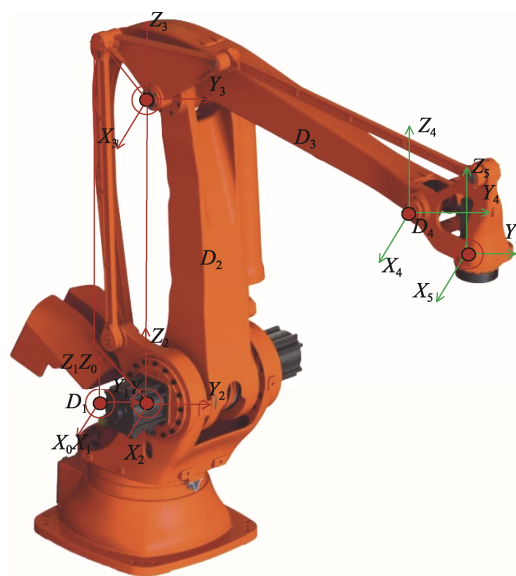


图 1 四轴码垛机器人

Fig.1 Four-axis palletizing robot

### 1.2 码垛机器人机械设计

码垛机器人结构见图 2。由图 2 可知,码垛机器人的效应器轴被定义为 No.1 轴,用于驱动码垛机器人垂直移动的轴是 No.2 轴,用于驱动码垛机器人水平移动是 No.3 轴。用于驱动码垛机器人进行旋转运动的最后一根轴是 No.4 轴。码垛机器人的上部结构由谐波齿轮、圆锥滚子轴承、深沟球轴承等支撑部件组成。上部大臂由 2 个平行杆组成,2 个平行杆的一个末端执行器与小臂铰接,另一个末端执行器铰接有 2 个滑块。2 个滑块由 No.2 和 No.3 电机通过滚珠丝杠和皮带轮驱动,用于驱动码垛机器人垂直和水平移动。码垛机器人的末端执行器是气动钳,由 1 号电机驱动。所有电机都通过限位开关固定。如果码垛机器人在工作过程中接触限位开关,控制器将停止程序并发送报警信号。

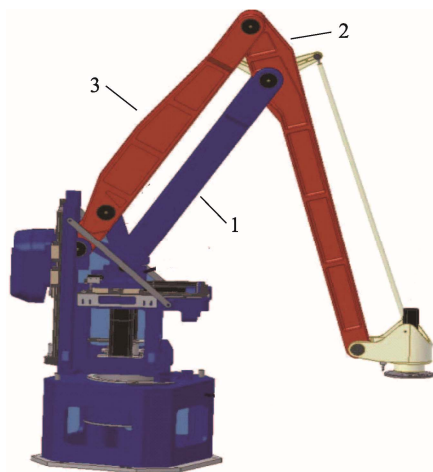


图2 码垛机器人示意

Fig.2 Sketch map of palletizing robot

## 2 建立码垛机器人的三维实体模型

### 2.1 搭建 SolidWorks 与 Matlab 联合仿真平台

SolidWorks 软件可以快速便捷地完成机械系统的三维实体模型设计工作,并将模型转换成 XML 格式,这种格式可以直接在 Matlab 中打开和处理,进而进行动态模拟和仿真分析。Matlab 中包含 Simulink 模块,可以实现动态系统仿真,可在机构成形之前发现问题并及时修正,降低反复修改带来的高投入。

### 2.2 建立 SolidWorks 与 Matlab 联合仿真模型

SolidWorks 与 Matlab 的联合仿真需建立机械模型、选定参数、搭建控制模型,最后对结果进行分析<sup>[8-9]</sup>。在 SolidWorks 软件中,SimMechanics 插件能够将三维模型文件保存在 XML 格式,在 Matlab 软件中运行相应命令,可以将 XML 文件转换成为 SimMechanics 模型,机械模型的转换过程见图 3。



图3 模型转换过程示意

Fig.3 Schematic diagram of model conversion process

在码垛货物的过程中,对于机器人大臂、小臂以及手腕处的控制信号,都必须按照关节运动的最大速度进行逐一验证。创建码垛机器人运动的 SolidWorks

模型时,要合理选择系统的各个零部件,采用世界坐标系原点展开设计,合理选择空间坐标轴。合理构建机械模型,使其能够同时在 Matlab, Simulink, SimMechanism 中运行,设置信号的输入和输出接口。

## 3 码垛算法与技术指标

设计的关节型码垛机器人涉及 4 个自由度,主要包含手腕、小臂、大臂、腰部和底座 5 个部分,手腕和腰部的旋转关节、小臂和大臂的摆动关节为 4 个旋转自由度。为了提升机器人仿真分析的效率,世界坐标系和装配体坐标系的相对位置关系要合理设置,简化工作内容;一些质量非常小的零部件可以进行简化处理,实现模型的最简化处理。

### 3.1 码垛机器人技术指标

码垛机器人的性能技术指标,是衡量码垛机器人机械设计和软件功能的一个重要标尺。码垛机器人主要有 300 kg 和 160 kg 等 2 种类型,技术指标见表 1。码垛机器人一共有 4 个主动轴:S 轴(回转)、L 轴(下臂)、U 轴(上臂)、R 轴(横摆)。

### 3.2 码垛算法

码垛的托盘化是一种单元化形式,其中均匀载荷码垛堆叠在托盘上,使用预定的图案序列和给定的层数。实际上,全自动码垛机器人中箱型的数量几乎是无限的。码垛的普遍问题可以归结为箱问题。箱问题有如下类型:带状充填、背包装载、货柜装载和多箱装载。

码垛主要采用的箱问题是带状充填和背包装载,下面对这 2 个问题进行阐述。

1) 带状充填:一个箱子有确定的高度和宽度,但长度无限大,目标是把所有盒子装进箱子后的长度尽可能小。令  $M=1$ ,则  $s_{i1} + s_{i2} + \dots + s_{iM} = 1$ 。令  $L_1$  为变量,则目标函数为  $\min L_1$ 。

2) 背包装载:假定每个盒子都有一个价值,如何把部分的盒子装入一个箱子中,使得到的价值总和最大。令  $M=1$ ,目标函数为  $\max \sum_{i=1}^N v_i s_{i1}$ 。如果盒子的价值定义为它的体积,那么目标就变成使箱子空间浪费最低,即容积利用率最高。此时目标函数可以写成

$$\max L_1 W_1 H_1 - \sum_{i=1}^N (p_i \cdot q_i \cdot r_i) s_{i1}。$$

表1 码垛机器人技术指标

Tab.1 Technical indices of palletizing robot

型号	负载能力/kg	重复定位精度/mm	自由度	每轴最大运动范围/(°)				每轴最大运动速度/((°)·s <sup>-1</sup> )			
				S 轴 (回转)	L 轴 (下臂)	U 轴 (上臂)	R 轴(手腕 横摆)	S 轴 (回转)	L 轴(下 臂)	U 轴(上 臂)	R 轴(横 摆)
SRB160A	160	±0.5	4	+180/- 180	+85/- 45	+120/- 20	+300/- 300	120	120	120	300
SRB300A	300	±0.5	4	+180/- 180	+85/- 45	+120/- 20	+300/- 300	85	90	90	190

如果需要码垛时，物体摆放不进去时，需要用于生成盒子码垛模式的算法——基于 Steudel 算法，它具有生成 4 种模式的初始解决方案的类似过程，见图 4。

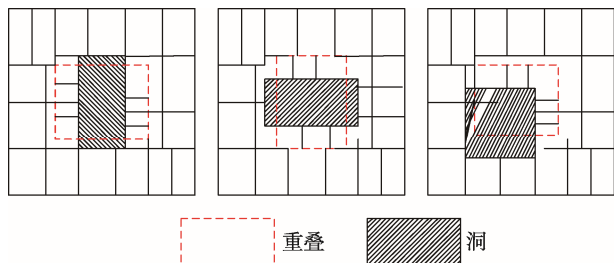


图 4 快速算法的处理

Fig.4 Treatment of fast algorithm

图 4 中虚线是码垛摆放重叠的部分，实线为空洞的部分。如果待放置的目标物体大于空洞的部分，就采用此方法进行码垛。有如下 3 种放置方式：在第 1 种方法中，盒子由重叠区域的 2 个水平边缘切割；在第 2 种方法中，盒子由 2 个垂直边缘切割；在第 3 种方法中，盒子由左垂直边缘和下水平边缘切割。

## 4 码垛机器人运动控制

### 4.1 正运动学计算

码垛机器人正运动学是为了解决末端位置的求解问题，已知关节轴的转角，通过运动学正解，即可求解末端姿态和位置：

$$T(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta & 0 \\ 0 & s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T(y, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中：c 表示 cos 函数，s 表示 sin 函数。根据机械构型，求得各连杆变换矩阵如下：

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

四自由度机械手的连杆参数见表 2。

根据机械构型，求得各连杆变换矩阵如下：

$${}^0_1 T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1_2 T = \begin{bmatrix} -s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & D_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ c\theta_2 & s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表 2 四自由度机械手的连杆参数

Tab.2 Connecting rod parameters of four-DOF manipulator

关节轴 $i$	连杆转角 $\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	连杆长度 $a_{i-1}$	连杆偏距 $d_i$	关节角 $\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	-90	$D_1$	0	$-\theta_2 - 90^{\circ}$
3	0	$D_2$	0	$-\theta_3 + 90^{\circ}$
4	0	$D_3$	0	$-\theta_4$
5	-90	$D_4$	0	$\theta_5$

$${}^2_3 T = \begin{bmatrix} s\theta_3 & -c\theta_3 & 0 & D_2 \\ c\theta_3 & s\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^3_4 T = \begin{bmatrix} c(\theta_2 + \theta_3) & -s(\theta_2 + \theta_3) & 0 & D_3 \\ s(\theta_2 + \theta_3) & c(\theta_2 + \theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^4_5 T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & D_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_4 & -c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第 4 个轴绕 z 轴旋转。需要转  $-(\theta_2 + \theta_3)$  的原因：如果要使得末端执行器保持水平，则必须让第 4 个轴旋转与第 2 个和第 3 个轴的响应的度数，才能使得末端执行器水平。运动学正解：

$${}^0_5 T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T = \begin{bmatrix} c(\theta_1 - \theta_4) & s(\theta_1 - \theta_4) & 0 & c_1(D_1 - c_2D_2 + c_{23}D_3 + D_4) \\ s(\theta_1 - \theta_4) & -c(\theta_1 - \theta_4) & 0 & s_1(D_1 - s_2D_2 + c_{23}D_3 + D_4) \\ 0 & 0 & -1 & c_2D_2 + s_{23}D_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 4.2 解析法反解运动

机器人反解几何图见图 5，反解运动学计算过程如下：

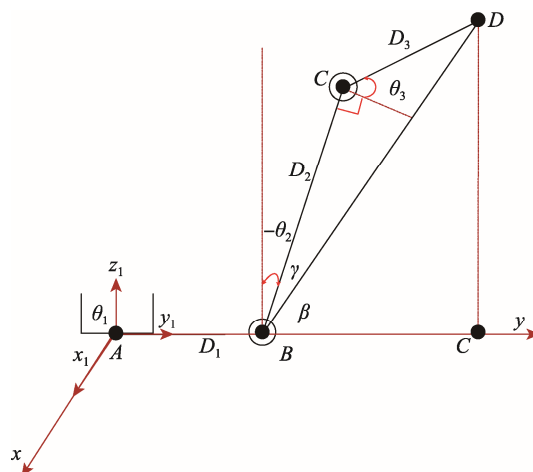


图 5 机器人反解

Fig.5 Inverse solution of the robot

1) 第1个轴。  $p_x = -s_1(D_1 - s_2D_2 + c_{23}D_3 + D_4)$ ,  $p_y = c_1(D_1 - s_2D_2 + c_{23}D_3 + D_4)$ 。当  $p_y = 0$ , 根据  $p_x$  的正负号判断  $\theta_1$  的位置:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(-\frac{p_x}{p_y}\right) / \theta_1 = \arctan\left(-\frac{p_x}{p_y}\right) \pm 180^\circ & p_y \neq 0 \\ \theta_1 = \pm 90^\circ & p_y = 0 \end{cases}$$

$\theta_1$  是唯一解。

2) 第4个轴反解。利用  $\arctan2$  可以解出唯一解:

$$\theta_4 = \arctan 2(s_{14}, c_{14}) + \theta_1$$

$\theta_4$  是唯一解。

3) 第2个轴反解。令:

$$\begin{cases} k_1 = -s_2D_2 + c_{23}D_3 = -s_2D_2 + c_2c_3D_3 - s_2s_3D_3 \\ k_2 = c_2D_2 + s_{23}D_3 = c_2D_2 + s_2c_3D_3 + c_2s_3D_3 \\ K_{11} = c_3D_3 \quad K_{22} = D_2 + s_3D_3 \end{cases}$$

则:

$$\begin{cases} s_2 = \frac{k_2k_{22} - k_1k_{11}}{k_{11}^2 + k_{22}^2} \\ c_2 = \frac{k_2k_{11} + k_1k_{22}}{k_{11}^2 + k_{22}^2} \\ \theta_2 = \arctan 2(s_2, c_2) \end{cases}$$

$\theta_2$  是唯一解。

4) 第3个轴反解。  $-90^\circ \leq \theta_3 \leq 90^\circ$ , 由余弦定理可知:

$$c\theta_1 \neq 0$$

$$BD = \sqrt{\left(\frac{p_y}{c\theta_1} - D_4 - D_1\right)^2 + (p_z)^2}$$

$$c(\theta_3 + 90^\circ) = \frac{D_3^2 + D_2^2 - BD^2}{2D_2D_3}$$

$\theta_3$  是唯一解。

## 5 结语

码垛任务对于提高存储和运输物料效率是必要的, 基于平行四边形机构设计了四轴码垛机器人, 可以实现待抓取目标物体的平移和摆放。

根据码垛机器人的结构特点, 采用 D-H 方法对机器人进行了运动学分析。机器人实体模型由 SolidWorks 构建并导入到 Matlab 中。调整仿真环境中的相应参数, 得到机器人的动态仿真模型。然后使用 Simulink 添加控制模块, 以构建完整的仿真模型, 跟踪分析各个零件的运动轨迹和运动参数, 按照工作情况灵活调整运动轨迹, 进行实时轨迹分析, 有效提升了设计效率。四轴码垛机器人在结构上采用平行四连杆的结构设计, 较 6 轴机器人运动更为稳定, 性能上避免了以往六轴机器人运动过程的复杂性。四轴码垛机器人简化了自由度和轴的数量, 运动性能更高, 运动更快。操作员可以在码垛机器人帮助下, 快速部

署任务, 并对任务进行反复编辑; 可以将待处理的物料的位置值传递给机器人模拟器, 使用这些位置, 可以模拟码垛操作, 从而实现企业利益最大化。

## 参考文献:

- [1] 黄冰鹏, 林义忠, 杨中华, 等. 码垛机器人的研究与应用现状[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 82—87.  
HUANG Bing-peng, LIN Yi-zhong, YANG Zhong-hua, et al. Research and Application Status of Palletizing Robots[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 82—87.
- [2] 周根荣, 姜平, 钟永彦. 码垛机器人运动学分析和控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(1): 81—84.  
ZHOU Gen-rong, JIANG Ping, ZHONG Yong-yan. Kinematics Analysis and Control System Design of Palletizing Robot[J]. Journal of Computer Measurement and Control, 2016, 24(1): 81—84.
- [3] 马志德, 孙会来, 李亚东, 等. 基于 Matlab-SimMechanics 的 MJR 混联码垛机器人运动建模及仿真研究[J]. 制造业自动化, 2013(14): 88—90.  
MA Zhi-de, SUN Hui-lai, LI Ya-dong, et al. Motion Modeling and Simulation of MJR Hybrid Palletizing Robot Based on Matlab-SimMechanics[J]. Manufacturing Automation, 2013(14): 88—90.
- [4] 应万明, 张壮. 水平多关节型码垛机器人结构设计[J]. 科技创新导报, 2017(24): 108—110.  
YING Wan-ming, ZHANG Zhuang. Structural Design of Horizontal Multi-joint Type Palletizing Robot[J]. Science and Technology Innovation Review, 2017(24): 108—110.
- [5] 孙祥溪, 罗庆生, 苏晓东. 工业码垛机器人运动学仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(3): 303—306.  
SUN Xiang-xi, LUO Qing-sheng, SU Xiao-dong. Kinematics Simulation of Industrial Palletizing Robot[J]. Computer Simulation, 2013, 30(3): 303—306.
- [6] 马丽. 基于 Matlab 的小型码垛机器人机构设计与仿真的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.  
MA Li. Research on Mechanism Design and Simulation of Small Palletizing Robot Based on MATLAB[D]. Tianjing: Tianjin University of Science & Technology, 2016.
- [7] 蓝培钦. 码垛机器人控制器系统软件的设计和研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.  
LAN Pei-qin. Design and Research of Palletizing Robot Controller System Software[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
- [8] CHEN Wei, WANG Xi-jun, SUN Wen-xia, et al. The Design of PROFINET-MODBUS Protocol Conversion Gateway Based on the ERTEC 200P[C]// 2016 10th International Conference on Software, Knowledge, Information Management & Applications (SKIMA), 2016: 87—91.

- [9] BARINOVA O, LEMPITSKY V, KHOLI P. On Detection of Multiple Object Instances Using Hough Transforms[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(9): 1773—1784.
- [10] 李成伟, 负超. 码垛机器人机构设计与运动学研究[J]. 机械设计与制造, 2009(6): 181—183.  
LI Cheng-wei, YAN Chao. Research on Design and Kinematics of Palletizing Robot Mechanism[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2009(6): 181—183.
- [11] 张志强, 臧冀原, 负超. 混联码垛机器人运动学分析及仿真[J]. 机械设计, 2010, 27(11): 47—51.  
ZHANG Zhi-qiang, ZANG Ji-yuan, ZHAI Chao. Kinematics Analysis and Simulation of Mixed Palletizing Robot[J]. Mechanical Design, 2010, 27(11): 47—51.
- [12] 叶辰雷. 码垛机器人的结构优化及轨迹规划研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.  
YE Chen-lei. Structural Optimization and Trajectory Planning of Palletizing Robots[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [13] 周新云, 李锻能, 姚松亮, 等. 斜导面直线关节码垛机器人正运动学研究[J]. 制造业自动化, 2013(21): 12—15.  
ZHOU Xin-yun, LI Duan-neng, YAO Song-liang, et al. Study on Forward Kinematics of Linear Joint Palletizing Robot with Oblique Guide Surface[J]. Manufacturing Automation, 2013(21): 12—15.
- [14] 孙文成. 搬运码垛机器人传动系统设计及其运动学分析与仿真研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.  
SUN Wen-cheng. Design of the Transmission System of the Palletizing Robot and Its Kinematics Analysis and Simulation[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- [15] 张明, 何庆中, 郭帅. 酒箱码垛机器人的机构设计与运动仿真分析[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 83—87.  
ZHANG Ming, HE Qing-zhong, GUO Shuai. Mechanism Design and Motion Simulation Analysis of Wine Box Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 83—87.