

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.09.001

# 全向轮式分拣装置货物移动轨迹模块化设计

唐英<sup>1</sup>, 张靖<sup>2</sup>, 吴官政<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 中科微至智能制造科技江苏股份有限公司机械规划部, 江苏 无锡 214108)

**摘要:**全向轮式分拣装置通过对分拣平台上均布的各个全向轮进行独立及有选择性的速度控制, 可实现以不同速度沿不同轨迹输送货物。文章提出一种全向轮式分拣装置货物移动轨迹的模块化设计方法, 实现货物在分拣平台上沿任意指定路线灵活输送。将货物在分拣平台上的任意轨迹移动分解为直线段与圆弧段 2 种轨迹的不同组合; 分别对直线段和圆弧段进行轨迹移动模块化设计, 输入各段起点和终点的位置及速度等初始化参数, 模块自动完成货物移动质心轨迹生成、货物移动扫掠面计算、扫掠面界内全向轮判断以及界内全向轮速度计算; 最后, 通过直线轨迹移动段与圆弧轨迹移动段的不同组合搭建货物分拣与堆码轨迹, 对全向轮式分拣装置货物移动轨迹模块化设计方法进行试验测试。结果表明, 文章提出的模块化设计方法大大降低了全向轮式分拣装置货物输送控制设计的难度。

**关键词:**全向轮分拣装置; 轨迹控制; 模块化设计; 分拣; 堆码

**中图分类号:** TP23; TH691.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)09-1153-07

## Modular design of cargo movement routes on sorting device with omnidirectional wheels

TANG Ying<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>, WU Guanzheng<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Division of Mechanical Planning, Wayzimu Intelligent Manufacturing Technology Jiangsu Co., Ltd., Wuxi 214108, China)

**Abstract:** The sorting device with omnidirectional wheels realizes the transportation of goods along different routes at different speeds by independently and selectively controlling the speed of each omnidirectional wheel evenly distributed on the sorting platform. This paper presents a modular design method for the movement routes of goods on the sorting device with omnidirectional wheels, so as to realize the flexible transportation of goods along any designated route on the sorting platform. Any track movement of goods on the sorting platform is decomposed into two different combinations of straight-line segment and arc segment. The modular design of track movement is carried out for the straight-line segment and arc segment respectively, and the initialization parameters such as the position and speed of the starting point and end point of each segment are input. The module automatically completes the generation of cargo moving centroid track, the calculation of cargo moving sweeping surface, the judgment of omnidirectional wheel within the boundary of sweeping surface and the calculation of omnidirectional wheel speed within the boundary. Through the different combination of linear track moving section and circular track moving section, the cargo sorting and stacking track is built. The test shows that the modular design method proposed in this paper greatly reduces the difficulty of cargo conveying control design of sorting device with omnidirectional wheels.

**Key words:** sorting device with omnidirectional wheels; movement route control; modular design; sorting; stacking

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2022-05-16

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1712902)

作者简介: 唐英(1968—), 女, 河南南阳人, 博士, 北京科技大学副教授, 硕士生导师。

## 0 引言

全向轮式分拣装置是一种机动灵活的输送装置,其分拣平台上均布有全向轮,每个全向轮可以单独工作。在分拣平台上输送货物时,通过有选择性地控制全向轮旋转,并依靠货物表面与接触全向轮的滚动摩擦驱动货物移动。改变与货物表面接触的各全向轮旋转速度的组合,可以控制驱动货物移动的速度大小和方向,从而驱动货物在分拣平台上沿任意指定路线以给定的速度灵活输送。

全向轮式分拣装置在驱动货物移动时,其中一种方法是计算货物在分拣平台上沿指定轨迹移动时所经过的面积,而位于经过面积内的全向轮为驱动货物移动的有效全向轮。目前确定物体移动所经过面积的算法主要有等距法<sup>[1-4]</sup>和扫掠法<sup>[5-7]</sup>。扫掠法的精确度比等距法高,因此被用于本文全向轮式分拣装置控制系统进行有效全向轮判断。对于全向轮的速度控制,较多文献<sup>[8-11]</sup>研究对象的全向轮均位于移动平台上,即对位于动态坐标系中的全向轮的速度控制。全向轮分拣装置中分拣平台空间位置固定不变,分拣平台上的各个全向轮只做绕轴线的定轴转动。本文将货物沿指定轨迹移动的速度作为合速度分解到各个驱动全向轮上,然后计算驱动全向轮的旋转速度。

为了满足分拣、堆码等不同功能要求,全向轮式分拣装置需要货物在分拣平台上可以按照任意给定轨迹和速度移动,控制系统程序编制工作十分繁重且耗时费力。

为了简化全向轮分拣装置控制系统程序设计,本文采用模块化的设计方法,将货物在分拣平台上的任意轨迹移动均分解为直线段与圆弧段这 2 种轨迹的不同组合,分别对货物在直线段和圆弧段的移动进行控制设计;并通过全向轮式分拣装置上货物分拣与堆码试验,对本文提出的货物移动轨迹模块化设计方法进行测试。

### 1 货物移动轨迹模块化设计思路

本文研究对象全向轮分拣装置分拣平台的结构示意图如图 1 所示。

长、宽各 1 200 mm 的正方形分拣平台由 33 个正六边形模块拼装而成,可根据实际需求增减模块数量,扩展出任意所需形状和尺寸的分拣平台。每个正六边形模块上都有 3 个呈 120°角均布沿节圆向心安装的全向轮,且任意两相邻模块上的两

同向万向轮之间的间距等于六边形模块对边间距,各全向轮自带电机可单独控制。旋转的全向轮与其上承载并保持接触的货物表面之间产生滚动摩擦力,所有滚动摩擦力的合力形成驱动货物移动的驱动力。

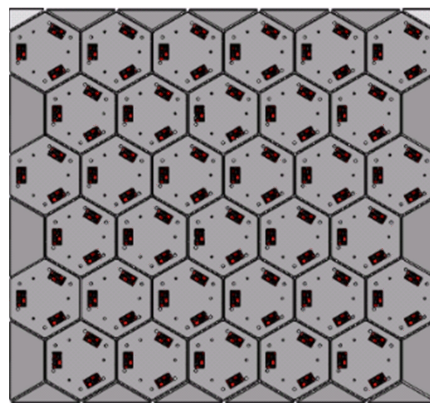


图 1 全向轮分拣装置分拣平台

货物在分拣平台上移动轨迹模块化设计流程如图 2 所示。

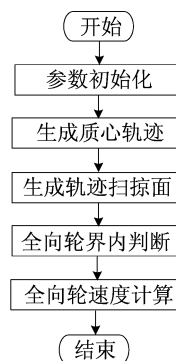


图 2 货物移动轨迹模块化设计流程

设计流程包括以下内容:

1) 参数初始化。设置直线段与圆弧段移动轨迹的起点和终点坐标、入口和出口速度;输入货物长、宽尺寸;采用圆弧段移动轨迹时还需设置圆心坐标及圆弧半径参数。

2) 生成质心轨迹。根据给定的货物起点和终点的坐标参数,按照轨迹选择中设定的直线和圆弧模式连接起点与终点,生成货物质心移动轨迹。

3) 生成扫掠面。货物沿质心轨迹移动时,货物两侧边缘所产生的边缘线界定货物扫掠面;依据货物质心移动轨迹及货物平面尺寸生成扫掠面边界方程。

4) 全向轮界内判断。根据全向轮与扫掠面

边界线的位置关系,货物移动过程中在扫掠面边界以内的全向轮为界内全向轮,界内全向轮为驱动货物移动的有效全向轮。

5) 全向轮速度计算。根据参数初始化中给定的货物起点和终点速度参数,计算任意时刻界内不同位置全向轮的速度,生成速度控制指令。

## 2 货物移动轨迹模块化设计算法

货物在全向轮分拣装置分拣平台上移动的轨迹模块化设计中的关键算法如下。

### 2.1 参数初始化

模块化设计时,直线段移动轨迹需要输入的起始参数为:起点  $P_s(x_s, y_s)$ , 终点  $P_e(x_e, y_e)$ ; 入口速度  $v_s$ , 出口速度  $v_e$ ; 货物长度  $l$ , 货物宽度  $w$ 。圆弧段移动轨迹的初始化参数为:起点  $P_s(x_s, y_s)$ , 终点  $P_e(x_e, y_e)$ ; 入口速度  $v_s$ , 出口速度  $v_e$ ; 货物长度  $l$ , 货物宽度  $w$ ; 圆弧半径  $R$ 、圆心坐标  $P_o(x_o, y_o)$ 。

### 2.2 生成质心轨迹

货物移动质心轨迹如图 3 所示。

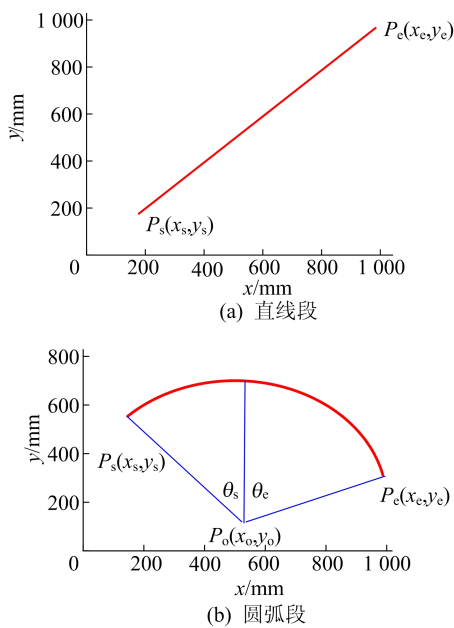


图 3 货物移动质心轨迹

1) 直线段质心轨迹如图 3a 所示,根据直线的起点  $P_s$  和终点  $P_e$  坐标,获得直线段货物质心轨迹的方程为:

$$y = \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}x + \frac{x_e y_s - x_s y_e}{x_e - x_s} \quad (1)$$

考虑到起点与终点横坐标一致,即直线轨迹与  $y$  轴平行,直线斜率并不存在,故此时的轨迹

方程为:

$$\begin{cases} x = x_s, \\ y_s \leq y \leq y_e \end{cases} \quad (2)$$

2) 圆弧段质心轨迹如图 3b 所示,  $\theta_s, \theta_e$  分别为  $P_s P_o, P_e P_o$  与  $y$  轴正半轴的夹角,则有:

$$\begin{cases} \theta_s = \arctan \frac{y_s - y_o}{x_s - x_o}, \\ \theta_e = \arctan \frac{y_e - y_o}{x_e - x_o} \end{cases} \quad (3)$$

由此,圆弧段圆弧上任意点  $P$  从  $P_s$  移动至  $P_e$  的过程中质心轨迹的参数方程为:

$$\begin{cases} x = R \sin \theta + x_o, & \theta_s \leq \theta \leq \theta_e; \\ y = R \cos \theta + y_o, & \theta_s \leq \theta \leq \theta_e \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\theta$  为  $PP_o$  与  $y$  轴正半轴的夹角。

### 2.3 生成货物移动扫掠面边界

货物移动轨迹扫掠面如图 4 所示。

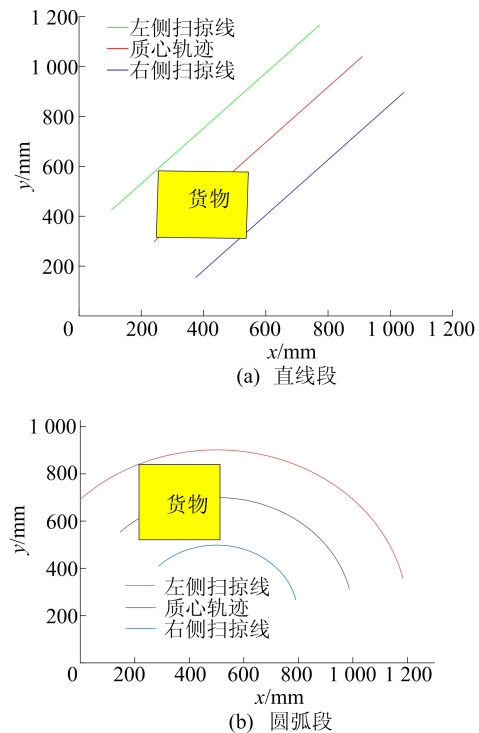


图 4 货物移动轨迹扫掠面

给定平面尺寸的货物其质心沿设定的轨迹移动,在货物两侧产生扫掠边界线,根据其位置分别称为左侧扫掠边界线和右侧扫掠边界线,其起点和终点坐标分别用  $P_{sL}(x_{sL}, y_{sL}), P_{sR}(x_{sR}, y_{sR})$  和  $P_{eL}(x_{eL}, y_{eL}), P_{eR}(x_{eR}, y_{eR})$  表示。

直线段的左侧扫掠线和右侧扫掠线参数方程为:

$$y_L = \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}x - \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}x_{sL} + y_{sL},$$

$$y_R = \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}x - \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}x_{sR} + y_{sR} \quad (5)$$

圆弧段的左侧扫掠线参数方程为:

$$\begin{cases} x = R_L \sin \theta + x_o, \\ y = R_L \cos \theta + y_o \end{cases} \quad (6)$$

圆弧段的右侧扫掠线参数方程为:

$$\begin{cases} x = R_R \sin \theta + x_o, \\ y = R_R \cos \theta + y_o \end{cases} \quad (7)$$

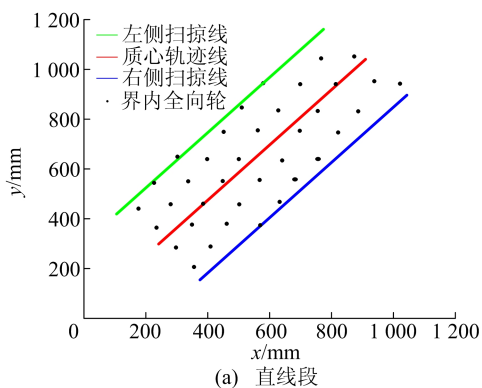
其中,  $R_L$ 、 $R_R$  分别为左、右侧扫掠线圆弧半径, 即

$$\begin{cases} R_L = R + \frac{\sqrt{l^2 + w^2}}{2}, \\ R_R = R - \frac{\sqrt{l^2 + w^2}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

### 2.4 全向轮界内判断

假设货物与全向轮为点接触, 位于货物扫掠边界线以及起点线与终点线所围成区域以内的全向轮为界内全向轮。

对于直线段, 界内轮判别式为:



$$\left\{ (x, y) \mid y \leq \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}x - \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}x_{sL} + y_{sL} \right\} \cap$$

$$\left\{ (x, y) \mid y \geq \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}x - \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s}x_{sR} + y_{sR} \right\} \cap$$

$$\left\{ (x, y) \mid y \geq \frac{x_e - x_s}{y_s - y_e}x - \frac{x_e - x_s}{y_s - y_e}x_s + y_s \right\} \cap$$

$$\left\{ (x, y) \mid y \leq \frac{x_e - x_s}{y_s - y_e}x - \frac{x_e - x_s}{y_s - y_e}x_e + y_e \right\}$$

(9)

对于圆弧段, 界内轮判别式为:

$$\left\{ (x, y) \mid (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 \leq R_L^2 \right\} \cap$$

$$\left\{ (x, y) \mid (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 \geq R_R^2 \right\} \cap$$

$$\left\{ (x, y) \mid y \geq \frac{y_s - y_o}{x_s - x_o}x - \frac{y_s - y_o}{x_s - x_o}x_s + y_s \right\} \cap$$

$$\left\{ (x, y) \mid y \geq \frac{x_e - x_s}{y_s - y_e}x - \frac{x_e - x_s}{y_s - y_e}x_e + y_e \right\}$$

(10)

直线段和圆弧段全向轮界内判断结果如图 5 所示。

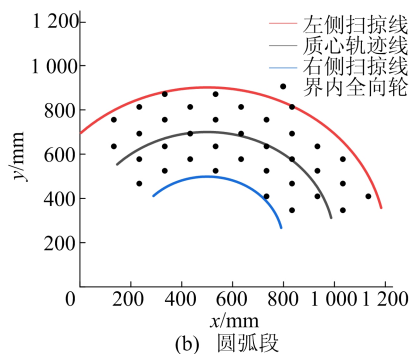


图 5 全向轮界内判断结果

### 2.5 全向轮速度计算

全向轮速度的计算主要包括 2 个方面: 一是确定货物加速度的控制策略; 二是根据货物的运行速度计算每个方向全向轮的实际转速。

1) 货物加速度控制策略。常用的加速度曲线有直线型、指数型、S 型以及正弦型<sup>[12]</sup>。本文选用直线型加速度控制策略。根据初始化参数中设置的入口速度  $v_s$  和出口速度  $v_e$  进行货物是匀速运动还是匀变速运动的判断。当  $v_e = v_s$  时, 货物匀速移动; 当  $v_e \neq v_s$  时, 货物需要进行加速度控制。

加速度移动时应设置货物加速度区间  $S_d$ , 即

$$S_d = \left| \frac{v_s^2 - v_e^2}{2a} \right| \quad (11)$$

其中,  $a$  为货物加速度,  $a = \pm \mu g$ <sup>[13]</sup>,  $\mu$  为货物与全向轮之间的动摩擦系数,  $g$  为重力加速度, 加速区

间和减速区间  $a$  分别取“+”和“-”。若该段轨迹的长度小于加速度区间长度  $S_d$ , 则可以通过降低货物移动速度或调整货物起止位置等方法来解决。

2) 驱动全向轮速度计算方法<sup>[10]</sup>。货物移动全向轮速度分析示意图如图 6 所示, 可以看出, 货物在分拣平台上做平动且全向轮在驱动货物移动时与货物之间不发生打滑现象。

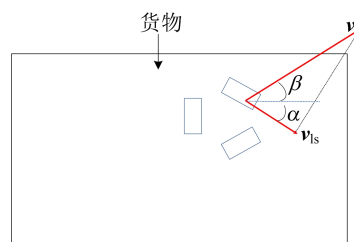


图 6 货物移动全向轮速度分析示意图

以图 6 中右上角的驱动全向轮为例,其运动学方程为:

$$v_{ls} = -v \cos(\alpha + \beta) \tag{12}$$

其中: $v$  为货物在分拣平台上移动速度大小; $v_{ls}$  为全向轮线速度大小; $\alpha$  为全向轮平面与  $x$  轴方向的夹角; $\beta$  为货物移动方向与  $x$  轴方向的夹角。

### 3 货物移动轨迹模块化设计应用

#### 3.1 控制平台的组成

全向轮式分拣装置控制系统主要由计算机、可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)、人机交互系统、耦合器从站终端、伺服驱动器终端以及驱动电机组成。计算机在系统中作为上位机,主要用于生成货物轨迹、计算机速度,根据下位机发送的数据将计算的结果返回下位机;PLC 为下位机,位于控制层,对执行机构发送控制命令;驱动电机以及与耦合器相连的传感器为现场执行设备,执行由 PLC 发送控制命令。各层结构之间通过以太网进行信息交互,控制方案设计如图 7 所示。

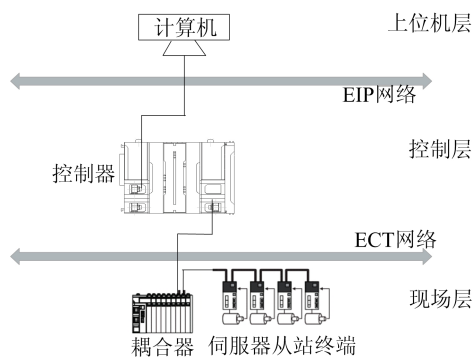


图 7 分拣装置控制系统结构

控制系统工作过程为:当货物触发入口传感器时,将货物信息发送给上位机,上位机计算该货物轨迹内有效轮子的速度,并传送给 PLC,然后 PLC 获取上位机传输来的给定速度,控制轨迹内的全向轮进行转动,从而实现货物在轨迹内的运动。

#### 3.2 分拣功能的实现

分拣功能是指货物以某一速度到达平台入口的任意位置,经过平台的驱动,以要求的速度和方向从指定的位置离开平台,实现货物的分拣。全向轮式分拣装置可根据需要进行左分拣、右分拣以及直线分拣。下面以左侧分拣为例说明货物移动轨迹模块化设计的应用。

左分拣货物质心轨迹如图 8 所示。

假设货物在分拣平台上全程为匀速,如图 8

所示,货物的入口坐标为  $(x_{in}, y_{in})$ ,出口坐标为  $(x_{out}, y_{out})$ 。这种直线-圆弧-直线的轨迹设计组合有利于保证货物移动的顺畅性和连贯性。

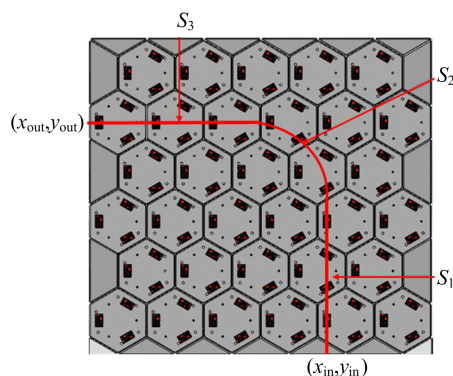


图 8 左分拣货物质心轨迹

再对各段进行参数化设计,确定两直线段长度和圆弧段半径时需要考虑货物的大小和速度。为了避免货物由于离心力作用偏离设定轨迹,圆弧段的圆弧半径应该满足  $R \geq v^2 / \mu g$ ,  $R$  为圆弧段半径,  $v$  为货物在分拣平台上的运行速度<sup>[14]</sup>。当受限于分拣入口与出口位置,不足以获得所需要的圆弧半径时,需放弃使用圆弧段,直接用连接入口与出口位置的直线段代替。为了防止速度方向突变而使货物偏离轨迹,货物的运行速度也应降低。

以  $400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的货物为例。假设货物入口  $P_{sp}$  位置坐标为  $(800, 0)$ 、出口  $P_{ep}$  位置坐标为  $(0, 800)$ 、分拣速度为  $1 \text{ m/s}$ ,驶入直线段的初始参数为:起点坐标  $(800, 0)$ ,终点坐标  $(800, 596)$ ,入口速度  $v_s = 1 \text{ m/s}$ ,出口速度  $v_e = 1 \text{ m/s}$ ;过渡圆弧段初始参数为:起点坐标  $(800, 596)$ ,终点坐标  $(596, 800)$ ,圆心坐标  $(596, 596)$ ,入口速度  $v_s = 1 \text{ m/s}$ ,出口速度  $v_e = 1 \text{ m/s}$ ;驶离直线段初始参数为:起点坐标  $(596, 800)$ ,终点坐标  $(0, 800)$ ,入口速度  $v_s = 1 \text{ m/s}$ ,出口速度  $v_e = 1 \text{ m/s}$ 。

分拣装置控制系统生成的货物质心轨迹、货物移动扫掠面边界如图 9 所示。

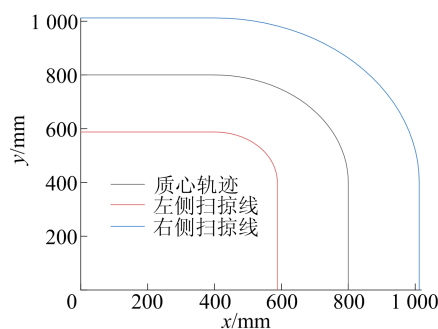


图 9 分拣系统生成的质心轨迹和扫掠面边界

对货物左侧分拣运动轨迹的跟踪效果如图 10 所示。



图 10 左侧实际分拣效果

### 3.3 堆码功能的实现

堆码功能是指多个货物逐个进入分拣平台,通过全向轮的驱动最终平稳地到达指定位置,实现货物的整齐码放。

货物堆码示意图如图 11 所示。从图 11 可以看出在堆码过程中各货物质心轨迹均由直线-圆弧-直线 3 段组合而成。

与分拣功能不同的是,堆码功能要求货物最终状态是停靠在分拣台的某一位置,因此,在驶入直线段和过渡圆弧段的货物做匀速移动,在停止直线段的货物做匀减速移动,直至速度降为 0。

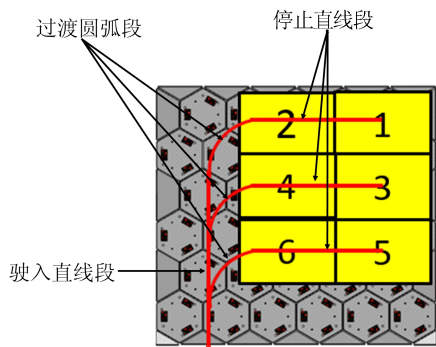


图 11 货物堆码示意图

受篇幅所限,在此仅展示第 1 个货物的轨迹搭建。

假设货物入口  $P_{sp}$  位置坐标为  $(200, 0)$ 、入口速度为  $1 \text{ m/s}$ ,驶入直线段初始参数为:起点坐标  $(250, 0)$ ,终点坐标  $(250, 754)$ ,入口速度  $v_s = 1 \text{ m/s}$ ,出口速度  $v_e = 1 \text{ m/s}$ ;过渡圆弧段初始参数为:起点坐标  $(250, 754)$ ,终点坐标  $(454, 958)$ ,圆心坐标  $(454, 754)$ ,入口速度  $v_s = 1 \text{ m/s}$ ,出口速度  $v_e = 1 \text{ m/s}$ ;停止直线段初始参数为:起点坐标  $(454, 958)$ ,终点坐标  $(1\ 000, 958)$ ,入口速度  $v_s = 1 \text{ m/s}$ ,出口速度  $v_e = 0 \text{ m/s}$ 。

货物堆码生成的质心轨迹、货物移动扫掠面边界如图 12 所示。

6 个货物堆码运动轨迹的跟踪效果如图 13 所示。

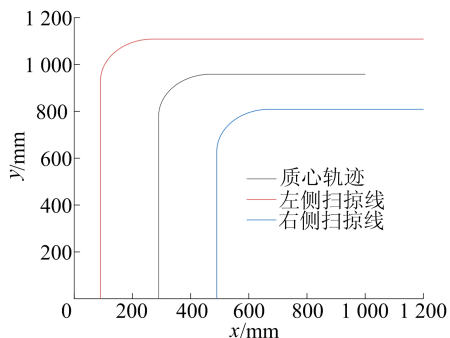


图 12 货物堆码生成的质心轨迹、扫掠面边界

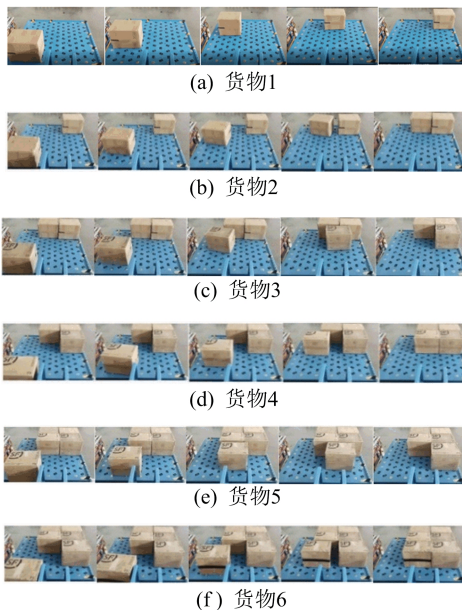


图 13 货物堆码运动轨迹

## 4 结 论

为了满足全向轮式分拣装置需要货物在分拣平台上按照任意给定轨迹和速度移动的要求,本文采用模块化设计方法简化全向轮分拣装置控制系统程序设计。将货物在分拣平台上的任意轨迹移动分解为直线段与圆弧段 2 种轨迹的不同组合;介绍了直线段和圆弧段进行轨迹移动模块化设计各阶段的算法,输入各段起点和终点的位置及速度等初始化参数,模块自动完成货物移动质心轨迹生成、货物移动扫掠面计算、扫掠面界内全向轮判断以及界内全向轮速度计算;最后,对本文提出的全向轮式分拣装置货物移动轨迹模块化设计方法进行了测试。结果表明:本文方法大大降低了全向轮式分拣装置进行货物输送时轨迹移动控制的难度,有利于全向轮式分拣装置功能扩展及实现,提高了分拣装置的适应性和机动灵活性。

(下转第 1175 页)

- [14] LI W, JIN X, ZHENG Y, et al. A porous and air gap elastomeric dielectric layer for wearable capacitive pressure sensor with high sensitivity and a wide detection range[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(33): 11468-11476.
- [15] CICEK M O, DOGANAY D, DURUKAN M B, et al. Seamless monolithic design for foam based, flexible, parallel plate capacitive sensors[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(6): 2001168.
- [16] LI S, DONG K, LI R, et al. Capacitive pressure sensor in-laid a porous dielectric layer of superelastic polydimethylsiloxane in conductive fabrics for detection of human motions[J]. *Sensors and Actuators A (Physical)*, 2020, 312: 112106.
- [17] BIJENDER B, KUMAR A. Flexible and wearable capacitive pressure sensor for blood pressure monitoring[J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2021, 33: 100434.
- [18] ZHU Y, WU Y, WANG G, et al. A flexible capacitive pressure sensor based on an electrospun polyimide nanofiber membrane[J]. *Organic Electronics*, 2020, 84: 105759.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 1158 页)

## [参 考 文 献]

- [1] 徐镇全. 组合曲面上组合曲线的等距方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [2] 彭玉海. 曲线运动导轨的设计方法研究[J]. *机械设计与制造*, 2014(10): 143-145.
- [3] 徐白. 面向离散数据的等距与扫掠技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [4] LINGG Z K, CHASE T R. Generating the swept area of a body undergoing planar motion[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1996, 118(2): 186-192.
- [5] 王金敏, 张恒毅, 李乃华, 等. 平面物体扫掠区域的算法研究[J]. *工程图学学报*, 2004, 25(2): 46-50.
- [6] 尚鹏, 王成焘. 股骨三维重建的轨迹线扫掠法与分支问题处理[C]//21世纪医学工程学术研讨会论文摘要汇编. 北京: 中国生物医学工程学会, 2001: 147.
- [7] ZHUANG J Y, LUO J, LIU Y C. A locking sweeping method based path planning for unmanned surface vehicles in dynamic maritime environments[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(11): 887-887.
- [8] 王勇, 刘洋, 祝鑫. 基于三轮全向移动平台的运动控制系统研究[J]. *现代机械*, 2019(6): 5-9.
- [9] 海丹. 全向移动平台的设计与控制[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [10] 邢雯丽. 8Mecanum 轮全向移动平台运动学、动力学建模与实验[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [11] 祝鑫. 全向移动机场服务机器人研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [12] 丁华斌. 基于加减速控制算法的汽车仪表步进电机控制系统设计与研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.
- [13] 慈强. 便携式路面摩擦系数测试仪研究与开发[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [14] 杨晓, 韩冰, 欧成章. 悬挂式单轨最小曲线半径及缓和曲线理论研究[J]. *现代城市轨道交通*, 2019(9): 85-90.

(责任编辑 胡亚敏)

## · 信息与动态 ·

## 《合肥工业大学学报(自然科学版)》专栏征稿启事

为了贯彻落实党的二十大精神,紧密围绕科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略,《合肥工业大学学报(自然科学版)》设置“机器人与人工智能”“环境污染与防治”两个专栏,面向国内外专家学者征集“机器人与人工智能”“环境污染与防治”领域的原创性学术论文、专题综述;稿件一经录用将优先刊发。

来稿要求政治导向正确、论证充分、具有较强的引领性和创新性。格式要求参见《合肥工业大学学报(自然科学版)》网页投稿指南的征稿简则和投稿模板。

在线投稿网址: <http://xbzss.hfut.edu.cn/xbzk.html>。