包装流水线双垛型高速码垛系统设计

马飞*，孙巍伟，马凤仪
（北京信息科技大学，北京 100192）

摘要：目的 提高包装流水线码垛效率。**方法** 设计一套包装流水线双垛型高速码垛系统，包括整形缓存区、码垛执行区和升降缠膜区 3 个功能区。系统以 PLC 作为控制核心，通过 SMART 700 IE V3 触摸屏实现人机交互，通过主令同步的指令控制方式，控制码垛机器人和自动缠膜机等设备，完成纸箱的码垛与缠膜。**结果** 经过现场试验验证了系统的有效性和稳定性，该系统可以进行双托盘同步码垛与缠膜，大大提高了码垛流水线的作业效率。**结论** 本文研究的系统提高了纸箱码垛效率，并能够促进包装自动化流水线智能化水平的提升。

关键词：双垛型高速码垛；包装流水线；PLC
中图分类号：TB486 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-3563(2024)13-0221-09
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.13.025

Design of Double-stack High Speed Stacking System for Packaging Assembly Line

*MA Fei**, *SUN Weiwei*, *MA Fengyi*
(Beijing University of Information Technology, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the stacking efficiency of packaging assembly lines. A double-stack high-speed stacking system for packaging lines was designed, which included shaping cache area, stacking execution area and lifting and wrapping area. With PLC as the control core, the system realized human-computer interaction through SMART 700 IE V3 touch screen, and control equipment such as stacking robots and automatic wrapping machines to complete the stacking and wrapping of cardboard boxes through synchronous command control. The effectiveness and stability of the system were verified by the actual experimental platform, and the system could carry out double-stack stacking and wrapping at the same time, which greatly improved the operation efficiency of the stacking line. The system studied in this paper improves the stacking efficiency of cartons and can promote the intelligent level of automated packaging lines.

KEY WORDS: double-stack high-speed stacking; packaging line; PLC

近年来，我国工业生产规模不断扩大，随着人工成本的不断增加，越来越多的工厂选择用自动化设备代替人工，尤其是在需要进行货物码垛的使用场合。因此，出现了大量以工业机器人为主体的码垛设备，码垛机器人大量应用于食品包装、物流仓储、医疗设备等行业[1-4]。

张志军[5]以 PLC 为控制核心设计了一种皮革自动码垛装置系统，该系统提高了皮革码垛的效率；唐阳洋[6]设计了用于木工板输送的自动化分拣及码垛设备，并通过实验验证了该设备的效率；杨远等[7]基于多轴同步控制技术，设计一种条烟柔性码垛系统，该系统可同时吸附 5 条高度和宽度不同的条烟，提高了条烟码垛机器人的效率。在包装领域，大量企业和研究人员都在使用 PLC 作为控制核心来研发自动化设备[8-11]。此外，还有部分研究人员对包装生产线进行了虚拟仿真的研究，可以为生产线设计、调试和改造提供理论参考，同时降低设计与调试成本，减少调试时间[12-15]。

收稿日期：2023-09-11
***通信作者**

目前，国内许多企业在自动化转型过程中，面临如何在现有的厂房基础上，进行合理的优化设计、合理布局，完成自动化流水线的改造的问题。本文研究以某企业现有的厂房为基础，进行自动化升级改造。系统采用自动化设备与码垛机器人的结合方式，设计一套包装流水线双垛型高速码垛系统，包括控制系统的搭建、通信机制、硬件选型、人机交互设计等，实现纸箱包装的双垛位自动码垛与缠膜，最后通过现场试验进行系统验证。

1　双垛型高速码垛系统设计

根据实际测量，工厂的高度只有 4 m，最高的垛型高度则为 2.65 m，人工码垛过程中最后几层的货物必须借助梯子才能完成。由于包装纸箱的大小不一，出货速度不同，因此需要对各部分机构进行柔性化设计。统计 19 种纸箱的生产规格后，具体技术参数如表 1 所示。

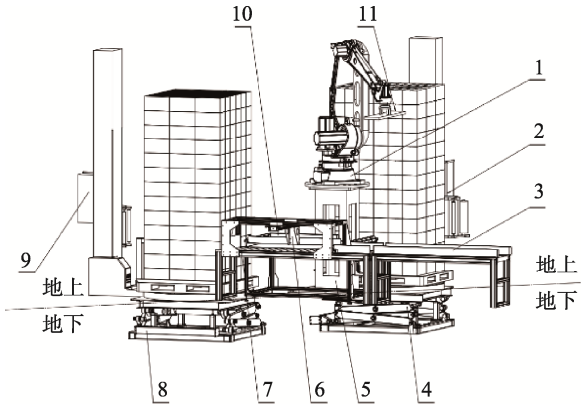
表 1　技术参数
Tab.1 Technical parameters

序号	参数	参数值
1	出货最大速度	20 箱/min
2	输送最大宽度	450 mm
3	最大托盘尺寸	1 236 mm×1 048 mm
4	最大垛型高度	2 650 mm
5	最大载荷	7.4 kg
6	转运驱动形式	滚筒驱动、带驱动
7	码垛机类型	全关节码垛机
8	控制形式	手动/单步/自动
9	码垛方式	一线双盘
10	输送长度	依据产线输出窗口随时调整

本文所研究的双垛型高速码垛系统采用一机双盘的码垛形式，可以最大化地利用厂房空间；同时结合码垛机器人和自动缠膜机等自动化设备，实现机器人自动码垛和缠膜的协同作业。该系统可以进行最大高度 2.8 m 以内垛型的码垛，且设计了柔性调整装置，能够实现多种类和规格的纸箱码垛。

1.1　双垛型高速码垛系统组成

系统主要由码垛机器人、缠膜机 1、传送带、升降装置 1、固定装置、推箱整形机构、滚筒区、升降装置 2、缠膜机 2、缓存机构和末端吸盘组成，如图 1 所示。



1.码垛机器人；2.缠膜机 1；3.传送带；4.升降装置 1；5.固定装置；6.推箱整形机构；7.滚筒区；8.升降装置 2；9.缠膜机 2；10.缓存机构；11.末端吸盘。
图 1　双垛型高速码垛系统组成
Fig.1 Components of double-stack high-speed stacking system

1.2　双垛型高速码垛系统结构

根据实际的生产要求，双垛型高速码垛系统的空间布局如图 2 所示，主要包括整形缓存区、码垛执行区和升降缠膜区 3 个部分。根据目前的厂房布局，过道右侧原为人工码垛区域，现改造为自动码垛区和缠膜区，可供码垛装置布局的空间为 6 m×6 m×4 m，码垛机器人的布局相对较为紧凑，接近于正方形设计。

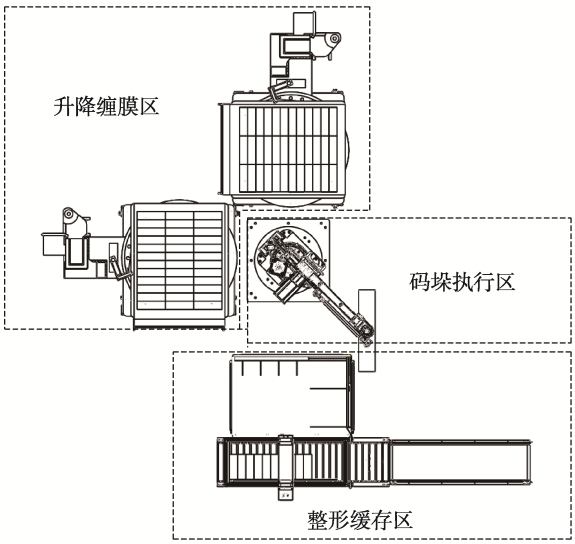


图 2　双垛型高速码垛装置空间布局
Fig.2 Space layout of double-stack high-speed stacking system

1.2.1　整形缓存区

整形缓存区装置包括传送/滚筒传送机构、推箱整形机构与缓存区，主要是对纸箱进行整形、计数和存储，方便机器人进行抓取，如图 3 所示。

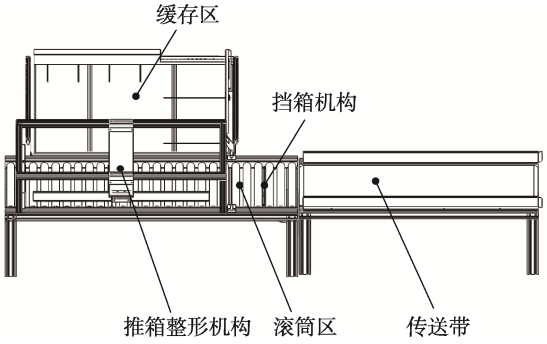


图 3　整形缓存区示意图
Fig.3 Schematic diagram of cache area

传送带/滚筒机构作为主要的输送机构，负责输送货物到推箱整形机构，滚筒区配合推箱整形机构实现纸箱的纸箱整形和推出；推箱整形机构的一端连有传送带，推箱整形机构包括滚筒区，滚筒区上设置有一排滚筒。传送带与滚筒区都用于传递纸箱，且传送带线速度小于滚筒旋转形成的线速度；缓存机构位于推箱整形机构和码垛机器人之间，用于缓存推箱整形机构推出的纸箱，同时设置有三级码垛区，根据速度要求可随时进行优先级码垛，提高码垛效率。

挡箱机构安装于传送带与滚筒区的交界处，功能为挡住传送的纸箱，使正在执行的推箱机构不被纸箱干涉。

1.2.2　码垛执行区

码垛执行区包括码垛机器人、固定装置和末端抓取装置，主要是机器人进行货物的抓取，码垛机器人如图 4a 所示。经过分析，本文选择真空海绵吸盘作为末端抓取装置，并根据实际需求进行设计。

1.2.3　升降缠膜区

升降缠膜区包括升降装置与缠膜机，如图 4a 和 4b 所示，用于实现货品的自动缠膜。升降装置位于托盘底部，安装于地下，表面高于地面 10 mm；缠膜机则安装在托盘一侧，实现缠膜功能。其中，液压升降机构表面长宽各为 1 250 mm，通过限位开关可调升降高度，最大离地高度为 1 500 mm，最大载质量为 1 000 kg；缠膜装置表面圆盘与立柱可进行拆卸，圆盘驱动装置安装于圆盘底面，圆盘固定于升降装置表面。圆盘直径为 1 800 mm，最大载质量为 600 kg，可缠膜高度为 3 000 mm。

1.3　码垛工艺流程

双垛型自动码垛系统工作流程如图 5 所示。人工将托盘与纸板放置到位后，纸箱由传送带进入滚筒区，同时，2 个升降装置会同时上升，缠绕机高度传感器开始检测当前位置。

a 码垛设备　　b 液压升降设备　　c 缠膜机

图 4　码垛、升降和缠膜设备
Fig.4 Stacking, lifting, and wrapping equipment

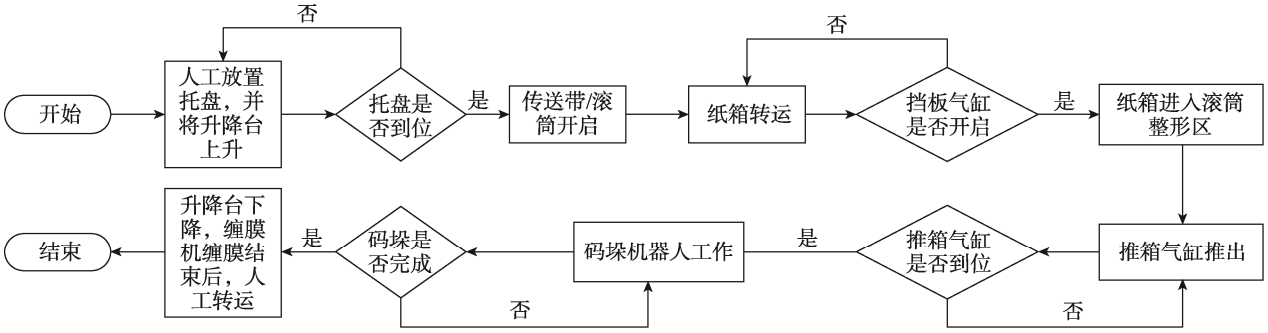


图 5　码垛工艺流程
Fig.5 Stacking process flow chart

当安装于传送带两侧的对射传感器检测到进入滚筒区的纸箱数量满足码垛数时，挡箱双杆气缸打开，推箱气缸将纸箱推入缓存区，缓存区光栅检测到纸箱到达的具体位置（根据箱子的大小设置为 A、B、C 三级取件点，A 为最靠近机器人的一侧，C 为靠近滚筒区的一侧，如图 6 所示），推箱气缸返回完成，码垛机器人开始工作。

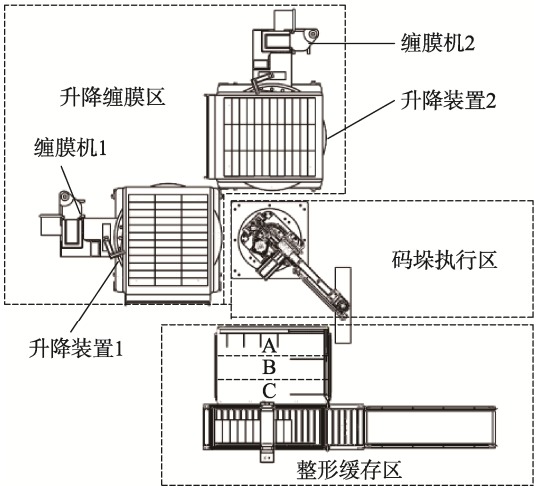


图 6　码垛工艺装置
Fig.6 Stacking process equipment diagram

如图 6 所示，码垛机器人首先开始向升降装置 1 处码垛，优先抓取 C 处纸箱。当光栅检测到纸箱被机器人完全抓取后，挡箱双杆气缸关闭，此时纸箱继续进入滚筒区，如此循环。

在码至半垛后，升降装置 1 下降，缠膜机 1 开始缠膜，此时码垛机器人开始向升降装置 2 处码垛。当升降装置 2 处码至半垛时，升降装置 2 下降，缠膜机 2 开始缠膜，此时码垛机器人继续向升降装置 1 处码垛，在升降装置 1 和 2 下降之后，缠膜机高度传感器每检测到 3 层高度差缠膜一次，在缠膜机 1 工作期间，码垛机器人则向升降装置 2 处码垛；反之，当缠膜机 2 工作时，码垛机器人则向升降装置 1 处码垛，如此往复循环，直至整垛码垛缠膜完成。整个码垛流程工作结束后，则由人工进行转运。

2　双垛型高速码垛控制系统

2.1　控制系统网络结构

双垛型高速码垛装置控制系统的主要硬件由 PLC、人机交互模块、驱动控制模块、执行机构等外围设备组成。人机交互模块中提供触摸屏，并含有开始、暂停、关闭等物理按键，工作指示灯和蜂鸣器能够及时掌握运行状态。主控制器通过驱动控制模块控制执行机构，传感反馈元件检测运动状态，并反馈到核心处理器中。如图 7 所示控制系统硬件结构，本文采用总线拓扑的方式，PLC 通过 MODBUS 协议与机器人通信，通过 TCP 协议与缠膜机通信，通过 I/O 模块控制升降装置与各气缸、电机等运动，从而实现码垛机器人的精准码垛与缠膜。

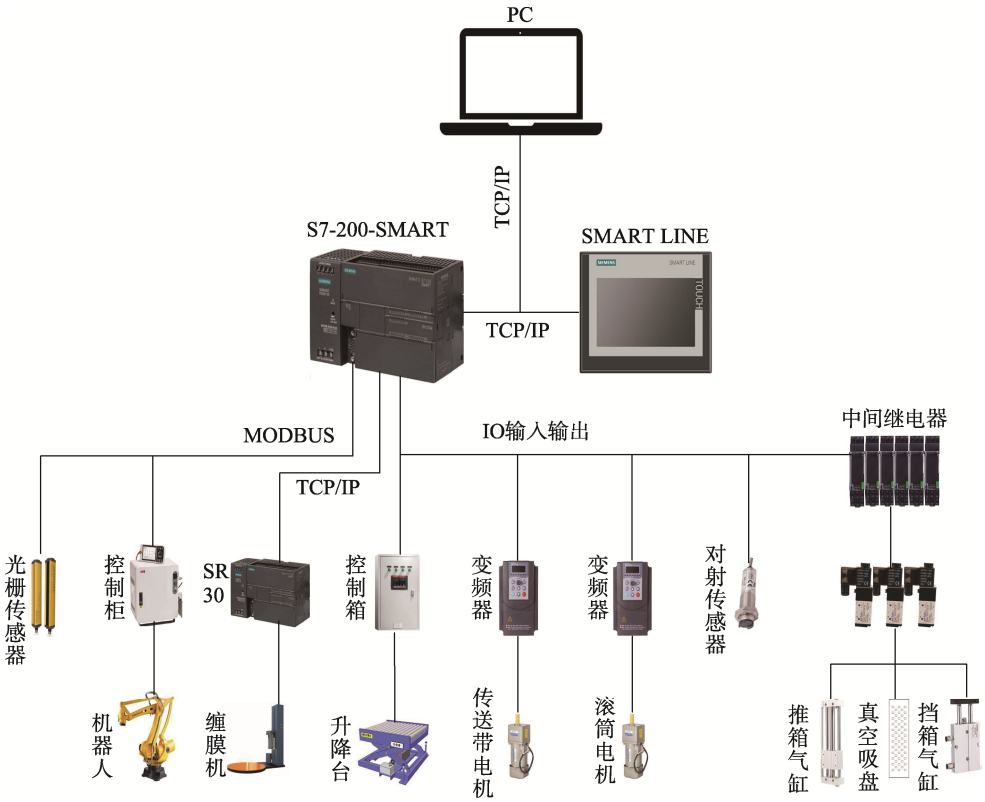


图 7　控制系统硬件结构
Fig.7 Hardware structure of control system

2.2　控制系统硬件结构

PLC 作为控制核心，控制整个高速码垛装置的工作，如图 7 所示。

2.2.1　传感器

码垛系统中用到 3 种传感器：

1）传送带上的纸箱进入滚筒区时，会进行计数，因此需要计数传感器计数，研究中选择 NPN 对射式光电传感器。

2）在纸箱从推箱整形机构进入缓存区时，要对缓存区的纸箱位置进行精确定位，研究中选择了型号为 T1-10010 的光栅传感器，供电电压为 DC 12~24 V，其有效检测距离为 990 mm，光轴间距为 10 mm，最大对射距离为 3 000 mm。光栅传感器是利用莫尔条纹原理，测量物体位置、速度和方向的传感器，由发光二极管、光栅、光敏元件和信号处理器等组成。当光栅传感器对物体进行测量时，发光二极管将光线照在光栅上，光栅将光线分为光束；当物体经过光栅时，被遮挡的光束将无法照射到光敏元件，光敏元件会产生电信号，可根据信号的大小判断遮挡的距离。信号处理器将电信号进行放大、滤波等处理，从而得到物体的位置、速度和方向等信息。如图 8 所示，选用光栅传感器可以很好地满足缓存区多级码垛的功能要求。

3）各执行气缸的传感器，研究中选用限位开关，用于对气缸的动作进行监控和反馈。

2.2.2　气动元器件

气动系统由气源系统、气路控制原件、气动执行元件组成。由于厂房内部提供气源，因此，只需要对控制元件和执行元件进行选型。

气动执行元件主要有推箱气缸与挡板气缸，其中推箱气缸受到推箱挡板的重力和纸箱的阻力，研究中选择亚德客磁耦合无杆气缸（RMTL20-500S），配套使用 CS1-G 磁性开关；挡箱气缸则主要受纸箱的挤压力，气缸的缸径不宜过小，研究中选用致鼎双杆气缸（TN10-100S），配套使用的 CS1-J 磁性开关；气路控制原件则主要是电磁阀，PLC 通过中间继电器控制电磁阀，电磁阀控制气缸的动作。

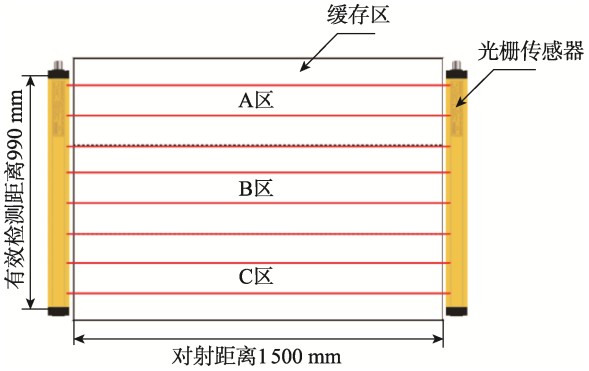


图 8　使用光栅传感器检测箱子处在不同缓存区
Fig.8 Detection of boxes in different cache areas with grating sensors

2.2.3　滚筒与传送带电机选择

研究中选择东川 61K200GU-SF 三相交流电机，功率为 200 W，配套 VFD-M 变频器。由于滚筒电机的摩擦因数远小于传送带，而速度相差不大，因此选择相同型号的电机与变频器。

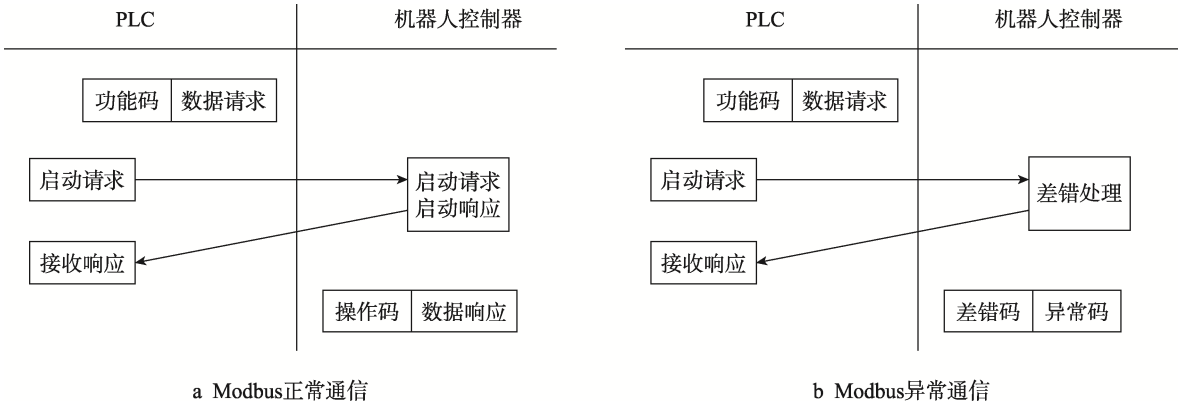
3　双垛型高速码垛控制系统软件设计

3.1　PLC 与机器人控制

PLC 通过 MODBUS 协议与机器人通信，首先由 PLC 请求，机器人控制器返回响应，出现差错时系统会返回差错码与异常码。其通信过程如图 9 所示。

3.2　PLC 与缠膜装置控制

缠膜装置的主控原件同为西门子 S7-200 SMART，因此与 2 台缠膜机可进行 TCP/IP 通信，通过网口将 2 个 PLC 连接即可。缠膜机的工作流程如图 10 所示。



a Modbus正常通信　　b Modbus异常通信

图 9　机器人 Modbus 通信过程
Fig.9 Modbus communication process of robot

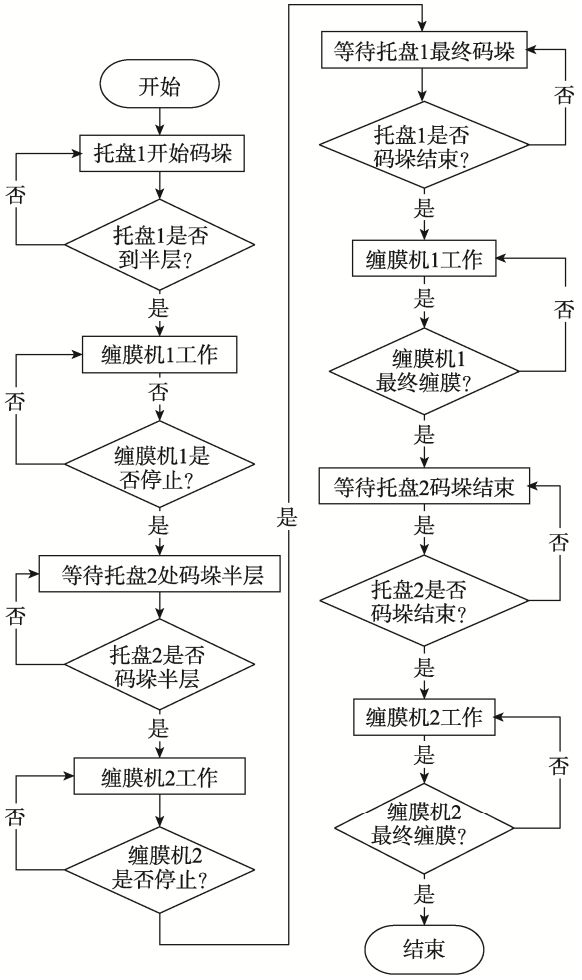


图 10　缠膜装置控制流程

Fig.10 Control flowchart of wrapping device

3.3　整形推箱机构控制

传送带与滚筒区开启后，纸箱开始进入传送带，需要控制元器件包括滚筒电机、传送带电机、挡板气缸、对射传感器、推箱气缸等，可通过 PLC 的 IO 进行控制。其控制流程如图 11 所示。

3.4　缓存区控制

缓存区光栅传感器需要通过 Modbus 协议进行通信，与机器人控制柜相同，通过 STEP-7 Micro/WIN SMART 中的 Modbus 库指令进行设置，使用 MBUS_CTRL 初始化主站通信，使用 MBUS_CTRL 读取从站寄存器数据。同时在使用前需要进行 ISP 烧录更新。

缓存区设计为分级码垛，码垛优先级从大到小为 C 区、B 区、A 区，且码垛速度分别为 70%、50%、30%。当仅有 A 处有纸箱存在时，说明机器人的码垛速度远大于产线的出货速度，此时机器人以 30%的码垛速度抓取 A 处的纸箱，此码垛策略可以最大化提高码垛的效率，防止由于出货速度过快而造成产线堵塞。其控制流程如图 12 所示。

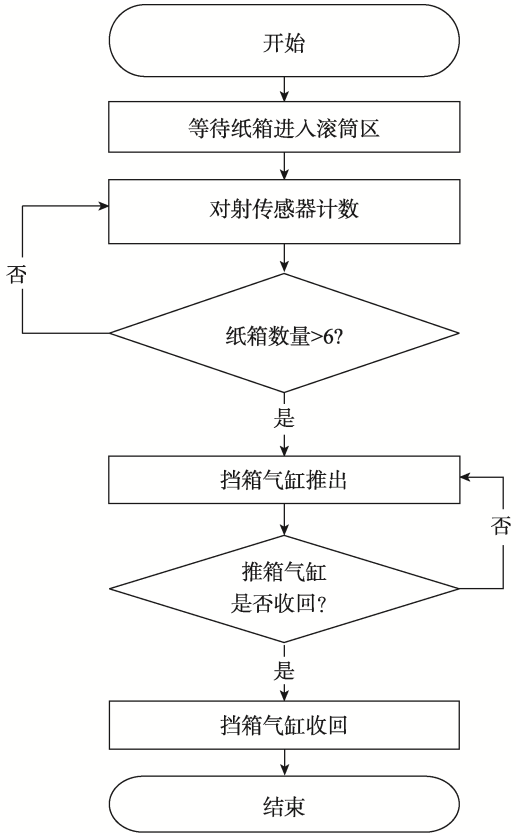


图 11　整形推箱控制流程

Fig.11 Control flowchart of plastic push box

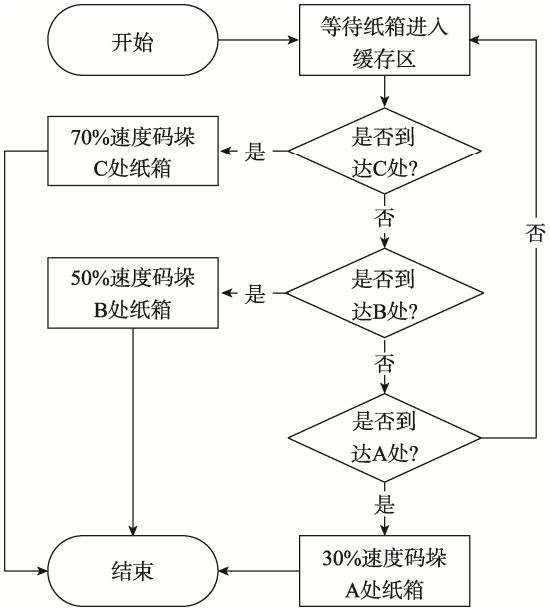


图 12　缓存区控制流程

Fig.12 Control flowchart of cache area

3.5　人机界面

人机交互模块作为自动化生产线中设备与工作人员的桥梁，研究中选择 SMART 700 IE V3 触摸屏实现人机交互。设计了人机交互主界面、码垛功能界面、启动码垛界面、状态监控功能界面等，其中启动码垛界面和状态监控功能界面如图 13 和图 14 所示。

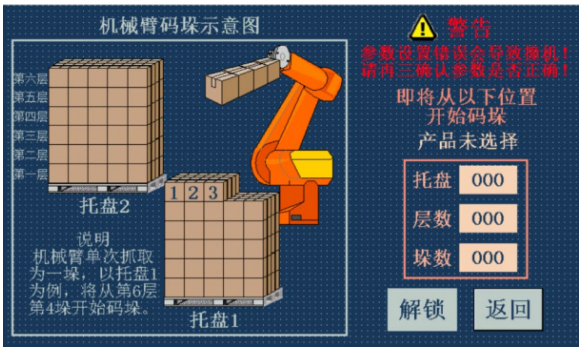


图 13　启动码垛界面
Fig.13 Launching the palletizing interface

图 14　状态监控功能界面
Fig.14 Status monitoring function interface

4　系统测试

通过现场试验装置、控制电路、控制气路的搭建，对各功能模块进行试验验证与分析。按照总体布局的要求进行现场设备的搭建，为试验测试提供实验平台。如图 15 所示，为双垛型高速码垛装置的实际搭建平台，其中传送装置、推箱整形装置、缓存区均安装可调地脚，通过钣金固定；码垛机器人固定装置则通过预埋螺栓连接在地面；缠膜机则通过膨胀螺栓与地面相连；升降装置与缠膜机旋转平台则均安装于基坑。

在双垛型与高速码垛装置现场搭建与码垛示教完成之后，测试纸箱（规格为 343 mm×150 mm×197 mm），包括各功能模块的测试、缠+膜测试验证和整机连续测试。

4.1　整形推箱机构测试

为了更好地进行码垛，进行了纸箱由传送带进入滚筒区的自动整形测试。设定传送带速度为 25 mm/s，滚筒区速度为 45 mm/s，按照实际纸箱运动状态进行测试。在纸箱由传送带进入滚筒区的时，从传送带输送过来的纸箱姿态各异，经过推箱整形机构之后，纸箱排列整齐，可见自动整形的效果较好，如图 16 所示。

图 15　现场试验平台
Fig.15 Field test rigs

a 纸箱整形前　　b 纸箱整形后

图 16　整形功能测试
Fig.16 Plasticity function test

4.2　缓存区分级码垛测试

由于测试纸箱的尺寸不符合三级缓存区的要求，因此设置为二级缓存区。码垛优先级从大到小则为 B、A，优先提取 B 处纸箱，因此，机器人首先从 B 处以较高的速度抓取纸箱，然后再将 A 处的纸箱以较低的速度进行码垛。

对 B 处纸箱从抓取到放置进行了试验验证，结果表明，当在 B 处有纸箱存在时，码垛机器人会优先抓取 B 处纸箱；当 B 处未检测到纸箱时，则以较低的速度对 A 处纸箱进行码垛，如图 17 所示。

图 17　缓存区分级码垛测试
Fig.17 Graded stacking test of cache area

4.3　升降缠膜连续测试

如图 18 所示，进行了双垛形码垛缠膜测试，在升降装置 2 缠膜的同时，机器人开始向升降装置 1 处继续码垛。

4.4　系统整体运行测试

如图 19 所示，针对目前出货速度最快规格的纸箱连续进行了码垛缠膜测试，分别设置 70%、50%、20%的码垛速度，每种速度分别测试了 10 次，并通过摄像的方式进行记录。

图 18　升降缠膜连续测试
Fig.18 Lift and wrap continuous test

图 19　整机连续测试
Fig.19 Continuous testing of whole machine

详细测试结果如表 2 所示。

表 2　测试结果
Tab.2 Test results

次数	完成时间/s		
	20%码垛速度	50%码垛速度	70%码垛速度
1	694	570	353
2	689	573	359
3	693	576	356
4	695	580	351
5	699	562	349
6	693	572	363
7	698	569	352
8	694	571	358
9	701	573	352
10	694	579	363
平均值	695	572	356

测试结果表明，在垛型高度为 2 530 mm、总纸箱为 432 箱、双垛型高速码垛装置在运行速率为 20% 的情况下，8 s 可完成单次码垛，11.6 min（696 s）即可完成托盘 1 与托盘 2 处码垛及缠膜。相较于人工平均 25 min/垛的码垛封膜，速率提高了 4.3 倍，每小时可至少码垛 2 700 箱，极大地提高了纸箱码垛封膜的效率。

5　结语

为了解决由于空间局促、高垛型自动化码垛困难的实际工程难题，文中设计了一套包装流水线双垛型高速码垛系统，包括整形缓存区、码垛执行区和升降缠膜区 3 个功能区，可以实现双垛型同时码垛与缠膜。系统以西门子 PLC 作为控制核心，通过主令同步的指令控制方式，并通过 SMART 700 IE V3 触摸屏实现人机交互。通过现场的测试，结果表明，该系统可以完成纸箱的双垛位的码垛与缠膜，大大提高了码垛流水线的作业效率。

参考文献：

[1] HU L, MIAO Y M, WU G X, et al. IRobot-Factory: An Intelligent Robot Factory Based on Cognitive Manufacturing and Edge Computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 90: 569-577.

[2] ALKALLA M G, FANN M A. Integrated Structure/Control Design of High-speed Flexible Robot Arms Using Topology Optimization[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2021, 49(3): 381-402.

[3] 孙立宁，许辉，王振华，等. 工业机器人智能化应用关键共性技术综述[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(2): 211-219.
SUN L N, XU H, WANG Z H, et al. Review on Key Common Technologies for Intelligent Applications of Industrial Robots[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(2): 211-219.

[4] 胡春生，魏红星，闫小鹏，等. 码垛机器人的研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(2): 57-77.
HU C S, WEI H X, YAN X P, et al. Research and Application of Palletizing Robot[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(2): 57-77.

[5] 张志军. 基于PLC的皮革自动码垛装置控制系统研究[J]. 中国皮革, 2022, 51(4): 45-48.
ZHANG Z J. Control System of Leather Automatic Palletizing Device Based on PLC[J]. China Leather, 2022, 51(4): 45-48.

[6] 唐阳洋. 非标木工板自动化分拣和码垛系统设计[J]. 物流技术, 2022, 41(5): 125-127.
TANG Y Y. Design of Automatic Sorting and Stacking System for Non-Standard Wood Boards[J]. Logistics Technology, 2022, 41(5): 125-127.

[7] 杨远，王晋冰，刘旭，等. 基于多轴同步控制技术的条烟柔性码垛系统设计[J]. 包装工程，2023，44(3): 261-267.
YANG Y, WANG J B, LIU X, et al. Design of Flexible Cigarette Palletizing Control System Based on Multi-Axis Synchronous Control Technology[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(3): 261-267.

[8] 苏红卫，支强. 基于 PLC 和触摸屏的果蔬自动包装机控制系统设计[J]. 包装工程, 2018, 39(5): 163-167.
SU H W, ZHI Q. Design of Control System for Automatic Fruit and Vegetable Packaging Machine Based on PLC and Touch Screen[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 163-167.

[9] 陆萍蓝，邵力行，张火明，等. 基于慧鱼技术和 PLC 控制的餐盘分拣系统设计[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 210-215.
LU P L, SHAO L X, ZHANG H M, et al. Design of Tray Sorting System Based on Fischertechnik and PLC Control[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 210-215.

[10] 刘彦磊，郭涛，张世辉，等. 基于 PLC 的相框组装包装控制系统设计[J]. 包装工程, 2022, 43(5): 205-210.
LIU Y L, GUO T, ZHANG S H, et al. Design of Photo Frame Assembly and Packaging Control System Based on PLC[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(5): 205-210.

[11] 李楠. 基于PLC的黄桃罐头生产线自动分装系统研究[D]. 大连：大连海洋大学, 2023.
LI N. Research on the Automatic Packaging System of Yellow Peach Canned Production Line Based on PLC[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023.

[12] 李琳杰，赵伟博，齐锴亮，等. 基于 RobotStudio 的自动生产线工作站设计与仿真[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(6): 26-29.
LI L J, ZHAO W B, QI K L, et al. Design and Simulation of Automatic Production Line Workstation Based on RobotStudio[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2021(6): 26-29.

[13] 庞党锋，崔世钢，田丽萍. 包装生产线码垛机器人工作站虚拟仿真研究[J]. 包装与食品机械，2022，40(4): 68-72.
PANG D F, CUI S G, TIAN L P. Simulation of Palletizing Robot Workstation in Packaging Production Line[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(4): 68-72.

[14] 魏雄冬. 基于纸箱包装生产线的机器人码垛仿真研究[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(12): 100-102.
WEI X D. Simulation Research on Robot Palletizing Based on Carton Packaging Production Line[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2022, 58(12): 100-102.

[15] 蔡玉强，范祺，贾思楠. 基于 RobotStudio 的牛奶箱搬运生产线仿真[J]. 包装与食品机械，2023，41(2): 107-112.
CAI Y Q, FAN Q, JIA S N. Simulation of a Milk Carton Handling Line Based on RobotStudio[J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(2): 107-112.