数字化储运包装系统设计研究

梁燕[1]，刘飞航[2*]
（1.重庆工程职业技术学院，重庆 402260；2.西南技术工程研究所，重庆 402260）

摘要：目的 为解决现代化工厂转运包装自动化程度低、使用环境单一、生产管理系统与转运包装联动性差的问题，设计了数字化储运包装系统。**方法** 根据使用环境和使用条件要求，对转运包装的整体结构、防护方式、数据联动进行全新设计。通过仿真分析满足储运包装系统的功能需求和使用要求。**结果** 设计出了数字化储运包装系统，提高了转运包装的自动化程度和数字化程度，承重 600 kg 时该系统变形为 0.47 mm，防护等级可达 IP33，工作系统电压为 24 VDC，打开、闭合运动时间为 2 s。**结论** 实现了数字化储运包装系统的设计及仿真，解决了普通转运包装自动化程度低、使用环境单一的问题，为同类产品的设计提供了参考。

关键词：数字化；自动化；联动
中图分类号：TB486 **文献标志码：**A **文章编号：**1001-3563(2025)07-0159-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.07.019

Design of Digital Storage and Transportation Packaging System

LIANG Yan[1], *LIU Feihang*[2*]
(1. Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260, China;
2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 402260, China)

ABSTRACT: In order to solve the problems of low automation degree, single use environment and poor linkage between production management system and transport packaging, the work aims to design a digital storage and transport packaging system. According to the requirements of the use environment and conditions, the overall structure, protection mode and data linkage of the transport packaging were completely designed. The functional and use requirements of the storage and transport packaging system were met through simulation analysis. The digital storage and transport packaging system was designed, improving the automation and digitization of the transfer and packaging. When 600 kg was loaded, the deformation was 0.47 mm, the protection level reached IP33, the working system voltage was 24 VDC, and the opening and closing movement time was 2 s. The design and simulation of a digital storage and transport packaging system are achieved, which solves the problems of low automation degree and single use environment of ordinary transfer packaging, and provides a reference for the design of similar products.

KEY WORDS: digitization; automation; linkage

智慧仓储、物流是现代物流的发展趋势[1]。张晶蓉等[2]提出，当仓储产品种类较多时，将托盘统一成具有一定体积和形状的单元产品进行装载，这一解决方案在同类型生产模式中具有一定的先进性。然而，随着社会发展，个性化产品比重逐渐加大，品种多、数量少的柔性化生产逐渐占据主导，车间内部经常存

收稿日期：2024-11-04
基金项目：重庆市教育委员会科学技术研究项目（KJQN202403402）
*通信作者

在相邻生产线制造不同产品的情况，常规的托盘、包装箱的储运方式会带来较大的物流、储存压力，占用大量的物流周转器具及仓储空间也给生产系统的指令传达和仓储管理带来较大的压力。赵迎君等[3]依托物联网技术，基于标准数据模型和微服务技术架构对电力物资融合仓进行搭建。袁骏等[4]对数字化车间物料自动转运系统进行了分析，不仅提高了数字化车间的自动化、数字化、智能化水平，还提高了生产效率和产品质量。余稳胜等[5]设计了一套基于 SCRAR 机器人及 2 组 *xz* 平面伺服机械手构成的搬运码垛系统，实现了产品的回收装箱及搬运码垛。梁川等[6]设计了一种智能仓储系统，通过物联网、大数据等技术提升了仓储及物流管理的自动化和智能化水平。现有研究主要对仓储、周转、包装系统分别进行研究，虽取得了一定的成果，但未能在产品包装与转运接收、转运送达与仓储接收之间实现产品信息传递，且周转器具本身无法实现产品的自动防护。

本文以解决车间柔性生产的储运和包装问题为基础，引入数字化信息交互的概念，提出了能在同一储运包装结构内同时满足“分区包装+堆码储存+数字化信息交互”的“数字化储运包装系统”的设计策略。将传统的包装优化、仓储优化、生产管理系统优化系统性地关联起来，通过结构设计实现对不同生产线的不同产品进行分区包装及堆码。通过堆码可实现装货后的包装系统在满足产品临时包装防护的同时，直接在仓库中进行长期堆码储存，无需在长储前或上线使用前对产品进行分包作业。在数字化方面，根据结构特点，在其内部装配独立的控制系统及执行机构，可从生产管理系统接收生产信息，由 AGV 小车拖运到指定位置，将位置信息自行反馈给生产管理系统后接收生产管理系统的装货信息，打开不同的装载区域，通过装货机器人进行装载，装货信息在每个货舱中进行目视化显示，装货完成后由 AGV 拖运到仓库，装货信息传递给仓储管理系统。整个工作过程有效实现了分区包装、相互堆码存储，不同系统之间的信息交互等功能在现有车间的不同生产线、系统之间形成了结合点，能最大化地提高整体效率，为同类问题的解决提供了新的研究思路。

1 设计方案

1.1 设计要求

为实现数字化储运包装系统顺利取代传统物流、转运、仓储器具，需确保其外形尺寸满足仓储标准，整体结构便于堆码装卸，因此选择长、宽、高均为 1.2 m 的底盘。根据生产线布置特点，将装载方式设计为双向对开，可实现 2 条生产线同时作业；另外，将货舱打开方式设计为杆组双向顶出模式。为适应不同自动化程度的车间周转需求，需同时满足 AGV 转运、自动牵引、人工转运，底墩功能用脚轮替代，侧面有插装结构，顶部有扶手护栏。厂房内部为标准室内环境，厂房间转运可能存在雨、雪、尘土等，因此货舱需采取基本的防尘措施。

为便于系统独立运行，兼顾弱电控制系统硬件的通用性，选择 24 VDC 作为系统的供电条件，电力由自带电池提供。车间信息交互多为局域网方式，选择无线方式实现信号的接收和发送，控制系统采用高性能工控机。工作阻力为各个部件的滑动和密封动作产生的摩擦力，采用步进电机即可满足工作需求。

由上述分析确定，数字化储运包装系统具有信息交互、自主控制、防水、防异物侵入、与现有物流器具尺寸相当等特点。具体设计特征如表 1 所示。

表 1 设计特征符合情况
Tab.1 Fitting of design features

设计特征	设计要求
室内存储、室外转运	防淋水、防大颗粒异物
常规尺寸	$L\times W\times H\leqslant$1 200 mm×1 200 mm×1 000 mm
能车队运输	具备插接接口、底部带滚轮
双工位使用	对向双开结构
满足混装功能	分层工作
单独使用、双层堆码	最大承重≤600 kg，能人工推拉
使用温度	–20~60 ℃
独立供电	电池系统
信息显示	显示屏
兼容生产管理系统	独立控制系统

1.2 总体设计方案

为实现设计要求，本文研究的数字化储运包装系统包含数字化控制系统设计和机械结构设计 2 个方面。数字化控制系统设计主要研究生产管理系统、仓储系统与本系统的信息交互以及内部自主控制，确保本系统的产品装载及位置信息、仓储状态信息分别与生产管理系统、仓储系统关联，有效打通不同生产系统的壁垒，实现管理效益最大化，同时可通过自带显示屏直观显示装载状态。机械结构设计主要研究如何在满足载重和堆码要求的情况下适应不同的使用环境，满足分区包装功能。

1.2.1 数字化系统设计

数字化系统以无线 Wi-Fi 技术为信息传输的基础，通过 Visual Studio 软件以 C#语言进行编写，整体控制流程分为外部控制流程和内部控制流程。外部控制流程主要通过数字化储运包装系统实时接收生产指令信息并反馈自身位置信息，保证生产管理系统按需调动 AGV 小车进行拖动，并将实际位置与指令位置进行比对形成位置信息闭环，然后根据生产管理

系统的生产计划以及相邻生产线的打包数量，打开不同分区的货舱，由打包机器人进行装货，装货结束后关闭货舱门并对关闭状态进行自检。自检无异常后由 AGV 将本系统转运至仓库位置，载货信息上传到仓储管理系统后由堆码机器人将本系统转运至指定位置。为便于目视化管理，在货舱表面布置显示屏，以直观展示每个货舱的实时载货信息。外部控制的主要流程如图 1 所示。

内部控制流程主要通过从外部控制流程获得的生产指令信息，调动主控制器的各项功能，并对内部的电池、天线、传感器等硬件结构进行实时管理。内部控制流程在工作时，首先，按照装载需求分别打开 3 层载货单元的分区层进行装载，装载过程中通过每个定置位置的传感器反馈装载执行情况，装载完成后关闭货舱门并对货舱关闭状态进行自检；其次，将载货状态信息显示在显示屏上；再次，通过电池管理系统对电池包电量进行监控，防止出现系统停电关闭的异常情况；最后，通过天线系统实时向外部发送位置信息，确保系统一直处于在线状态。内部控制的主要流程如图 2 所示。

控制系统硬件以高性能 PLC 的 I/O 口为传输基础，分别控制 3 个独立的电机控制器，每个电机控制器单独控制一台步进电机；系统控制器与生产、仓储管理系统的信号传输采用无线传输；通过生产管理系统与 PLC 的交互，将产品信息显示在每个货舱的显示屏或将自身的产品、位置信息等反馈给生产、仓储等上级管理系统；系统供电采用电池包供电。

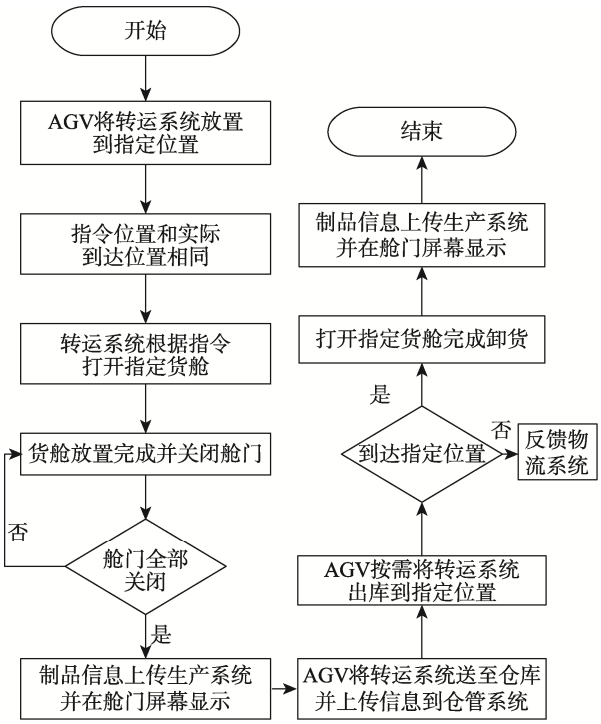


图 1　外部控制流程
Fig.1 External control process

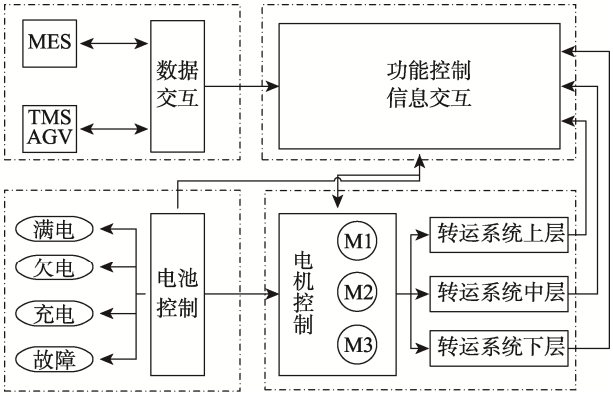


图 2　内部控制流程
Fig.2 Internal control process

系统工作时的阻力主要为丝杠、货舱两侧轨道、顶升轴承之间的滚动阻力以及货舱边缘密封条的摩擦力；系统总体功能以信号收发、功能执行为主，总体功耗较小；同时，考虑到直流系统的经济性、通用性、安全性，选择系统工作电压为 24 VDC。电机采用 86 步进电机，步进电机受到负载扰动时转速误差波动较小[7]，额定电压 U_N=24 V，额定电流 I_N=6 A，保持转矩 T_f=12 N·m，步距角 q=1.8°。电驱采用具有 8 位拨码开关设定动态电流、半/全流设定的独立驱动器。系统控制采用工业主机，运行内存为 16 G，RS232 串口，满足 Wi-Fi/网口双模连接，额定功率 P_N=30 W，信号接收天线串接增益天线对信号进行增强。显示屏规格为 4.3 寸（1 寸≈3.3 cm），字库储存空间为 32 Mb，可实现对货架产品的精确识别和种类的快速更新[8]。电池系统采用 24 V、27 A·h 电池，电压范围为 16.8~25.2 V。通过组态控制器与辅助设备建立周期通信，使用专用通信监视工具对整个通信过程进行监控[9]。

1.2.2　主体材料选择

考虑到使用环境、强度以及原材料的通用性、经济性等要求，储运包装系统的主体框架结构采用聚乙烯（PE）材料，其屈服强度为 25 MPa、抗拉强度为 33 MPa、密度为 0.95 g/cm^3、剪切模量为 387.32 MPa、弹性模量为 1 100 MPa、泊松比为 0.42。对产品进行定位的结构需具备缓冲功能且吸湿性小、防霉，同时材料需具有均一性[10]。

1.2.3　总体结构设计

结构设计需同时满足力学强度、运动可靠性、产品防护、电气安装等需求，可作为包装材料随产品交付[11]。因此主体结构设计为框架式，侧面布置有叉板、叉孔，便于车队状态运输，如图 3 所示；最小载货单元设计为双向对开的 3 层独立运动结构，底部安装脚轮，脚轮及堆码部位有 5 mm 厚的垫板，用来分散应力，如图 4 所示；扶手护栏起到把手和堆码稳定的作用；货舱表面有用于显示产品信息的显示屏。

载货单元边缘嵌入 30 HA 的氯丁橡胶密封条，起到防水和防异物进入的作用。为保证密封效果，结合密封条尺寸，设计最大载荷时弹性变形量≤3 mm。内部独立顶升结构与货舱水平动作联动，实现产品装卸时的自动顶出和下沉，如图 5 所示。框架结构内部分层布置电机、电机控制器、传动结构、系统控制器等，如图 6 所示。每个货舱由上下 2 组推杆在推块的作用下实现反向联动，如图 7~8 所示。单元货载的高度应充分考虑运输机具的允许堆码高度[12]，整体平面尺寸为 1 200 mm×1 000 mm[13]。

由三维结构设计可知，储运包装系统主体结构最大外廓尺寸为 1 200 mm×1 000 mm×930 mm，框架为厚度 5 mm 的 PE 板，受力较大位置布置有厚度 5 mm 的加强板。3 层双向 12 货舱，单层独立运动控制，产品升降与货舱开合动作联动，能满足使用环境及使用功能要求。

1.3　设计小结

通过上述数字化系统设计、主体材料选择、总体结构设计，数字化储运包装系统对设计要求的使用环境、防护要求、尺寸要求、能源要求等硬件结构及内外部控制等功能已得到实现，满足储运包装系统的存储、运输、防水、防尘、数字化的设计要求。设计特征符合情况如表 2 所示。

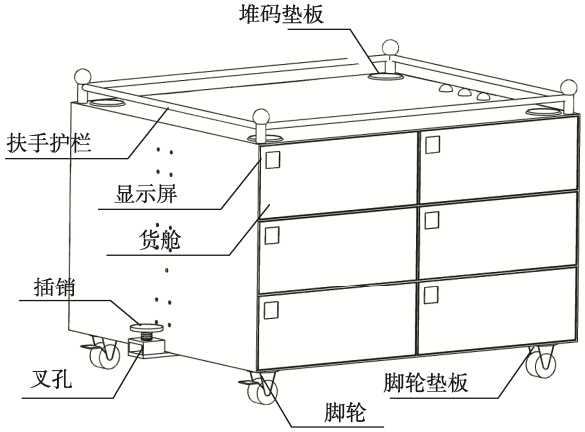


图 3　主体结构
Fig.3 Main structure

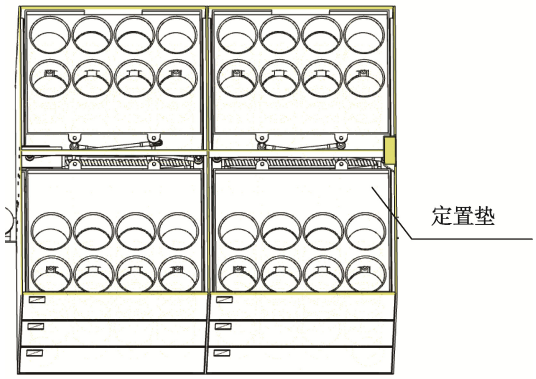


图 4　货舱状态
Fig.4 Hold condition

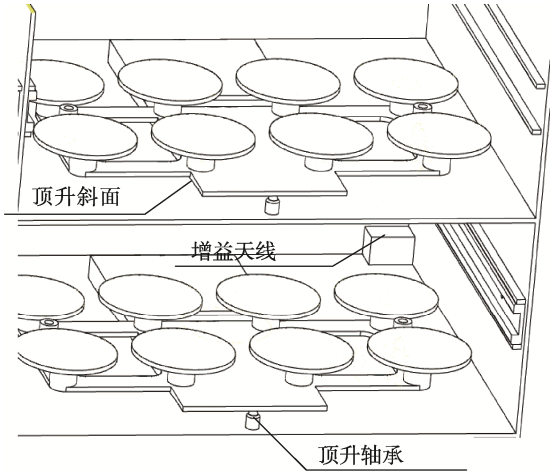


图 5　顶升结构
Fig.5 Jacking structure

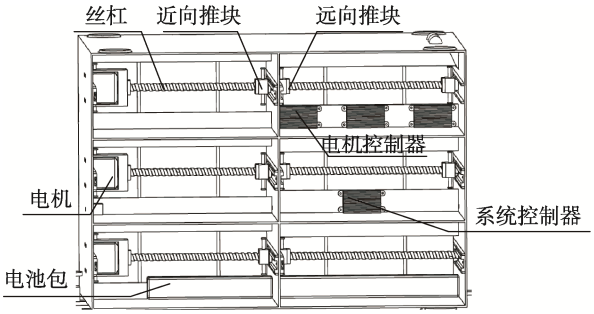


图 6　内部结构
Fig.6 Internal structure

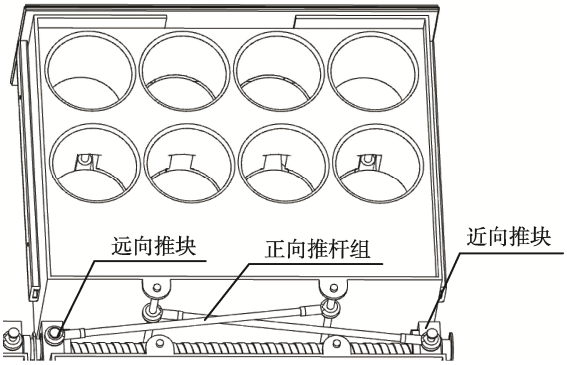


图 7　正向推拉结构
Fig.7 Forward push-pull structure

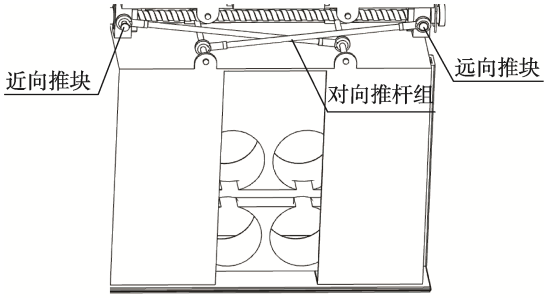


图 8　反向推拉结构
Fig.8 Reverse push-pull structure

表 2　设计特征符合情况
Tab.2 Fitting of design features

设计特征	设计要求	满足程度
室内存储、室外转运	防淋水、防大颗粒异物	IP33
常规尺寸	$L\times W\times H\leqslant$1 200 mm×1 200 mm×1 000 mm	$L\times W\times H$=1 200 mm×1 000 mm×930 mm
车队运输功能	具备插接接口、底部带滚轮	自锁插口、4 个脚轮
双工位使用	双开结构	3 层 2 向结构
满足混装功能	分层工作	独立 3 层结构
单独使用、双层堆码	最大承载质量≤600 kg，能人工推拉	600 kg
使用温度	−20~60 ℃	−40~80 ℃
独立供电	电池系统	24 V，30 A·h
信息显示	显示屏	液晶显示屏
兼容生产管理系统	系统控制器	独立控制程序

2　分析及仿真

2.1　位移分析

位移分析对象为数字化储运包装系统的货舱伸缩及与之联动的产品升降动作。伸缩动作需确保货舱正常打开，防止打开距离不足导致无法取出货物或打开幅度过大导致货舱倾覆。升降动作需确保与货舱伸缩的产品升降联动动作可靠，产品不与框架结构干涉且能顶升到机械手需要的抓取位置或收缩到定置垫平面以内。假设推块位移为 L_1，与推块联动的推杆位移为 L_2，货舱位移简化为 L_3，顶升斜面位移简化为 L_4。L_1 与 L_2 夹角为 θ_1，L_2 与 L_3 夹角为 θ_2，L_3 与 L_4 夹角为 θ_3，上述矢量形成封闭矢量，通过对闭环矢量求解，得出伸缩位移 s 和升降位移 h 与杆组之间的关系，具体见式（1）~（2）。

$$s=L_3+L_2\cos\theta_2 \tag{1}$$

$$h=L_4-L_3\cos\theta_3 \tag{2}$$

带入结构尺寸条件后，可求得货舱最大伸缩距离约为 323 mm，升降板最大顶升距离为 43 mm，能满足产品平稳取放的条件。

2.2　运动仿真

使用 Siemens NX 12.0 完成三维建模及运动仿真。动作顺序：电机、丝杠正转→双向推块正向运动→推杆组推动货舱→货舱双向滑出→货物升降板顶升→电机、丝杠反转→双向推块反向运动→推杆组拉回货舱→货舱双向缩回→货物升降板下降→运动完成。装载时优先使用底层货舱，卸货时优先使用顶层货舱。

对运动仿真结果进行分析，货舱完整运动时间为第 2 秒到第 6 秒，打开、闭合运动时间均为 2 s，最大打开距离为 323 mm，能满足货物取放需求（图 9）；升降板最大顶升距离为 43 mm（图 10），能满足机器人的抓取需求，降低后可确保产品上表面低于定置垫，起到对产品的保护作用。为确保整个运动结构在动作过程中不出现死点导致运动失效，需对推块及推杆的转动运动进行同步分析：推块最大位移为 244 mm（图 11），与杆组轨迹有效配合，未出现死点情况；推杆在 z 平面内转动时 x 方向最大位移为 162 mm、y 方向最大位移为 122 mm（图 12），在正常工作范围内。各运动部件运动参数满足使用要求。

2.3　力学仿真

有限元分析时通过数据近似的方式对真实物理系统进行分析[14]。Ansys Workbench 可进行线性静力学和非线性动力学的仿真，本文主要采用线性静力学仿真[15]。将三维模型导入 Ansys Workbench 16.0 有限元分析软件中。堆码状态下，脚轮垫板（$\varnothing$=80 mm）位置受力

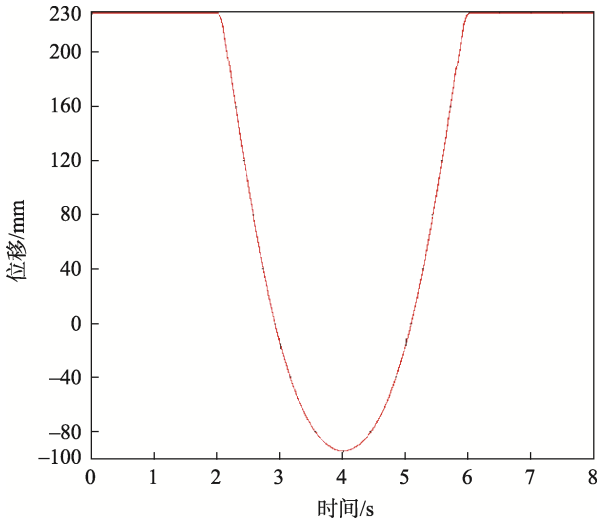


图 9　货舱时间-位移曲线
Fig.9 Cargo hold time-displacement curve

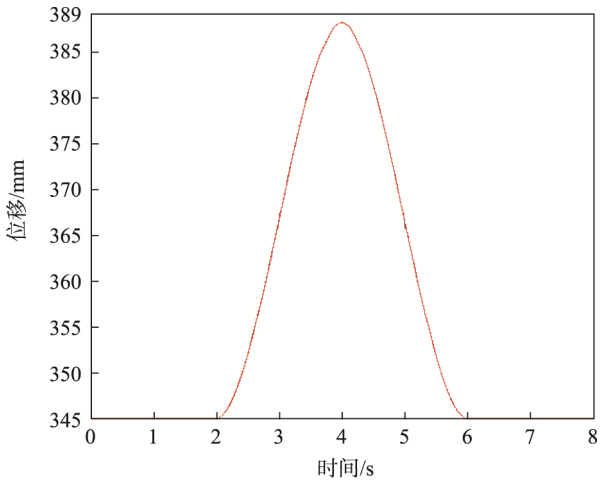


图 10　升降板时间-位移曲线
Fig.10 Lifting plate time-displacement curve

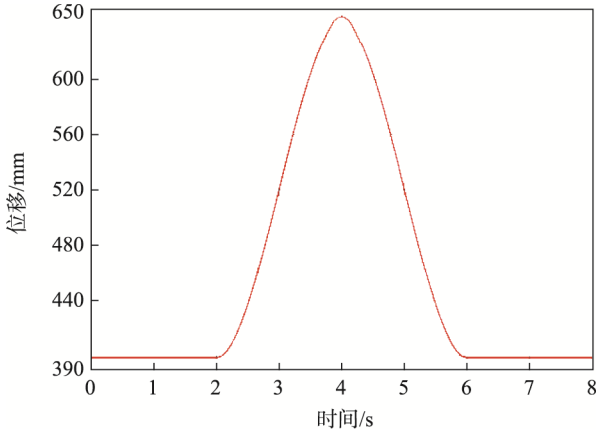


图 11　推块时间-位移曲线
Fig.11 Push-block time-displacement curve

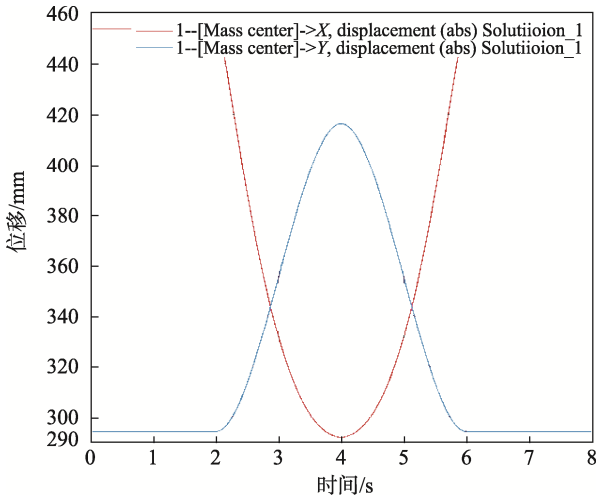


图 12　推杆时间-位移曲线
Fig.12 Push rod time-displacement curve

最大，因此主要对此结构进行力学分析。当负载质量为 600 kg 时，P=5 kPa。网格大小采用默认设置[16]；收敛条件：循环次数为 5，细化层数为 2，收敛≤5%。由力学仿真可知，最大总变形量为 0.47 mm（图 13），最大平均应变为 0.001 2 mm（图 14），最大平均应力为 3.17 MPa（图 15），经 3 次重复计算，收敛结果达到 3%（图 16），满足设计要求。垫板直径与倒圆角半径对应力影响最大[17]。

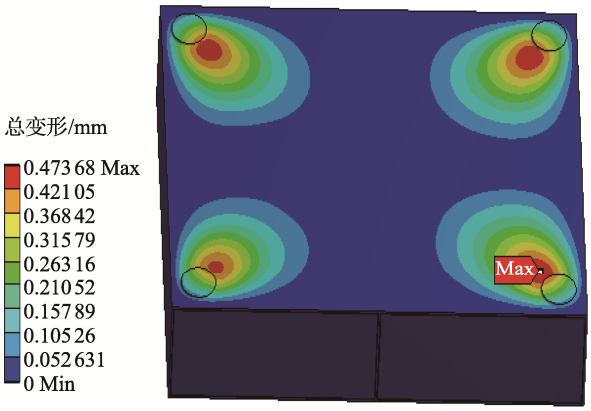


图 13　总变形云图
Fig.13 Cloud map of total deformation

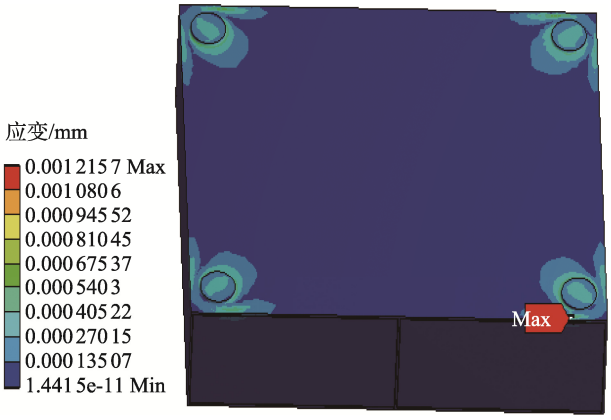


图 14　应变云图
Fig.14 Cloud map of strain

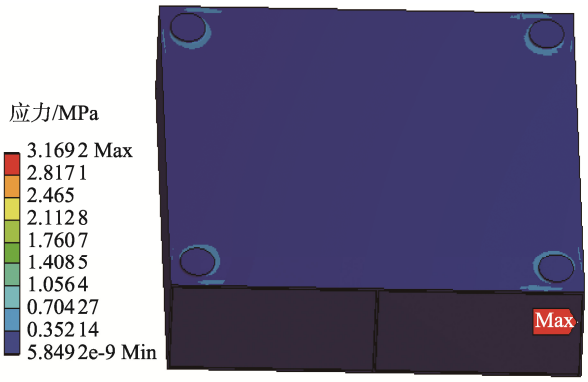
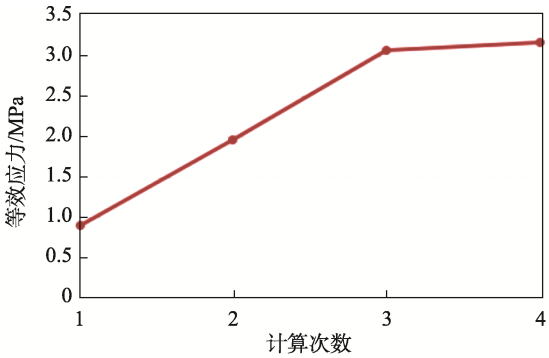


图 15　应力云图
Fig.15 Cloud map of equivalent stress



	等效应力/MPa	应变/%	节点	元素
1	0.905 86		86 411	41 820
2	1.972 2	74.103	243 643	137 926
3	3.076	43.728	669 843	418 390
4	3.169 2	2.986 2	1 415 083	927 603

图 16　收敛结果
Fig.16 Convergence result

2.4　仿真小结

通过内外部工况条件的环境剖面，获得系统的各类环境因素[18]，确定主体最大弹性变形≤3 mm。通过对结构设计优化，本系统最大变形为 0.47 mm，

提高了脚轮与脚轮垫板的匹配性[19]，改善了结构的应力分布[20]，满足实际使用需求。

3　结语

对数字化储运包装系统进行了数字化系统设计、主体材料选择、总体结构设计，并根据设计结果进行了运动仿真分析、力学仿真分析等研究。通过材料选择和结构设计，实现了存储、运输、防水、防异物的功能；通过对控制系统及控制程序的设计，实现了数字化通信，满足了整体控制要求；通过运动仿真，确定了运动结构平稳运行的条件；通过力学仿真，实现了结构强度的计算。文中提出的数字化储运包装系统在设计方面全面考虑了使用环境和操作习惯，各项设计指标均达到使用要求和相关标准，能有效取代各种常规的转运、存储、物流器具，提高标准化水平，为同类结构的设计与仿真分析提供了设计和数据参考。

参考文献：

[1] 霍艳芳，唐海莹，胡慧君. 区域智慧物流发展水平评价指标体系构建[J]. 物流技术, 2024, 43(4): 151-160.
HUO Y F, TANG H Y, HU H J. Construction of Regional Smart Logistics Development Level Evaluation Index System[J]. Logistics Technology, 2024, 43(4): 151-160.

[2] 张晶蓉，贺占文，周艳杰，等. 基于混合整数规划的工厂产品托盘打包及装箱问题研究[J]. 包装工程, 2023, 44(17): 143-151.
ZHANG J R, HE Z W, ZHOU Y J, et al. Pallet Packing and Container Loading of Factory Products Based on Mixed Integer Programming Approach[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(17): 143-151.

[3] 赵迎君，徐英韬. 基于物联网技术的电力物资融合仓建设方案研究[J]. 机械与电子, 2024, 42(9): 65-68.
ZHAO Y J, XU Y T. Research on the Construction Plan of Electric Power Material Integration Warehouse Based on Internet of Things Technology[J]. Machinery & Electronics, 2024, 42(9): 65-68.

[4] 袁骏，张胜，赵华. 面向轮胎行业数字化车间物料自动转运机器人系统研究[J]. 制造业自动化, 2021, 43(3): 150-155.
YUAN J, ZHANG S, ZHAO H. Research on Automatic Material Transfer Robot System for Tire Industry Digital Workshop[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(3): 150-155.

[5] 余稳胜，王苗苗，王蕊. 冲压件回收机器人搬运码垛系统设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(12): 115-118.
YU W S, WANG M M, WANG R. The Design of Robot Handling Palletizing System for Stamping Parts Recovery[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(12): 115-118.

[6] 梁川，陈雪军. 基于智能技术的仓储系统设计[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2024, 42(3): 44-48.
LIANG C, CHEN X J. Design of Intelligent Storage System Based on Advanced Technologies[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2024, 42(3): 44-48.

[7] 安小宇，杨洋，李楠，等. 引入扰动补偿的多电机滑模协同控制研究[J]. 包装工程, 2023, 44(15): 146-152.
AN X Y, YANG Y, LI N, et al. Multi-Motor Sliding Mode Cooperative Control by Introducing Disturbance Compensation[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(15): 146-152.

[8] 张金燕，吴蓬勃，王拓，等. 面向仓库货架的商品智能拣选机器人设计[J]. 包装工程, 2024, 45(5): 230-239.
ZHANG J Y, WU P B, WANG T, et al. Design of Intelligent Goods Picking Robot for Warehouse Shelves[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(5): 230-239.

[9] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 可编程序控制器抽样检查和例行试验方法: GB/T 36011—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Sampling Check and Routine Test Method for Programmable Controllers: GB/T 36011-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[10] 中央军委装备发展部. 军用物资防护包装材料应用指南: GJB/Z 188—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Equipment Development Department of the Central Military Commission. Application Guide for Protective Packaging Materials for Military Materials: GJB/Z 188-2021[S].Beijing: Standards Press of China, 2021.

[11] 中国人民解放军总后勤部.军用装备包装、装卸、贮存和运输通用大纲: GJB 1181—1991[S]. 北京: 中国标准出版社,1991.
The General Logistics Department of the Chinese People's Liberation Army. General Outline for Packaging, Loading, Unloading, Storage and Transportation of Military Equipment: GJB 1181-1991[S]. Beijing: Standards Press of China, 1991.

[12] 中央军委装备发展部.托盘单元货载: GJB 1918A—2020[S]. 北京: 中国标准出版社,2020.
Equipment Development Department of the Central Military Commission. Pallet Unit Load: GJB 1918A-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.

[13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 硬质直方体运输包装尺寸系列: GB/T 4892—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Dimensions of Rigid Rectangular Transport Packages: GB/T 4892-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[14] 伍伟敏, 赵敏. 有限元分析技术在冶金机械设计中的应用[J]. 世界有色金属, 2023(9): 43-45.
WU W M, ZHAO M. Application of Finite Element Analysis Technology in Metallurgical Machinery Design[J]. World Nonferrous Metals, 2023(9): 43-45.

[15] GRIGORENKO Y M, BESPALOVA O I. Generalized Method of Finite Integral Transformations in Linear and Nonlinear Static Problems for Shallow Shells[J]. Journal of Mathematical Sciences, 2023, 274(5): 618-640.

[16] 陈艳霞. ANSYS Workbench 2020 有限元分析从入门到精通: 升级版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020: 55-56.
CHEN Y X. ANSYS Workbench 2020 Finite Element Analysis from Introduction to Mastery: Upgrade Edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020: 55-56.

[17] 刘延斌, 秦新亚, 王学生, 等. 先导式安全阀导阀推杆可靠性的概率有限元分析[J]. 机械设计, 2023, 40(10): 1-7.
LIU Y B, QIN X Y, WANG X S, et al. Probabilistic Finite-Element Analysis on Reliability of Pilot-Operated Safety Valve's Pilot Valve Push Rod[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(10): 1-7.

[18] 胡博, 李文强, 朱兵, 等. 基于环境剖面的复杂装备系统优化设计参数识别方法[J]. 机械设计, 2023, 40(2): 9-18.
HU B, LI W Q, ZHU B, et al. Parameter-Identification Method for Optimization Design of Complex Equipment Systems Based on Environmental Profile[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(2): 9-18.

[19] 郁卫星, 杨臻, 刘万川, 等. 车载机枪托架行进间发射动力学分析与优化[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(7): 94-100.
YU W X, YANG Z, LIU W C, et al. Dynamic Analysis and Optimization of Vehicle-Mounted Machine Gun Brackets during Moving Firing[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(7): 94-100.

[20] 徐鲁兵, 廖明夫, 吕延军. 某动力涡轮转子连接圆弧端齿的优化设计[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(6): 969-977.
XU L B, LIAO M F, LYU Y J. Design Optimization on Curvic Couplings of a Power Turbine Rotor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(6): 969-977.