

导向滚轮式快递分拣系统设计与仿真优化

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.2006

崔功卓 巩雪 李泽
李欣妍

哈尔滨商业大学

轻工学院

黑龙江 哈尔滨 150028

摘要: 针对快递行业分拣配送效率低的问题,设计一种导向滚轮式快递分拣系统,通过翻转结构与导向滚轮分拣机的配合实现快递包裹的智能快速分拣。利用 SolidWorks 软件对扫描装置、上包区、翻转结构、分拣轮结构和快递运输整体结构进行三维建模。利用 ANSYS Workbench 对分拣轮机架进行模态分析,得到应增加支撑脚的厚度以保证其刚度。通过模块 DesignXplorer 响应面优化设计,提高翻转结构整体刚度,减轻结构质量。优化后,总质量减少了 9.42%,有明显的轻量化效果,而且强度和刚度都满足校核条件。此外,本系统扩展性强,可根据分拣需求灵活配置分拣机数量,能够满足中小型快递公司对物流配送货物分拣的需要,具有广阔的市场前景和极大推广价值。

关键词: 快递分拣; 结构设计; 模态仿真; 轻量化

中图分类号: TB486⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)02-0055-07

引文格式: 崔功卓, 巩雪, 李泽, 等. 导向滚轮式快递分拣系统设计与仿真优化 [J]. 包装学报, 2025, 17(2): 55-61.

消费者的需求不断升级加速了快递、快运产业的变革,物流配送呈现小批量、多品种发展的趋势。国家邮政局监测数据显示,截至 2024 年 8 月 13 日,2024 年我国快递业务量突破 1000 亿件^[1]。然而,快递包裹处理量激增导致错件、丢失、损坏等问题日益凸显^[2]。快递行业的迅猛发展对快递网点的分拣效率、准确率等提出了更高的要求。人工分拣通过单号地址来匹配对应的物流网点,而地址与网点的对应关系常常发生变化,这造成了分拣难、分拣慢、分拣错误率高等问题,直接影响到快递公司的服务质量。大型分拣系统虽然效率高,但占地面积大、投入成本高、回报周期长,不适合中小型快递公司的使用^[3-5]。关于快递包裹分拣设计优化的相关研究很多。王同旭^[6]设计了应用于物流行业的摆轮分拣机。张雪怡^[7]设

计了应用于中型分拣场合的新型三项分拣机。吕潜龙等^[8]设计了一种安全可靠、空间利用率高的翻盘式快递自动分拣装置。

为加快中小型快递公司使用快递包裹自动分拣系统,本研究拟设计导向滚轮式快递分拣系统,并基于有限元软件的模态分析优化分拣轮机架结构,利用 ANSYS Workbench 对翻转结构进行响应面优化,实现机构轻量化与合理化。

1 系统设计

导向滚轮式快递分拣系统主要包括扫描装置、上包区、翻转结构、二级分拣包区、同步带组件及支撑结构等,如图 1 所示。通过同步带控制方式使分

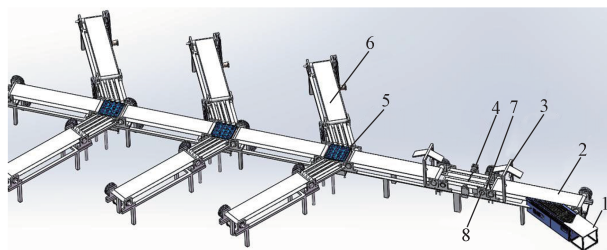
收稿日期: 2024-09-26

基金项目: “十三五”国家科技支撑计划项目(2016YFD0400301)

作者简介: 崔功卓,男,硕士生,主要研究方向为物流装备智能化, E-mail: 2080869889@163.com

通信作者: 巩雪,女,副教授,博士,硕士生导师,主要从事物流装备智能化研究, E-mail: gongxue@hrcbu.edu.cn

拣轮模组共同运动,让快递按照既定路线向前移动,且在移动过程中,根据物流码信息实时控制左右分拣快递作业。采用同步带控制方式,可以有效降低伺服电机等核心零部件的故障率,降低设备的维护成本,延长设备寿命。按多分支的分拣输送布局,将各个模块进行错开布置,以便于设备容纳更多的分拣单元,从而节省占地空间,提高工作效率。此外,导向滚轮式快递分拣机可以进一步优化配送仓库内的物流自动化流程,提高物流效率,并且降低由人员操作可能带来的安全隐患。



1—上包区; 2—输送带; 3—扫描装置; 4—翻转结构;
5—导向滚轮; 6—二级分拣包区; 7—同步带; 8—同步带轮。

图1 导向滚轮式快递分拣系统结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of guided roller courier sorting system

分拣机前半段是上包区、输送带、翻转结构,后半段由导向滚轮和二级分拣包区组成。包裹从上包区进入,经输送带送到扫描相机区域,相机扫描快递包裹上物流码,再将信息反馈给 PLC,PLC 根据对应的信息控制导向轮的方向、速度,以实现包裹分拣。分拣机无需人工进行面单信息识别、包裹分类和传输,实现了自动产品分类、翻转、输送、分拣作业,可以节省 70% 以上的劳动力成本,同时优化的环形结构即二级分拣包区使更多的人重新分配到更灵活的工作,如人工排序集包、人工排序等。人工排序集包是指在特定业务场景下,人工对归集好的信息包或数据集合等按照一定的规则或需求进行排序的操作。人工排序是指通过人工的方式,依据一定的标准或规则对事物进行顺序排列的行为。

1.1 扫描装置

本快递分拣系统中图像采集系统由两组扫描装置组成,每组均采用多摄像头并联工作,由 3 个工业摄像头、1 个光源和 1 个固定结构组成(见图 2)。一组扫描装置安装在翻转结构前的输送带上,用于检测包裹前面、中间和后面的信息;另一组扫描装置安装在翻转结构后输送带上,用于检测包裹翻转后

的信息。

本图像采集系统具有高精度、快速性、稳定性、灵活性和可靠性的优点。

1) 高精度:多个摄像头可以实现重叠拍摄、多角度拍摄,提高图像精度、识别准确性。

2) 快速性:多个摄像头同时工作可以提高拍摄速度和处理效率,从而大幅度提高操作速度。

3) 稳定性:使用多个摄像头可以保证当某一摄像头出现故障时,整个系统仍能正常运转,提高了系统的稳定性。

4) 灵活性:针对不同货物形态,自主选择使用多个摄像头或单一摄像头。

5) 可靠性:多摄像头可以解决在快递传输过程中由于颠簸、撞击等造成包裹上的二维码变形而不易识别问题,辅助后续的自动分类操作。

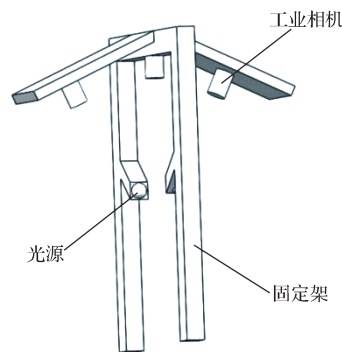


图2 扫描装置

Fig. 2 Scanning device

1.2 上包区

快递包裹上包区由称重区和上件区两部分组成,如图 3 所示。

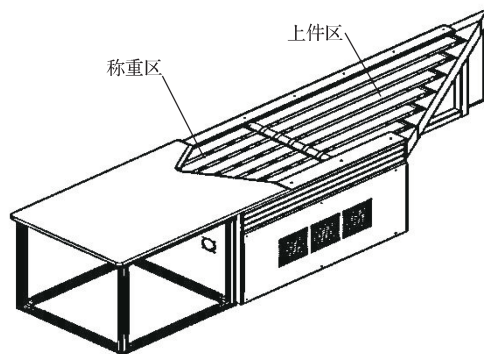


图3 上包区

Fig. 3 The upper packaging platform

称重区是皮带下方的压力传感器称重包裹。当遇到超载包裹时,皮带会失灵,并发送警报信息,工作人员剔除不符合标准的快递包裹。下一步通过机器视觉或人工筛选出尺寸不符合规格的快递包裹。上件区紧挨输送带,且其安装方向与输送带运动方向有一定夹角,以便于快递包裹能够更加顺利地进入和离开输送带,减少因速度不匹配而产生的撞击和故障。

1.3 翻转结构

翻转结构主要由一个三段错开的传送带、一个翻转板和一个具有相同自由度的旋转气缸组成(见图4)。各部件通过定位螺钉、螺栓、螺母和连接块与立柱连接, 翻转结构两端通过轴承支撑, 轴承与机架相连。翻转结构主要负责承载旋转部分的固定负载、静力负荷和运动负荷, 承受旋转矩和扭矩, 以及承担包裹部分的重量。包裹翻转时产生的惯性较大, 引起的冲击力可能会导致机器稳定性较差, 这可能会影响位置的准确性。为了确保稳定和精度, 需要合理的设计翻转结构。

根据坐标、自由程度和受力情况等因素, 翻转结构的设计需满足以下基本要求: 结构紧凑、惯性不太大、惯性定位准确、结构布局合理等。翻转板角度取值为 60° 。包裹经输送带送至翻转板前, 借助惯性力, 被锐角结构(翻转板与输送带的夹角为锐角)夹住做 180° 翻转。包裹翻转时, 运动要灵活, 导向性和平稳性要好。故从结构、行程、关节距离和载荷情况等因素出发, 合理选用分拣轮。

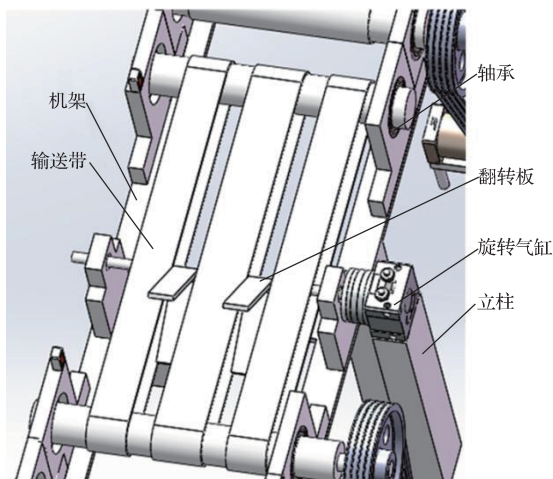


图4 翻转装置结构

Fig. 4 Structure of flipping device

1.4 分拣轮

分拣轮是快递包裹自动分拣系统中关键的组成部分。根据快递包裹的分拣特点设计分拣轮结构时, 应注意以下几点: 结构要简单紧凑; 在满足刚度与强度要求下, 质量要轻; 选取转动动力合适的滚轮, 以减少能量损耗、降低滚轮负载, 保证包裹不被推落到其他区域。

本文创新设计的分拣轮结构如图5所示。分拣结构包括滚轮和同步带两部分, 采用模块化结构即4个

引导轮构成一个元件, 4个元件分布在分拣结构中, 且元件之间的间距可根据包裹的外形和大小来调节, 以分类更容易形成模块化的产品。分拣轮转动是利用一个电机控制同步带带动4个滚轮动作, 分拣轮底部左右换向动作是通过一个电机输入带动4个同步带轮两两连接, 从而实现一个输入4个输出使得滚轮完成左右转动功能, 使得结构紧凑, 利用同步带传动保证了各个模块分拣轮的同步运动。同步带的动力输入经过键连接传送给滚轮, 使其控制简单易行, 提高准确性。

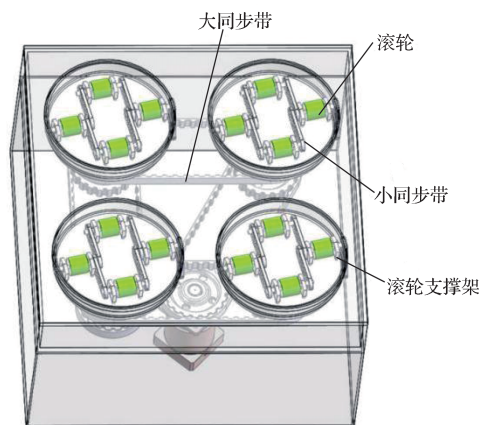


图5 分拣轮结构

Fig. 5 Structure of sorting wheel

1.5 分拣轮机架的模态分析

若分拣轮的工作频率与分拣轮机架结构的固有频率重合, 则会引起共振, 对分拣轮机架结构造成破坏^[9-12], 故对分拣轮机架结构的固有振动特性进行分析, 并结合谐响应分析确定分拣轮机架结构的共振频率。将分拣轮机架结构模型导入有限元分析软件中, 选用弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 的普通碳钢材质, 模态分析得到机身结构的前6阶固有频率振型图(见图6)。由图6可知, 1阶固有频率为 25.55 Hz 时, 平台结构整体轻微向右摆动, 最大变形量为 3.03 mm; 2阶固有频率为 25.55 Hz 时, 平台结构上层向右倾斜摆动, 最大变形量为 3.03 mm; 3阶固有频率为 37.15 Hz 时, 平台结构上层向右摆动, 最大变形量为 3.82 mm; 4阶固有频率为 94.68 Hz 时, 平台结构中间向下收缩, 最大变形量为 8.33 mm; 5阶固有频率为 130.63 Hz 时, 平台结构四个支撑部分靠拢摆动, 最大变形量为 3.16 mm; 6阶固有频率为 134.98 Hz 时, 平台结构上层波浪摆动, 最大变形量为 7.68 mm。分析结果表明, 分拣轮机架结构的振动主要集中在上部支撑部分和4个支撑脚上。

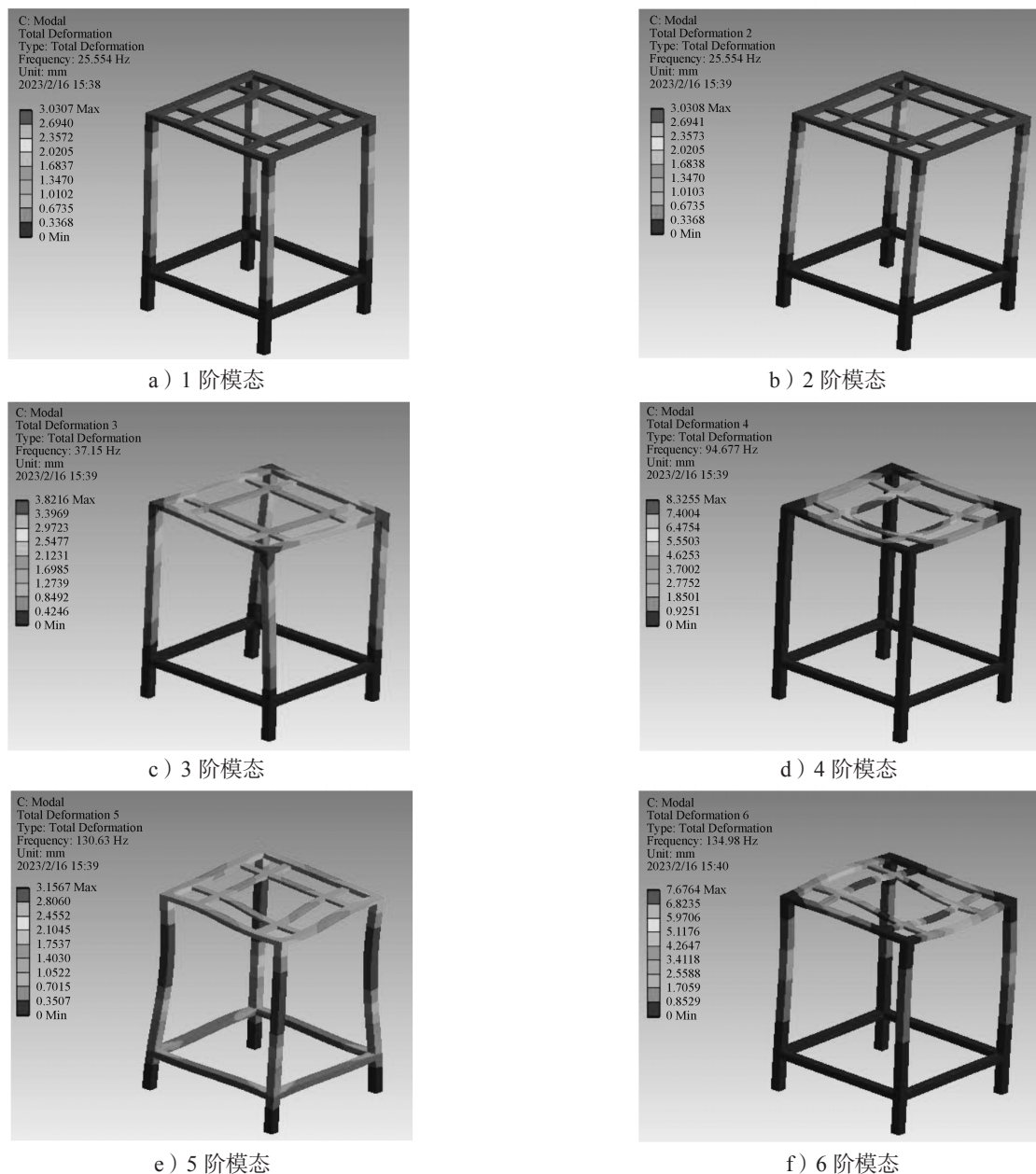


图6 分拣轮机架结构前6阶固有频率振型图

Fig. 6 Natural frequency vibration mode diagram of the first six orders of sorting wheel rack structure

综上,若电机、定位装置、同步带等部件的振动频率接近分拣轮机架结构机身的固有频率,就会导致共振现象^[13-16]。加之,分拣轮在工作过程中受到快递包裹移动带来的外部冲击,会导致振动加剧。此时平台结构的振幅增大,结构本身的薄弱环节容易产生破坏,在结构应力集中的地方也更容易产生裂纹。故应增加支撑脚的厚度以保证其刚度。

2 翻转结构优化

在确定翻转板材料的情况下,为了降低生产成

本、提高翻转效率,对翻转板的截面尺寸进行优化。尺寸优化作为结构优化设计的一种,包括目标函数、设计变量和约束条件3个要素^[17,18]。基于数学模型的优化设计方法不仅能加速设计流程,还能有效降低实验测试成本,并提高产品的工作效率及可靠性。

2.1 优化设计模块

在有限元软件 ANSYS Workbench 中用模块 DesignXplorer 对翻转结构进行优化,设置2个设计变量、3个约束条件和1个目标函数,并通过数值拟合得到输入与输出变量之间的关系函数进行结构优

化^[19,20], 优化流程如图7所示。

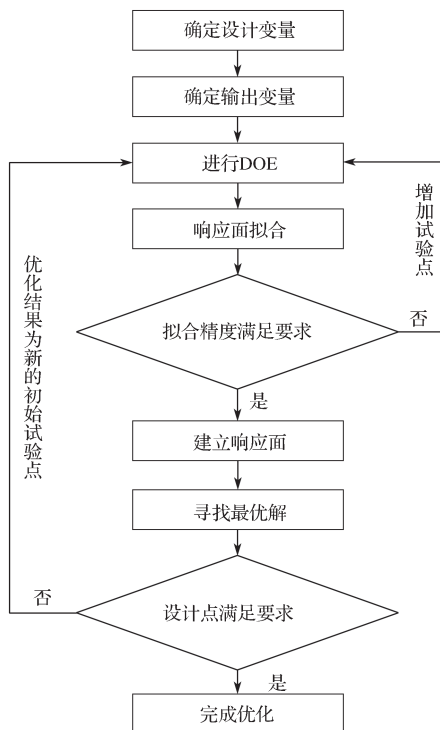


图7 优化设计流程图

Fig. 7 Flow chart of optimization design

2.2 建立数学模型

1) 设计变量

翻转结构是快递包裹翻转的关键部件。翻转结构的相关结构参数如图8所示。选用连接轴长度(P_2) 1000 mm 与翻转板壁厚(P_3) 20 mm 作为设计变量, 当截面参数发生变化时, 翻转结构的工作性能发生变化, 整机质量及生产成本也会受到影响。

2) 约束条件

约束条件是限制设计变量及性能参数的取值范

围。连接轴长度的上限值与下限值分别为 1100 mm 和 900 mm, 翻转板壁厚的上限值与下限值分别为 22, 18 mm。

3) 目标函数

在响应面尺寸中, 根据输入参数的个数采集设计参数的样本, 然后确定样本的位置。中心组合实验法是优化设计过程中常用的一种实验设计方法, 通过有限次数的实验数据, 寻找最优设计方案, 具有较高的实验效率和设计准确性。故采用中心组合实验法对翻转结构进行优化设计, 在设计变量连接轴长度和翻转板壁厚生成 9 个设计点即不同长度和壁厚组合。通过 9 个设计点的有限元模拟计算, 得出不同长度与壁厚组合产生的稳定性代价函数结果, 并通过二次插值函数建立响应曲面, 以获得更全面的数据和更精确的结果。设计变量(连接轴长度 P_2 、翻转板壁厚 P_3) 及目标函数(质量 P_1 、总变形 P_4 、等效应力 P_5) 的变化情况如图9所示。

4) 优化结果分析

通过响应面计算, 确定影响翻转结构等效应力、总变形和质量的主要因素。通过优化模块得到 3 个最佳设计候选点: 点 1 (925.65, 18.009), 点 2 (909.02, 18.007), 点 3 (976.85, 18.016)。这三组点结构优化参数计算完成后, 在响应面工作界面中选择二维曲线图模式, 观察连接轴长度 P_2 、翻转板壁厚 P_3 与翻转结构质量 P_1 的关系, 如图 10 和 11 所示。

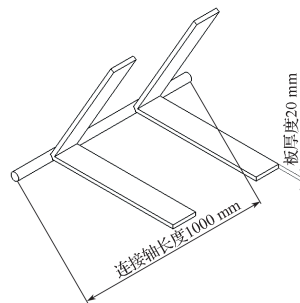


图8 翻转结构展开图

Fig. 8 Unfold diagram of flipping structure

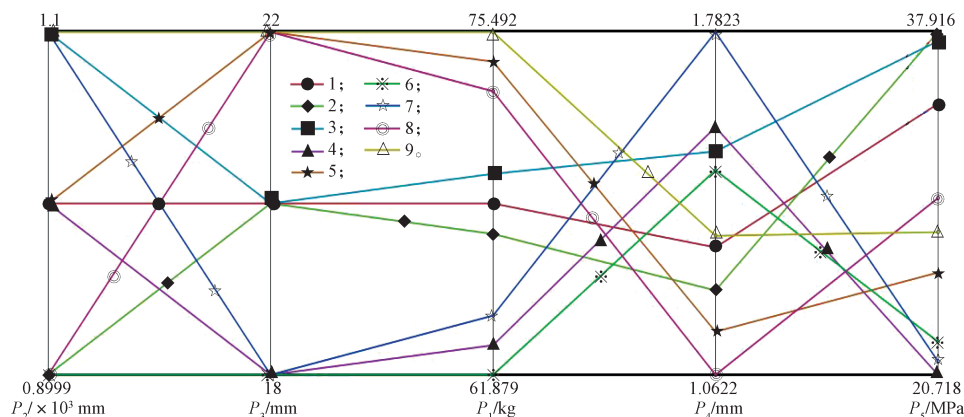
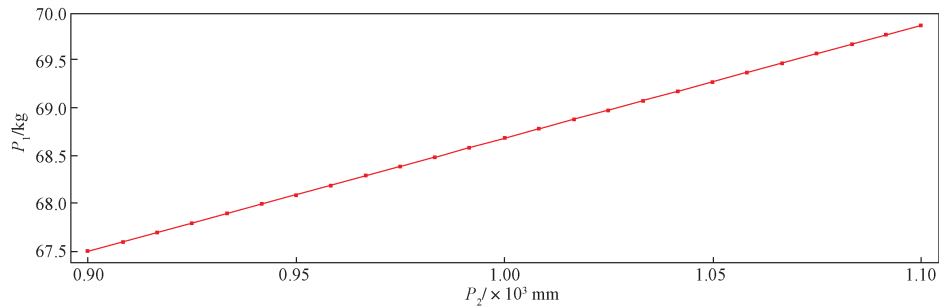
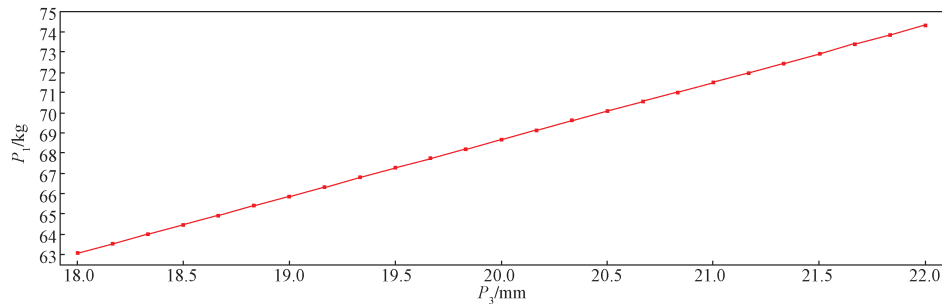


图9 翻转结构优化实验设计点平行参数图

Fig. 9 Parallel parameter diagram of design points for flipping structure optimization experiment

图 10 P_1 与 P_2 关系图Fig. 10 Relationship between P_1 and P_2 图 11 P_1 与 P_3 关系图Fig. 11 Relationship between P_1 and P_3

由图 10 和 11 可知, 翻转结构质量随着连接轴长度和翻转板壁厚的增大而增大。

在样本点中找到最优解, $P_2 = 925.65$ mm, $P_3 = 18.009$ mm。优化前后参数对比如表 1 所示。优化后, 翻转最大等效应力为 21.456 MPa, 较优化前降低了 37.46%, 这说明结构更加紧凑, 结构性能有所提高; 翻转结构质量由原来的 68.676 kg 减少到 62.207 kg, 较优化前降低了 9.42%, 这表明轻量化效果显著; 翻转结构的总变形由原来的 1.3295 mm 增加到 1.5083 mm, 这表明变形很小, 对结构的影响可以忽略不计。

表 1 优化前后参数对比

Table 1 Comparison of parameters before and after optimization

结构	P_2 /mm	P_3 /mm	P_1 /kg	P_4 /mm	P_5 /MPa
优化前	1000	20	68.676	1.3295	34.308
优化后	925.65	18.009	62.207	1.5083	21.456
优化效果	-7.435%	-9.9%	-9.41%	13.44%	-37.46%

3 结语

针对以往快递分拣系统占地面积大, 投入成本高, 无法满足不同的应用场景需求等问题, 本研究设

计并实现了一款可灵活扩展的导向滚轮式快递分拣系统。主要从以下几个方面进行优化设计:

1) 利用 SolidWorks 软件对快递分拣机和快递运载整体系统结构进行三维建模。

2) 利用 ANSYS Workbench 对分拣轮的机架进行模态分析, 得到前 6 阶固有频率和振型。分拣轮机架结构的振动主要集中在上部支撑部分和 4 个支撑脚。加之, 分拣轮在工作过程中会受到快递包裹移动带来的外部冲击, 导致振动加剧。故增加支撑脚厚度以保证其刚度。

3) 通过响应面结构优化模块对翻转板进行优化设计, 得到最佳值是连接轴长度 $P_2 = 925.65$ mm、翻转板壁厚 $P_3 = 18.009$ mm。优化后, 翻转结构质量由原来的 68.676 kg 减少到 62.207 kg, 较优化前降低了 9.42%。在减轻质量的情况下, 主要部件在使用中仍能够满足荷载要求。

总之, 本系统扩展性强, 可根据分拣需求灵活配置分拣机数量, 能够满足中小型快递公司对物流配送货物分拣的需要, 具有广阔的市场前景和极大推广价值。

参考文献:

[1] 国家邮政局. 2024 年全国快递业务量突破 1000 亿件

- [EB/OL]. (2024-08-13) [2024-09-20]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202408/content_6968031.htm.
- [2] 李 泽, 巩 雪, 刘京宇, 等. 基于 PLC 的快递分拣系统 [J]. 包装学报, 2023, 15(2): 18-22.
- [3] 李孝军. 大型快递分拣枢纽高层控制系统 [J]. 自动化与信息工程, 2019, 40(4): 35-38, 46.
- [4] 杨 钰, 杨 磊, 张晓楠. 一种应用于物流行业的自动分拣控制系统 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(4): 71-77.
- [5] 喜崇彬. 自动分拣系统市场现状与发展趋势 [J]. 物流技术与应用, 2019, 24(1): 82-84.
- [6] 王同旭. 摆轮分拣机技术发展与应用研究 [J]. 物流技术与应用, 2021, 26(7): 122-128.
- [7] 张雪怡. 一种物流分类用的新型三项分拣机 [J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(2): 42-43.
- [8] 吕潜龙, 阮学云. 一种翻盘式快递自动分拣装置的设计 [J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2021, 41(1): 62-67.
- [9] 吕思源, 赵润茂, 陈 刚, 等. 新型双压电制动高频压电点胶阀设计 [J]. 轻工机械, 2023, 41(3): 1-8.
- [10] 陈美宏, 徐传燕, 许春晓, 等. 基于 ANSYS 的汽车传动轴模态识别 [J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(8): 20-24.
- [11] 何家盼, 何俊艺. 基于 ANSYS 的汽车转向节模态分析研究 [J]. 时代汽车, 2023(11): 101-103.
- [12] 谢 苗, 张鸿宇, 任 泽, 等. 煤矿井下锚固群组动力响应特性分析 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(10): 278-288.
- [13] 付云开. 基于 ANSYS 的凸轮摇杆式播量调节装置模态分析 [J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(7): 81-85.
- [14] 钱露露, 娄 鹏, 章焕章, 等. 弧齿锥齿轮系统级模态分析方法研究 [J]. 机械传动, 2023, 47(5): 113-120.
- [15] 董 芳. LED 分拣机复合材料摆臂的静动态特性分析及结构优化 [J]. 机床与液压, 2018, 46(3): 84-86, 94.
- [16] 陈 磊, 孟新宇. 分拣机 L 型摆臂的静动态特性分析及结构优化 [J]. 机械工程与自动化, 2022(4): 90-92.
- [17] 郭北涛, 代国辉. 基于 Ansys Workbench 分拣机械手爪的仿真与优化 [J]. 山西焦煤科技, 2022, 46(9): 4-8.
- [18] 周 杭, 丁晓红. 基于 OptiStruct 的交叉带分拣小车轻量化设计 [J]. 电子科技, 2017, 30(8): 121-123.
- [19] 时强胜, 刘世豪. 面向芒果包装线的分拣机械手臂承载能力研究 [J]. 包装工程, 2018, 39(11): 193-197.
- [20] 刘 静, 陶毓杰. 快递分拣机的设计与部分仿真验证 [J]. 机械设计, 2022, 39(6): 22-27.

(责任编辑: 邓 彬)

Design and Simulation Optimization of Guided Roller Courier Sorting System

CUI Gongzhuo, GONG Xue, LI Ze, LI Xinyan

(School of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: In response to the low efficiency in the courier delivery industry, a guided roller courier sorting system is designed to achieve intelligent and rapid sorting of courier parcels through the cooperation of the flipping structure and the guided roller sorter. SolidWorks software is used to model the scanning device, the upper package area, the flip structure, the sorting wheel structure and the overall structure of the courier transportation in three dimensions. Modal analysis of the sorting wheel frame is carried out using ANSYS Workbench, and it shows that the thickness of the support legs should be increased to ensure their stiffness. The optimal design of response surface based on DesignXplorer module can increase the overall stiffness of the tilting structure and reduce the total mass of the structure. After optimization, the total mass is reduced by 9.42%, which has obvious lightweight effect, and the strength and stiffness can meet the calibration conditions. The system is highly scalable and the number of sorters can be flexibly configured according to the sorting requirements. It can meet the needs of small and medium-sized courier companies for sorting logistics and distribution goods, and has a broad market prospect and great promotion value.

Keywords: courier sorting; structural design; modal simulation; lightweighting