

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.003

基于卷烟配送质效提升的单人单车技术研究

沈晔超^{1,2}, 丁兆罡³, 赵菊⁴, 张留厂⁵, 崔国臣⁵, 张俊峰⁵

(1. 合肥工业大学机械工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 安徽机电职业技术学院电气工程学院, 安徽芜湖 241002; 3. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009; 4. 合肥工业大学管理学院, 安徽合肥 230009; 5. 周口市烟草公司卷烟物流配送中心, 河南周口 466000)

摘要:针对当前卷烟物流领域出现的配送效率欠佳、人工成本居高不下、交接差错难以完全避免的现状, 文章提出一套基于“单人单车”模式的智能配送系统, 通过设计包含智能立体仓库、工业机器人、自动升降平台等模块的配送车辆自动化改造方案, 同时开发集成动态路径优化、实时状态监控、电子签收等功能的智能管理平台, 生成“感知-决策-执行-进化”全流程协同的工作体系。依据成本收益的定量核算, 该系统 2.8 a 即可收回投资成本, 经济效益显著; 凭借差错控制的量化核验, 在实施智能化改造之后, 单车配送差错数量由以往每车年均 0.350 次降至 0.063 次, 差错成本下降明显。研究表明, 单人单车智能配送模式可有效替代传统配送方式, 全面提高卷烟物流的运营效率以及差错管理水平, 为卷烟行业智能转型升级提供了可靠的理论基础和可普及的技术路线。

关键词: 卷烟物流; 单人单车配送; 车辆自动化改造; 人机协同智能系统; 差错控制

中图分类号: F253.4 文献标志码: A 文章编号: 1003-5060(2026)01-0022-07

Single-operator vehicle technology for enhancing quality and efficiency in cigarette distribution

SHEN Yechao^{1,2}, DING Zhaogang³, ZHAO Ju⁴, ZHANG Liuchang⁵, CUI Guochen⁵, ZHANG Junfeng⁵

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Electrical Engineering, Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241002, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 5. Cigarette Logistics Distribution Center, Zhoukou Tobacco Company, Zhoukou 466000, China)

Abstract: Persistent inefficiencies, rising labor costs, and frequent handover errors in cigarette logistics are addressed through an intelligent single-operator vehicle delivery model. Delivery vehicles are retrofitted with intelligent stereo warehouses, industrial robots, and automated lift platforms, while an integrated management platform is developed to enable dynamic route optimization, real-time status monitoring, and electronic proof of delivery (e-POD), thus creating a closed-loop perception-decision-execution-evolution workflow. Cost-benefit analysis indicates a payback period of roughly 2.8 years, demonstrating significant economic benefits. Quantitative verification of error control shows the annual error rate per vehicle dropping from 0.350 to 0.063 with the implementation of intelligent retrofit, markedly reducing error-related expenses. The proposed model surpasses conventional delivery methods, improves the operational efficiency and error management level of cigarette logistics, and provides a reliable theoretical foundation and a scalable technical roadmap for the intelligent transformation and upgrading of cigarette logistics.

Key words: cigarette logistics; single-operator vehicle delivery; vehicle automation retrofit; human-machine collaborative intelligent system; error control

收稿日期: 2025-09-12; 修回日期: 2025-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175013); 合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2025JSKF0504)

作者简介: 沈晔超(1987—), 男, 安徽芜湖人, 合肥工业大学博士生;

赵菊(1979—), 女, 安徽怀远人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师;

张俊峰(1976—), 男, 河南周口人, 周口市烟草公司高级经济师, 通信作者, E-mail: zhangjunfeng2003@tom.com.

0 引言

随着现代产业体系加速朝着高效化、绿色化、智能化发展^[1],卷烟物流长期以来采用的“双人单车”配送模式,逐渐显露出人力浪费、作业成本增大、交接差错率难以避免等结构性弊端^[2]。而信息技术与智能装备的普及让这些短板更加突出,行业亟需探索更为高效、可靠的“单人单车”作业模式。

发达经济体在该领域已积累成熟经验。日本烟草公司依托面向配送线路优化的智能导航系统,结合高机械化装卸方案,为单人操作模式提供了可行的实践基础^[3]。欧美企业则聚焦组合优化与机器学习的深度融合构建“预测-优化”闭环:文献^[4]利用机器学习求解了 NP-hard 的车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP);文献^[5]提出的 SPO(smart predict-then-optimize)框架通过在模型结构中嵌入优化问题,显著降低传统两阶段方法的决策误差;文献^[6]借助可微随机扰动,将梯度反向传播扩展到组合优化,支持库存控制等多阶段决策。在供应链透明度研究方面:文献^[7]明确了链路结构与透明度的内在联系;文献^[8]提出“云供应链”模型,通过整合物联网与区块链实现多源数据协同;文献^[9]构建了一套“透明度管理系统-工具-结果”三元框架,揭示了数据融合对可追溯性和韧性的促进方式。需要说明的是,上述研究多把通用城配或跨企业供应链当作基准场景展开,对单人作业时的装卸工序细化、作业安全约束以及现场操作时延等问题的关注有所欠缺;有关预测-优化方法在任务粒度、参数化约束以及工程可部署性上,同样没有对卷烟配送做针对性的刻画;而透明度的相关研究大多建立在较高的数据共享及系统一体化水平之上,对多端协同中的数据一致性与落地条件的探讨比较有限。这些成果为行业实践夯实了可靠的技术基础,但还是要结合卷烟配送具体业务流程及场景约束进行工程化集成与验证。

在方法和体系层面取得进展的同时,相关技术在业务实践中也逐步构建起端到端的应用体系。得益于上述技术基础,国外烟草及快消品企业已在集配中心部署高架立体仓储系统,并在末端上线无感 e-POD(electronic proof of delivery)技术,将单票签收时间压缩至数秒、拣选差错率降至千分级^[10];无人车、楼宇配送机器人及 RFID-Vision 联控方案的落地,则进一步验证了“单人(或无人)+智能装备”闭环配送的可行性。

“十四五”期间,国内卷烟物流已全面推进智慧仓配的升级,依旧主要采用“双人单车”的作业方式,结合近年权威研究,订单拣选等人工作业平均约占仓库运营成本 55%,据此保守估计人工费用约占配送总成本的 1/2,同时,履约差错会引发复拣、退换和再配送等显著链式成本,规模企业年化损失可达千万元级^[11]。江浙、川渝等区域单人单车试点表明,在实施线路组织重构、引入弹性调度与数字监管后,日均配送效率提高了 10%~20%,差错次数下降逾 70%。与国际同类实践对比,国内研究主要还停留在经验总结阶段,在车辆一体化改造、“感知-决策-执行-进化”协同控制和差错经济风险量化等关键问题上未开展系统性的探讨工作。目前学术界在部分环节取得了一定的进展:文献^[12]打造了以运输时间达到最短、成本降至最低、车辆利用率提至最高为目标的调度模型;文献^[13]按照运输与运营成本,提出区域物流中心总成本的模型,还运用遗传算法给出选址办法;文献^[14]针对订单碎片化愈发明显的趋势提出双层算法,为承运标段划分以及拼车配载提供了理论参考。然而针对“双人”向“单人”过渡的系统化研究尚显不足。

鉴于此背景,本文以卷烟供应链为应用场景,针对现有卷烟物流双人配送模式存在的装卸效率不高、路径规划欠佳、安全风险偏多等问题,提出“单人单车”配送的新型解决方案。该方案将信息化调度与机械化装卸融合为一体,对车辆功能与作业流程实施一体化重塑处理,在保障单人作业既安全又稳定的前提下,实现成本下降与效率上扬,为卷烟物流的降本增效提供可付诸实践的技术路线。

1 卷烟配送流程和工作原理

1.1 传统的双人单车配送流程

在烟草物流体系中,“双人单车”配送模式长期作为主要作业方式被广泛采用。该模式突出的特征是每辆配送车由 2 名工作人员一起执行任务,即驾驶员与配送员分工协作,从而实现作业安全与运行效率之间的有效平衡。驾驶员主要把控车辆的操控和行驶安全相关事宜,在卷烟装卸以及向客户交付时,驾驶员也同时参与辅助配送员执行现场安全警戒等相关工作;配送员则是卷烟交接的核心实施者,承担起卷烟商品交付、签收以及同客户进行沟通等现场服务内容。

“双人单车”配送模式作业流程如图 1 所示。



图1 “双人单车”配送模式作业流程图

1.2 单人单车配送模式构建

“单人单车”配送模式体现为每辆配送车辆仅由1名工作人员单独作业,完成囊括卷烟装载、运输、交付及订单签收整个流程的工作,这种模式在优化人力资源布局、增强作业灵活性的同时,对配送过程的安全和效率提出了更高的要求,应依托智能技术手段进行保障。

单人自动化配送的标准流程包括以下7个环节:车辆出车前检查→订单下载→卷烟装载→配送前核对→在途配送→配送任务完成→返回配送中心。

在机械系统设计方面,为实现单人独自操作条件下的高效配送,且保证配送时作业人员无需下车即可达成与客户的交接工作,必须对传统配送车厢实施系统性自动化改造。通过在车厢内部引入智能立体仓储系统、工业机器人(如机械臂或码垛机等)、自动升降平台等自动化装置,达成车辆在配送点短暂滞留期间的快速装卸与高效协同。这种人机协作的自动化设计,有利于提高配送效率,缓解劳动压力。

配送车辆机械结构改造示意图如图2所示。

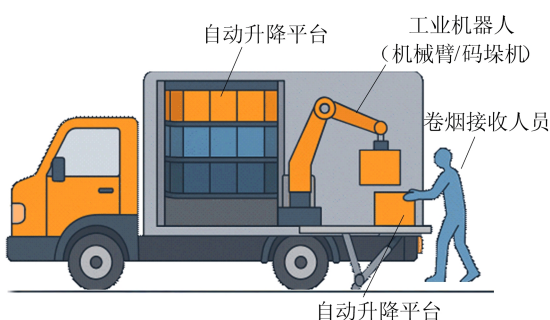


图2 配送车辆机械结构改造示意图

2 配送车辆的智能化改造方案

2.1 智能化配送系统的方案设计

为适应“单人单车”配送模式的运行需求,需

同步推进信息化系统的配置与升级,构建覆盖全流程的智能配送管理平台。该系统围绕卷烟配送的关键业务环节,支持数据的实时采集、交互与动态调度,实现对整个配送过程的可视化监控与智能化管理。智能化配送系统架构的设计方案如图3所示。

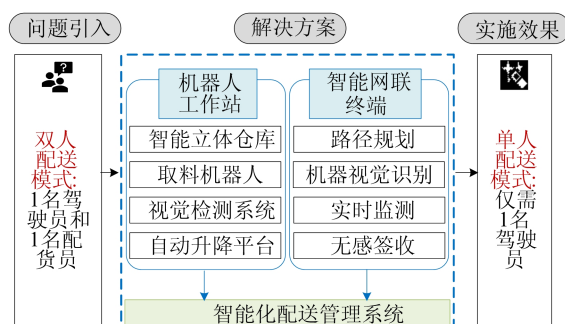


图3 智能化配送系统架构的设计方案

背靠大数据分析和物联网感知技术,智能化配送系统需对零售终端、卷烟产品以及配送人员的关联关系开展模型搭建与分析研判,建立针对配送线路优化与动态调度的算法模型,在给出最优路径方案的同时,切实提升整体配送效率。该系统采用无感签收技术,同步与高精度传感器以及数据采集装置配合,达成供货端与零售终端之间的迅速交付,大幅简化操作程序,降低人工介入的频次。

2.2 模块化与自动化设备的集成应用

2.2.1 智能立体仓储集成系统设计模型

本文设计的车厢内智能立体仓储集成系统结构示意图如图4所示。

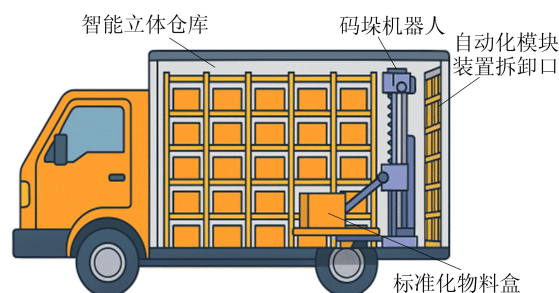


图4 车厢内智能立体仓储集成系统结构示意图

为了增进单人操作状态下的装卸效率与作业便利性,本研究提出一种依托模块化结构的配送车辆智能化改造方案。该方案将模块化智能立体仓库系统集成到车厢内部,模块单元可按照卷烟包装的尺寸规格进行个性化配置,以实现高效存

放与快速出入库作业,通过优化既有的直动式伸缩取料结构,并引入小型码垛机器人与标准化物料盒协作工作,车厢内部结构被改造成为高度灵活的智能立体仓储单元。此项改造显著提升了货物存储的密度,也拉高了作业自动化水平和响应效率。

2.2.2 升降平台参数设计与计算分析

在烟草配送过程中,码垛机器人将卷烟物料从立体仓库中提取,通过送料窗口传递至车厢外部,由接收人员完成交付。为保障卷烟物料传递时的安全以及接收人员操作过程中的舒适便捷,应对送料窗口高度 H_w 以及升降平台行程 h 进行科学设计,设计目标为在达到防盗安全标准的基础上,结合人体工程学相关参数,厘定最适宜的人机作业高度。升降平台与送料窗口结构示意图如图 5 所示。

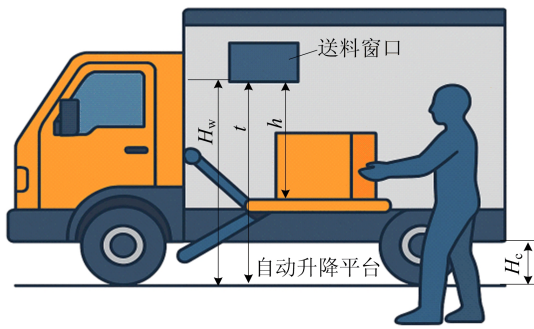


图 5 升降平台与送料窗口结构示意图

1) 送料窗口防盗高度计算。首先进行人体极限探窗高度计算。依据 GB/T 10000—2023《中国成年人人体尺寸》^[15],95th 百分位成年男性的肩高为 1.474 m,上臂、前臂、手的长度分别为 0.347、0.263、0.198 m,考虑垫脚高度 0.05 m 以及手臂上举 15°、身体侧倾 10°,计算可得最大探窗高度为:

$$Z_{\max} \approx 1.474 \text{ m} + 0.05 \text{ m} + \sin 15^\circ \cos 10^\circ \times (0.347 + 0.263 + 0.198) \text{ m} \approx 1.73 \text{ m} \quad (1)$$

然后确定窗口高度。为确保车外人员无法接触车内物料,增加 0.12 m 的安全高度^[16],则窗口下沿高度需满足:

$$H_w \geq Z_{\max} + 0.12 \text{ m} = 1.85 \text{ m} \quad (2)$$

最后得出结论,窗口下沿设置为 1.85 m 可以有效防止地面行人未经许可获取物料。

2) 升降平台运行范围设计。升降平台设计需配合可折叠放烟台结构,确保平台在行车状态下自动收起,在装卸作业时自动升降至最优作业

高度。其结构件(如支撑杆和传感器)采用嵌入式布设,仅在需要时伸展,有效节约车厢空间并降低劳动强度。

配送车辆初始设定参数见表 1 所列。表 1 中: $H_w = H_c + t$; V_{opt} 取值参考文献^[17]。

表 1 配送车辆参数初始设定参数

| 序号 | 参数符号 | 含义 | 参数值 |
|----|------------------|-------------|--------|
| 1 | H_c | 车厢地板中心高度 | 1.55 m |
| 2 | t | 车厢地板至窗口下沿高度 | 0.30 m |
| 3 | H_w | 窗口下沿高度 | 1.85 m |
| 4 | h | 升降平台降幅 | 变量 |
| 5 | V | 人手垂直作业高度 | ≤可达高度 |
| 6 | V_{opt} | 最佳工效高度 | 0.75 m |
| 7 | m | 单箱卷烟质量 | 4 kg |

3) 搬运工效学分析与行程计算。首先进行搬运工效学分析。采用 NIOSH 推荐的 RWL (recommended weight limit) 模型与搬运指数 (lifting index, LI) 评估升降平台设计的合理性,其公式如下:

$$R_{\text{WL}} = C_L M_H M_V M_D M_A M_F M_C \quad (3)$$

式(3)中,各乘数含义与取值范围见表 2 所列。

表 2 RWL 乘数物理含义和取值范围

| 序号 | 乘数 | 物理含义 | 取值范围 |
|----|-------|--------|---------|
| 1 | C_L | 负荷常数 | 固定值 |
| 2 | M_H | 水平距离乘数 | 0.3~1.0 |
| 3 | M_V | 垂直高度乘数 | 0~1.0 |
| 4 | M_D | 垂直位移乘数 | 0.7~1.0 |
| 5 | M_A | 躯干扭角乘数 | 0.5~1.0 |
| 6 | M_F | 频率乘数 | 0.3~1.0 |
| 7 | M_C | 握持乘数 | 0.6~1.0 |

从主观感受上判断,为了完成搬运的某个姿势越糟糕,人体搬运时越不舒服,对应的乘数就会降低, R_{WL} 就会减小。

用实际质量 m 与 R_{WL} 相除,即可得到 LI 值:

$$I_L = \frac{m}{R_{\text{WL}}} \quad (4)$$

当 $I_L \leq 1$ 时,表示可接受的安全搬运区间;当 $1 < I_L \leq 3$ 时,表示可执行但具有改进空间的搬运;当 $I_L > 3$ 时,表示较困难,高风险搬运操作,应避免。

然后进行升降行程结果计算分析。将 R_{WL} 的 7 个因子进行分组:

$$\underbrace{C_L}_{\text{负荷常数}} \times \underbrace{M_H M_D M_A M_F M_C}_{\text{高度无关5项}} \times \underbrace{M_V(h)}_{\text{高度敏感}} \quad (5)$$

在实际工况下,假设搬运姿势合理,无躯干扭转,搬运频率较低(≤6 次/min),取 $M_H = 0.625$,

$M_F=0.91, M_A=M_C=1.00, M_D=0.97$, 则有:

$$p = \begin{bmatrix} M_H \\ M_D \\ M_A \\ M_F \\ M_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.625 \\ 0.97 \\ 1.00 \\ 0.91 \\ 1.00 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$K = C_L \times \prod_{i=1}^5 p_i = 23 \times 0.625 \times 0.97 \times 1.00 \times 0.91 \times 1.00 = 12.69 \quad (7)$$

$$\begin{cases} V(h) = 1.85 - h, \\ M_V(h) = \max\left\{0, 1 - \frac{|V(h) - 0.75|}{0.30}\right\}; \\ V(h) > 1.85, \quad M_V(h) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

分别将升降平台行程 h 设置为 0、0.80、1.10 m 并代入上述公式,得到的结果见表 3 所列。

表 3 升降行程与搬运指标评估

| h/m | 手部高度/m | M_V | R_{WL}/kg | I_L | 作业评价 |
|-------|--------|-------|-------------|----------|----------|
| 0 | 1.85 | 0 | 0 | ∞ | 无法取物 |
| 0.80 | 1.05 | 0.33 | 4.22 | 0.95 | 勉强可取,易疲劳 |
| 1.10 | 0.75 | 1.00 | 12.69 | 0.32 | 推荐值,操作舒适 |

推荐把升降平台最大下降高度设置成约 1.10 m,在实现 1.85 m 窗口防盗要求的同时,保障接收人员操作既舒适又高效。为符合个体的多样化差异,也可做适度改动,但通常情况下,平台下降高度需达到 0.80 m 及以上。

2.3 全流程智能化与安全可视化管理

为构建安全、可控的现代化物流系统,本文设计基于智能感知与行为分析的安全管控方案。系统依靠车载高清摄像头、传感器等装置,实现对驾驶行径、车厢状态和外部环境的实时审视;服务器端借助智能识别算法检测疲劳驾驶、违规行为的风险情况,并且依靠语音提示或远程预警实施干涉;系统借助加密机制对全程的音视频数据进行存储,拥有对责任追溯及风险复盘的能力;以集成监控调度平台为依托,结合 5G 通信、边缘计算加上云存储技术,达成对运输全程的高频数据采集与动态反馈,保障配送过程安全、可信且实现可视化管理。车载智能监控-边缘协同安全管控系统如图 6 所示。

从业务结构这个维度,系统把配送过程划分成“实体层”和“数据层”2 个并行层面,保障物流配送与信息同步通行,经过系统升级及流程再造,切实取代传统的低效率信息传送模式,显著提升

配送数据处理的智能化与自动化水平,为实现从“双人配送”向“单人智能配送”的转型提供支撑。整体配送业务流程图如图 7 所示。

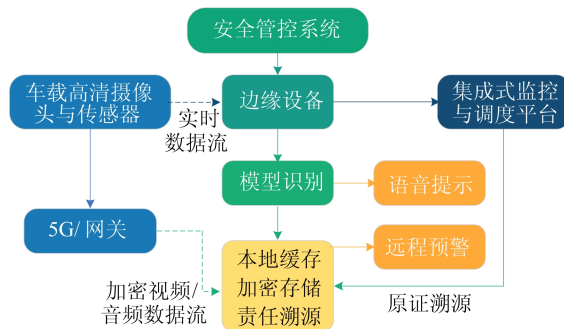


图 6 车载智能监控-边缘协同安全管控系统

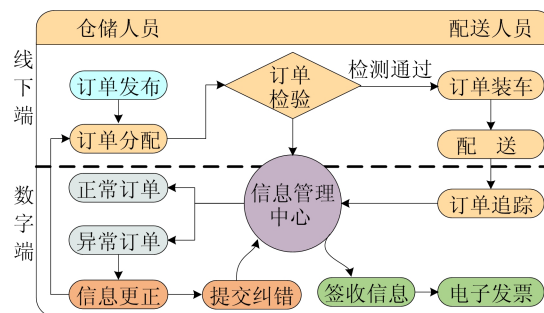


图 7 配送业务流程图

3 改进后的配送能效提升分析

按照“成本优化→差错控制”的分析路径,对“单人单车”卷烟配送模式的经济性和可行性进行量化论证。

3.1 成本结构

改造后,每辆配送车仅需 1 名操作员。设置参数如下: W 为人均年薪(含五险一金); C_0 为单车一次性改造费用; C_m 为年度维保费用; d 为折旧年限; r 为贴现率; V_{NP} 为净现值(net present value, NPV); T_{pay} 为投资回收期。

年度现金流为:

$$\Delta C_{yr} = (2W - W) - C_m = W - C_m \quad (9)$$

以配送人员行业均薪 $W=(11 \pm 1)$ 万元与维保 $C_m=(3.5 \pm 0.5)$ 万元计,可得 $\Delta C_{yr}=(7.5 \pm 1.5)$ 万元/(车·a)。

$$V_{NP} = -C_0 + \sum_{t=1}^d \frac{\Delta C_{yr}}{(1+r)^t} \quad (10)$$

若采用国产化方案,取初始投资 $C_0=(21 \pm 3)$ 万元、贴现率 $r=8\%$ 、折旧期 $d=6$ a,则有:

$$\begin{aligned} V_{NP} &= +13.67 \text{ 万元/车} > 0, \\ T_{pay} &= C_0/\Delta C_{yr} \approx 2.8 \text{ a} \end{aligned} \quad (11)$$

综上所述,改造投资可在 2.8 a 内收回,剩余 3.2 a 进入纯收益期,经济可行性显著。

3.2 配送与签收环节人为差错分析

传统“双人单车”流程中的主要差错集中于配货和签收 2 个环节:拣选差错率 p_{pick} 为 1%~3%;手工签收误录率 p_{pod} 约为 0.5%。

系统改造后,差错控制能力显著增强。

1) 配货端:立体仓储系统通过条码核对,拣选准确率大于等于 99.9%;

2) 签收端:电子签收(e-POD)系统整合订单编号与 GPS 数据,误录率降至 0.05% 以下;

3) 车载核验:RFID+视觉系统实时比对“货物-配送点”,不匹配即报警。

参照道路货运综合保险的赔付数据,将单次差错的平均经济损失 C_{err} 设为 (0.8 ± 0.2) 万元,基准差错强度 $\lambda_0 = (0.35 \pm 0.05)$ 次/(车·a)。车载核验检出率 $\rho = 0.82 \pm 0.04$,则剩余差错强度可以表示为:

$$\lambda_1 = (1 - \rho)\lambda_0 \quad (12)$$

将中值 $\rho = 0.82$, $\lambda_0 = 0.35$ 次/(车·a)代入式(12),计算可得 $\lambda_1 = 0.063$ 次/(车·a)。

进行波动区间分析,最差情况和最佳情况分别为:

$$\begin{aligned} \rho_{min} &= 0.78, \quad \lambda_{0-max} = 0.40 \text{ 次/(车·a)}, \\ \lambda_{1-max} &= (1 - 0.78) \times 0.40 \text{ 次/(车·a)} = \\ &0.088 \text{ 次/(车·a)} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \rho_{max} &= 0.86, \quad \lambda_{0-min} = 0.30 \text{ 次/(车·a)}, \\ \lambda_{1-min} &= (1 - 0.86) \times 0.30 \text{ 次/(车·a)} = \\ &0.042 \text{ 次/(车·a)} \end{aligned} \quad (14)$$

因此,改造后系统的剩余差错强度区间 $\lambda_1 \in [0.042, 0.088]$ 次/(车·a)。

对应的期望差错损失为:

$$E[L_0] = \lambda_0 C_{err} = (0.28 \pm 0.07) / (\text{车} \cdot \text{a}) \quad (15)$$

$$E[L_1] = \lambda_1 C_{err} = (0.05 \pm 0.02) / (\text{车} \cdot \text{a}) \quad (16)$$

差错成本削减率为:

$$R_{err} = 1 - \frac{E[L_1]}{E[L_0]} \approx 82\% \quad (17)$$

即通过车载智能核验和电子签收闭环,可将人为差错成本压缩至原水平的 18% 以下,显著提升了配送可靠性与经济效益。

4 结 论

本文针对传统“双人单车”卷烟配送模式在配

送效率、人力成本及差错管控方面的局限性,开发并验证了一套适配“单人单车”作业场景的智能配送系统,采用对车辆机械结构的优化与信息系统的集成式应用,极大提升了卷烟物流作业的自动化程度及运行安全性,得出以下主要结论。

1) 在机械系统方面,设计了一种集立体仓储单元、升降作业平台和码垛机器人于一体的智能车厢结构。该结构在确保车外防盗安全的前提下,可实现高效的自动化装卸作业。通过搬运工效学分析发现,当平台下降至 1.10 m 时,操作者的操作舒适性最佳,推荐重量限值 R_{WL} 和负荷指数 I_L 均处于合理范围内。

2) 在信息系统上面,构建了包含路径规划、状态监测、电子签收等功能模块的智能配送平台。该平台达成了配送全流程的可视化及闭环管理模式,大幅增进了作业灵活性与配送的精确比率。

3) 在经济效益方面,通过成本收益分析可知,单车智能化改造的投资回收周期约为 2.8 a,系统在进入稳定运营期后可持续带来经济收益,具有良好的应用推广前景。

4) 在差错控制方面,引入基于车载 RFID 与视觉识别的联合核验机制后,系统差错率由原来的每车每年 0.35 次下降至 0.063 次,差错成本降低至传统模式的 18% 以下,显著增强了系统的配送准确性与运行安全性。

综上所述,构建“单人单车”智能配送系统能有效替换人力,提高工作效率,降低操作方面的风险,有着较强的实用价值与推广可行性,顺应烟草物流行业智能化转型背景下的实际需求。

[参 考 文 献]

- [1] 沈坤荣,周铃铃. 数实融合推动现代化产业体系建设的机制与路径[J]. 中国特色社会主义研究, 2025(1): 34-43.
- [2] 裘琳,周海云,汤杰,等. 基于智慧物联网技术住院部药品闭环可追溯管理模式建立与效果评价[J]. 医药导报, 2024, 43(10): 1689-1694.
- [3] DING W, ZHANG Q, DAI Y, et al. Design and implementation of automatic material transport vehicle based on visual navigation[C]//2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA). [S. l.]: IEEE, 2024: 1580-1584.
- [4] BOGYRBAYEVA A, MERALIYEV M, MUSTAKHOV T, et al. Machine learning to solve vehicle routing problems: a survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(6): 4754-4772.

(下转第 35 页)

- [10] CURTO-CARDENAS D, CALAF-CHINA J, BRAVO D P M, et al. Cold expansion process with multiple balls; numerical simulation and comparison with single ball and tapered mandrels[J]. *Materials*, 2020, 13(23): 36-55.
- [11] 王强, 赵勇, 倪孟龙. 高干涉量压合衬套强化铝合金孔结构的疲劳性能[J]. *机械工程材料*, 2020, 44(7): 46-50.
- [12] FAGHIH S, BEHRAVESH S B, SHAHA S K, et al. Effect of split sleeve cold expansion on fatigue and fracture of rolled AZ31B magnesium alloy[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 123: 703-715.
- [13] 王彦菊, 王欣, 沙爱学, 等. Ti₂AlNb 合金孔挤压加工残余应力仿真与疲劳实验[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(4): 66-74.
- [14] PUCILLO G P. The effects of the cold expansion degree on the fatigue crack growth rate in rail steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 164: 107-130.
- [15] WANG Y, ZHU Y, HOU S, et al. Investigation on fatigue performance of cold expansion holes of 6061-T6 aluminum alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 95: 216-228.
- [16] CAO X, ZHANG P, LIU S, et al. A novel hole cold-expansion method and its effect on surface integrity of nickel-based superalloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 59: 129-137.
- [17] 马世成, 王欣, 宋颖刚, 等. 孔挤压芯棒导端角对 TC17 钛合金孔结构表面完整性及疲劳性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(4): 75-82.
- [18] ACHARD V, DAIDIE A, PAREDES M, et al. Optimization of the cold expansion process for titanium holes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(6): 1500626.
- [19] WANG C, ZOU F, ZHOU E, et al. Effect of split sleeve cold expansion on micro structure and fatigue performance of 7075-T6 aluminum alloy holes[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 167: 331-339.
- [20] 唐伟, 林忠亮, 吴保全, 等. 孔结构压合衬套冷挤压强化的疲劳寿命试验研究[J]. *航空精密制造技术*, 2022, 58(4): 11-15.
- [21] 林忠亮, 白清顺, 王洪飞, 等. 孔用衬套冷挤压的强化机理与疲劳寿命研究进展[J]. *表面技术*, 2023, 52(4): 1-14.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 27 页)

- [5] ELMACHTOUB A N, GRIGAS P. Smart “predict, then optimize”[J]. *Management Science*, 2022, 68(1): 9-26.
- [6] BERTHET Q, BLONDEL M, TBOUL O, et al. Learning with differentiable perturbed optimizers[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, 33: 9508-9519.
- [7] GUALANDRIS J, LONGONI A, LUZZINI D, et al. The association between supply chain structure and transparency: a large-scale empirical study[J]. *Journal of Operations Management*, 2021, 67(7): 803-827.
- [8] IVANOV D, DOLGUI A, SOKOLOV B. Cloud supply chain: integrating Industry 4. 0 and digital platforms in the “Supply Chain-as-a-Service”[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 160: 102676.
- [9] MONTECCHI M, PLANGGER K, WEST D C. Supply chain transparency: a bibliometric review and research agenda [J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 238: 108152.
- [10] MADHWAL Y, BORBON-GALVEZ Y, ETEMADI N, et al. Proof of delivery smart contract for performance measurements[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 69147-69159.
- [11] DIEFENBACH H, GROSSE E H, GLOCK C H. Human-and-cost-centric storage assignment optimization in picker-to-parts warehouses[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 315(3): 1049-1068.
- [12] 欧阳世波, 张森寒, 谢俊明, 等. 计及多目标约束的成品卷烟销售订单配送调度优化[J]. *中国烟草学报*, 2024, 30(2): 80-91.
- [13] 董坤, 钟宇, 徐宏伟, 等. 基于遗传算法的卷烟区域物流配送中心选址方法[J]. *烟草科技*, 2025, 58(3): 103-112.
- [14] 庄文杰, 邹翔宇, 孙庆平, 等. 卷烟承运标段划分模型研究[J]. *中国烟草学报*, 2023, 29(5): 112-119.
- [15] 全国人类工效学标准化技术委员会(SAC/TC 7). 中国成年人人体尺寸: GB/T 10000—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 3.
- [16] ISO. Safety of machinery-safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs: ISO 13857: 2019 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2019: 1-28.
- [17] RANA VOLO A, AJOUDANI A, CHINI G, et al. Adaptive lifting index (aLI) for real-time instrumental biomechanical risk assessment: concepts, mathematics, and first experimental results[J]. *Sensors*, 2024, 24(5): 1474.

(责任编辑 胡亚敏)