DOI: 10.3901/JME.2019.14.206

多层穿梭车系统输送机缓存长度建模与优化^{*}

秦艺萍 王艳艳 吴耀华 胡金昌
(山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

摘要: 目前, 多层穿梭车系统存在由于输送机缓存长度不合适, 而导致出库阻塞或拣选空闲等问题, 进而影响系统的整体效率。为提高系统作业效率, 减少输送设备成本, 在对多层穿梭车系统出库作业流程进行深入分析的基础上, 建立输送机缓存输入输出平衡模型; 在输送机缓存满足分拣作业正常运行的情况下, 提出该缓存长度的最优条件及临界条件。运用开环排队网络建模方法对料箱出库作业流程进行分析, 建立料箱平均出库时间模型, 并根据料箱出库作业流量分布与人工拣选效率的关系, 构建输送机缓存长度的优化模型; 为缩短料箱平均出库时间, 利用 k-means 聚类算法和储区排列规则对储位优化, 进一步降低输送机缓存长度。仿真结果显示, 优化后的品项分配与随机分配相比, 补货缓存长度更趋合理, 长度减少约 12%。该研究一方面可指导规划设计人员对输送机缓存长度进行设计, 另一方面可提高系统的整体作业效率, 降低运营成本。

关键词: 多层穿梭车系统; 输送机缓存长度; 开环排队网络; k-means 算法; 储位优化

中图分类号: F253

Conveyor's Buffer Length Modeling and Optimization of Multi-Shuttle System

QIN Yiping WANG Yanyan WU Yaohua HU Jinchang
(College of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: At present, the multi-shuttle system has problems such as the unsuitable conveyor's buffer length, which leads to problems such as outbound block or picking idle, affecting the overall efficiency of the system. To improve the operation efficiency of the multi-shuttle system and reduce the input cost of the conveying equipment, based on in-depth analysis of the multi-shuttle system outbound operation process, the conveyor buffer input and output balance model is established; In the case of normal operation of the picking operation, the optimal conditions and critical conditions of the buffer length are proposed. The open queuing network modeling method is used to analyze the outbound operation process of the case, and the average outbound-time model of the case is established. According to the relationship between the flow distribution of the case outbound operation and the manual picking efficiency, the optimization of the buffer length model of the conveyor is established; In order to shorten the average outbound time of the case, the k-means clustering algorithm and the storage arrangement rule are used to optimize the storage position, further reducing the conveyor buffer length. The simulation results show that the optimized item allocation is more reasonable than the random allocation, and the replenishment buffer length is reduced by about 12%. On the one hand, this study can guide the designer to design the conveyor buffer length, on the other hand, it can improve the overall operating efficiency of the system and reduce the operating cost.

Key words: multi-shuttle system; conveyor buffer length; open queuing networks; k-means algorithm; storage assignment optimization

0 前言

随着物流行业智能化、自动化水平的显著提高, 多层穿梭车储分一体化系统在电商及制造行业得到了广泛应用。该系统在出入库作业时, 为防止作业

中断, 提高订单拣选效率, 在提升机与人工拣选站台的交接段设置了一定长度的输送机用于缓存出入库的料箱。本文研究的输送机缓存主要是用于暂存出库待拣选的料箱, 减少设备之间相互等待的时间。研究发现, 在实际作业中料箱到达输送机缓存的速度受品项存放位置及任务调度等因素影响, 是一个离散的随机过程。在这种情况下, 如果输送机缓存过长, 超出最大出库效率下的理论缓存量, 则导致设备会占用过多的空间, 造成资源浪费; 如果输送

^{*} 山东大学基本科研业务费专项资金(2018JC035)、山东省重点研发计划(2017GGX60103)和山东省自然科学基金(ZR2017MF014)资助项目。
20181104 收到初稿, 20190318 收到修改稿

机缓存过短, 不满足最大出库效率下的理论缓存量, 则导致短时间内料箱得不到及时补充时, 出现缺货现象, 影响拣货效率。综上分析, 输送机缓存合理的长度对整个系统的拣货效率的提高至关重要。

目前, 对于提高多层穿梭车系统(以下简称多穿系统)拣货效率的研究主要集中在储位优化及任务调度优化方面。牟善栋^[1]对多穿系统进行建模优化, 采用蚁群聚类对储位进行优化, 同时应用遗传算法对任务调度进行优化, 从而提高系统效率。JANEAB^[2]通过货物相似性计算, 构建聚类模型, 并应用启发式算法求解最优储位, 从而平衡拣货人员工作量, 提高拣货效率。WANG 等^[3]提出多层穿梭车仓储系统任务调度模型, 通过遗传算法研究并行取货、串行出库策略下系统效率。胡金昌^[4]通过研究订单聚类分配策略来提高系统效率, 提出四种改进 k-means 聚类算法并结合真实订单数据进行验证分析, 对四种聚类算法优化效率进行排序。ROY 等^[5]提出用 SOQN 方法建模, 并用降解法求解分析多自动小车任务切换情况下系统的性能。

在拣选缓存长度优化方面, 王艳艳^[6]对自动卷烟分拣系统中拣选补货缓存长度进行建模优化, 采用启发式聚类算法对品项储位进行优化, 缩短货物出库时间, 从而减少缓存长度, 提高拣选效率。而在多层穿梭车系统中, 提高系统拣货效率多从储位优化、任务调度方面进行研究, 对于优化输送设备尺寸的适应性研究还未有涉及。通过对输送机缓存作业过程及多层穿梭车系统的详细分析, 建立输送机缓存长度模型并进行优化, 为多层穿梭车系统合理设计提供理论依据。

1 多层穿梭车系统拣货作业描述

在多层穿梭车系统中, 每层均由穿梭车进行料箱的货位存取和水平方向运输, 然后交接给提升机, 再统一由提升机来实现料箱的垂直方向运输, 最终交接到输送机输入端, 输送机将料箱运输到人工拣货站台进行拣选, 如图 1 所示。在多层穿梭车系统中, 出入库作业由穿梭车并行取货与提升机串行运输高效配合, 提高了整个系统的拣货效率。本文的所有分析均基于简单作业模式, 即该型多穿系统的分析过程只存在出库作业或者入库作业。

在多穿系统进行出库作业时, 订单拣选系统应准确高效的将料箱出库, 供人工拣选。为防止拣选中断, 应用了输送机缓存暂存待拣选的料箱。由于, 储位分布及任务调度的影响, 出库任务下达后, 穿梭车和提升机配合输送料箱的过程中会存在设备间等待, 所以料箱到达输送机入口的过程是一个离散

图 1 多层穿梭车系统作业模型

的随机过程。在料箱到达输送机缓存的时间是随机的情况下, 如果输送机缓存长度设计不合理则会出现以下三种问题, 如图 2 所示。

如果输送机缓存长度过短, 则会出现补货不及时, 导致拣货人员空闲, 降低拣货效率, 如图 2a 所示。如果输送机缓存长度过长, 则会出现输送机缓存不满的情况, 从成本投入和空间利用角度看, 造成设备投入和空间资源的浪费, 如图 2b 所示。如果软件上设定的理论缓存量大于缓存的实际存放量, 即缓存在饱和状态下, 仍发出多穿系统出库指令, 则由于人工繁忙且输送机缓存无空位, 导致提升机占用, 料箱得不到及时交接, 发生出库任务堵塞的情况, 如图 2c 所示, 从而降低了系统拣选效率。

(a) 输送机缓存长度过短引发的问题示意图

(b) 输送机缓存长度过长引发的问题示意图

(c) 理论缓存量大于实际存放量引发的问题示意图

图 2 不同输送机缓存长度

综上所述,料箱到达输送机缓存的速度、输送机缓存的长度(或存放料箱的件数)对人工拣货作业正常运转起着重要作用。理论缓存量的设定须与输送机缓存实际可存放量保持一致,以确保在满足各拣货站台正常作业的状况下,提升机与输送机正常交接,不影响其它料箱的正常出库作业,提高整个多穿系统的分拣效率。

2 输送机缓存长度优化建模

2.1 拣货作业流程分析

仅考虑料箱的出库作业,针对单一拣选站台的补货输送设备,其输入输出如图 3 所示,输入为料箱从提升机进入输送机缓存的过程,设输入流量为 $I(t)$;假设不考虑回库阻塞的情况,输出为料箱被拣选完毕回库的过程,设输出流量为 $O(t)$,设实际输送机的驱动速度为 v_l ,长度为 L 。料箱的分拣受人工拣选速度的影响,是一个离散的随机过程,设人工拣选速度服从分布函数 $\phi(t)$ 。

图 3 输送机缓存输入输出示意图

可以得出,当输入流量大于输出流量时,即在 $I(t) - O(t) > 0$ 的状况下,料箱从输送机输出端开始

产生挤压,假设料箱压缩的最大密度为 $\rho_{\max}$ 。用 $l(t)$ 表示 t 时刻压缩密度达到 $\rho_{\max}$ 的长度,其前面的压缩密度用 $d_l(t)$ 表示,实际输送机输出端料箱压缩密度为 $d_0(t)$ 。

根据料箱在输送机缓存上的输送作业过程可知,输送机的实际输出流量可表示为

$$O(t) = \min(\phi(t), v_l \times d_0(t)) \quad (1)$$

将输送机缓存中的料箱密度表示如下

$$d_l(t) = \begin{cases} I(t)/v_l & (l(t) < L \text{ 或 } l(t) < L, I(t) < O(t)) \\ \rho_{\max} & (l(t) < L, I(t) < O(t)) \end{cases} \quad (2)$$

由于在正常的料箱分拣作业过程中,输送机缓存的输入输出处于平衡状态,则得出平衡模型如下

$$\int_0^t I(\beta - \tau) d\beta = \int_0^t O(\beta) d\beta + l(t) \quad (3)$$

输送机缓存的作业过程从第一次输入流量大于零开始统计,结束于所有的料箱拣选完成,设整个输送缓存作业时间周期为 T ,在此只讨论分析 $\tau \leq t \leq T - \tau$ 时间段中的作业过程,在此过程中存在以下两个命题。

(1) 假设料箱的长度为 ω ,输送缓存存在任意 $\tau \leq t \leq T - \tau$ 时刻,人工处于空闲状态且 $\phi(t) > 0$ 时,满足分拣作业的最优条件是 $l(t) = \omega$ 。

证明:当 $\phi(t) > 0$ 时,表示拣选站台有拣货需求,若 $l(t) < \omega$,则表示在输出端未出现货物积压现象,如图 4 所示。

图 4 $d_0(t) < \rho_{\max}$ 示意图

针对输送机上的料箱 K_l 进行分析, K_l 在 $t - \tau + a/v_l$ 时刻进入输送机, a 表示货物距离拣货人员的距离,当 $\phi(t) > 0$ 时表示有拣货需求,而 $O(t + a/v_l) = 0$,因此在 a/v_l 时间段内,人工处于空闲状态,拣选作业停止进行。

(2) 在 $t(\tau < t \leq T)$ 时刻,拣选人员连续拣选的

条件是 $d_0(t) \geq \phi(t)/v_l$ 。

证明: 假设当 $d_0(t) < \phi(t)/v_l$ 时, 拣选工作可连续进行, 即 $d_0(t) \times v_l < \phi(t)$, 由式 $O(t) = \min(\phi(t), v_l \times d_0(t))$ 可知, $O(t) = v_l \times d_0(t)$, 即 $O(t) < \phi(t)$ 。由此可得, 当拣选站台有拣选需求时, 料箱不能正常到达, 与拣选人员连续拣选矛盾, 故假设不成立。由此可知, 整个输送缓存的过程必须满足如下约束

$$d_0(t) > 0 (\tau < t \leq T) \quad (4)$$

在整个料箱出库拣选过程中, 若输送缓存未影响拣选的正常作业, 且一直存在 $l(t) < L$, 则表示输送机缓存长度过大, 为降低设备投入成本, 应适当减少输送机缓存长度。

2.2 输送机缓存输入过程分析

为便于对系统出库作业的分析计算, 根据多层穿梭车系统的运行环境, 首先做如下假设。

- (1) 该系统服从随机存取策略。
- (2) 穿梭车服从首列待命位策略。
- (3) 穿梭车、提升机服务遵循先进先出(First-come-first-served, FCFS)原则。
- (4) 为防止争箱现象的发生, 设料箱与品项一一对应, 且料箱存储数量足够, 避免在分拣的同时进行补货任务。

- (5) 穿梭车、提升机每次仅可装载一个料箱, 且设备运行不受载重影响, 速度恒定。

在此基础下, 系统的出库作业流程如图5所示。系统首先将出库指令发给对应货层的穿梭车, 穿梭车按照存取规则到达相应出库货位, 叉取料箱, 运

图5 多层穿梭车系统出库作业流程示意图

输到首列与提升机完成料箱交接, 最后由提升机将料箱运到对应的 I/O 站台, 完成出库任务。

2.2.1 开环排队网络

在分析输送机缓存最优长度时, 需计算输送机缓存的输入流量分布, 即针对多层穿梭车系统, 依据订单结构, 计算每个待拣料箱到达输送机缓存入口时的平均出库时间 T_o 。通过建立开环排队网络分析, 计算每个服务机构的平均队列长度和平均等待时间, 设任务到达率为 λ , $\lambda_s^{i,j}$ 表示 i 层 j 巷道的穿梭车任务到达率, λ_L 表示提升机的任务到达时间; 设备服务率为 μ , $\mu_s^{i,j}$ 表示 i 层 j 巷道的穿梭车设备服务率, μ_L 表示提升机的服务率。则可建立如图6所示开环排队网络, 网络中包括穿梭车服务系统和提升机服务系统。

图6 多层穿梭车系统开环排队网络模型图

根据 BOLCH 等^[7]的求解思路求解此开环排队网络, 得到各排队网络子系统的队列长度用 $Q_{n,r} (r=1,2,\dots,H; n=S_1, S_2, \dots, S_H)$ 表示, 最后根据利特尔求解公式求出每个服务节点的平均等待时间。穿梭车的平均等待时间为 t_s^w , 如式(5)所示, 提升机的平均等待时间为 t_L^w , 如式(6)所示。

$$t_s^w = \frac{\lambda_s^{i,j}}{\mu_s^{i,j} \times (\mu_s^{i,j} - \lambda_s^{i,j})} \quad i=1,2,\dots,H; j=1,2,\dots,Q \quad (5)$$

$$t_L^w = \frac{\sum_{r=1}^H \frac{Q_{n,r}}{\lambda_s^{i,j}}}{H} \quad r,i=1,2,\dots,H; n=S_1, S_2, \dots, S_H \quad (6)$$

2.2.2 订单平均出库时间

从订单任务下达到料箱被送到输送机缓存入口的时间等于每个设备对料箱的平均作业时间及各个设备互相等待时间之和, 设 $t_n^w (n=S, L)$ 表示各级服务系统中“顾客”等待服务机构的平均等待时间, $t_n^s (n=S, L)$ 表示每个设备的平均服务时间。则订单平均出库时间可表示为

$$T_o = t_s^s + t_s^w + t_L^s + t_L^w \quad (7)$$

设 t_s^a 表示穿梭车单向水平运动时间, t_L^a 表示提

升机单向垂直运动时间。对于多层穿梭车系统而言,穿梭车的作业时间由穿梭车水平运动时间及接取、卸载料箱的时间组成,可表示为式(8);同理可得,提升机的作业时间由垂直运动时间及接取、卸载料箱的时间组成,可表示为式(9)

$$t_s^s = (t_s^\alpha + t_p) \times 2 \quad (8)$$

$$t_L^s = (t_L^\alpha + t_p) \times 2 \quad (9)$$

在考虑运动特性的前提下,对设备运动时间进行分析,设 ε 、 σ 分别为单个存储货位的宽度、高度, v_s 、 v_L 分别表示穿梭车最大行驶速度、提升机最大行驶速度; a_s 、 a_L 分别表示穿梭车加速度、提升机加速度; t_p 表示设备接取、卸载料箱的时间。则根据上文假设条件中穿梭车停靠点策略,在出库状态下,穿梭车每完成一次任务都停靠在该楼层首列,并根据 LU^[8]及 SI 等^[9]研究,设备的运动曲线大致如图 7 所示。

图 7 设备运动曲线图

图中, Y 表示穿梭车到达货位的运行时间,根据运动学公式,假设第 i 个出库货位坐标为 (H_i, A_i) ,则穿梭车在此阶段的作业时间为

$$t_s^\alpha = \begin{cases} 2 \left[2v_s/a_s + (A_i - \varepsilon - 2v_s^2/2a_s)/v_s \right] & Y \geq 2v_s/a_s \\ 4 \sqrt{2(A_i - \varepsilon)/a_s} & Y < 2v_s/a_s \end{cases} \quad (10)$$

$$t_L^\alpha = \begin{cases} 2 \left[2v_h/a_h + (H_i - \sigma - 2v_h^2/2a_h)/v_h \right] & Y \geq 2v_h/a_h \\ 4 \sqrt{2(H_i - \sigma)/a_h} & Y < 2v_h/a_h \end{cases} \quad (11)$$

2.3 输送机缓存输出过程分析

拣选人员在输送机末端进行拣选,根据人因工程,货架设置在拣选工作台设置同一侧,且工作台高度合理,拣选人员单位时间拣货数量基本固定且一致。除特殊情况,大部分时间输送作业连续且分拣作业正常,人工拣选效率服从一般分布 $\phi(t)$ 。

2.4 输送机缓存长度优化建模

对于多层穿梭车系统而言,能连续进行拣选作业的基本条件是当一个料箱拣选完成之后,有新的料箱到达人工拣货台。已假设人工拣货服从 μ_m 的一般分布,下面分别从补货能力和分拣能力两方面对输送机缓存长度进行建模。

(1) 当输送机缓存料箱未满载,即货物密度 $d_i(t) < \rho_{\max}$ 时,料箱会继续从多穿系统中出库,直到输送机上缓存的料箱达到最大密度。假设设计时,输送机缓存长度较大,在整个拣货输送过程中一直处于不饱和状态,即多穿系统的出库能力无法满足拣选站台的拣货能力,则根据多穿系统出库能力建立输送机缓存长度模型如式(12)所示。且 $I(\beta)$ 为输送机缓存的输入, m_i 表示前 τ 个周期货物在输送机缓存的长度(不包括货物之间的冗余长度),则时间分布服从式(7)。

$$L = m_{\max} = \int_0^{k\tau} \frac{I(\beta) - \mu_m}{\rho_{\max}} d(\beta) \left(1 \leq k \leq \frac{T}{t} - 1 \right) \quad (12)$$

(2) 当输送机缓存能到达最大密度时,表示该周期输送机缓存已满。当人工拣选一个料箱,多穿系统才能出一个料箱,为使分拣作业连续进行,不出现缺货现象,则输送机缓存长度模型应满足式

$$\rho_{\max} L_o \geq \left(T_o + \frac{1}{\lambda} + \frac{L_o}{v_l} \right) \times \mu_m \quad (13)$$

输送机缓存长度的最小临界值为式

$$L_o = \frac{\left(T_o + \frac{1}{\lambda} \right) \times \mu_m}{\rho_{\max} - \frac{\mu_m}{v_l}} \quad (14)$$

由于第 n 个品项的位置不确定,为保证整个拣货周期的正常运行,需计算所有满足缓存密度为 $\rho_{\max}$ 的时间点,假设有 c 个满足条件的点,则对应输送机长度的临界值 L_i^k ($1 \leq i \leq 3, 0 \leq k \leq c$)。

同时,输送机缓存必须满足整件存放的原则,假设 L' 为计算所得的最优输送机长度的临界值,则实际补货缓存的长度应为

$$L = \left\lceil \frac{L'}{\omega} \right\rceil \times \omega \quad (15)$$

3 基于 k-means 聚类的品项储位优化

由上述输送机缓存长度模型可知,在不改变多层穿梭车系统设备投入、不提高设备机械性能的前提下,可通过减少料箱到达输送机入口的时间来减少输送机缓存长度,在此提出了一种通过优化品项储位的方法来减少此时间,从而达到缩短输送机缓存长度的目的。

品项在多穿系统中的存放规则对穿梭车及提升机的整体行走距离有较大影响,从而使料箱到达输送机的时间不同,影响了输送机缓存长度。传统立

库在单指令循环模式下只能顺序完成取货任务,为了缩短出库时间,一般将品项基于重量和周转率进行分类存放。但对于多层穿梭车系统而言,该系统具有穿梭车并行取货、提升机串行出库的特点,所以为充分发挥该系统的存取优势,在进行储位优化的时,根据 ZHANG^[10]应用货物相关性原则,通过 k-means 聚类算法来确定多个储区,然后按照相似储区分层分布的原则对储区进行排列组合,同时储区内部按照品项出库量大小进行排序,最终确定品项最优储位,提高系统整体出库效率,减少输送机缓存长度。

3.1 k-means 品项聚类优化算法

(1) 利用品项出库任务完成时刻平均差值,建立品项相关性矩阵,出库任务完成时间平均差值越小的品项,出库相关性越强,分析时越应该放在一个簇中,具体步骤如下。

1) 设 S 是 n 个待进行聚类分析的品项集合, $S = \{1, 2, 3, \dots, j+1, \dots, n\}$, 对于任意两个品项 S_i 和 S_j , 其出库数量分别 Q_i 和 Q_j , 其出库任务到达的时刻序列 $A_{S_i}(a_m^{S_i}, m=1, 2, \dots, Q_i)$ 和 $A_{S_j}(a_m^{S_j}, m=1, 2, \dots, Q_j)$, 假设 $Q_i < Q_j$, 则两两品项出库时刻差平均值为

$$\zeta_{S_i, S_j} = \frac{1}{Q_i} \sum_{m=1}^{Q_i} \min |a_m^{S_i} - a_m^{S_j}|, \quad \zeta_{S_i, S_j} = \zeta_{S_j, S_i} \quad (16)$$

2) 按照出库品项总数 n 构建 $n \times n$ 品项相关性矩阵。

$$R_s = \begin{pmatrix} 0 & \zeta_{S_1, S_2} & \zeta_{S_1, S_3} & \cdots & \zeta_{S_1, S_n} \\ & 0 & \zeta_{S_2, S_3} & \cdots & \cdot \\ & & \cdot & \cdot & \zeta_{S_{n-2}, S_n} \\ & & & \cdot & \zeta_{S_{n-1}, S_n} \\ & & & & 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

(2) 应用改进 k-means 算法^[11]进行聚类,形成多个储区。k-means 聚类算法,是基于固定的品项相关性矩阵的储位分配策略,将品项间的相关值看作聚类分析算法中品项间的“距离”,替换了聚类分析时常用的欧式距离、曼哈顿距离等。

首先确定合适的 k 个聚类参考点作为临时的聚类中心,然后根据品项相关性矩阵,找出与这几个聚类中心距离最短的品项,并分配到合适的 k 个簇中。计算每个簇的重或均值,作为新的聚类中心,再重新计算其他各品项到这个聚类中心的距离,然后把各个品项加入到离它最近的聚类中心的簇中,重新形成 k 个簇。重复迭代,直到 k 个簇的均值不再变化,得到 k 个储区。

3.2 储区及储区内部优化

(1) 根据开环排队网络模型的分析结果^[1], 将经过聚类优化得到的储区,按照如下原则进行排列组合。

1) 总出库量越大的储区越靠近 I/O 点。

2) 储区间相似度高的两储区,按照垂直方向排列,能够有效利用多层穿梭车系统并行取货特性,减少等待时间。

3) 储区间的总出库量差值越小的两个储区,需按对角线方向排列,其中出库量高的储区放在低层,使提升机空闲时间更短。

根据上述原则,需要建立储区总量矩阵及储区相关性矩阵。该储区总量值 θ_w 为该储区单位时间的所有品项总出库数,如式(18)所示,从而建立储区总量矩阵 G^{Total} , 如式(19)所示;当多个品项分配到同一储区后,将储区中所有品项的均值作为一个新的品项,由此可计算得到各中心点的距离,即储区相关性值,建立储区矩阵。通过所建立的两个储区矩阵,依次应用三个储区排列组合原则,实现储区整体优化。

$$\theta_w = \text{sum}(\text{task}_w) \quad (18)$$

$$G^{Total} = (\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_w \cdots \theta_m) \quad (19)$$

(2) 储区内部品项排序处理。储区内部的品项按照出库量大小进行排序,将出库量大的品项存放于距离每层首列近的储位上。

经过储位优化之后,提升机等待时间可最小化到忽略,并且通过相似货物分层分布后,能够极大提高穿梭车利用率,防止了较短时间内多辆穿梭车同时申请提升机调度的情况,使穿梭车等待时间也最小化。假设优化后,提升机正常作业且等待时间忽略不计;每出库 m 个料箱,出现一次穿梭车等待,则优化后的料箱平均出库时间可表示为

$$T_o = t_s^s + t_s^w / m + t_L^s \quad (20)$$

4 实例仿真

本实例数据来源于一汽物流有限公司实际出库任务中随机一天的出库单信息。使用 Matlab 软件进行编程求解。该多穿系统共有三个巷道,存放 102 个品项,平均每个巷道出库 34 个品项,即 $n_i = 34 (i=1, 2, 3)$, 设输送机缓存初始长度为 4 m, 任务到达率 $\lambda = 12$ 箱/min, 人工拣货效率为 $\mu_m = 10$ 箱/min, 作业周期 $T = 480$ min, 其设备参数及特性见表 1。

表 1 多层穿梭车系统设备参数及特性

参数	数值
料箱宽度 ω/m	0.4
储位高度 σ/m	1
列宽 ε/m	0.6
缓存最大密度 $d_{\max}/(\text{箱}/\text{m})$	5/2
输送机驱动速度 $v_i/(\text{m}/\text{s})$	0.5
穿梭车最大行驶速度 $v_s/(\text{m}/\text{s})$	4
穿梭车加速度 $a_s/(\text{m}/\text{s}^2)$	2
提升机最大行驶速度 $v_L/(\text{m}/\text{s})$	3.5
提升机加速度 $a_L/(\text{m}/\text{s}^2)$	2
设备取放货时间 t_p/s	2

按照基于 k-means 聚类的储位优化方法进行品项优化分配,然后分别计算三条分拣站台对应的输送机缓存长度在优化前后的临界值 $L_i^k (1 \leq i \leq 3, 0 \leq k \leq c)$ 。通过计算可得,三条输送机缓存线达到最大密度时的临界长度与对应时间点的关系图,如图 8 所示。

图 8 三条输送缓存长度随时间变化图

通过储位优化后的输送线缓存长度明显减小且长度变化趋于平稳。

下面分别对三条输送机第一次达到最大密度的时间、达到最大密度的次数及补货缓存临界长度进行分析。

三条输送机第一次达到缓存最大密度的时间点与储位优化前后关系如表 2 所示,从表 2 中可以看出,经过储位优化后,每条输送机第一次达到缓存最大密度的时间均有明显减少,说明在大致相等出库量的情况下,品项经过储位优化,料箱到达输送机缓存的速度明显提高。

表 2 输送机第一次达到最大密度的时间点 min

分配方法	1 号输送机	2 号输送机	3 号输送机
储位随机分配	30	32	29
储位优化分配	19	27	20

三条分拣线达到最大密度的次数与品项分配之间的关系如表 3 所示,从表 3 可以得出,经过储位优化后的输送机缓存达到最大密度的次数明显增多。说明优化后的品项储位与多穿系统的出库任务相关性更强,提高了输送机输入效率。

表 3 输送机缓存达到最大密度的次数

分配方法	1 号输送机	2 号输送机	3 号输送机
储位随机分配	16	15	17
储位优化分配	30	28	35

经过计算得到的三条分拣输送机缓存长度临界值与实际值如表 4 所示,可以得出优化后的品项分配方法由于提高了料箱的到达速度,从而降低了输送机缓存长度。

表 4 输送机缓存长度 m

分配方法	1 号输送机		2 号输送线		3 号输送线	
	临界值	实际值	临界值	实际值	临界值	实际值
储位随机分配	3.20	3.2	3.13	3.2	3.22	3.6
储位优化分配	2.61	2.8	2.57	2.8	2.82	3.2

综上所述,经过基于 k-means 聚类的储位优化后的输送机缓存长度比随机储位分配分别平均减少 12.5 %, 12.5 %, 11.1 %,从而证明了输送机缓存长度建模的有效性及其基于 k-means 聚类储位优化的优越性。

5 结论

(1) 以多层穿梭车系统中输送机缓存为研究对象,对输送机的料箱输送过程进行分析,建立基于输送机缓存的输入输出平衡模型,并提出输

送机缓存满足分拣作业的临界条件与最优条件并进行了证明。

(2) 建立开环排队网络, 通过分析计算输送机缓存输入流量分布, 建立了输送机缓存长度模型, 为多层穿梭车系统的规划提供设计依据。

(3) 在多层穿梭车系统中, 品项储位分配是影响料箱出库速度关键因素之一, 因此设计了 k-means 算法对品项进行聚类, 得到确定的储区, 并按照一定的优化规则对储区及储区内部进行货位优化, 降低系统出库时间, 从而缩短输送机缓存长度。

(4) 通过实例验证, 基于 k-means 的储位优化方法可减少输送机缓存长度 12 % 左右, 从而证明了输送机缓存长度模型的可行性及品项分配优化方法的优越性。

(5) 在此只考虑了简单多层穿梭车系统的输送机缓存长度, 对于跨巷道或跨层穿梭车系统中输送机缓存长度如何最优还有待研究。

参 考 文 献

- [1] 牟善栋. 多层穿梭车仓储系统建模与优化[D]. 济南: 山东大学, 2014.
MOU Shandong. Modeling and optimization of multi-tier shuttle storage system[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [2] JANEAB C C. A clustering algorithm for item assignment in a synchronized zone order picking system[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 166(2): 489-496.
- [3] WANG Y, MOU S, WU Y. Task scheduling for multi-tier shuttle warehousing systems[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(19): 5884-5895.
- [4] 胡金昌. 多层穿梭车分拣系统的订单分配优化[D]. 济南: 山东大学, 2016.
HU Jinchang. Order allocation optimization for multi-shuttle sorting system[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [5] ROY D, KRISHNAMURTHY A, HERAGU S S, et al. Performance analysis and design trade-offs in warehouses with autonomous vehicle technology[J]. IIE Transactions, 2012, 44(12): 1045-1060.
- [6] 王艳艳, 吴耀华, 吴颖颖, 等. 自动补货系统补货缓存优化[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 174-180.
WANG Yanyan, WU Yaohua, WU Yingying, et al. Restocking buffer optimization of automated picking system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24): 174-180.
- [7] BOLCH G, GREINER S, DE MEER H, et al. Queueing networks and markov chains: Modeling and performance evaluation with computer science applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [8] LU X, SHI H Y, WANG L, et al. Analytical travel time models for multi-aisle automated storage and retrieval systems[C]// International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences. IEEE, 2017: 1-6.
- [9] SHI H Y, LU X, LI D W. Travel time analysis of the single and dual command of AS/RS[C]// 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE, 2017: 7.
- [10] ZHANG Y. Correlated storage assignment strategy to reduce travel distance in order picking [J]. IFAC Papersonline, 2016, 49(2): 30-35.
- [11] 吴颖颖, 孟祥旭, 王艳艳, 等. “货到人”拣选系统订单排序优化[J]. 机械工程学报, 2016, 52(4): 206-212.
WU Yingying, MENG Xiangxu, WANG Yanyan, et al. Order sequence optimization for “part-to-pickers” order picking system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(4): 206-212.
- [12] 朱可欣. 基于关联分析的某日化用品仓库储位分配策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
ZHU Kexin. Research on slotting allocation strategy for a certain daily chemical articles' warehouse based on association analysis[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [13] KUO R J, KOU P H, CHEN Y R, et al. Application of metaheuristics-based clustering algorithm to item assignment in a synchronized zone order picking system[J]. Applied Soft Computing, 2016, 46(C): 143-150.
- [14] 吴耀华, 刘鹏. 蜂巢系统在电商行业订单履约中心的应用[J]. 物流技术与应用, 2017, 22(1): 110-113.
WU Yaohua, LIU Peng. Application of honeycomb system in E-commerce industry order implementation center[J]. Logistics & Material Handling, 2017, 22(1): 110-150.
- [15] HERAGU S S, CAI X, KRISHNAMURTHY A, et al. Analysis of autonomous vehicle storage and retrieval system by open queueing network[C]// IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE, 2009: 455-459.
- [16] LAMBALLAIS T, ROY D, KOSTER M. Estimating performance in a robotic mobile fulfillment system[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 256(3): 976-990.

- [17] WANG Liming, SHAO Yimin. Crack fault classification for planetary gearbox based on feature selection technique and k-means clustering method[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 242-252.

作者简介: 秦艺萍, 女, 1994 年出生。主要研究方向自动拣选系统作业效率优化、物流系统规划。

E-mail: qyp1994@163.com

王艳艳, 女, 1978 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为自动分拣系统和仓储系统作业任务调度优化。

E-mail: 1978_wyy@163.com

胡金昌, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为自动拣选系统、物流系统规划、设计和仿真等。

E-mail: hjch1992@163.com

吴耀华(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为自动分拣系统、集成化物流系统规划、设计和仿真等。

E-mail: mike.wu@263.net