DOI: 10.3901/JME.2019.08.216

基于进化算法的跨巷道多层穿梭车仓储系统的研究*

马文凯 吴耀华 吴颖颖 杨 栋
(山东大学控制科学与工程学院 济南 250061)

摘要: 跨巷道多层穿梭车仓储系统集成存储和分拣功能于一体, 充分利用仓库立体空间, 利用高层货架实现货物的密集存储, 采用“货到人”订单拣选模式, 能够快速响应订单, 缩短分拣时效。跨巷道多层穿梭车仓储系统的性能评估包括: 存储容量, 拣选效率(即分拣系统每小时的订单拣选量), 拣选时间(即订单从流入系统到分拣完成所用时间)。通过对系统拣选任务流程的分析, 提出了单任务周期下系统分拣效率和订单拣选时间的有效评估方法, 在此基础上提出跨巷道多层穿梭车仓储系统综合设计框架, 通过分析系统配置优化模型, 提出进化算法, 求解系统最优配置, 使其在满足系统性能要求的前提下成本最低, 该设计框架精确的求解系统设施的最优配置, 降低规划设计人员的工作强度。

关键词: 多穿系统; 性能分析; 系统设计; 货到人

中图分类号: F282

Research on Cross-aisles Multi-shuttle Warehouse System Based on Evolutionary Algorithm

MA Wenkai WU Yaohua WU Yingying YANG Dong
(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: Cross-aisles multi-shuttle warehouse system has not only storage function but also the sorting function, and makes full use of warehouse space to achieve high-density storage by using high shelves. It uses “part-to-picker” order picking mode to respond quickly to orders and shorten sorting time. The performance estimation of cross-aisles multi-shuttle warehouse system includes storage capacity, throughput of system, and transaction cycle time. An effective method is proposed to estimate the system throughput and order transaction cycle time only considering single retrieval command, based on this, an integrated design framework for storage system of multi-lane shuttle vehicles across roadways is proposed. By analyzing the optimization model of system configuration, an evolutionary algorithm is proposed and the optimal configuration of the system is solved so that the cost is the lowest under the premise of meeting the system performance requirements. The framework solves the optimal configuration of the system configuration accurately and reduces the work intensity of the system designers.

Key words: multi-shuttle warehouse system; performance analysis; system design; part-to-picker

0 前言

近年来, 随着电商行业的快速发展以及自动化技术的不断创新, “货到人”(Part-To-Picker)订单拣选系统代替传统的“人到货”(Picker-To-Part)拣选模式受到电商企业的广泛青睐。“货到人”订单拣选系统主要包括以下几种: 自动存储及取货系统(Automated storage and retrieval system, AS/RS), 自

动小车存储及取货系统(Autonomous vehicle storage and retrieval system, AVS/RS)以及基于移动机器人的订单分拣系统(Robotic mobile fulfillment systems, RMFS)。AS/RS 是由专属于各巷道的堆垛机并行工作完成系统的存储取货任务。AVS/RS 是自动小车沿轨道行驶, 并配合提升机完成跨层跨巷道的存储取货任务。RMFS 是由多台自动导引小车(Automated guided vehicle, AGV)取代拣选人员, 通过无线网络从拣选台处接收订单任务, 并行作业完成存储分拣任务。

跨巷道多层穿梭车仓储系统(Cross-aisles multi-

* 国家自然科学基金资助项目(61703241)。20180607 收到初稿, 20181130 收到修改稿

shuttle warehouse system, CAMSWS)以穿梭车为载体, 配合提升机执行任务, 也是 AVS/RS 的一种。以其存储容量大, 占地面积小, 分拣效率高, 响应速度快等优点, 受到电商企业的广泛关注。CAMSWS 是由多层多巷道立体货架, 巷道穿梭车, 转载穿梭车, 出入库提升机, 拣选台, 缓存区以及输送机组成。各个设备之间相互配合并行工作, 缩短了订单拣选时间, 提高了拣选效率。转载穿梭车可以将不同巷道的货物运输至同一拣选台, 使得该系统可以跨巷道拣选到订单(Pick-To-Order), 缩短订单拣选时间。

国内外对于仓储系统的研究多以 AVS/RS 为研究目标, 主要包括系统的整体性能以及系统的运营策略。MALMBORG 等^[1]建立 AVS/RS 优化模型, 通过设置系统配置参数来优化系统性能。FUKUNARI 等^[2]采用闭环排队网络建模的方法, 分析 AVS/RS 在单指令周期(仅分拣任务或存储任务)和双指令周期(既有分拣任务又有存储任务)下系统的分拣效率。EKREN 等^[3]通过半开环排队网络模型分析了 AVS/RS, 并采用几何矩阵方法求解, 来评估系统性能, 并验证了该方法的有效性。MARCHET 等^[4]通过对系统性能的评价, 改进 AVS/RS 的设计框架, 并用 Arena 进行仿真试验。ZOU 等^[5]通过建立 fork-join 排队网络模型, 比较了 AVS/RS 中设备在并行运行策略和顺序运行策略下系统的性能。CAI 等^[6]建立了半开环排队网络, 分析了 AVS/RS 系统的利用率、输出效率等性能。还有部分研究专注于系统的运营策略, WANG 等^[7]建立 MSWS 的任务调度模型, 分析了并行取货、串行出库的作业时序模型, 用改进的遗传算法对模型进行求解。吴颖颖^[8]等提出了订单排序优化模型, 通过改进的 K-Means 聚类算法对订单进行排序优化, 提高了系统的拣选效率。ROY 等^[9]通过半开环排队网络分析 AVS/RS 系统, 并考虑进阻塞因素对系统性能的影响。王艳艳等^[10]提出一种能根据不同订单类型进行系统适用性选择的系统优化方法, 进行了两类“货到人”系统对不同订单类型的适用性分析。

本文综合考虑客户对分拣系统的需求以及 CAMSWS 自身的特点, 通过分析系统的配置优化模型, 基于进化算法, 求解使成本最小的系统最优配置(即存储货架的层、排、列, 以及拣选台、提升机的数量)。本文还提出了对 CAMSWS 系统成本、拣选效率、订单拣选时间等主要性能的评估方法, 总结归纳出系统配置对系统性能的影响规律。

1 跨巷道多层穿梭车系统

1.1 布局介绍

在 CAMSWS 中, 要实现货物的密集存储, 方便拣选, 一般用周转箱作为容器放置在货架上存储货物。如图 1 所示, 每个存储巷道两边各有一排货架, 每排货架上一个白色方格为一个存储列, 可放置一个周转箱。货物的水平运输由穿梭车提供, 垂直方向的运输由提升机负责。穿梭车分为巷道穿梭车(简称巷道车)和转载穿梭车(简称转载车), 每一层每一个巷道都有一辆巷道车负责该层货物 Y 方向的水平运输, 每一层有一辆转载车负责 X 方向的水平运输。转载车的设置是多穿系统不同于其他分拣系统的一大优势, 货物可以通过转载车跨巷道作业, 提高了系统的灵活性, 分拣任务可以直接拣选到订单。提升机分为出库提升机和入库提升机, 主要提供作业任务中货物的垂直运输。一组提升机只服务于一个拣选台, 其中出库提升机负责把货物运送至第一层, 再通过输送机运输给拣选台; 入库提升机则负责把要存储的货物运送至目的层, 再通过穿梭车运送到存储位置。图 1 中灰色区域表示为缓存区, 主要用于暂存周转箱, 减少设备之间的相互等待时间。缓存区主要分为两大部分, 一部分是巷道车和转载车之间的缓存区, 设置在巷道起始位置, 巷道车和转载车的交接处。另一部分是转载车和提升机之间的缓存区, 设置在提升机与每层转载车的交接处。

图 1 CAMSWS 俯视图

图 1 显示的是 CAMSWs 的俯视图, 上半部分的存储区域展示顶层的布局, 在 CAMSWs 中, 每一层的布局配置都相同。输送机和拣选台设置在第一层, 方便包装输送。由该布局图可知, 巷道车的数量是货架层数(T)和存储巷道数(A)的乘积, 转载车的数量等于货架层数(T), 提升机的组数等于拣选台的数量(N_p)。

1.2 作业流程

在 CAMSWs 系统中, 巷道车、转载车和提升机的服务规则如下。

(1) 穿梭车和提升机完成任务之后, 停靠在上个任务完成之后所在的位置, 即遵循 point-of-service-completion (POSC) 原则。

(2) 穿梭车、提升机以及拣选台均按照先到先服务原则(first-come, first-served, FCFS)对接收到的请求进行服务。

(3) 穿梭车和提升机都只能运输一个周转箱。

如图 2 所示的 CAMSWs 系统分拣任务作业流

图 2 分拣任务流程

程。订单经过处理之后, 由 WCS 系统生成分拣任务下达到 CAMSWs 系统中。分拣任务到达之后, 首先请求对应层对应巷道的巷道车, 若该巷道车正处于工作状态, 则任务进入该巷道车任务队列等待, 若巷道车空闲, 则响应该任务并到达订单所需货物的存储位置。巷道车沿该巷道导轨运行, 把存有所需货物的周转箱运送至出库缓存区, 若缓存区暂存位置已满, 则巷道车在该处等待缓存区空位, 若缓存区有空位, 巷道车卸载周转箱并进入空闲状态等待新任务请求。放置在缓存区的周转箱按照先后顺序依次请求转载车, 转载车按照 FCFS 原则执行任务, 把周转箱从巷道处的出库缓存区运送至相应的出库提升机缓存区, 同样检查出库缓存区是否有空位, 若有空位, 转载车卸载周转箱然后响应新任务请求。提升机接收出库缓存区周转箱的任务请求, 把周转箱运送至一层并卸载在输送机上, 由输送机运输至拣选台进行人工拣货。

2 系统性能分析建模

2.1 主要参数

本文用到的主要参数如表 1 所示。

表 1 主要参数

参数	释义
λ_r	分拣任务的到达率/ h^{-1}
A	货架存储巷道的数量
T	货架的存储层数
C	每排货架存储列的数量
n	存储货格的总数量($2 \times T \times C \times A$)
N_p	拣选站台的数量
μ_p	每个拣选站台的拣选效率/ h^{-1}
$W_{\max}$	存储货架的宽度/m
$L_{\max}$	存储货架的长度/m
$H_{\max}$	存储货格的高度/m
L_s	单个存储货位的长度/m
W_s	单个存储货位的宽度/m
W_A	单个存储巷道的宽度/m
H_T	单层存储货架的高度/m
L_c	输送机的长度/m
v_r	巷道车的平均速度/(m/s)
v_t	转载车的平均速度/(m/s)
v_l	提升机的平均速度/(m/s)
v_c	输送机的平均速度/(m/s)
ε_r	巷道车由于加速或减速引起的时间上的延迟/s
ε_t	转载车由于加速或减速引起的时间上的延迟/s
ε_l	提升机由于加速或减速引起的时间上的延迟/s
ε_p	设备接取或者卸载周转箱所用时间/s

2.2 系统性能

本文对 CAMSWs 的性能评估, 从系统成本、订单生命周期(完成一个订单分拣所用时间)和分拣效率(即单位时间系统的最大分拣量)这三个方面进行。

系统成本(C)包括两部分: 设备成本和货架成本。可以通过式(1)求出

$$C = (C_R \times A + C_T) \times T + C_L \times N_p + C_S \times (2 \times T \times C \times A) \quad (1)$$

式中, C_R 为巷道车的单价; C_T 为转载车的单价; C_L 为一组提升机的单价; C_S 为单个存储货位的货架价格。

由式(1)可知, 由于巷道车、转载车和提升机的市场单价远大于单个存储货位的货架价格, 所以这三种设备的总成本占系统成本的比例较大。所以系统巷道数量(A), 货架层数(T), 提升机数量(N_p)这三个参数的变化对系统成本的影响较大。

订单拣选时效是指订单进入系统到离开系统所经历的时间。本文仅考虑分拣任务, 所以订单拣选时效(t_o)计算如下

$$t_o = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12} + t_{13} + t_{14} + t_{15} + t_{16} + t_{17} + t_{18} \quad (2)$$

式中, t_1 为订单等待巷道车服务用时(s); t_2 为巷道车从出库缓存区到目的货位用时(s); t_3 为巷道车搂取周转箱用时(s); t_4 为巷道车运输周转箱到出库缓存区用时(s); t_5 为巷道车卸载周转箱用时(s); t_6 为周转箱等待转载车服务用时(s); t_7 为转载车从停靠位到目的巷道用时(s); t_8 为转载车从出库缓存区搂取周转箱用时(s); t_9 为转载车运输周转箱到相应的提升机处所用时间(s); t_{10} 为转载车卸载周转箱所用时间(s); t_{11} 为周转箱等待提升机服务所用时间(s); t_{12} 为提升机从一层运行至目的层所用时间(s); t_{13} 为提升机从出库缓存区搂取周转箱用时(s); t_{14} 为提升机运输周转箱到一层所用时间(s); t_{15} 为提升机卸载周转箱所用时间(s); t_{16} 为输送机运输周转箱所用时间(s); t_{17} 为周转箱等待拣选台服务所用时间(s); t_{18} 为拣选人员拣选订单货物所用时间(s)。

式(2)中, t_1 , t_6 , t_{11} , t_{17} 是等待接收服务的时间, 与分拣任务的到达率, 服务设备的服务效率和缓存区的暂存容量有关。本文假设各设备搂取或者卸载周转箱所用时间相等(即 $t_3 = t_5 = t_8 = t_{10} = t_{13} = t_{15}$), 均等于 ε_p 。式中计算 t_2 和 t_4 时巷道车的运行距离都是出库缓存区至目的货位处, 所以

同样

$$t_4 = t_2 = \frac{C \times W_s}{2 \times v_r} + \varepsilon_r \quad (3)$$

$$t_7 = t_9 = \frac{A \times (W_A + 2 \times L_S)}{2 \times v_l} + \varepsilon_l \quad (4)$$

$$t_{12} = t_{14} = \frac{T \times H_T}{2 \times v_l} + \varepsilon_l \quad (5)$$

t_{16} 是周转箱在输送带上匀速行驶所用时间, 所以

$$t_{16} = \frac{L_c}{v_c} \quad (6)$$

系统的分拣效率是指单位时间系统的分拣量。由于缓存区的功能, 各设备(巷道车、转载车、提升机)之间的相互影响程度降低。本文假设缓存区足够长, 各个设备独立运行各自任务, 由于各设备机械特性、运行距离不同, 必然存在一个效率较低的设备, 称之为系统的瓶颈, 则系统的最大分拣效率受到了系统瓶颈的限制。

由式(2)可知, 巷道车完成一个分拣任务分为四部分:

- (1) 巷道车从出库缓存区行走至目的货位(t_2)。
- (2) 巷道车从存储货位中搂取周转箱(t_3)。
- (3) 巷道车运送周转箱至出库缓存区(t_4)。
- (4) 巷道车在出库缓存区卸载周转箱(t_5)。

所以巷道车的最大输出 $TH_{r,\max}$ 可以求得

$$TH_{r,\max} = \frac{3600}{t_2 + t_3 + t_4 + t_5} \times A \times T \quad (7)$$

同样, 转载巷道车的最大输出 $TH_{t,\max}$ 可以求得

$$TH_{t,\max} = \frac{3600}{t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}} \times T \quad (8)$$

提升机巷道车的最大输出 $TH_{l,\max}$ 可以求得

$$TH_{l,\max} = \frac{3600}{t_{12} + t_{13} + t_{14} + t_{15}} \times N_p \quad (9)$$

拣选台的最大输出 $TH_{p,\max}$ 可以求得

$$TH_{p,\max} = \mu_p \times N_p \quad (10)$$

因此, 系统的最大分拣效率

$$TH_{\max} = \min(TH_{r,\max}, TH_{t,\max}, TH_{l,\max}, TH_{p,\max}) \quad (11)$$

3 系统设计建模

3.1 目标函数

本文以系统成本为标准, 则最优的系统配置(层、排、列)应使得系统成本最少。

$$\min \quad C = (C_R \times A + C_T) \times T + C_L \times N_p + C_S \times (2 \times T \times C \times A) \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad TH_{\max} \geq TH_r \quad (13)$$

$$2 \times T \times C \times A \geq n_r \quad (14)$$

$$t_o \leq t_{o,r} \quad (15)$$

式中, TH_r 为客户需求的系统最大效率; n_r 为客户需求的系统存储容量; $t_{o,r}$ 为客户需求的订单拣选时效。

3.2 进化算法

本文采取启发式智能算法来获取使得系统成本最少的组合配置。如图3所示为本文基于启发式算法提出的系统设计框架。该框架与进化遗传算法的优化机理非常匹配。在该问题中, 系统的组合配置(即系统的巷道数量, 存储层数, 存储列数, 拣选站台数量)即 $[A, T, C, N_p]$ 为决策因子, 为寻找目标函数的近似最优解, 可按如下步骤执行算法。

图3 CAMSWS 设计框架

(1) 初始化: 首先需要满足存储数量的要求, 系统的存储数量可以通过公式 $2 \times T \times C \times A$ 计算。由式(1)可知, 巷道车、转载车、提升机在系统成本中

占比较大, 所以对于系统成本来说, 变量 A , T 和 N_p 对成本的影响最大。巷道车和转载车的成本都跟 T 成正比, 所以本文考虑系统初始配置从 T 的最小值 $T_{\min}$ 开始选取, 以满足成本最少的优化目标。同时为了满足客户对于存储容量的需求, $T_{\min}$ 的计算式为

$$T_{\min} = \left\lceil \frac{N_r}{2 \times A_{\max} \times C_{\max}} \right\rceil \quad (16)$$

式中, N_r 为客户需求的存储容量

$$A_{\max} = \left\lceil \frac{W_{\max}}{W_A + 2 \times L_S} \right\rceil \quad (17)$$

$$C_{\max} = \left\lceil \frac{L_{\max}}{W_S} \right\rceil \quad (18)$$

$T_{\min}$ 作为系统初始配置的货架层数, 定义 T_0 。巷道数量 (A) 对于系统成本的影响比存储列数 (C) 大, 所以系统初始配置的巷道数量 A_0 可以这样计算

$$A_0 = \left\lceil \frac{N_r}{2 \times T_0 \times C_{\max}} \right\rceil \quad (19)$$

那么初始存储列数 (C_0) 的计算式为

$$C_0 = \left\lceil \frac{N_r}{2 \times T_0 \times A_0} \right\rceil \quad (20)$$

接下来根据客户需求的分拣效率, 求系统拣选台的数量 N_p 。拣选台数量 N_p 的计算式为

$$N_p = \left\lceil \frac{TH_r}{\mu_p} \right\rceil \quad \text{s.t.} \quad N_p \leq A \quad (21)$$

式中, TH_r 为客户要求的分拣效率 (h^{-1})。

式(21)把拣选台的分拣效率设置为客户要求的系统分拣效率。若拣选台是系统瓶颈, 系统依然满足客户需求, 若拣选台不是系统瓶颈, 由式(11)可知, 其他设备(如巷道车、转载车、提升机)的分拣效率必然小于拣选台, 同时也必然不满足客户要求。在式(21)中, 我们设置了一个约束条件, 从提升机的机械特性以及 CAMSWS 的布局结构上考虑, 我们设置提升机的数量不大于巷道的数量。所以不管何种情况, 由式(21)所求得的拣选台数量都是最佳的数目。系统的初始配置都已求得。

(2) 选择: 通过式(11)求系统在该配置下的最大分拣效率 $TH_{\max}$, 通过比较 $TH_{\max}$ 和客户需求的分拣效率 TH_r , 可以确认该配置是否满足客户需求。如果 $TH_{\max} > TH_r$, 证明该系统配置满足客户需求, 终止算法, 求取系统成本和订单生命周期。若 $TH_{\max} \leq TH_r$, 说明系统瓶颈处分拣效率较低。进行

第(3)步对系统进行优化, 通过判断系统瓶颈, 采取相应的措施提高系统分拣效率。

(3) 进化: 该步骤主要通过提高系统瓶颈处效率而增大系统的工作效率。由式(21)可知, 拣选台的分拣效率已然满足客户要求。所以这里只需分析巷道车、转载车、提升机的分拣效率。若巷道车是瓶颈(即 $TH_{\max} = TH_{r,\max}$), 可以通过增加货架层数或者巷道数量来提高巷道车的分拣效率。考虑到仓库尺寸, 因为式(16)中, 从最小层数开始选取, 所以这里先考虑通过增加货架层数的措施来提高巷道车的分拣效率。检测是否已经达到最大层数 $T_{\max}$, 其计算公式为

$$T_{\max} = \left\lfloor \frac{H_{\max}}{H_T} \right\rfloor \quad (22)$$

若没有, 则增加层数, 即 $T = T + 1$ 作为新的值, 则巷道数量和存储列数可以通过下式求得

$$A = \left\lfloor \frac{N_r}{2 \times T \times C_{\max}} \right\rfloor \quad (23)$$

$$C = \left\lfloor \frac{N_r}{2 \times T \times A} \right\rfloor \quad (24)$$

如果达到最大层, 只能通过增加巷道数量来提高巷道车分拣效率, 在这之前检测巷道数量是否达到最大, 若超出仓库尺寸限制, 需要重新咨询客户需求, 即客户所提供的仓库空间与要求的系统性能不匹配。若没有超出仓库尺寸, 则增加巷道数量, 即 $A = A + 1$ 作为新值, 货架层数不变, 通过客户需求的存储容量求解出存储列数(C)。

如果巷道车不是瓶颈, 考虑转载车的分拣效率。若转载车是瓶颈(即 $TH_{\max} = TH_{t,\max}$), 增加货架层数(T)是一个比较有效的措施, 货架层数增加 1, 通过式(23)、(24)计算巷道数量和存储列数, 重新计算系统最大分拣效率。若转载车不是瓶颈, 那么提升机必然是系统的瓶颈处, 提升机分拣效率的提高可以通过增加提升机数量, 由于提升机和拣选台数量相等, 所以刷新拣选台数量, 然后再进行评估。

4 试验研究

4.1 仿真分析

根据实际项目中设备的机械特性以及 CAMSWS 系统存储规格, 设置表 2 中主要参数。

根据设置的参数值以及图 2 所示分拣任务流程, 仿真试验设置存储位置的总数量 n 为 10 000, 拣选台数量为 4, 即提升机的组数也为 4, 对巷道数量(A)为 6, 7, 8, 货架层数(T)为 7, 9, 11, 共 9

中不同系统配置分别分析, 其中存储列数根据不同配置情况求得, 即 $C = \frac{n}{2 \times T \times A}$ 。对每一种不同的系统配置, 本文考虑了三种不同的输入(即订单到达率分别为 $1\,500\text{ h}^{-1}$, $2\,000\text{ h}^{-1}$, $2\,500\text{ h}^{-1}$), 所以一共 36 种不同情况的仿真结果如表 2 所示。

表 2 CAMSWS 中参数设置

参数	数值
单个存储货位的长度 L_s/m	0.8
单个存储货位的宽度 W_s/m	0.8
单个存储巷道的宽度 W_A/m	1.4
单层存储货架的高度 H_T/m	0.8
巷道车的平均速度 $v_r/(\text{m/s})$	2
转载车的平均速度 $v_t/(\text{m/s})$	3
提升机的平均速度 $v_l/(\text{m/s})$	6
巷道车时间上的延迟 c_r/s	3
转载车时间上的延迟 c_t/s	3
提升机时间上的延迟 c_l/s	1
输送机的长度 L_c/m	4
单个拣选台的分拣效率 μ_p/h^{-1}	360
输送机的平均输送速度 $v_c/(\text{m/s})$	0.7
接取或卸载周转箱所用时间 c_p/s	2

由表 3 的仿真结果, 可以得到如下结论。

(1) 当系统的最大分拣效率 $TH_{\max}$ 大于系统输入时, 系统的输出是由输入决定的; 相反当系统的输入大于系统最大分拣效率, 系统的输出等于它的最大分拣效率。

(2) 系统的最大分拣效率 $TH_{\max}$ 可以通过识别系统瓶颈来粗略的估计, 即第 2.2 节中式(7)~(11)所提出的求最大分拣效率的方法。在仿真模型中, 给定一个足够大的输入, 如表 3 中, 到达率为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 时, 通过分别统计各个设备的输出。如编号 28 的仿真结果, 订单到达率为 $10\,000\text{ h}^{-1}$, 巷道车的输出为 $2\,749\text{ h}^{-1}$, 证明该输入下巷道车已经达到它最大的处理能力, 即 $TH_{r,\max} = 2\,749$; 同样, $TH_{t,\max} = 1\,938$, $TH_{l,\max} = 2\,526$, $TH_{p,\max} = 2\,520$, 系统瓶颈则为处理能力最小的转载车。仿真结果显示系统输出为 $1\,938\text{ h}^{-1}$, 等于该情况下转载车的分拣效率, 即如式(11)所示, 系统的最大分拣效率等于系统瓶颈的分拣效率。

(3) 系统的瓶颈受系统配置的影响, 即不同的巷道数量、货架层数、存储列数以及提升机拣选台的数量, CAMSWS 的瓶颈不同。从表 3 中(编号 20, 21, 24, 27, 29, 30, 33, 36 的仿真结果)可以看出, 当货架层数比较高的时候, 系统的瓶颈是提升机, 因为此时提升机平均服务时间变长, 从而单位时间的输出变少, 因此为了消除提升机这里的瓶颈,

可以减少货架层数,或者增加提升机数量;当巷道数量比较多时,转载车平均服务时间相对较长,则转载车单位时间输出较少,此时系统瓶颈会在转载车这里(如编号 10, 13, 16, 19, 22, 23, 25, 26, 28, 31, 32, 34, 35 的仿真结果所示),为了消除

瓶颈,一般会减少巷道数量,或者增加层数以增加转载车数量;同理,若存储列数相对较多时,巷道车也可能会成为系统瓶颈,此时会减少存储列数,或增加巷道数量以增加巷道车数量,从而消除巷道车处的瓶颈。

表 3 仿真结果

编号	到达率 $/h^{-1}$	巷道 数量	货架 层数	存储 列数	巷道车 输出量/ h^{-1}	转载车 输出量/ h^{-1}	提升机 输出量/ h^{-1}	拣选台 输出量/ h^{-1}	系统瓶颈	最大分拣效率 TH_{max}	系统输出 量/ h^{-1}
1	1 500	6	7	120	2 749	1 500	1 500	1 500	无	1 938	1 500
2	1 500	6	9	93	1 500	1 500	1 500	1 500	无	2 441	1 500
3	1 500	6	11	76	1 500	1 500	1 500	1 500	无	2 361	1 500
4	1 500	7	7	103	1 500	1 500	1 500	1 500	无	1 800	1 500
5	1 500	7	9	80	1 500	1 500	1 500	1 500	无	2 314	1 500
6	1 500	7	11	65	1 500	1 500	1 500	1 500	无	2 361	1 500
7	1 500	8	7	90	1 500	1 500	1 500	1 500	无	1 680	1 500
8	1 500	8	9	70	1 500	1 500	1 500	1 500	无	2 160	1 500
9	1 500	8	11	57	1 500	1 500	1 500	1 500	无	2 361	1 500
10	2 000	6	7	120	2 000	1 938	2 000	2 000	转载车	1 938	1 938
11	2 000	6	9	93	2 000	2 000	2 000	2 000	无	2 441	2 000
12	2 000	6	11	76	2 000	2 000	2 000	2 000	无	2 361	2 000
13	2 000	7	7	103	2 000	1 800	2 000	2 000	转载车	1 800	1 800
14	2 000	7	9	80	2 000	2 000	2 000	2 000	无	2 314	2 000
15	2 000	7	11	65	2 000	2 000	2 000	2 000	无	2 361	2 000
16	2 000	8	7	90	2 000	1 680	2 000	2 000	转载车	1 680	1 680
17	2 000	8	9	70	2 000	2 000	2 000	2 000	无	2 160	2 000
18	2 000	8	11	57	2 000	2 000	2 000	2 000	无	2 361	2 000
19	2 500	6	7	120	2 500	1 938	2 500	2 500	转载车	1 938	1 938
20	2 500	6	9	93	2 500	2 492	2 441	2 500	提升机	2 441	2 441
21	2 500	6	11	76	2 500	2 500	2 361	2 500	提升机	2 361	2 361
22	2 500	7	7	103	2 500	1 800	2 500	2 500	转载车	1 800	1 800
23	2 500	7	9	80	2 500	2 314	2 441	2 500	转载车	2 314	2 314
24	2 500	7	11	65	2 500	2 500	2 361	2 500	提升机	2 361	2 361
25	2 500	8	7	90	2 500	1 680	2 500	2 500	转载车	1 680	1 680
26	2 500	8	9	70	2 500	2 160	2 441	2 500	转载车	2 160	2 160
27	2 500	8	11	57	2 500	2 500	2 361	2 500	提升机	2 361	2 361
28	10 000	6	7	120	2 749	1 938	2 526	2 520	转载车	1 938	1 938
29	10 000	6	9	93	4 398	2 492	2 441	2 520	提升机	2 441	2 441
30	10 000	6	11	76	6 353	3 046	2 361	2 520	提升机	2 361	2 361
31	10 000	7	7	103	3 660	1 800	2 526	2 520	转载车	1 800	1 800
32	10 000	7	9	80	5 815	2 314	2 441	2 520	转载车	2 314	2 314
33	10 000	7	11	65	8 400	2 829	2 361	2 520	提升机	2 361	2 361
34	10 000	8	7	90	4 688	1 680	2 526	2 520	转载车	1 680	1 680
35	10 000	8	9	70	7 406	2 160	2 441	2 520	转载车	2 160	2 160
36	10 000	8	11	57	10 000	2 640	2 361	2 520	提升机	2 361	2 361

4.2 案例分析

数据来源于主营品牌折扣商品的某电子商务公司,该电商企业某大区日分拣量相对较大,订单具有多品种小批量特点。为了方便拣选作业,将货物

存储在周转箱中,然后放置在存储货架上。根据周转箱的尺寸特点以及周转箱的之间的间隙,存储货架的尺寸如下:长(L_s)0.8 m,宽(W_s)0.8 m,高(H_r)0.8 m。该案例中客户的需求以及资源条件如表

4 所示。

表 4 客户需求及所给条件

参数	数值
存储容量/h ⁻¹	10 000
分拣效率	2 000
存储货架长度 $L_{\max}/\text{m}$	100
存储货架宽度 $W_{\max}/\text{m}$	30
存储货架高度 $H_{\max}/\text{m}$	13

因为 CAMSWS 一个货格中存储一个周转箱，表中所述存储容量即货格数量为 10 000。由表中存储货架各项尺寸信息以及货格尺寸，可以通过式(13)、(14)、(18)计算出系统中巷道数量、存储列数以及货架层数的最大值。可得

$$A_{\max} = 10$$

$$C_{\max} = 125$$

$$T_{\max} = 16$$

表 5 所示为巷道车、转载车、提升机以及货架材料等系统设备的市场均价。

表 5 设备单价

参数	数值/万元
巷道车单价	15
转载车单价	15
一组提升机单价	30
单个货格的成本	0.04

表 6 所示为 56 种不同系统配置下，相应的系统性能表现。分别考虑了 8 种不同的货架层数和 7 种不同的巷道数量。系统存储容量满足客户需求，为 10 000，系统最大效率通过式(11)求得，系统成本通过式(1)和表 4 中相关数据求得，订单生命周期通过式(2)以及第 2 部分所设计的仿真模型来求解。由第 4.1 节中仿真结果分析得到的结论(1)，设置仿真时系统输入为 2 000/h，若系统最大分拣效率大于 2 000，则系统输出等于输入，若分拣效率小于 2 000，则系统达不到客户要求。按照设计框架，系统初始配置计算出为表 5 中粗体第一行，即初始货架层数为 4，初始巷道数量为 10，初始存储列数为 125，提升机以及拣选台数量为 3。在该配置下计算出系统最大分拣效率为 900/h，远小于客户需求，另外计算得出的订单生命周期为 1.8 h，也是不可取的。经检测系统瓶颈处为转载车，所以通过增加层数，重新计算系统配置，直到满足需求。最终计算出表 5 中粗体第二行满足客户需求，货架层数为 8，巷道数量为 7，存储列数为 90，提升机以及拣选台数量为 7，系统最大分拣效率为 2 215/h，订单生命周期为 9.5 min，系统成本为满足条件配置中最低。

表 6 分析结果

货架层数	巷道数量	存储列数	提升机数量	存储容量	最大分拣效率/h ⁻¹	系统成本/元	订单生命周期/s
4	4	313	n.a.	10 016	n.a.	n.a.	n.a.
4	5	250	n.a.	10 000	n.a.	n.a.	n.a.
4	6	209	n.a.	10 032	n.a.	n.a.	n.a.
4	7	179	n.a.	10 024	n.a.	n.a.	n.a.
4	8	157	n.a.	10 048	n.a.	n.a.	n.a.
4	9	139	n.a.	10 008	n.a.	n.a.	n.a.
4	10	125	3	10 000	900	11 500 000	6587.53
5	4	250	n.a.	10 000	n.a.	n.a.	n.a.
5	5	200	n.a.	10 000	n.a.	n.a.	n.a.
5	6	177	n.a.	10 620	n.a.	n.a.	n.a.
5	7	143	n.a.	10 010	n.a.	n.a.	n.a.
5	8	125	4	10 000	1286	11 950 000	4285.67
5	9	113	4	10 170	1200	12 768 000	4781.87
5	10	100	4	10 000	1125	13 450 000	3877.67
6	4	209	n.a.	10 032	n.a.	n.a.	n.a.
6	5	167	n.a.	10 020	n.a.	n.a.	n.a.
6	6	139	n.a.	10 008	n.a.	n.a.	n.a.
6	7	120	5	10 080	1662	12 732 000	3282.80
6	8	105	5	10 080	1543	13 632 000	3477.80
6	9	93	4	10 044	1440	14 217 600	3574.00
6	10	84	4	10 080	1350	15 132 000	3671.40
7	4	179	n.a.	10 024	n.a.	n.a.	n.a.
7	5	143	n.a.	10 010	n.a.	n.a.	n.a.
7	6	120	6	10 080	1987	13 182 000	2381.93
7	7	103	6	10 094	1908	14 237 600	2776.13
7	8	90	5	10 080	1800	14 982 000	2971.93
7	9	80	5	10 080	1680	16 032 000	3368.93
7	10	72	5	10 080	1575	17 082 000	3566.73
8	4	157	n.a.	10 048	n.a.	n.a.	n.a.
8	5	125	n.a.	10 000	n.a.	n.a.	n.a.
8	6	105	n.a.	10 080	n.a.	n.a.	n.a.
8	7	90	7	10 080	2215	15 732 000	571.07
8	8	79	6	10 112	2057	16 644 800	767.67
8	9	70	6	10 080	1920	17 832 000	2665.07
8	10	63	5	10 080	1800	18 732 000	2963.27
9	4	139	n.a.	10 008	n.a.	n.a.	n.a.
9	5	112	n.a.	10 080	n.a.	n.a.	n.a.
9	6	93	n.a.	10 044	n.a.	n.a.	n.a.
9	7	80	7	10 080	2492	16 932 000	367.20
9	8	70	7	10 080	2314	18 282 000	464.20
9	9	62	6	10 044	2160	19 317 600	662.00
9	10	56	6	10 080	2025	20 682 000	760.60
10	4	125	n.a.	10 000	n.a.	n.a.	n.a.
10	5	100	n.a.	10 000	n.a.	n.a.	n.a.
10	6	84	n.a.	10 080	n.a.	n.a.	n.a.
10	7	71	n.a.	9 940	n.a.	n.a.	n.a.
10	8	63	8	10 080	2571	19 932 000	261.53
10	9	56	7	10 080	2400	21 132 000	386.73
10	10	50	7	10 000	2250	22 600 000	568.33
11	4	114	n.a.	10 032	n.a.	n.a.	n.a.
11	5	91	n.a.	10 010	n.a.	n.a.	n.a.
11	6	76	n.a.	10 032	n.a.	n.a.	n.a.
11	7	65	n.a.	10 010	n.a.	n.a.	n.a.
11	8	57	8	10 032	2829	21 262 800	209.27
11	9	51	8	10 098	2640	22 939 200	257.87
11	10	46	7	10 120	2475	24 298 000	356.87

注：n.a. 表示该结果不满足初始条件

5 结 论

(1) 本文介绍了跨巷道多层穿梭车仓储系统的组成及工作流程, 并从系统成本, 系统分拣效率, 订单生命周期三个方面对系统性能进行分析。

(2) 提出跨巷道多层穿梭车仓储系统性能评估方法, 系统成本受货架层数、巷道数量、存储列数以及拣选台数量影响较大; 系统的最大分拣效率受系统瓶颈的影响, 当系统输入大于等于系统最大分拣效率时, 系统实际输出等于系统最大分拣效率, 当系统输入小于系统最大分拣效率时, 系统实际输出等于系统输入; 通过设计仿真模型, 试验验证提出的性能评估方法, 并求解订单生命周期。

(3) 提出了跨巷道多层穿梭车仓储系统的综合设计框架, 采用进化算法求解性价比最高的系统配置, 以减少设计人员的工作量。

(4) 本文的局限性是未对多任务周期情况进行分析计算。多任务周期包含出入库任务循环作业, 实际作业过程中入库任务作业流程是出库作业的逆流程, 在评估系统的效率问题上, 本文仅考虑系统的出库效率, 后续还可对多任务周期的系统效率进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] MALMBORG C J. Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(8): 1807-1822
- [2] FUKUNARI M, MALMBORG C J. A network approach for evaluation of performance measures in autonomous vehicle storage and retrieval systems[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 193(1): 152-167.
- [3] EKREN B Y, HERAGU S S, KRISHNAMURTHY A, et al. Matrix-geometric solution for semi-open queueing network model of autonomous vehicle storage and retrieval system[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 68: 78-86.
- [4] MARCHET G, MELACINI M, PEROTTI S, et al. Development of a framework for the design of autonomous vehicles storage and retrieval systems[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(14): 4365-4387.
- [5] ZOU B, XU X H, GONG Y, et al. Modeling parallel movement of lifts and vehicles in tier-captive vehicle-based warehousing systems[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 254(1): 51-67.
- [6] CAI X, HERAGU S S, LIU Y. Modeling and evaluating the AVS/RS with tier-to-tier vehicles using a semi-open queueing network [J]. IIE Transactions, 2014, 46(9): 905-927.
- [7] 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.
- [8] 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-picker” order picking system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(4): 206-212.
- [9] 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.
- [10] 王艳艳, 周以齐, 沈长鹏, 等. 一种两类“货到人”订单拣选系统的适用性选择方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(4): 206-212.
WANG Yanyan, ZHOU Yiqi, SHEN Changpeng, et al. Applicability selection method of two parts-to-picker order picking systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4): 206-212.

作者简介: 马文凯, 男, 1991 年出生, 博士。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: kevin.ma@mail.sdu.edu.cn

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

吴颖颖, 女, 1985 年出生, 博士。主要研究方向为分区自动拣选系统调度优化、物流系统规划、设计和仿真等。

E-mail: Sophia.wu@sdu.edu.cn

杨栋, 男, 1988 年出生, 博士。主要研究方向为物流系统优化与设计, 供应链优化等。

E-mail: yangdong.lv@foxmail.com