

SP-AS/RS 基于新型出入口结构的行程时间分析

童泽平¹ 吴应强¹ 任亮¹ 李巍²

(武汉科技大学管理学院 武汉 430081)¹

(湖南大学物流信息与仿真技术湖南省重点实验室 长沙 410000)²

摘要 为建立分离平台式自动化存储系统的双命令行程时间分析模型,寻求自动化存储系统的最佳设计,文中引入新型的系 统出入口位置结构,通过分析分离平台式自动化存储系统的运作流程,建立双命令周期的行程时间数学模型,并验证模型优化的有效性。从期望行程时间角度分析,当形状因子 $b=1$ 时,提出的模型有效率更高,提高了 27.92%。研究的创新性在于引入新型出入口位置结构之后,用更为实际的双命令存储模式对自动化存储系统进行了行程时间分析,优化了双命令周期期望行程时间模型。在双命令周期存储模式下,分离平台式自动化存储系统引入新型出入口位置结构后,相比传统的分离平台式自动化存储系统的运作效率更高。

关键词 分离平台式自动化存储系统,行程时间模型,出入口位置,双命令周期,自动立体化仓库,运作效率

中图分类号 TP273,TP29 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.04.049

Travel Time Analysis of SP-AS/RS with New Configuration for I/O Point

TONG Ze-ping¹ WU Ying-qiang¹ REN Liang¹ LI Wei²

(School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)¹

(Hunan Provincial Key Laboratory of Logistics Information and Simulation Technology, Hunan University, Changsha 410000, China)²

Abstract In order to establish the dual-command travel time analysis model of the split-platform automated storage and retrieval system and seek the optimal design of the automated storage and retrieval system, this paper introduced a new system input and output point configuration, established a travel time mathematical model of dual-command cycle, and verified the effectiveness of model optimization. From the perspective of the expected travel time, when the shape factor $b=1$, the proposed model is more efficient, increased by 27.92%. The innovation of this paper is that after introducing the new entrance and exit location structure, the travel time of the automatic storage system is analyzed with more practical storage mode, and the expected travel time model is optimized. In the dual-command cycle storage and retrieval mode, the split-platform automated storage and retrieval system introduces a new configuration type of system input and output point, which is more efficient than the traditional split-platform automated storage and retrieval system.

Keywords Split-platform automated storage and retrieval system, Travel time model, Input/output point, Dual-command cycle, Autostereoscopic warehouse, Operational efficiency

1 引言

我国物流行业发展迅速,带动了仓储行业的快速发展。自动化存储系统(Automated Storage and Retrieval System, AS/RS)自 20 世纪 50 年代出现以来,已经成为库存控制和仓库物料处理中最重要的工具之一。自动化存储系统广泛应用于自动化生产环境和配送中心,在现代化的工厂存储中发挥着重要作用,大大提升了库存控制的性能,以及时间、空间和设备的利用率^[1-2]。自动化仓储系统在处理现代化大型仓库、

物流配送中心以及大型制造工厂的货物时扮演着重要的角色,可以有效提升库存管理的能力,以及时间和空间的利用率^[3-4]。Lee 等^[5]认为完整的自动仓储系统应该由多层货架、堆垛机(S/R machine)和系统出入口(Input/Output point, I/O point)组成,其中多层货架负责存放各种货物,堆垛机负责货物的存储或拣取,系统出入口负责保存需要存储或拣取的货物。刘兵兵等^[6]从仓储、物流与供应链管理理论 3 个角度出发,针对码头起重机调度问题、最小翻箱次数等路径优化问题,以及供应链系统优化协调等方面展开研究,并认为仓储

到稿日期:2018-12-17 返修日期:2019-01-06 本文受国家自然科学基金项目(71601074),湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20171104)资助。

童泽平(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为物流优化、管理决策, E-mail: 39998173@qq.com(通信作者);吴应强(1995—),男,硕士生,主要研究方向为仓储优化;任亮(1985—),男,博士,讲师,主要研究方向为物流优化、智能优化算法、不确定优化等;李巍(1981—),男,博士,副教授,主要研究方向为物流优化。

系统发展新风口一定是仓储与物联网技术的结合与发展。沈古文^[7]以倍深式货架型和三维紧致化型对自动化存储系统的研究进行分析,认为堆垛机采用双梭机的方式能提升倍深式自动化立体仓库的整体运作效率,并得出三维紧致化仓储系统的行程时间模型。郝晶晶^[8]对三维紧致化仓储系统的系统出入口位置进行了优化研究,认为单命令存储模式下系统出入口的最优位置为货架底端中点。张倩^[9]根据堆垛机的运行路径和存取产品的方式,建立了随机存储时倍深式货架的运行时间模型。陈璐等^[10]在提出一种整数规划模型的基础上设计了一个两阶段的启发式算法,用于自动化立体仓库中的建模。赵金萍等^[11]使用 Flexsim 软件进行仿真,然后对仿真运行数据进行分析,给出相应的改善方案,最后使用 Flexsim 仿真软件对优化后的仓库进行仿真建模,并与优化前的仿真模型输出的数据进行对比分析。马向国等^[12]确定了自动化立体仓库的绩效评估的指标变量,并将马尔可夫分析法应用到自动化立体仓库的绩效评价系统中,建立了数学求解模型,并通过 ARENA 仿真技术验证了该模型的可行性与科学性。杨玮等^[13]对双载具和三载具两种设备配置下的货位分配问题进行了分析,根据存储系统的实际运作情况,考虑了堆垛机在行走过程中的加速度,建立了更符合实际的数学模型。

传统的自动化存储系统通常使用堆垛机(S/R machine)进行货物的移动。每个堆垛机都有一个垂直驱动、一个水平驱动和一个或两个穿梭机驱动。当堆垛机装载货物在水平方向移动时,堆垛机也会在垂直方向对货物进行上下移动,穿梭机则帮助堆垛机将运载的货物运送到货架的存储单元格中。虽然堆垛机可以在水平和垂直方向同时运作,具备较高的效率性,但缺点是不能移动运载超重的货物,比如海运集装箱。因此,为了使自动化存储系统具备操作海运集装箱的能力, Hu 等^[14]研究推出了一种新型的自动化存储系统——分离平台式自动化存储系统(SP-AS/RS),得出了可靠的基于保持驻留点策略的单命令周期的期望行程时间模型。Vasili 等^[15]通过分析水平运输平台完成存取操作后返回中点位置和返回起点位置的驻留点策略拓展了 Hu 等^[14]的研究。接着, Vasili 等^[16]提出了一个以数据为基础的单命令行程时间模型,并用 Monte Carlo 仿真验证了模型的精确性。Vasili 等^[17]创新性地提出了一个新型的系统出入口结构,将分离平台式自动化存储系统中的垂直方向升降机和出入口放置在整个系统的中间,并研究分析了行程时间。但这些文献仅考虑了单命令循环(Single Command Cycle, SC)的情况,而包含存储和拣取货物的双命令循环(Dual Command Cycle, DC)更符合实际情况。Liu 等^[18]第一次以双命令存储策略对分离平台式自动化存储系统进行期望行程时间的分析,并通过软件仿真对模型进行验证,其精准性较高,为未来的相关研究打下了基础。随后, Liu 等^[19]通过对分离平台式自动化存储系统进行同层情况下双命令存取货物和不同层情况下双命令存取货物的分析,创新性地提出了存取货架分开的研究分析,即一个货架使用一个独立的升降机存储货物,另一个货架使用一个独立的升降机拣取货物;还分析了两种运作模式下的期望行程时间模型,并通过仿真验证了该模型,结果显示该模型较之前的研

究成果优化了 26%。

本文基于 Vasili 等和 Liu 等的成果进行了延伸性研究分析,提出在分离平台式自动化存储系统中引入一种新型的出入口位置结构,即垂直方向的升降机平台和系统出入口在货架的中点,基于此研究整个系统在双命令存取模式下的行程时间模型,并将该模型结果与 Liu 等的模型结果进行对比。

2 问题描述和模型建立

2.1 问题描述

分离平台式自动化存储系统如图 1 所示,其基本构成如下:每一个货架包括一个垂直运输平台(Vertial Platform, VP),每一个水平层面包含一个水平运输平台(Horizontal Platform, HP)。从第一层开始用整数 1 往上依次标记层数,从第一列开始用整数 0 往后依次标记列数(即第 0 列为垂直运输平台所在列数)。垂直运输平台的作用是连接货架的不同层级,水平运输平台的作用是连接当前层级的所有单元格。垂直运输平台和水平运输平台的运行相互独立。通过运用垂直运输平台和水平运输平台,分离平台式自动存储系统可以用更快的速度处理更重的货物,以及处理所有类型 and 尺寸的海运集装箱。

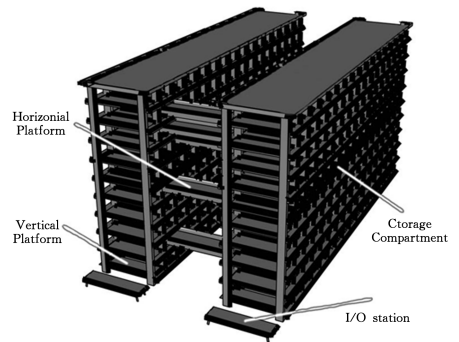


图 1 分离平台式自动化存储系统结构

Fig. 1 Split-platform AS/RS structure

假设采用双命令周期,即包含一个存储操作和一个拣取操作,且两个操作的执行数量是相等的。在系统中运用随机存储,即拣选面的任何单元格都有可能被选择用于存储和检索。货架被认定为一个连续的矩形拣选面,货架和运输平台的规格是已知的,并且运输平台是匀速运行的。当双命令周期结束后,垂直运输平台返回至第一层,水平运输平台返回至第 0 列。

执行存储操作时,首先,系统出入口将货物转运到垂直运输平台,垂直运输平台将货物运送至指定的层数。之后,垂直运输平台将货物转运到水平运输平台,水平运输平台再将货物运送至最终的货物单元格进行存储。完成存储操作后,需要拣取操作的层级,该层级的水平运输平台从单元格中拣取货物并返回第 0 列,与此同时,垂直运输平台移动到执行拣取操作的层级,接受水平运输平台所拣取的货物。最后,垂直运输平台运载货物返回系统出入口。

2.2 模型建立

2.2.1 数学符号说明

本文使用的数学符号说明如下。

L 为货架的长度; H 为货架的高度; n 为货架的层数; α 为存储操作和拣取操作位于同一层的概率; β 为存储操作和拣取操作位于不同层的概率; V_h 为水平运输平台的速度; V_v 为垂直运输平台的速度; t_0 为垂直运输平台和水平运输平台之间或者水平运输平台和单元格之间传输负载的时间; c_0 为对矩形拣选面进行规范和标准化之后,垂直运输平台和水平运输平台之间或者水平运输平台和单元格之间传输负载的时间; t_1 为系统出入口和垂直运输平台之间传输运载的时间; c_1 为对矩形拣选面进行规范标准化之后,系统出入口和垂直运输平台之间传输运载的时间; t_h 为水平运输平台从第0列货架到达最后一列货架的时间, $t_h = \frac{L}{V_h}$; t_v 为垂直运输平台从第一层货架到达最高一层货架的时间, $t_v = \frac{H}{V_v}$; t_s 为存储操作所需时间; t_r 为拣取操作所需时间; t 为双命令周期的行程时间; b 为形状因子, $b = \frac{t_v}{t_h}$ 。

通过上述数学符号说明,系统内的货架可以被标准规范化为长度为1、高度为 b 的矩形拣选面。在双命令周期中,用 (x_1, y_1) 表示存储单元格的坐标位置, (x_2, y_2) 表示拣取单元格的坐标位置,其中 x 表示货架的列数, y 表示货架的层数,所有数值均以时间为单位。Hu等^[14]基于随机存储的策略,研究并证明了 $x_i (i=1,2)$ 和 $y_i (i=1,2)$ 的概率分布函数和概率密度函数,公式如下:

$$F_{y_i}(z) = \begin{cases} \frac{z}{b}, & 0 \leq z \leq b \\ 1, & z \geq b \end{cases} \Rightarrow f_{y_i}(z) = \begin{cases} \frac{1}{b}, & 0 \leq z \leq b \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

因此,可以得到 y_i 的期望值如下:

$$E(y_i) = \int_0^b z \times f_{y_i}(z) dz = \frac{b}{2} \quad (2)$$

$$F_{x_i}(z) = \begin{cases} z, & 0 \leq z \leq 1 \\ 1, & z \geq 1 \end{cases} \Rightarrow f_{x_i}(z) = \begin{cases} 1, & 0 \leq z \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

因此,可以得到 x_i 的期望值如下:

$$E(x_i) = \int_0^1 z \times f_{x_i}(z) dz = \frac{1}{2} \quad (4)$$

双命令周期的期望行程时间公式为:

$$E(t) = E(t_s) + E(t_r) \quad (5)$$

2.2.2 双命令周期下存储操作期望时间 $E(t_s)$ 的推导

在分离平台式自动化存储系统中执行双命令周期。首先执行存储操作,系统出入口首先将货物转运至垂直运输平台,垂直运输平台再将货物运送至指定的货架层数并将货物转运至该层的水平运输平台;然后,水平运输平台将货物运送至指定的最终存储单元格。

因此,存储操作所需时间可以表示为:

$$t_s = c_1 + y_1 + c_0 + x_1 + c_0 = c_1 + y_1 + 2c_0 + x_1 \quad (6)$$

Hausman等^[20]在其研究中认为,堆垛机在存储点放下货物和在拣取点拾起货物所消耗的时间,与堆垛机总使用时间相比是很小的。因此,类似地,分离平台式自动化存储系统中的传输时间 t_0 (垂直运输平台和水平运输平台之间或者水平

运输平台和单元格之间传输货物的时间)和传输时间 t_1 (系统出入口和垂直运输平台之间传输货物的时间)与运输平台移动所消耗的时间相比是很小的。因此为了简化接下来的计算,可以将 t_0 和 t_1 假设为0,则 $c_0 = 0, c_1 = 0$,存储操作所需时间可以重新表示为: $t_s = x_1 + y_1$ 。

双命令周期下的存储操作期望时间为:

$$\begin{aligned} E(t_s) &= E(x_1) + E(y_1) \\ &= \int_0^1 z \times f_{x_1}(z) dz + \int_0^b z \times f_{y_1}(z) dz \\ &= \frac{b}{2} + \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2.3 双命令周期下拣取操作期望时间 $E(t_r)$ 的推导

情形1 双命令周期的存取操作和拣取操作位于同一层

图2示出了存取操作和拣取操作位于同一层的行程操作。由图2可知, x_1 和 x_2 位于同一层,且此时 $y_1 = y_2$ 。首先,在 y_1 层的水平运输平台从 x_1 列移动到 x_2 列,到达指定位置后,单元格将货物传输给水平运输平台;然后,该水平运输平台运载货物返回至第0列,并将货物传输给垂直运输平台;最终,该垂直运输平台运载货物返回至第一层,并将货物传输给系统出入口。

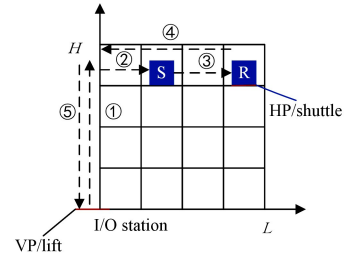


图2 存取操作和拣取操作位于同一层的行程操作

Fig. 2 Travel operation when storage operation and retrieval operation are on the same tier

因此,拣取操作所需时间可以表示为:

$$t_r = |x_1 - x_2| + 2c_0 + x_2 + y_1 + c_1 \quad (8)$$

又因为 $c_0 = 0, c_1 = 0$,所以 $t_r = |x_1 - x_2| + x_2 + y_1$ 。

假设 $W = |x_1 - x_2|$,其概率分布函数如下:

$$\begin{aligned} F_W(z) &= P(W \leq z) = P(|x_1 - x_2| \leq z) \\ &= P(-z \leq x_1 - x_2 \leq z) \\ &= \begin{cases} 1 - (1 - z)^2, & 0 \leq z \leq 1 \\ 0, & z \geq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

概率密度函数如下:

$$f_W(z) = \begin{cases} 2 - 2z, & 0 \leq z \leq 1 \\ 0, & z \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

因此,当存取操作和拣取操作位于同一层时,拣取操作的期望时间为:

$$\begin{aligned} E(t_r) &= E(|x_1 - x_2|) + E(x_2) + E(y_1) \\ &= \int_0^1 z f_W(z) dz + \frac{1}{2} + \frac{b}{2} \\ &= \frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{b}{2} \\ &= \frac{5}{6} + \frac{b}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

情形2 双命令周期的存取操作和拣取操作位于不同层

图3示出了存取操作和拣取操作位于不同层的行程操作。由图3可知, x_1 和 x_2 位于不同层, 且此时 $y_1 \neq y_2$ 。首先, 垂直运输平台从 y_1 层移动至 y_2 层; 与此同时, 位于 y_2 层的水平运输平台从第0列移动到第 x_2 列, 到达指定单元格拣取货物返回第0列并将货物转运给垂直运输平台; 最终垂直运输平台运载货物返回第1层, 并将货物传输至系统出入口。

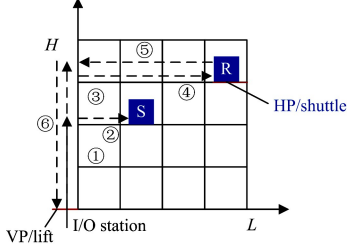


图3 存取操作和拣取操作位于不同层的行程操作

Fig. 3 Travel operation when storage operation and retrieval operation are on different tier

因此, 拣取操作所需时间可以表示为:

$$t_{r_2} = \max(|y_1 - y_2|, 2x_2 + c_0) + c_0 + y_2 + c_1 \quad (12)$$

又 $c_0 = 0, c_1 = 0$, 所以 $tr_2 = \max(|y_1 - y_2|, 2x_2) + y_2$ 。

假设 $W = \max(|y_1 - y_2|, 2x_2)$, 又因为 $|y_1 - y_2|$ 和 $2x_2$ 是相互独立的, 所以有:

$$F_w(z) = P(\max(|y_1 - y_2|, 2x_2) \leq z) = P(|y_1 - y_2| \leq z)P(2x_2 \leq z) \quad (13)$$

Hu 等在其研究中证明了 $P(|y_1 - y_2| \leq z)$, 结果如下:

$$P(|y_1 - y_2| \leq z) = \begin{cases} 0, & z \leq 0 \\ \frac{2z}{b} - \frac{z^2}{b^2}, & 0 \leq z \leq b \\ 1, & z \geq b \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{又因为: } P(2x_2 \leq z) = \begin{cases} 0, & z \leq 0 \\ \frac{z}{2}, & 0 \leq z \leq 2 \\ 1, & z \geq 2 \end{cases} \quad (15)$$

Liu 等在其研究中证明 $E(\max(|y_1 - y_2|, 2x_2))$ 结果如下:

$$E(\max(|y_1 - y_2|, 2x_2)) = E(W) = \int_z z f_z(z) dz = \begin{cases} \frac{b^2}{24} + 1, & 0 \leq b \leq 2 \\ \frac{b}{3} + \frac{4}{3b} - \frac{2}{3b^2}, & b \geq 2 \end{cases} \quad (16)$$

所以,

$$E(t_{r_2}) = E(\max(|y_1 - y_2|, 2x_2)) + \frac{b}{2} = \begin{cases} \frac{b^2}{24} + \frac{b}{2} + 1, & 0 \leq b \leq 2 \\ \frac{5b}{6} + \frac{4}{3b} - \frac{2}{3b^2}, & b \geq 2 \end{cases} \quad (17)$$

其中, α 为存储操作和拣取操作位于同一层的概率, β 为存储操作和拣取操作位于不同层的概率, 执行拣取操作的最终行程时间期望为:

$$E(t_r) = \alpha E(t_{r_1}) + \beta E(t_{r_2}) \quad (18)$$

因此, 可得:

$$E(t_r) = \begin{cases} \beta + \frac{5\alpha}{6} + (\frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2})b + \frac{\beta}{24}b^2, & 0 \leq b \leq 2 \\ \frac{5\alpha}{6} + (\frac{5\beta}{6} + \frac{\alpha}{2})b + \frac{4\beta}{3b} - \frac{2\beta}{3b^2}, & b \geq 2 \end{cases} \quad (19)$$

在随机存储策略下, 假设有 n 层货架, 那么存储操作和拣取操作位于同一层的概率 α 为 $\frac{1}{n}$, 存储操作和拣取操作位于不同层的概率 β 为 $1 - \frac{1}{n}$ 。因此, 双命令周期的期望行程时间为:

$$E(t) = \begin{cases} \frac{3}{2} - \frac{1}{6n} + b + \frac{n-1}{24n}b^2, & 0 \leq b \leq 2 \\ \frac{1}{2} + \frac{5}{6n} + \frac{4n-1}{3n}b + \frac{4n-4}{3nb} - \frac{2n-2}{3nb^2}, & b \geq 2 \end{cases} \quad (20)$$

3 基于新型出入口位置结构的双命令行程时间

本节介绍一种引入新型出入口位置结构的分离平台式自动化存储系统^[21], 将垂直运输平台和系统出入口放置于货架的中间, 垂直运输平台完成操作后返回至系统出入口驻留, 水平运输平台完成操作后返回至货架的中点。

例如假设当前存储操作的目标单元格为 (x, y) , 由图4可看出, 位于货架中点的系统出入口将货物转运给同样位于货架中点的垂直运输平台, 然后垂直运输平台运载货物至指定的层数 y 并将货物转运给位于货架中点的水平运输平台, 最终水平运输平台装载货物运送至最终单元格完成存储操作。当垂直运输平台返回至系统出入口、水平运输平台返回至货架中点时, 整个存储操作完全结束。

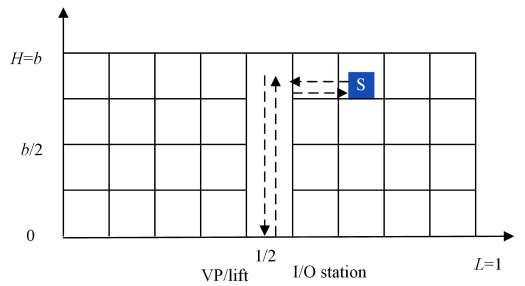


图4 引入新型出入口结构的平台分离式自动化存储系统

Fig. 4 SP-AS/RS with new configuration for I/O point

图5示出为基于新型出入口位置结构的分离平台式自动化存储系统。Vasili 等^[17]认为可以将整个新型存储系统分成左右两个区域, 并且认为在随机存储策略下, 两个区域被使用的概率是相等的, 且等于 $\frac{1}{2}$, 即 $P(L) = P(R) = \frac{1}{2}$ 。分成左右两个区域后, Vasili 等认为整个系统的行程时间期望为 $E(T) = P(L)E(T_L) + P(R)E(T_R)$, 其中 $E(T)$ 代表基于新型出入口位置结构的分离平台式自动化存储系统的行程时间期望, $P(L)$ 代表左边部分货架被使用的概率, $P(R)$ 代表右边部分货架被使用的概率, $E(T_L)$ 代表左边部分货架的期望行程

时间, $E(T_R)$ 代表右边部分货架的期望行程时间。

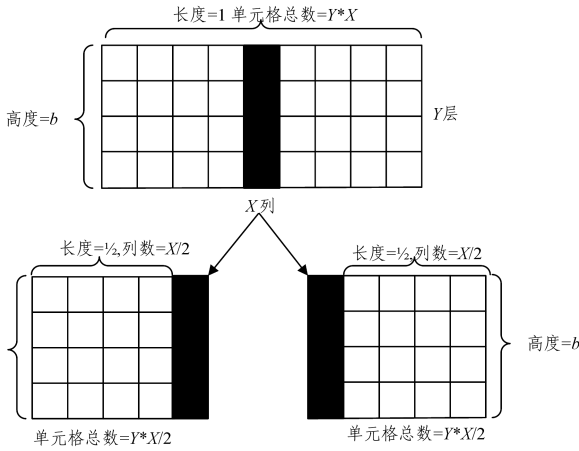


图 5 分成两个区域的平台分离式自动化存储系统

Fig. 5 SP-AS/RS divided into two regions

又因为左右两个区域的驻留点策略一样,所以左右两个区域拥有相同的形状因子和相同的期望行程时间:

$$E(T_L) = E(T_R) = E(t_{(b \times \frac{1}{2})}) \quad (21)$$

$E(t_{(b \times \frac{1}{2})})$ 代表货架单元格总数为 $Y \times \frac{X}{2}$ 的期望行程时间,可得:

$$E(T) = P(L)E(T_L) + P(R)E(T_R) \\ \Rightarrow E(T) = \frac{1}{2}E(t_{(b \times \frac{1}{2})}) + \frac{1}{2}E(t_{(b \times \frac{1}{2})}) \quad (22)$$

因此:

$$E(T) = E(t_{(b \times \frac{1}{2})}) \quad (23)$$

因为:

$$E(t) = \begin{cases} \frac{3}{2} - \frac{1}{6n} + b + \frac{n-1}{24n}b^2, & 0 \leq b \leq 2 \\ \frac{1}{2} + \frac{5}{6n} + \frac{4n-1}{3n}b + \frac{4n-4}{3nb} - \frac{2n-2}{3nb^2}, & b \geq 2 \end{cases}$$

且货架单元格总数为 $Y \times \frac{X}{2}$ 的货架长度为 $\frac{1}{2}$, 又 $b = \frac{t_v}{t_h} =$

$\frac{L}{H} \frac{v_v}{v_h} = \frac{L \times v_h}{H \times v_v}$, 所以将 b 替换成 $2b$, 分离平台式自动化存储系

统基于新型进出口位置结构的双命令行程时间模型的结果如下:

$$E(T) = E(t_{(b \times \frac{1}{2})}) = \begin{cases} \frac{3}{4} - \frac{1}{12n} + b + \frac{n-1}{12n}b^2, & 0 \leq b \leq 1 \\ \frac{1}{4} + \frac{5}{12n} + \frac{4n-1}{3n}b + \frac{2n-2}{6nb} - \frac{n-1}{12nb^2}, & b \geq 1 \end{cases} \quad (24)$$

4 结果分析

通常使用 Hu 等提出的系统配置进行结果分析, 本文使用 Hu 等的第一种系统配置进行验证分析, 在该系统配置中:

- 1) 每个货架的存储单元格总数量为 288;
- 2) 每个存储单元格的宽和高均为 4.5 m;
- 3) 垂直运输平台的运行速度为 1 m/s, 水平运输平台的

运行速度为 2 m/s。

将本文提出的分离平台式自动化存储系统基于新型进出口位置结构的双命令行程时间模型与 Liu 等提出的双命令行程时间模型进行对比分析, 结果如表 1 所列, 三维展示图如图 6 所示。

表 1 模型结果分析对比

Table 1 Comparison of model results

所在层数	列数	单元格数	形状因子 b	Liu 等的模型 $E(t)$ 的结果	本文优化后的模型 $E(T)$ 的结果	优化率
1	288	288	0.01	1.3433	0.6767	0.4963
9	32	288	0.56	2.0531	1.3240	0.3551
12	24	288	1.00	2.5243	1.8194	0.2792
17	17	288	2.00	3.6471	3.0392	0.1667
24	12	288	4.00	6.0920	5.6200	0.0775
48	6	288	16.00	8.6752	8.2691	0.0468
96	3	288	64.00	85.6402	85.3706	0.0031
288	1	288	576.00	767.8385	767.5854	0.0003

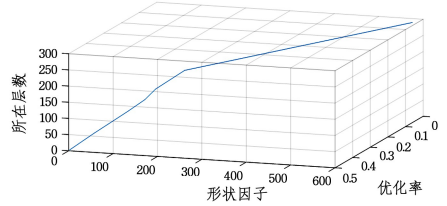


图 6 模型结果的三维展示图

Fig. 6 3D display of model results

Liu 等^[18]首次对平台分离式自动化存储系统进行双命令周期的模型建立和电脑仿真分析, 双命令循环的期望行程时间和货架的形状因子之间存在近似的凸函数关系。当形状因子 $b < 1$ 时, 双命令周期的期望行程时间随其增加而减少; 当形状因子 $b \geq 1$ 时, 双命令周期的期望行程时间随其增加而增加。 $b = 1$ 时, 双命令周期的期望行程时间取得最小值, 在第一种系统配置下, Liu 等的模型和计算机仿真结果的双命令周期的期望行程时间的最小值分别为 136.31 和 137.26, 这说明 square-in-time 货架是效率最高的货架。

Liu 等的分析认为 square-in-time 货架的效率更高, 所以当形状因子 $b = 1$ 时, 从期望行程时间角度分析, 本文提出的模型的有效率更高, 提高了 27.92%。

结束语 本文通过研究得出, 分离平台式自动化存储系统引入新型进出口位置结构之后, 整个仓储系统的运作效率得到了提升。从期望行程时间角度来看, 本文提出的双命令周期的期望行程时间模型较 Liu 等提出的双命令周期的期望行程时间模型的有效率更高, 当形状因子 $b = 1$ 时, 即在 square-in-time 货架情况下, 有效率提升了 27.92%。

本文研究的创新性在于对分离平台式自动化存储系统引入新型进出口位置结构之后, 使用更加实际的双命令存储模式对自动化存储系统进行行程时间分析, 优化了双命令周期的期望行程时间模型。

参考文献

[1] MANZINI R, GAMBERI M, REGATTIERI A. Design and con-

- trol of an AS/RS[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(7-8): 766-774.
- [2] SUN H, LEE Y H, SI Y L, et al. A Performance Estimation Model for As/Rs By M/G/1 Queuing System[J]. Computers & Industrial Engineering, 2004, 46(2): 233-241.
- [3] BERG J P V D, ZIJM W H M. Models for Warehouse Management: Classification and Examples[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(1/2/3): 519-528.
- [4] GU J. Research on Warehouse Operation: A Comprehensive Review[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(1): 1-21.
- [5] LEE Y H, LEE M H, SUN H. Optimal Design of Rack Structure with Modular Cell in AS/RS[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 98(2): 172-178.
- [6] LIU B B, SUN L B, YU Y G. New Progress in Research on Warehousing, Logistics and Supply Chain Management[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(2): 176-187. (in Chinese)
刘兵兵, 孙李波, 余玉刚. 仓储、物流与供应链管理研究新进展[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(2): 176-187.
- [7] SHEN G W. Compact Storage System Performance and Operational Strategy Research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
沈古文. 紧致仓储系统绩效及运作策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [8] HAO J J. Automatic Warehousing Design and the Application Foreground[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
郝晶晶. 自动化仓储系统的设计与应用前景分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [9] ZHANG Q. Research on running time model of multi-deep shelf stacker under classified storage [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
张倩. 分类存储下多倍深式货架堆垛机运行时间模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [10] CHEN L, LANGEVIN A, RIOPEL D. Dynamic Relocation Problem in an Automated Storage/Retrieval System[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Natural Science), 2011, 45(1): 115-119. (in Chinese)
陈璐, LANGEVIN A, RIOPEL D. 自动化立体仓库中的动态储位分配问题[J]. 上海交通大学学报(自然科学版), 2011, 45(1): 115-119.
- [11] ZHAO J P, XIONG J X, ZOU W Q, et al. Simulation and Optimization of Inbound and Outbound Automated Warehouse Based on Flexsim[J]. High Technology Letters, 2017, 27(1): 81-87. (in Chinese)
赵金萍, 熊君星, 邹文强, 等. 基于 Flexsim 的自动化立体仓库出入库仿真与优化[J]. 高技术通讯, 2017, 27(1): 81-87.
- [12] MA X G, LIU T J, WANG L, et al. Performance Evaluation of Automated Warehouse Based on Markov Chain[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1692-1700. (in Chinese)
马向国, 刘同娟, 王丽, 等. 基于马尔可夫链的自动化立体仓库的绩效评估[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(7): 1692-1700.
- [13] YANG W, WANG T, WANG J C, et al. Modeling and Simulation of Multi-Carrier Automated Warehouse Location[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(13): 117-124. (in Chinese)
杨玮, 王婷, 王洁慈, 等. 多载具式自动化立体仓库货位分配建模与仿真[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(13): 117-124.
- [14] HU Y H, HUANG S Y, CHEN C, et al. Travel Time Analysis of a New Automated Storage and Retrieval System[J]. Computers & Operations Research, 2005, 32(6): 1515-1544.
- [15] VASILIO M R, TANG S H, HOMAYOUNI S M. Comparison of Different Dwell-Point Policies for Split-Platform Automated Storage and Retrieval System[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2006, 3(1): 91-106.
- [16] VASILIO M, HONG T S. A Statistical Model for Expected Cycle Time of SP-AS/RS: An Application of Monte Carlo Simulation [J]. Applied Artificial Intelligence, 2008, 22(7-8): 824-840.
- [17] VASILIO M, HONG T S, HOMAYOUNI S, et al. Travel Time Analysis of SP-AS/RS with an Alternative Configuration for the Input/Output Station[C]// The 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering. Alexandria, Egypt; 2007, 1272-1281.
- [18] LIU T, XU X, QIN H, et al. Travel Time Analysis of the Dual Command Cycle in the Split-Platform AS/RS with I/O Dwell Point Policy[J]. Flexible Services & Manufacturing Journal, 2016, 28(3): 1-19.
- [19] LIU T, GONG Y, KOSTER R B M D. Travel Time Models for Split-Platform Automated Storage and Retrieval Systems[J]. International Journal of Production Economics, 2018, 197: 197-214.
- [20] HAUSMAN W H, SCHWARZ L B, GRAVES S C. Optimal Storage Assignment In Automatic Warehousing Systems[J]. Management Science, 1976, 22(6): 629-638.
- [21] DENG H X, ZHAO C N, WANG M. Research on Dipole Reverse Current Pair Antenna Applied to Logistics Warehousing [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(1): 113-117. (in Chinese)
邓红星, 赵超男, 王猛. 应用于物流仓储的偶极子反向电流对天线的研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(1): 113-117.