

6-4-2020

Performance Evaluation of Automated Warehouse Based on Markov Chain

Xiangguo Ma

1. Logistics School, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China;;

Tongjuan Liu

2. School of Information, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China;;

Wang Li

3. Graduate School, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China;

Rongfen Jiang

3. Graduate School, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Performance Evaluation of Automated Warehouse Based on Markov Chain

Abstract

Abstract: It is necessary that the way of evaluating the AS/RS is scientific and feasible. However the majority of existing evaluate methods is static and qualitative, whose analysis results deviation, to a certain extent, from the real data. To support the improvement of the AS/RS use, the performance of AS/RS with a dynamic and quantitative method was analyzed. Specifically, the automated stereoscopic warehouse performance evaluation indicators were established; *by using Marco analysis, the mathematical model of performance evaluation was got; based on ARENA software, the feasibility and validity of the mathematical solution model were verified.*

Keywords

AS/RS, performance evaluation, markov analysis, ARENA simulation

Recommended Citation

Ma Xiangguo, Liu Tongjuan, Wang Li, Jiang Rongfen. Performance Evaluation of Automated Warehouse Based on Markov Chain[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1692-1700.

基于马尔可夫链的自动化立体仓库的绩效评估

马向国¹, 刘同娟², 王丽³, 蒋荣芬³

(1. 北京物资学院物流学院, 北京 101149; 2. 北京物资学院信息学院, 北京 101149; 3. 北京物资学院研究生部, 北京 101149)

摘要: 科学可行的评估方法是改善自动化立体仓库应用现状的必要前提。已有的基于自动化立体仓库的绩效评估方法以静态的、定性的分析方法为主, 其结论与实际情况存在一定的偏差。采用动态的、定量的评估方法对自动化立体仓库的绩效进行分析, 从而为提高自动化立体仓库的使用效率提供分析依据。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。

关键词: 自动化立体仓库; 绩效评估; 马尔科夫分析法; ARENA 仿真

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 07-1692-09

Performance Evaluation of Automated Warehouse Based on Markov Chain

Ma Xiangguo¹, Liu Tongjuan², Wang Li³, Jiang Rongfen³

(1. Logistics School, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; 2. School of Information, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; 3. Graduate School, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China)

Abstract: It is necessary that the way of evaluating the AS/RS is scientific and feasible. However the majority of existing evaluate methods is static and qualitative, whose analysis results deviation, to a certain extent, from the real data. To support the improvement of the AS/RS use, the performance of AS/RS with a dynamic and quantitative method was analyzed. Specifically, the automated stereoscopic warehouse performance evaluation indicators were established; by using Marco analysis, the mathematical model of performance evaluation was got; based on ARENA software, the feasibility and validity of the mathematical solution model were verified.

Keywords: AS/RS; performance evaluation; markov analysis; ARENA simulation

引言

目前, 自动化立体仓库在整个仓储环节占据重要的地位, 是物流系统核心技术所在^[1]。在自动化立体仓库中, 运用大量的计算机技术, 这在一定程度上避免了由于纯人工作业而导致的作业效率低以及出错率高等问题。然而, 与欧美国家相比, 我

国自动化立体仓库的整体使用效率较低。造成该现象的主要原因是仓库的内部参数设置以及设备布局不合理。因此, 使用科学合理的方法对自动化立体仓库的绩效进行评估是十分必要的。

当前, 在对物流系统进行绩效评估时, 常见的模型与方法有: 关联矩阵法、模糊综合评价模型和层次分析法。在特定的研究领域内, 这 3 种方法是非常有效的。然而, 由于这 3 种方法均为静态的评价方法并且具有不同程度的主观性, 因此, 在一定程度上, 它们的应用范围受到了限制。事实上, 在对精确度要求比较高的系统进行绩效评估时, 运用



收稿日期: 2015-06-15 修回日期: 2015-12-03;
基金项目: 北京市社会科学基金(15JGB071), 北京物资学院高级别科研项目培育基金(GJB20161004), 北京物资学院 2014 年度青年基金(2014XJQN03), 北京物资学院高级别科研项目培育基金(GJB20143006);
作者简介: 马向国(1975-), 男, 满族, 内蒙多伦, 博士, 副教授, 研究方向为现代物流系统规划及建模仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1692 •

上述 3 种评价方法所得的结论与实际情况会存在一定的偏差。然而, 自动化立体仓库是一个动态的、多因素的复杂系统, 所以, 常见的评价方法并不适用。因此, 在对自动化立体仓库进行绩效评估时, 应该选择动态的、定量的评价方法。

马尔可夫分析法(Markov Analysis)又称为马尔可夫转移矩阵法, 是指在马尔可夫过程的假设前提下, 通过分析随机变量的现实变化情况来预测这些变量未来变化情况的一种预测方法^[2]。马尔可夫分析法是一种动态的研究方法, 能够预测下一个时刻系统所处的状态, 并且因其具有无后效性的特征, 故预测处理过程不需要太多的历史数据。因此, 将马尔可夫分析法应用到自动化立体仓库的绩效评估中具备理论基础。本文针对自动化立体仓库的特征, 建立基于马尔可夫链的自动化立体仓库的绩效评估模型, 且将其运用于实际案例中, 并对结果进行分析。然后, 基于同一实际案例, 建立 ARENA 仿真模型, 并将两者所得的结果进行对比分析, 最终对数学分析模型的准确性进行验证。

1 自动化立体仓库的绩效指标

对自动化立体仓库进行绩效评估的目的是判断系统运行效率是否合理以及是否存在进一步的提升空间, 从而为相关改进工作指明方向。一般而言, 用来对自动化立体仓库运作绩效进行评估的指标有^[3-6]:

1) 仓库总体的利用率

衡量仓库面积和空间的利用程度, 用在一定时间内仓库的平均堆放面积占总面积的比例, 或者平均空间堆放体积占库房总容积的比例来衡量。

2) 仓库货位利用率

衡量仓库货位的利用程度, 用在一定时间内仓库的平均货位占用量占总货位的比例来衡量。货位利用率在一定程度上反应了仓库内原料库存数量。

3) 仓库的吞吐能力

衡量仓库的最大出入库作业能力, 用在一定时期内系统的最大吞吐量或平均吞吐量来衡量, 为入

库量和出库量的总和。

4) 设备利用率

包括设备的能力利用率和时间利用率两个方面, 分别用在一定时期内平均载荷量占额定载荷量的比例和实际工作时间占额定工作时间的比例来衡量。

5) 系统响应能力

衡量系统对出入库任务的响应速度, 这与系统的调度策略密切相关。用在一定时期内出入库任务的平均等待时间、处理时间、堵塞时间来衡量。

6) 物流周转速度

用在一定时期内货物在库位中的平均存储时间, 或者仓库的平均周转次数来衡量。

7) 作业差错率

可以用作业中发生的错误操作次数占总操作次数的比例来衡量。

本文, 在对自动化立体仓库进行绩效评估时, 所使用的绩效评估指标变量有: ①系统中平均到达的需求数量; ②系统中平均等待的需求数量; ③系统中平均到达的出库需求数量; ④系统中平均到达的入库需求数量; ⑤任意时间系统内堵塞的概率; ⑥系统内任意需求的逗留时间; ⑦系统内任意需求的等待时间; ⑧服务器的使用率。

2 自动化立体仓库的系统模型

2.1 案例描述

该立体库占地面积达 1 600 m²(入库小车通道不占用库房面积), 高度近 18 m, 3 个巷道(6 排货架), 作业方式为整盘入库。在此案例中, 重要的设备是 AGV 小车。当货物进入仓库时, 通过无线网络呼叫空闲 AGV 小车, 使其从货台取货, 然后输送到指定的入库暂存区(共有很多个入库暂存区), 再由堆垛机将货物放到自动化立体仓库的货架上。具体而言, 在货物的出入库过程中, 当货物到达货台时, 便发送一条请求命令询问 AGV 小车是否空闲, 若空闲则 AGV 小车运行至取货台, 叉

取货物并根据指令将货物运送到指定的货台。若 AGV 小车处于繁忙状态, 则货物进入等待队列, 当 AGV 小车转为空闲状态时, 则 AGV 小车自动执行此作业的请求命令。

2.2 系统模型的建立

2.2.1 模型的假设条件

为了使随机模型更具有准确性, 现作如下假设:

1) 在 AGV 小车的运行中, 服从“先进先出”的服务准则, 每次只能取一件货物, 如果同时取两个则计作 2 次任务, 以此类推;

2) 工作时间设为 8 h;

3) 忽略机器的初始状态, 即 AGV 小车或者堆垛机的启动时间以及伸缩叉的时间即预热时间等均不被考虑。

2.2.2 模型的构建

因为实际的自动化立体仓库有多排货架, 多辆 AGV 小车, 整个自动化系统所涉及到的因素较为复杂, 所以, 当需求多到需要所有的 AGV 小车同时启动时, 我们将需求平均分给每辆 AGV 小车。因此, 在基于马尔可夫预测法的模型分析求解时, 可将一辆 AGV 小车独立抽离出来, 建立有一个服务器、一个队列的模型, 如图 1 所示。并且, 引入需求优先级的概念: 双需求优先级为“1”, 单需求为“0”, “1”的优先级高于“0”。该模型的构建是基于实际情况而设立的, 符合现实需求。

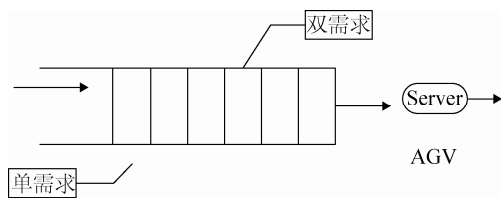


图 1 简化后的排队模型

2.2.3 相关参数说明

1) 出库需求和入库需求的达到均服从泊松分布(根据经验值以及历史数据统计样本得出), 速率分别为 λ_1 和 λ_2 , 并且二者的到达相互独立;

2) 在此系统中只有单一的服务器即 AGV 小车, 当其执行单任务时, 它的运行时间服从表达式 $s_s(\chi)$; 当其执行双任务时, 其运行时间服从表达式 $s_d(\chi)$;

3) 在 2 个等待服务的队列中, 出库需求的最大容量为 K; 入库需求的最大容量为 L。当库内需求数量到达一定容量时, 则不能再进入自动化立体仓库。

3 基于马尔可夫链的绩效评估

3.1 系统状态分析

在建立马尔可夫模型时, 首先要对系统的状态进行分析。本文将自动化立体仓库中需求到达的种类及数量作为系统的状态, 记 $X = \{X_n, n = 0, 1, \dots\}$ 。X 是一个二维随机变量, 其中 $X_n = (i, j)$ 表示在自动化立体仓库系统中存在着 i 个出库需求 j 个入库需求。当系统中开始出现忙碌时期或者当一个服务完成时, 就会出现状态的转移, 当时间及状态都离散时, X 便构成了马尔可夫链。

仓库中需求的到达服从泊松流。用 v_{ij} 或 u_{ij} 表示, 在 t 时刻, 有 i 个出库需求、 j 个入库需求的到达概率。

若 AGV 小车执行的是双任务, 即 $i \neq 0$ 并且 $j \neq 0$, 记概率为 v_{ij} , 那么

$$v_{ij} = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda_1} (\lambda_1 t)^i}{i!} \frac{e^{-\lambda_2} (\lambda_2 t)^j}{j!} dS_d(t) \quad (1)$$

若 AGV 小车执行的是单任务, 即 $i = 0$ 或者 $j = 0$, 记概率为 u_{ij} , 那么

$$u_{ij} = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda_1} (\lambda_1 t)^i}{i!} \frac{e^{-\lambda_2} (\lambda_2 t)^j}{j!} dS_s(t) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda_1} e^{-\lambda_2} (\lambda_2 t)^j}{j!} dS_s(t) \quad (2)$$

$$\text{或} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\lambda_1} e^{-\lambda_2} (\lambda_1 t)^i}{i!} dS_s(t)$$

此时, 在系统中构成马尔可夫链 $(0, 0), (0, 1), \dots, (0, L), (1, 0), \dots, (K-1, L), (K, 0), \dots, (K, L)$, 并且转移矩阵为:

$$A_i = \begin{bmatrix} u_{i0} & u_{i1} & u_{i2} & \cdots & u_{iL-1} & u_{iL}^* \\ v_{i0} & v_{i1} & v_{i2} & \cdots & v_{iL-1} & v_{iL}^* \\ 0 & v_{i0} & v_{i1} & \cdots & v_{iL-2} & v_{iL-1}^* \\ 0 & 0 & v_{i0} & \cdots & v_{iL-3} & v_{iL-2}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & v_{i1} & v_{i2}^* \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & v_{i0} & v_{i1}^* \end{bmatrix},$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, K-1$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ u_{00} & u_{01} & u_{02} & \cdots & u_{0L-1} & u_{0L}^* \\ 0 & u_{00} & u_{01} & \cdots & u_{0L-2} & u_{0L-1}^* \\ 0 & 0 & u_{00} & \cdots & u_{0L-3} & u_{0L-2}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & u_{01} & u_{02}^* \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & u_{00} & u_{01}^* \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ u_{10} & u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1L-1} & u_{1L}^* \\ 0 & u_{10} & u_{11} & \cdots & u_{1L-2} & u_{1L-1}^* \\ 0 & 0 & u_{10} & \cdots & u_{1L-3} & u_{1L-2}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & u_{11} & u_{12}^* \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & u_{10} & u_{01}^* \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ u_{i0} & u_{i1} & u_{i2} & \cdots & u_{iL-1} & u_{iL}^* \\ 0 & u_{i0} & u_{i1} & \cdots & u_{iL-2} & u_{iL-1}^* \\ 0 & 0 & u_{i0} & \cdots & u_{iL-3} & u_{iL-2}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & u_{i1} & u_{i2}^* \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & u_{i0} & u_{i1}^* \end{bmatrix},$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, K-1$$

$$P = \begin{bmatrix} B_0 & B_1 & B_2 & \cdots & B_{K-1} & B_K \\ A_0 & A_1 & A_2 & \cdots & A_{K-1} & A_K \\ 0 & A_0 & A_1 & \cdots & A_{K-2} & A_{K-1}^* \\ 0 & 0 & A_0 & \cdots & A_{K-3} & A_{K-2}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & A_1 & A_2^* \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & A_0 & A_1^* \end{bmatrix},$$

$$\text{并且, } u_{ij}^* = \sum_{i \geq j} u_{ij}, \quad v_{ij}^* = \sum_{i \geq j} v_{ij}, \quad A_{ij}^* = \sum_{ij} A_j,$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, K-1$$

3.2 系统的半马尔可夫过程分析

对于概率向量 $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$, 如对任意的 $i, j \in S: \lim_{K \rightarrow \infty} P_j^{(K)} = \pi_j$, 则称 π 为马尔可夫链的稳态分布。稳态分布经过多次转移之后, 系统存在一个处于状态 j 的有限概率, 此概率与系统原始状态无关。因此马尔可夫链是一种稳态分布, 则便可根据中间状态的转移达到即定的目标。基于马尔可夫链稳态分布的相关性质^[7], 即 $\pi = \pi P$ 且 $\pi e = 1$, 以及状态的转移矩阵, 则有如下等式成立:

$$\pi_i = \pi_0 B_i + \sum_{v=1}^{i+1} \pi_v A_{i+1-v}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, K-1 \quad (3)$$

$$\pi_K = \pi_0 B_K + \pi_1 A_K + \sum_{v=2}^K \pi_v A_{i+1-v} \quad (4)$$

π 是一种稳定状态的概率分布, 且这种状态是在任意时刻都可能发生的。考虑到自动化立体仓库内的运作流程, 本文运用半马尔可夫方法对其进行分析, 得出选定的自动化立体仓库绩效评估指标的量化值。

半马尔可夫过程与初始系统中的需求的容量是不同的, 半马尔可夫过程的时间间隔是服从一般的时间分布, 并且其状态的转移只发生在指定的时间点^[8], 并不是随机发生的过程, 如图 2 所示。

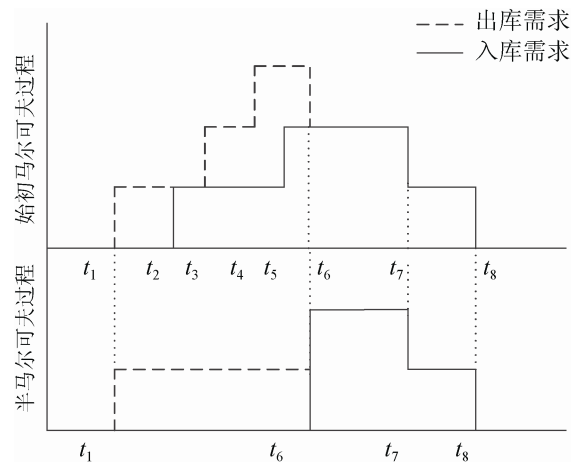


图 2 过程对比

在初始的马尔可夫过程图中，状态转移在 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_8$ 时刻发生，而在半马尔可夫过程中，状态转移仅发生在 t_1, t_6, t_7, t_8 时刻。

记 η_{ij} 表示在状态 (i, j) 的预计逗留时间，则有等式(5)成立：

$$\eta_{ij} = \begin{cases} \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, i = j = 0; \\ E(s_s), j = 0, 1 \leq i \leq K, \\ \text{或 } i = 0, 1 \leq j \leq L; \\ E(s_d), 1 \leq i \leq K, 1 \leq j \leq L; \end{cases} \quad (5)$$

显然，当 $i = j = 0$ 时， $\eta_{ij} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ ；当 $i, j \geq 1$ 时，半马尔可夫过程才开始出现，此时系统中的状态为 $(i, 0)$ 或 $(0, j)$ ，及服务器执行的是单任务，因此 η_{i0} 或者 $\eta_{0j} = E(S_s)$ ；当 $1 \leq i \leq K, 1 \leq j \leq L$ 时，服务器执行的是双任务，因此 $\eta_{ij} = E(S_d)$ 。

并且在半马尔可夫过程中，在任意时间处于状态 (i, j) 的概率：

$$P_{ij} = \frac{\pi_{ij}\eta_{ij}}{\sum_{K=0}^K \sum_{L=0}^L \pi_{KL}\eta_{KL}} \quad (6)$$

3.3 仓库绩效评估指标的量化

3.3.1 量化公式

根据以上分析，自动化立体仓库内各个绩效评估指标的量化公式如下所示：

- 1) 系统中平均到达的需求数量

$$E(N) = \sum_{i=0}^{K+1} \sum_{j=0}^{L+1} (i + j)P_{ij} \quad (7)$$

- 2) 系统中平均等待的需求数量

$$E(N_q) = \sum_{i=1}^{K+1} (i-1)P_{i0} + \sum_{j=1}^{L+1} (j-1)P_{0j} + \sum_{i=0}^{K+1} \sum_{j=0}^{L+1} (i + j - 2)P_{ij} \quad (8)$$

- 3) 系统中平均到达的出库需求数量

$$E(N_{rc}) = \sum_{i=0}^{K+1} \sum_{j=0}^{L+1} iP_{ij} \quad (9)$$

- 4) 系统中平均到达的入库需求数量

$$E(N_{sc}) = \sum_{i=0}^{K+1} \sum_{j=0}^{L+1} jP_{ij} \quad (10)$$

- 5) 任意时间系统内堵塞的概率

$$P_b = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \sum_{j=0}^{L+1} P_{K+1,j} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \sum_{i=0}^{K+1} P_{i,L+1} \quad (11)$$

- 6) 系统内任意需求的逗留时间，通过 Little 公式得：

$$E(T) = \frac{E(N)}{\lambda} \quad (12)$$

$$\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)(1 - P_b)$$

- 7) 系统内任意需求的等待时间

$$E(T_q) = \frac{E(N_q)}{\lambda} \quad (13)$$

$$\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)(1 - P_b)$$

- 8) 服务器的使用率

$$\rho = 1 - \rho_{00} \quad (14)$$

3.3.2 结果分析

将自动化立体仓库的实际运行数据代入数学求解模型中，得出系统评价指标的量化值，从而对系统的运行状态进行评估。在本文中系统运行的主要参数值，如表 1 所示。

表 1 主要参数值

指标	文中表示	参数
出库需求到达	$\lambda_1 = 1$	Poisson(2)
入库需求到达	$\lambda_2 = 3$	Poisson(3)
单任务服务时间	$S_s(t)$	Exponential(5)
双任务服务时间	$S_d(t)$	Exponential(4)
出库需求排队容量	K	5
入库需求排队容量	L	5

将 $\lambda_1, \lambda_2, S_s(t), S_d(t), K, L$ 的函数值代入公式，此时逗留时间：

$$\eta_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{5}, i = j = 0; \\ \frac{1}{5}, j = 0, 1 \leq i \leq 5, \text{或 } i = 0, 1 \leq j \leq 5; \\ \frac{1}{4}, 1 \leq i \leq 5, 1 \leq j \leq 5; \end{cases} \quad (15)$$

再结合公式(6)，得出相关概率估计值，如表 2 所示。

表 2 主要概率的估计值

类型	估测值	类型	估测值	类型	估测值
P_{00}	0.202 3	P_{10}	0.069 3	P_{20}	0.022 7
P_{01}	0.112 7	P_{11}	0.068 7	P_{21}	0.031 1
P_{02}	0.062 6	P_{12}	0.051 3	P_{22}	0.028 9
P_{03}	0.353 9	P_{13}	0.034 8	P_{23}	0.023 0
P_{04}	0.019 9	P_{14}	0.022 6	P_{24}	0.017 2
P_{05}	0.010 3	P_{15}	0.014 4	P_{25}	0.012 7
P_{30}	0.007 4	P_{40}	0.002 4	P_{50}	0.000 7
P_{31}	0.012 6	P_{41}	0.004 8	P_{51}	0.001 7
P_{32}	0.013 9	P_{42}	0.006 1	P_{52}	0.002 4
P_{33}	0.012 8	P_{43}	0.006 4	P_{53}	0.002 9
P_{34}	0.010 9	P_{44}	0.006 3	P_{54}	0.003 2
P_{35}	0.009 1	P_{45}	0.005 9	P_{55}	0.003 8

最后, 将现有数值分别相应地代入公式(7)~(14)中, 得出主要指标的量化值, 如表 3 所示。

表 3 主要指标的量化值

绩效评估指标	量化值
系统中平均到达的需求数量	2.740 2
系统中平均等待的需求数量	1.593 1
系统中平均到达的出库需求数量	1.087 9
系统中平均到达的入库需求数量	1.776 3
任意时间系统内堵塞的概率 %	0.029 0
系统内任意需求的逗留时间/min	0.589 5
系统内任意需求的等待时间/min	0.330 9
服务器的使用率 %	82.764 6

由以上数据可知, 在该自动化立体仓库中, 整体资源配置比较合理。在系统内部, 出库需求量和入库需求量相互均衡。另外, 系统中的任意时间需求堵塞率为 0.000 29, 这说明系统没有出现大量需求堵塞现象; 服务器的使用率为 0.827 646, 这说明系统中设施设备利用率较高。因此, 该自动化立体仓库的整体使用效率较高。

4 仿真实验分析

为对数学求解模型的准确性进行科学判断, 利用 ARENA 仿真模型对自动化立体仓库的绩效状况进行分析, 并将两者所得的结果进行比较。

4.1 仿真建模

4.1.1 仿真逻辑图设计

ARENA 仿真软件是基于实体驱动流程的软件, 在仿真模型建立之前应理清仿真对象的内部逻辑关系^[9]。因此, 在前文分析的基础上, 绘制自动化立体仓库的仿真逻辑图, 如图 3 所示。

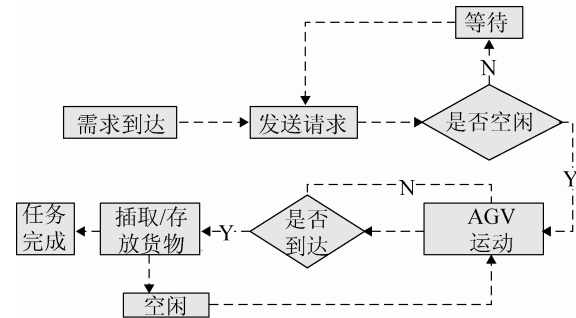


图 3 仿真逻辑图

当需求到达的时候, 若此时 AGV 小车处于空闲状态, 则 AGV 小车转为工作状态, 执行任务需求, 否则, 需要等待 AGV 小车转为空闲状态时才开始处理, 直到所有需求处理完成。

4.1.2 仿真模型建立

在自动化立体仓库中, 需求的处理过程涉及到仓库、传送带、AGV 小车以及叉车等设备, 这是一个复杂的、多因素的系统。基于仿真逻辑图, 利用 ARENA 进行仿真时, 总模型设计图, 如图 4 所示。

首先, 需要运用 ARENA 中的 create 模块产生入库需求以及出库需求, 即图 4 中的 storage orders 和 retrieval orders; 然后, 将各需求赋予初始值, 在自动化立体仓库中, 当 AGV 小车开始处理需求时, 我们将按照需求的种类来进行处理, 即 decide 模块(区分所达到的是单需求还是双需求)。如果是单需求, 则需要进一步判断, 是单需求中的入库需求还是出库需求, 如果是入库需求, 则如图 4 中的最上面一行, 需要请求一个 AGV 小车来进行搬运, 此时如果小车处于空闲状态, 则即可开始进行操作, 如果处于忙碌状态, 则需求需要排队等待

运输(Request AGV 上面的蓝色横线); 如果此时是单需求中的出库需求, 则首先要确定在自动化立体仓库中是否存在足够数量的合格产品进行运输, 如果有, 则进一步判断是否为订单中所要求的产品种类, 如果全都是符合要求的, 则开始进行运送, 如果有其中的一项不符合要求, 则需要等待一段时间, 等仓库中有足够数量的合格产品之后再进行操作。

如果在上述第一个 **decide** 模块中我们所确定出来的仓库中所到达的需求为双需求, 即既有入库

需求(同时)也有出库需求。首先, 进行入库需求的操作, 请求 AGV 小车将指定的货物运送到 AS/RS 仓库中; 当入库需求操作完毕后, 再开始进行出库需求的操作, 与上述出库需求的出库机制相一致, 但此时采用新的模块进行操作, 用 **pickup** 模块对货物进行分拣, 分拣之后即可请求各种设备进行货物的出库。

另外, 在需求的处理过程中, 即在货物的出入库过程中, 传送带是必用的设备。在操作过程中, 传送带运作的逻辑关系如图 5 所示。

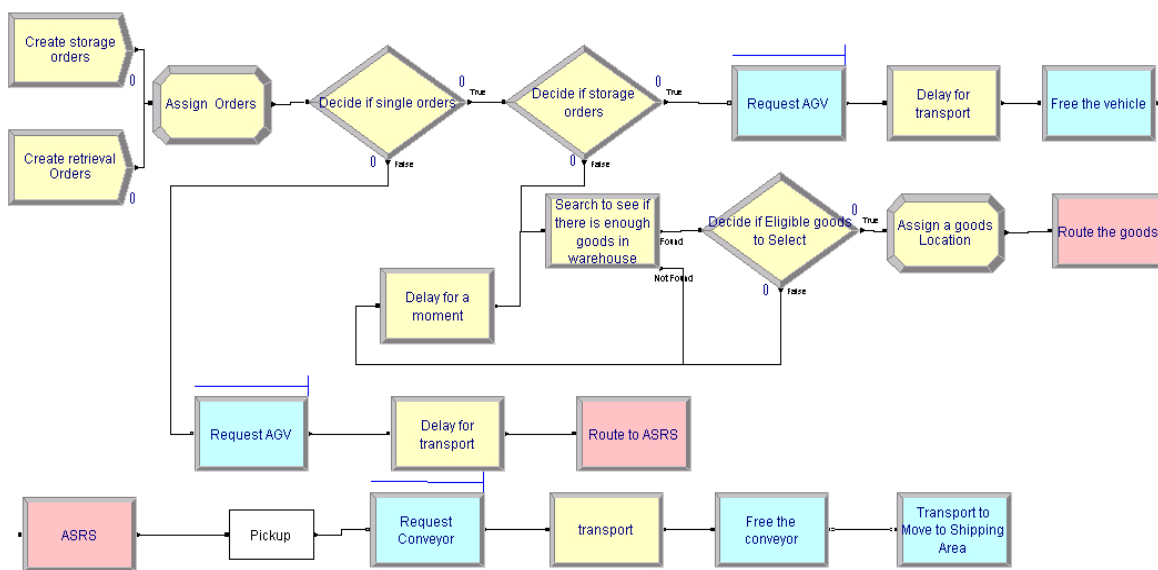


图 4 总模型设计图

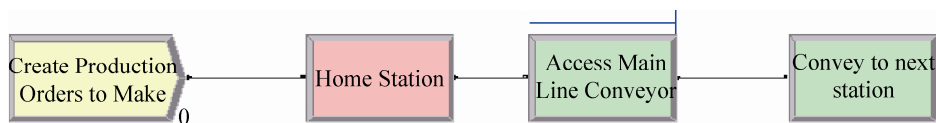


图 5 传送带运送逻辑图

由图 5 可知, 产品的需求到达之后, 最先到达的是站点, 我们命名为 **home station**, 即货物开始进入传送带的地方, 然后即进入主运送通道, 接着不断地向下一个站点运送, 最后进入高层货架的存储。

4.1.3 仿真模型参数的设置

出库需求的到达符合均值为 2 的泊松分布, 一次达到最大数量为 5, 如图 6 所示。

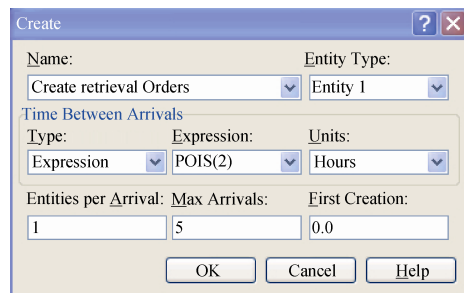


图 6 Create retrieval orders 模块参数设置

入库需求到达参数的设置与出库需求类似, 其

中在单需求的处理中, 服务时间服从的是均值为 5 的指数分布, 如图 7 所示。

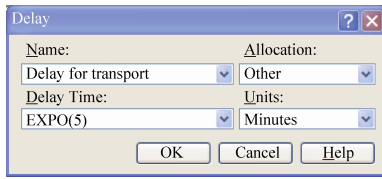


图 7 单需求服务时间设置

在双需求的处理过程中符合均值为 4 的指数分布, 如图 8 所示。

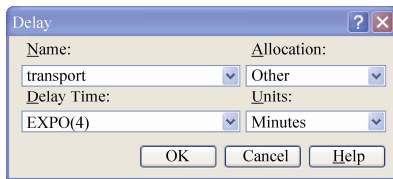


图 8 单需求服务时间设置

Usage

Number Busy	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
	ASRS_Transporter	0.8400	(Insufficient)	0.00
Number Scheduled	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
	ASRS_Transporter	1.0000	(Insufficient)	1.0000
Utilization	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
	ASRS_Transporter	0.8400	(Insufficient)	0.00

图 9 AGV 小车的使用效率图

Request ASRS.Queue	0.3144	(Insufficient)	0.00	1.0000
--------------------	--------	----------------	------	--------

图 10 任意需求的等待时间

表 4 各项指标的仿真值

绩效评估指标	仿真值
系统中平均到达的需求数量	2.854 2
系统中平均等待的需求数量	1.606 2
系统中平均到达的出库需求数量	1.080 5
系统中平均到达的入库需求数量	1.773 7
任意时间系统内堵塞的概率(%)	0.027 9
系统内任意需求的逗留时间(分)	0.587 2
系统内任意需求的等待时间(分)	0.330 4
服务器的使用率(%)	82.764 6

4.2 仿真运行及结果分析

4.2.1 仿真运行

通过模型的反复运行, 得出仿真报告。

4.2.2 仿真结果分析

通过系统的运行, 系统中 transporter 即 AGV 小车的使用效率, 如图 9 所示。

由运行报告可以知道 AGV 小车每次搬运一件货物, 其在整个自动化立体仓库的运行中使用效率为 84%, 与之前由马尔可夫分析方法所得的结论相差无几; 同理可以从报告中得出任意需求的等待时间, 如图 10 所示。

根据报告统计, 自动化立体仓库的绩效评估指标的量化值, 如表 4 所示。

4.3 对比分析

将表 3~4 的相应内容进行对比分析, 得出平均相对误差, 其中平均相对误差的值由公式(16)取得:

$$\text{平均相对误差} = \frac{\text{相对误差总和}}{(K+1)(L+1)}, \quad (16)$$

$$\text{相对误差总和} = \sum \frac{|\text{估计值} - \text{仿真值}|}{\text{仿真值}};$$

其中对比结果, 如表 5 所示。

表 5 马尔可夫链算法评估结果与仿真建模结果对比值

绩效评估指标	相对误差 %
系统中平均到达的需求数量	0.151 7
系统中平均等待的需求数量	0.198 0
系统中平均到达的出库需求数量	0.257 3
系统中平均到达的入库需求数量	0.084 1
任意时间系统内堵塞的概率 %	0.358 2
系统内任意需求的逗留时间 min	0.133 4
系统内任意需求的等待时间 min	0.187 9
服务器的使用率 %	0.013 6

通过这 2 种方法的对比结果可以发现, 将马尔可夫分析方法应用于自动化立体仓库的绩效评估是有效的, 它科学合理地对自动化立体仓库的运行状态进行了缜密地分析。

5 结论

本文主要分析了基于马尔可夫链的自动化立体仓库的绩效评估问题。本文对自动化立体仓库的运行状态进行定量分析并构建了简单排队模型。针对自动化立体仓库的绩效评估指标, 在自动化立体仓库的马尔可夫链具有稳态分布特性的基础上, 通过对自动化立体仓库的半马尔可夫过程进行分析, 求出了绩效评价指标的量化表达式, 提出了一种基于马尔可夫链的自动化立体仓库的绩效评估数学求解模型。综合而言, 本文的绩效评估模型具有很强的实用价值和创新性。创新性主要表现为:

1) 根据马尔可夫预测法的求解要求, 引入需

求优先级的因子, 遵循自动化立体仓库的运行特征, 构建了单服务器单队列的简单排队模型;

2) 基于系统的马尔可夫链的稳态分析特性, 引入半马尔可夫过程分析法, 导出系统任意时间处于状态 (i, j) 的概率。

通过实际案例的应用, 将数学模型的解与仿真结果进行对比分析, 最终得出了基于马尔可夫链的自动化立体仓库的绩效评估数学求解模型具有可行性与科学性的结论。另外, 文本对其他相关绩效评估问题的研究, 具有一定的借鉴价值。

参考文献:

- [1] 佟美慧. 自动化立体仓库的货位优化与管理 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2013.
- [2] 许智慧. 马尔可夫状态转移概率矩阵的求解方法研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- [3] 李美霞, 李卫东. 企业物流自动化立体仓库设计 [J]. 物流技术, 2010, 12: 138-140.
- [4] 胡红梅. 物流质量指标体系的构建及其评价 [J]. 商品储运与养护, 2008, 30(8):37-38.
- [5] 王红春. 基于EIQ-Flexsim的自动化立体仓库仓储设备及系统设计 [J]. 物流科技, 2013, 36(9): 1-5.
- [6] 雷楠南. 自动化立体仓库系统的技术研究与应用 [J]. 机械工程与自动化, 2014 (3): 163-165.
- [7] 温海彬, 王友国. 马尔可夫链预测模型及一些应用 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [8] 陈童, 黎放, 狄鹏. 基于马尔可夫到达过程的两级可修备件 (S-1, S) 库存优化模型 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(5): 113-119.
- [9] 赵璐, 金淳, 于越. 可视化交互仿真软件Arena的最新进展 [J]. 系统仿真技术, 2006, 2(3):176-181.
- [10] 韩子鹏, 赵子华, 刘世平, 等. 火箭外弹道学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 23-83.
- [11] 侯宏录, 闫帅. 利用 Simulink 仿真的弹道辨识算法精度分析 [J]. 西安工业大学学报, 2008, 28(5): 409-413.
- [12] 张民权, 刘东方, 王冬梅, 等. 弹道修正弹发展综述 [J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 127-130.

(上接第 1691 页)

- [7] 吴建云, 王春洁, 汪瀚. 基于蒙特卡洛法的卫星天线板展开精度分析 [J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(6): 89-94.
- [8] 王华, 徐军, 张芸香. 基于 Matlab 的弹道蒙特卡洛仿真研究 [J]. 火箭与制导学报, 2005, 25(1): 181-183.
- [9] 杨帆, 芮筱亭, 王国平. 提高弹道导弹命中精度方法研究 [J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2007,