

# 多模式自动化存取系统设备调度与任务分配<sup>①</sup>

付晓锋<sup>1,2</sup>, 张波<sup>1</sup>, 俞汉生<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(总后建筑工程研究所, 西安 710032)

<sup>2</sup>(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

**摘要:** 多模式自动化存取系统是一种新型仓储系统, 其存储空间利用率高、设备配置灵活. 为提高作业效率, 降低运行成本, 需对系统进行设备调度和任务分配, 实现按需配置和管理系统资源. 通过将系统的作业过程建模为多个服务中心组成的排队网络, 对服务中心设备数量进行调度, 保证系统稳态运行. 基于预期作业时间设计具有两级模糊规则的模糊控制器, 为托盘物资上下架任务分配托盘提升机, 实现托盘物资上下架任务的优化分配, 减少作业过程所需的运输路径, 从而提高作业效率, 减少作业叉车数量, 降低作业成本. 文中通过一个托盘物资上架任务仿真算例, 验证了模糊控制任务分配策略的有效性.

**关键词:** 设备调度; 任务分配; 模糊控制; 排队网络; 多模式自动化存取系统

## Equipment Dispatch and Task Assignment for an Autonomous-Steerable-Vehicle Storage and Retrieval System of a Warehouse

FU Xiao-Feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, YU Han-Sheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Construction Engineering Research Institute, General Logistics Department of PLA, Xi'an 710032, China)

<sup>2</sup>(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** An autonomous-steerable-vehicle storage and retrieval system is a new storage conception, which has high space utilization and can dispatch its equipments flexibly. To achieve efficient and low-cost operations, the equipment dispatch and task assignment should be designed according to the requirements of the warehouse. In this paper, the inbound and outbound processes of the autonomous-steerable-vehicle storage and retrieval system are modeled as queue networks, which include several service centers. The equipments in each service center are dispatched to ensure the steady state of the system. A fuzzy controller based on the expected time of handling palletized units is designed, which can assign the palletized units to the optimal lifters in inbound and outbound process. In this method, the number of forklift can be reduced due to the reduction of the handling distance in the inbound and outbound processes, so that it decreases the operation cost and heightens the operation efficiency. At last, an example simulation of inbound process is shown to verify the validness of the method in the task assignment.

**Key words:** equipment dispatch; task assignment; fuzzy control; queuing network; autonomous-steerable-vehicle storage and retrieval system

### 1 系统概述

自动化立体库仓储系统的自动化程度高、操作简便、作业效率高, 得到了较广泛的应用, 但自动化立体库仓储系统需为堆垛机预留作业巷道, 挤占了库房存储空间, 限制了库房存储空间利用率的提高<sup>[1]</sup>. 多模

式自动化存取系统是一种新型的自动化仓储系统, 它具有存储空间利用率高、自动化程度高、出入库作业灵活等特点. 该系统的核心设备是托盘提升机、多模式穿梭板和配套货架. 多模式穿梭板能够在系统的货架轨道上四向运行, 实现货架层内托盘物资的搬运作

① 基金项目: 中国博士后科学基金(2015M582835)

收稿时间: 2015-09-30; 收到修改稿时间: 2015-12-15 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005189]

业,还可借助于托盘提升机进行换层,实现不同货架层间托盘物资的搬运作业.相对于传统的自动化立体库仓储系统,该系统无需为堆垛机预留作业巷道,具有更高的存储空间利用率.

多模式自动化存取系统具有很强的发展潜力,但其系统设备配置灵活、作业过程比较复杂,需根据系统作业需求管理调度库内作业设备,并优化分配作业任务.如何按照作业需求,按需调度系统设备和分配作业任务,实现较高的作业效率,降低作业成本,是多模式自动化存取系统发展中亟需解决的问题.

现有公开文献对自动化仓储系统的研究主要集中在穿梭板和提升机运输环节,通过分析提升机和穿梭板的运行时间<sup>[2]</sup>,建立货架内设备运输托盘物资的时间模型<sup>[3]</sup>,采用启发式优化方法求解穿梭板的最优任务分配策略<sup>[2]</sup>.在仓储系统中,叉车、穿梭板是活动设备,可根据需要进行增减调配;而提升机是固定式设备,无法在不同系统间调配使用.在满足作业任务需求的条件下,任务分配应着重加强对既有固定式设备和自动化设备的利用,减少对活动设备和作业人员的需求,从而使用最少的可自由调度资源完成作业任务,

降低作业成本. Ekren 等人分析了系统中提升机和穿梭板的数量匹配问题<sup>[4]</sup>, Carlo 等人分析了两个共桅提升机的任务分配策略,通过引入两个评估函数量化和描述这两个提升机的效率及其相互影响,根据作业需求和等待时间,采用启发式函数进行任务优化分配<sup>[5]</sup>.在多模式自动化存取系统中,各提升机之间相互独立,目前尚未发现有公开文献针对多模式自动化存取系统的设备调度和多台独立提升机的任务分配展开研究.

仓库最重要的业务是物资出入库作业,根据多模式自动化存取系统的出入库作业流程对设备进行资源在线管控和调度设计,可有效提高作业效率,降低作业成本<sup>[6,7]</sup>.通过合理的设备调度和任务分配,充分利用托盘提升机、多模式穿梭板等自动化设备进行作业,减少叉车等需人员参与环节的设备配置数量.

多模式自动化存取系统的物资入库作业由“接收入库单”、“物资到货”、“理货组盘”、“分配存储货位”、“叉车运输”、“提升机换层”和“穿梭板运输”等环节组成,将到达的物资存储至指定货位,其中“理货组盘”、“叉车运输”、“提升机换层”和“穿梭板运输”四个环节需要占用作业设备和作业时间,如图1.

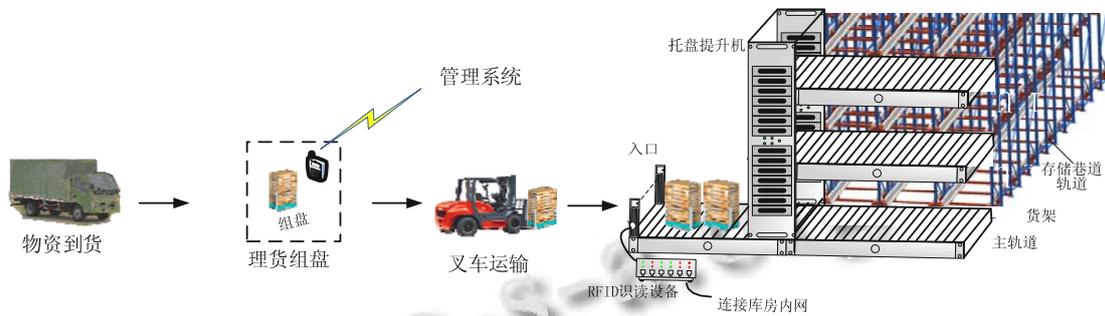


图1 多模式自动化存取系统的入库作业过程

多模式自动化存取系统的物资出库作业过程由“接收出库单”、“分配出库货位”、“穿梭板运输”、“提升机换层”、“叉车运输”、“拆盘回库”和“物资出库”等环节组成,其中“穿梭板运输”、“提升机换层”、“叉车运输”和“拆盘回库”四个环节需要占用作业设备和作业时间.物资出库作业过程与入库作业过程虽然步骤相反,但设备调度和任务分配方法类似,本文详细讨论多模式自动化存取系统入库过程的设备调度和任务分配,出库过程的设备调度和任务分配策略与入库过程可类似分析.

## 2 系统管理架构

在物资入库过程中,管理系统根据各个作业环节的物资排队情况,调度管控各环节的设备或人员数量,使作业设备数量与物资流量相适应.将多模式自动化存取系统入库作业过程建模为包含“理货组盘”、“叉车运输”、“提升机换层”和“穿梭板运输”四个服务中心的排队网络,每一个服务中心由输入、服务台和输出三部分组成.理货组盘服务中心的服务台为组盘作业人员,叉车运输服务中心的服务台为叉车,穿梭板运输服务中心的服务台为穿梭板,作业人员、叉车和穿梭板均为可移动服务台,其数量可根据具体任务动态调

度;提升机换层服务中心的服务台为提升机,提升机为固定服务台,作业时可全部投入使用,但由于提升机的安装位置不同,将托盘分配给不同提升机进行入库作业所需的作业成本(如作业运输路径长度)存在差

异,应优先将任务分配给成本较低的提升机,降低批量物资的入库成本,提高作业效率.图 2 给出了管理系统对各个服务中心的控制信息流.

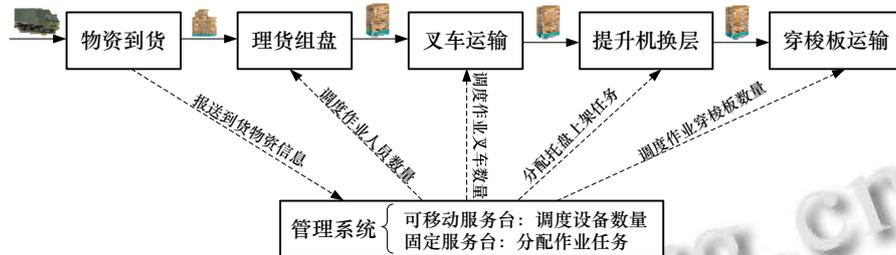


图 2 入库作业排队网络各个服务中心的控制信息流

在出库作业过程中,由于每批次出库任务只有最后一个托盘可能存在“拆盘回库”环节,在分析大批量物资出库作业效率时该环节可忽略.出库作业过程可建立与入库作业过程类似的排队网络,即“穿梭板运输→提升机换层→叉车运输→物资出库”.

### 3 系统设备架构

在入库作业过程中,系统的信息流与物流均要依次经过“理货组盘”、“叉车运输”、“提升机换层”和“穿梭板运输”四个服务中心.

理货组盘服务中心的物资到达率可由物资到货入库单获得,叉车运输服务中心的物资到达率可由组盘作业区的手持终端获得,提升机换层服务中心的物资到达率可由货架入口的感应设备(如 RFID 识读设备)获得<sup>[8]</sup>,穿梭板运输服务中心的物资到达率可由托盘提升机获得.

入库作业排队网络的物资流量平衡方程为<sup>[9-11]</sup>

$$\sigma_4 = \sigma_3 = \sigma_2 = \sigma_1 = \lambda_1 \quad (1)$$

其中, $\lambda_1$ 为系统的物资到货率, $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 和 $\sigma_4$ 分别为“理货组盘”、“叉车运输”、“提升机换层”和“穿梭板运输”四个服务中心的物资到达率.

物资通常分批次运达仓库,若要求某批次物资需在限定时间内入库,其等效物资到货率为

$$\lambda_1 = \frac{w}{t_m} \quad (2)$$

其中, $w$ 为该批次物资的数量, $t_m$ 为该批次物资的给定入库作业时间.

为确保系统能够达到稳态,要求各服务中心的服务率小于 1<sup>[12,13]</sup>,即

$$\rho_i = \frac{\sigma_i}{c_i \mu_i} < 1 \quad i=1, \dots, 4 \quad (3)$$

其中, $\rho_i$ 为第*i*个服务中心的服务率, $c_i$ 为第*i*个服务中心的服务台数量, $\mu_i$ 为第*i*个服务中心服务台的平均服务率.

由(1)-(3)式可求解完成入库任务所需理货组盘作业人员、叉车和穿梭板的最小数量.在接到入库任务后,管理系统调度用于入库作业的设备数量应大于求解得到的设备最小数量.

类似地,出库作业过程也可建立物资流量平衡方程,根据各服务中心的服务率小于 1 的准则求解出库任务过程所需叉车和穿梭板的最小数量.

### 4 托盘物资上下架任务分配

在多模式自动化存取系统仓库中,货架入口通常设置在托盘提升机旁边,托盘提升机分散安装于库房的的不同区域.在入库作业过程的理货组盘完毕后,叉车按照管理系统给出的托盘物资上架任务分配方案将托盘物资运送到指定的托盘提升机货架入口,进行托盘物资上架作业.

托盘物资从理货组盘作业区到指定存储货位需经过叉车运输、提升机换层和穿梭板运输环节,第*k*台提升机完成该过程所需作业时间 $t_{pk}$ 为

$$t_{pk} = \frac{L_f}{v_f} + t_r + \frac{L_s}{v_s} \quad (4)$$

其中, $L_f$ 为叉车运输路径长度, $v_f$ 为叉车运输平均速率, $t_r$ 为托盘提升机换层时间, $L_s$ 为穿梭板运输路径长度, $v_s$ 为穿梭板运输平均速率.

为提高系统的整体作业效率,管理系统需结合待上架托盘物资的预期运输路径和各托盘提升机的托盘物资上架任务排队情况,将各新组待上架托盘物资的

上架任务分配给各个托盘提升机,如图3.图中为当前可用提升机台数.

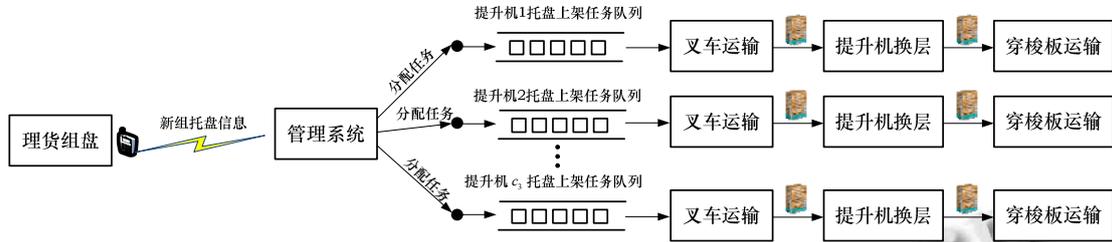


图3 管理系统将新组托盘物资上架任务分配给各提升机

模糊控制方法是以模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种有效的最优控制方法<sup>[14]</sup>,模糊控制不依赖于对象的模型就可以进行控制决策,而且对系统参数变化具有较强的适应性<sup>[15,16]</sup>.针对入库作业过程设置模糊控制器,为新组托盘物资上架任务分配提升机,如图4<sup>[14-17]</sup>.每次新托盘物资组盘完毕后,组盘作业人员通过手持终端将新组托盘物资信息发送至管理系统,管理系统按照控制器中设置的模糊规则库推理机进行在线决策,保证为每个托盘物资上架任务分配的提升机最优.

托盘物资的穿梭板运输平均速率,  $k=1, \dots, c_3$ .

为简化模型,认为叉车将新组托盘物资运送至所分配的提升机期间,提升机入口托盘物资队列不发生变化,则新组托盘物资通过第  $k$  台提升机上架的预期时间  $t_{ek}$  为

$$t_{ek} = t_{pk} + t_{wk} \quad (6)$$

为将新组托盘物资的上架任务分配给预期上架时间最短的提升机,依次分析将新组托盘物资上架任务分配给各提升机的可能性,最后确定最优的提升机.由于当前共有  $c_3$  个可用提升机,因此模糊控制器有  $2c_3$  个输入、1 个输出,模糊控制器输入为  $t_{wk}$  和  $t_{pk}$ ,输出为新组托盘物资上架任务分配的提升机编号  $d$ .输入变量的隶属函数选用三角函数,以模糊子集  $\{ZO,PS,PM,PB\}$  作为偏差语言变量,其元素分别代表零、正小、正中、正大.

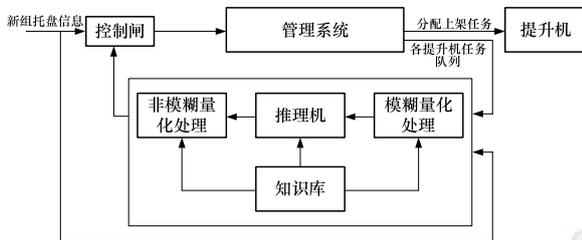


图4 新组托盘物资上架任务分配模糊控制器

采用 Mamdani 型模糊推论模型设计模糊控制器<sup>[14-17]</sup>.新组托盘物资分配给托盘提升机的原则是通过将该托盘物资分配给最优的托盘提升机,使该托盘物资的预期上架时间最短.托盘物资上架任务被分配的提升机编号记为  $d$ .

构造模糊控制规则:按照作业时间  $t_{ek}$  从小到大的顺序对所有提升机排序,依次分析将新组托盘物资上架任务分配给各个提升机的可能性,作业时间较小的提升机接收新组托盘物资上架任务的可能性较大.若当前提升机待上架托盘物资上架任务队列中已有较多任务在等待排队,则接收新组托盘物资上架任务的可能性会变小.由于模糊控制器有  $2c_3$  个输入,每个输入都有 4 个模糊集合,当提升机的数量较多时,将建立大量模糊规则,因此采用两级模糊规则建立模糊库以减少模糊规则条数<sup>[14]</sup>.

当前共有  $c_3$  台提升机可供使用,第  $k$  台提升机中待上架托盘物资数量为  $s_k$ ,新组托盘物资上架任务分配给该提升机后的任务等待时间

$$t_{wk} = \sum_{j=1}^{s_k} \left( t_j^L + \frac{L_j^S}{v_j^S} \right) \quad (5)$$

其中,  $t_j^L$  为第  $j$  个托盘物资的提升机换层时间,  $L_j^S$  为第  $j$  个托盘物资的穿梭板运输路径长度,  $v_j^S$  为第  $j$  个

I 级模糊控制:当完成一个新组托盘物资的组盘作业后,针对作业时间最小的提升机  $L_m$  构造模糊控制规则,若  $L_m$  任务队列中已有较长的任务等待时间,该提升机接受新组托盘物资上架任务的可能性会很小.

II 级模糊控制:若新组托盘物资上架任务未进入

$L_m$ ，则依次分析其它提升机接收该任务的可能性，若有多个提升机同时允许接受该任务，选择  $t_{ek}$  最小的提升机进入；若没有提升机接受该任务，则该任务回到  $L_m$  并进入其任务队列排队。

每个提升机的输入为  $t_{wk}$  和  $t_{pk}$ ，每个输入都有 4 个模糊集合，输出为  $d_k$ ，输入变量的隶属函数选用三角函数，取值 Y 或 N，表示接受或不接受该新组托盘物资上架任务，建立模糊规则库如表 1<sup>[14]</sup>。

表 1 托盘物资上架任务分配模糊规则库

$t_{wk}$	$t_{pk}$	$d_k$	$t_{wk}$	$t_{pk}$	$d_k$
ZO	ZO	Y	ZO	PM	Y
PS	ZO	Y	PS	PM	N
PM	ZO	Y	PM	PM	N
PB	ZO	N	PB	PM	N
ZO	PS	Y	ZO	PB	N
PS	PS	Y	PS	PB	N
PM	PS	N	PM	PB	N
PB	PS	N	PB	PB	N

通过分析模糊输出  $d_k$  与模糊输入  $t_{wk}$  和  $t_{pk}$  之间的定量关系，确定  $t_{wk}$  和  $t_{pk}$  的隶属度函数中 PB 的值。

根据多模式自动化存取系统设计的托盘出入库作业效率，设置系统单托盘物资入库最大时间阈值  $\bar{t}_e$ 。当提升机当前的等待时间  $t_{wk} \rightarrow 0$  时，若其预期上架时间  $t_{ek}$  超过设定的阈值  $\bar{t}_e$ ， $t_{pk}$  达到其 PB 的最大值。由 Mamdani 型模糊推理算法，当  $t_{wk}$  是 ZO， $t_{pk}$  满足下式时提升机将会拒绝该新组托盘物资上架任务

$$t_{pk} > \bar{t}_e \quad (7)$$

同理，当提升机的预期作业时间  $t_{pk} \rightarrow 0$  时，若其预期上架时间  $t_{ek}$  超过设定的阈值  $\bar{t}_e$ ， $t_{wk}$  达到其 PB 的最大值。当  $t_{pk}$  是 ZO， $t_{wk}$  满足下式时提升机将会拒绝该新组托盘物资上架任务

$$t_{wk} > \bar{t}_e \quad (8)$$

结合(7)式、(8)式和表 1，可分析模糊控制规则库的准确性。由表 1 有，在  $t_{wk} = ZO$  且  $t_{pk} \neq PB$ 、 $t_{pk} = ZO$  且  $t_{wk} \neq PB$ 、 $t_{pk} = PS$  且  $t_{wk} = PS$  三种情况下，提升机接受当前上架任务，其它情况皆不接受。由(7)式和(8)式有，当  $t_{wk} = ZO$  且  $t_{pk} \neq PB$  时，将当前任务分配给该提升机的等待时间趋于零，且作业时间未超过系统设定的阈值；当  $t_{pk} = ZO$  且  $t_{wk} \neq PB$  时，将当前任务分配给该提升机的作业时间趋于零，且等待时间未超过系统设定的阈值；当  $t_{pk} = PS$  且  $t_{wk} = PS$  时，将当前任务分配给该提升机的作业时间和等待时间都较短；显然，这三种情况下该

提升机均应接受任务，而其它情况下  $t_{wk}$  或  $t_{pk}$  之中总会出现较大的数据，导致作业时间较长，在对各个提升机进行循环分析以寻找最小作业时间的过程中，应拒绝该任务，让该任务能够进入其它提升机的任务队列进行作业时间分析，以确保当前任务能够尽可能从所有提升机中选取最优。由此，在上架托盘任务较多的情况下，(7)式、(8)式和表 1 共同构建的模糊规则可确保将新组托盘分配给最优提升机，从而使系统获得最优解，即(7)式、(8)式和表 1 构建的规则具有较高的准确性。

采用上述模糊控制策略分配托盘物资上架任务，在任务量较小时，管理系统会将任务全部分配给作业成本较低(相应地作业时间较短)的提升机；在任务量较大时，管理系统会将任务优先分配给作业成本较低的提升机，当这些提升机中已累积较多的待执行任务时，管理系统会将任务分配给作业成本稍高的提升机，从而提高系统的整体作业效率。

类似地，在出库作业过程中，以每台提升机完成下架作业所需的作业时间和预期等待时间为输入，以所分配的提升机编号为输出，可建立模糊控制器实现任务分配。在任务量较小时，将拟下架托盘物资的下架任务全部分配给作业成本较低的提升机；在任务量较大时，将任务优先分配给作业成本较低的提升机，当这些提升机中已累积较多的待执行任务时，将任务分配给作业成本稍高的提升机，提高系统的整体作业效率。

### 5 仿真分析

采用本文的设备调度与托盘物资任务分配策略对某乳制品仓库的物资入库上架作业过程进行分析。该库房设置 4 台托盘提升机，配有理货组盘作业人员、叉车和多模式穿梭板若干，如图 5。

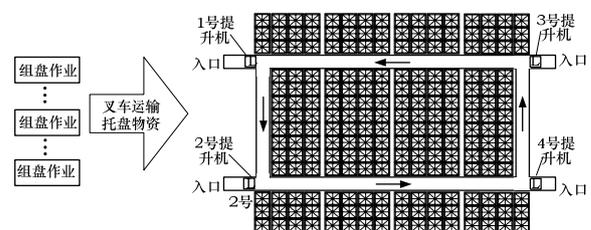


图 5 多模式自动化存取式货架系统布局

组盘区到 4 台提升机的距离分别为 20m、22m、60m、62m，叉车运送托盘物资的平均速率为 60m/min。

若按照 4 台提升机平均分配托盘物资上架任务, 叉车将托盘物资运送至货架入口, 则预期叉车运输(计算往返)的平均服务率  $\bar{\mu}_2=0.732$  托盘/min. 在模糊控制任务分配策略下, 实际的叉车运输平均服务率  $\mu_2$  大于  $\bar{\mu}_2$ .

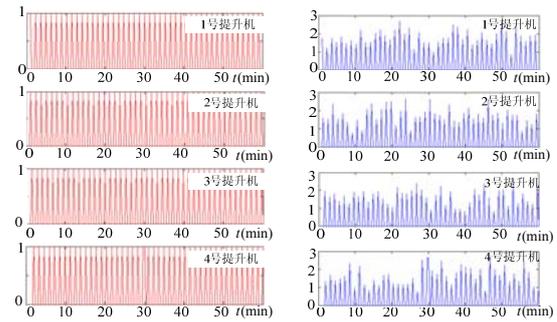
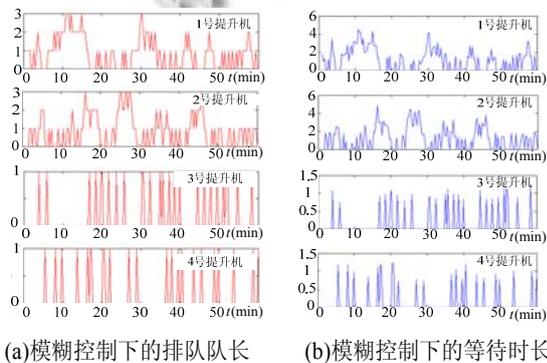
托盘提升机将托盘物资从货架入口送至指定货架层平均需 0.6min, 提升机换层的平均服务率  $\mu_3=1.667$  托盘/min.

托盘物资的入库货位在货架内随机分布, 货架入口与存储货位之间可能的最大路径距离为 60m, 穿梭板将托盘物资从货架入口运送至存储货位的平均路径距离为 30m, 穿梭板运送托盘物资的速率为 45m/min(不考虑启停转向所需时间), 预期穿梭板运输(计算往返)的平均服务率  $\bar{\mu}_4=0.75$  托盘/min.

若库房现到达一批乳制品, 该批次乳制品预计可组盘为 180 托盘, 组盘作业的平均服务率  $\mu_1=1$  托盘/min, 拟在 60min 内完成该批次乳制品入库.

由(2)式可得该批次乳制品的等效物资到货率  $\lambda_1=3$  托盘/min. 由(3)式可得配有理货组盘作业人员的最小数量为 3, 作业叉车的最小数量为 5, 托盘提升机的最小数量为 2, 多模式穿梭板的最小数量为 4. 注意, 由于库房内可用的托盘提升机数量为 4, 采用模糊控制策略分配托盘物资上架任务后, 实际的叉车运输平均服务率  $\mu_2$  大于  $\bar{\mu}_2$ , 所需的作业叉车最小数量应小于或等于 5.

管理系统调度 3 个组盘作业服务台进行组盘作业, 开启 4 台托盘提升机, 采用模糊控制策略分配托盘物资上架任务, 各个提升机前托盘物资的排队队长情况如图 6(a), 等待时长如图 6(b). 若将托盘物资均匀分配给各个托盘提升机(不采用模糊控制策略分配任务), 排队队长情况如图 6(c), 等待时长如图 6(d).



(c)均匀分配下的排队队长 (b)均匀分配下的等待时长  
图 6 物资入库过程中各提升机的排队情况

由图 6 可知, 当采用模糊控制时, 由于第 1、2 号提升机与组盘区的距离较近, 分配的托盘物资比第 3、4 号提升机多, 提升机换层环节前最多出现了长度为 3 的托盘物资排队队列, 排队等待时长最大达到 5min. 当采用均匀分配时, 各个提升机分配的托盘物资数量相同, 排队队长最大为 1, 排队等待时长最大为 3min.

进一步分析叉车运输服务中心的参数, 采用模糊控制策略时, 叉车运输总路径 11480m(相当于叉车作业时间 191.3min), 最小作业叉车数量为 4; 若不采用模糊控制策略, 将托盘物资上架任务均匀分配给各个托盘提升机, 叉车运输总路径 14760m(相当于叉车作业时间 246min), 最小作业叉车数量为 5. 通过模糊控制策略优化分配托盘物资上架任务, 减少了物资入库作业所需的运输路径, 提高了上架作业效率, 降低了入库作业成本.

对出库作业过程的任务分配进行类似分析, 该模糊控制任务分配策略也有较好的结果. 模糊控制可减少出库物资运输路径, 提高下架作业效率, 降低出库作业成本.

### 6 结束语

多模式自动化存取系统仓库依赖于作业设备进行自动化作业, 其编配的作业人员较少, 应尽量通过优化托盘物资任务分配策略减少对作业人员的需求. 本文重点针对多模式自动化存取系统的入库作业流程, 讨论了系统的设备调度和托盘物资上架任务分配问题, 同时简述了出库作业过程的设备调度和任务分配思路. 通过设备调度, 为系统各个环节合理调配设备数量, 保证系统达到稳态. 通过托盘物资上下架任务分配, 减少出入库作业所需的运输路径, 降低叉车等需人工

参与作业环节的设备编配数量,提高作业效率,降低作业成本,具有较好的经济效益。

### 参考文献

- 1 De Koster R, Le-Duc T, Yugang Y. Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS. *International Journal of Production Research*, 2008, 46(6): 1495-1514.
- 2 Tzur M, Drezner E. A lookahead partitioning heuristic for a new assignment and scheduling problem in a distribution system. *European Journal of Operational Research*, 2011, 215(2): 325-336.
- 3 Lerher T, Ekren BY, Dukic G, Ros B. Travel time model for shuttle-based storage and retrieval systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(9): 1705-1725.
- 4 Ekren BY, Heragu SS. Simulation based performance analysis of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2011, 19(7): 1640-1650.
- 5 Héctor JC, Iris FAV. Sequencing dynamic storage systems with multiple lifts and shuttles. *International Journal of Production Economics*, 2012, 140(2): 844-853.
- 6 Huang W, Zhou Z, Sun Q. Throughput analysis of an automated warehouse with pallet shuttle. *Proc. of International Conference on Logistics Engineering and Management*. IEEE Press. 2010. 1509-1514.
- 7 Fu X, Zhang B, Wang W. A method of operation management for pallet-rack warehouses based on RFID and pick-by-light techniques. *Proc. of 7th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*. IEEE Press. 2014. 49-53.
- 8 Chen JC, Cheng C, Huang PB, Wang K, et al. Warehouse management with lean and RFID application: A case study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69: 531-542.
- 9 李雪.基于排队论的 AGV 利用率控制优化. *兰州交通大学学报*, 2012, 31(6): 91-93.
- 10 甘剑锋,周晓光.基于排队论的自动化立体仓库 AGV 调度效率分析. *计算机测量与控制*, 2004, 12(7): 657-659.
- 11 杨静蕾. Jackson 网络在集装箱码头物流优化中的应用研究. *物流技术*, 2007, 26(1): 50-53.
- 12 郑大钟,赵千川.离散事件动态系统.北京:清华大学出版社, 2001.
- 13 官建成.随机服务过程及其在管理中的应用.北京:北京航空航天大学出版社, 1994.
- 14 丁健.基于排队网络队列模糊控制的自动小车立体仓库出入库任务的分配方法. *工业控制计算机*, 2014, (7): 41-44.
- 15 丁海山,毛剑琴.模糊系统逼近理论的发展现状. *系统仿真学报*, 2006, (18): 2061-2066.
- 16 王军,王杰,苗小冬.模糊控制理论在库存货位管理中的应用. *微计算机信息*, 2006, (30): 120-122.
- 17 张润彤,朱晓敏.串联排队网络顾客准入的模糊控制. *自动化学报*, 2000, (26): 192-198.