

仓储、物流与供应链管理研究新进展

刘兵兵^{1,2}, 孙李波¹, 余玉刚¹

(1. 中国科学技术大学管理学院, 安徽合肥 230026; 2. 安庆师范大学数学与计算科学学院, 安徽安庆 246133)

摘要: 仓储、物流与供应链管理相关理论与方法是支撑全球经济与商业活动快速发展的基石, 因其本身理论上的复杂性与在实践中的高度实用性, 受到国内外学者的持续关注. 本文以仓储、物流与供应链管理理论以及这些方法面向实际问题时的运用难点作为研究对象, 重点介绍了我们在仓储理论与优化方法(尤其是下一代紧致化仓储系统), 以集装箱码头为典型背景的起重机调度及货物存取顺序优化, 货物最小翻箱次数等一系列路径优化问题的求解方法以及以供应商管理库存系统为代表的供应链系统优化协调与控制等方面的研究进展. 最后, 结合物联网技术展望了在下一代仓储、物流与供应链管理领域中未来需深入探索的重点和方向.

关键词: 紧致化仓储系统; 存储策略; 路径优化; 启发式方法; 供应商管理库存; 物联网技术

中图分类号: C93 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2017.02.008

引用格式: 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.

LIU Bingbing, SUN Libo, YU Yugang. Recent advances on researches of warehousing, logistics and supply chain management[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(2): 176-187.

特
约
评
述

Recent advances on researches of warehousing, logistics and supply chain management

LIU Bingbing^{1,2}, SUN Libo¹, YU Yugang¹

(1. School of Management, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. School of Mathematics and Computing Science, Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

Abstract: Theories and methodologies adopted in warehousing, logistics and supply chain are the bedrock for the rapid development of global economy and commercial activities. Such theories and methodologies attract researchers' attention due to their complexity and practicability. In this paper, our achievements in these fields are introduced: warehousing theory and optimization methods (especially next generation compact warehousing system), scheduling yard cranes in a container block and minimizing total travel time in a two-depot automated S/R system, minimizing the expected number of reshuffles at a container

收稿日期: 2016-10-04; **修回日期:** 2016-11-06

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年科学基金项目(71225002), 国家自然科学基金国际(地区)重点合作项目(71520107002)资助.

作者简介: 刘兵兵, 男, 1980年生, 博士生/副教授, 研究方向: 物流与供应链管理、仓储管理. E-mail: lbb1224@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 余玉刚, 男, 1975年生, 博士/教授, 中国科学技术大学管理学院执行院长, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 中组部“青年千人计划”入选者, 科技部中青年科技创新领军人才. 研究成果主要集中在物流领域, 包括下一代仓储系统(物流分配中心、集装箱码头、停车系统等)研究、库存管理研究、供应链物流与市场和金融交叉领域研究. 在 Transportation Science, Production and Operations Management, IIE Transactions 等顶级期刊发表学术论文 60 余篇, 相关研究被引 1500 余次, 曾获中国科学院优秀研究生指导教师奖, 中国物流与采购联合会科技进步一等奖等, 入选中国高被引学者 (Elsevier, 2014, 2015, 2016). E-mail: ygyu@ustc.edu.cn



terminal and optimal mechanisms design in vendor-managed-inventory (VMI) supply chains. Then, combining the technology of Internet of things, some perspectives are given on future directions of warehousing, logistics and supply chain management.

Key words: compact warehousing system; storage police; routing optimization; heuristic method; VMI (vendor-managed-inventory); technology in Internet of things

0 引言

随着经济全球化的日趋深入,对支撑其良性快速发展高效的仓储、物流与供应链管理的技术与方法提出了更高的要求。从概念上来讲,仓储管理是指对仓库本身以及仓库内的物品进行有效管理,具体来说就是指仓储管理者为充分利用现有仓储资源以提供高效的仓储服务所进行的有计划、有组织的协调优化与控制过程。物流管理是指对物品流动的一系列计划、组织、控制与协调过程。从上述两个概念可以看出,仓储与物流管理均属于过程管理,而供应链管理则与之不同,它以系统的观点将相互关联的企业作为一个整体,以供应链成员企业内部以及企业之间的同步化和集成化作为所追求的目标,以提高供应链整体及成员企业的长期绩效为目的,对供应链的成员企业内部及企业之间的传统业务功能进行系统的、战略层面上的重组、协调与优化。

从内涵上,供应链管理的研究范畴要比仓储与物流管理的研究范畴更广,三者既有紧密联系又存在着明显区别。仓储管理研究的主体是仓库以及库内的物品,包括仓库本身及其内部货架的设计,以存取效率为目标的库内物品的存储策略,订单拣选策略以及库内物品移动路径的优化调度等。物流管理研究的主体主要是对企业从采购到生产再到销售等环节涉及的存储、运输与交付等相关活动的物品状态转换过程的管理。而供应链管理不仅涉及物流管理,同时也包括信息流与资金流的管理,因此供应链应该是物流、信息流与资金流的统一有机体。

仓储、物流与供应链管理所面临的研究问题均来源于经济活动的具体实践中,尤其随着近几年互联网经济的出现,关于仓储、物流与供应链管理方面的新问题不断涌现,这对于从事仓储、物流与供应链管理的研究人员来讲既是极大的挑战,又是难得的

机遇。因此,本文对仓储、物流与供应链管理最近的相关研究进行梳理与提炼,系统总结了我们在这些领域中的最新研究进展,以期给感兴趣的读者带来一些启发。

本文拟从以下三个方面进行详细介绍。

(I) 紧致化仓储系统管理与优化研究进展。近年来,仓储系统正随着自动化和物联网技术的飞速发展、土地资源的日益稀缺以及人类对高效高质服务的追求而发生着急速的变革。20世纪60年代,在自动化技术的推进下大量自动化仓储系统开始普及,并逐步替代传统的手工仓储系统(图1(a),(b))。从本世纪开始,随着信息技术革命的深入和土地资源的日益稀缺(尤其是在人口稠密地区),仓储系统正在加速向紧致化、自动化和智能化方向演化。这种演化在近几年导致了新一代智能紧致化仓储系统的诞生(图1(c)),下文简称紧致化仓储系统。因此,如何高效利用仓库的已有空间从而推迟对更大仓库的需求具有非常重要的意义。下一代仓储系统因具有“紧致化、智能化、无走道”等特征,能够达到高效利用现有仓储空间的目的。在该研究方向中,我们首先对传统教材中广泛使用的分类存储策略模型与结论进行了全面修正;然后针对下一代仓储系统,介绍一种三维紧致化仓储系统中的存取货物启发式排序算法;并针对一系列的紧致化仓储系统的尺寸优化与调度问题有效的优化方案进行了介绍。

(II) 集装箱码头中货物存取调度等路径优化问题的研究进展。集装箱运输对经济与商业全球化起着至关重要的作用,因此集装箱码头的工作效率,特别是货物吞吐效率受到了研究者和实践者的极大关注。我们将在集装箱码头中双起重机的调度问题、双进出口(two-depot)自动化存储系统存取顺序的优化方法、集装箱码头最小化翻箱次数的堆叠决策算法以及港口移动吊车最小化行程时间方法等方面展开详细介绍。

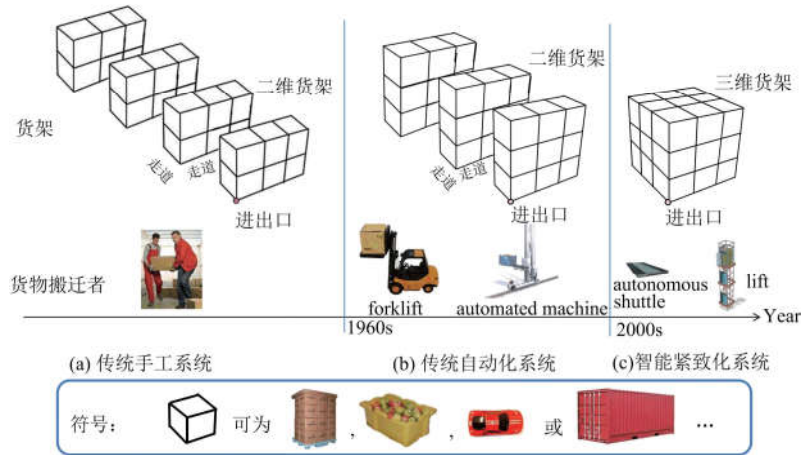


图 1 仓储系统演化

Fig.1 Evolutions of warehousing

(Ⅲ) 供应商管理库存 (vendor-managed-inventory, VMI) 的供应链管理研究进展. 在企业运作中, 为了提升反应速度并降低库存成本, VMI 已经成为供应商和零售商广泛采纳的合作机制. 在这一部分中, 我们针对 VMI 系统零售商选择问题、易腐产品库存管理问题以及 VMI 系统中合作广告与生产决策等问题逐个展开介绍.

1 紧致化仓储系统研究进展

1.1 全周转率策略次优性研究

从 1976 年以来, 仓储管理领域中对于全周转率策略的普适性结论是: 全周转率 (full turnover-based storage) 策略可实现比企业广泛应用的分类存储 (class-based storage) 策略更短的存取货时间. 全周转率策略及其公式是 1976 年由现美国 3 位 INFORMS fellows: Warren H. Hausman (现 Stanford 大学教授), Leroy B. Schwarz (现 Purdue 大学教授) 和 Stephen C. Graves (现 MIT 教授) 在文献 [1] 中提出. 该策略被大量后续发表在 Management Science, IIE Transactions 等高端杂志的论文所引用 (参见综述文献 [2] 和 [3] 等).

我们的研究^[4]发现, 经典全周转率策略公式没有区分全周转率策略和其他存储策略对所需仓储空间的不同要求, 即默认相同货物在不同仓储策略下所需仓储空间是相同的, 这造成了不同存储策略效率比较的不公平性, 并发现文献 [1] 中存在 “inconsistent assumptions”, 实际上, 在全周转率策略下每个货物各为一类, 这给不同货物共享仓储空

间带来了障碍, 从而比分类存储策略等需要更大的仓储空间. 应该将不同存储策略的空间区别反映到存取货物的时间公式中, 因为更大的存储空间可能意味着更长的存取货时间. 然而, 30 多年来仓储界的研究者在引用文献 [1] 中全周转率公式和相关推导过程的时候没有注意到以上问题. 据此, 我们对文献 [1] 中的全周转率策略公式做出了修正. 另外, 我们还对其他有代表性场景的全周转率公式进行了对应的修正 (比如文献 [5] 和 [6]). 模拟结果显示, 全周转率存储策略在大部分情况下劣于 two class-based storage 分类存储策略 (即把仓储空间分成两个最优空间), 甚至在很多情况下劣于随机存储策略.

1.2 考虑物品种类有限性影响的分类存储策略研究

分类存储策略在过去的 40 年中受到了学者的广泛关注. 分类存储策略通过将物品根据其周转率不同而分开存放的方式提高仓库的周转效率. 经典的研究表明, 全周转率存储 (即每种物品各成一类) 策略是分类存储策略的最优下界, 即在分类存储策略下物品分成的种类越多, 平均存取的时间就越短. 然而, 现实中却没有任何一家企业使用全周转率存储进行物品的存放. 这种理论与现实的差距吸引了我们对此研究的兴趣. 通过对经典文献中相关假设条件的研究发现, 经典文献中的一个假设仅在物品种类无限大的时候成立. 此假设就是: 每种物品所需要的存储空间等于其平均库存水平. 这是一个与全周转率存储并不兼容的假设条件. 因此, 我们有理由

对经典理论的正确性提出质疑.基于此,我们在该研究中考虑物品种类有限性的影响,放松“物品所需存储空间等于其平均库存水平”的假设,取而代之提出了一种基于物品种类数量的存储空间公式,进一步对经典文献中的存取时间公式进行了修正.

与传统的经典理论不同,我们发现^[7]:通常情况下,一个很小的分类数量就能实现仓库存取货物平均响应时间的最小化,如图 2 所示,在考虑物品种类有限性影响的情况下得到的平均行程时间大于经典文献中的研究结论,并且时间并非随着分类数量的增加而减小,一般情况下,小于 5 类的分类存储即可为仓库提供最优的策略.

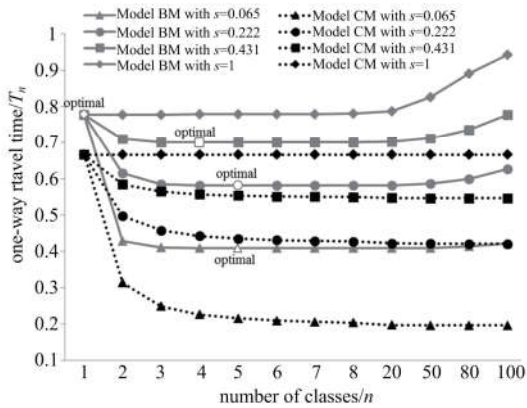


图 2 所给模型与文献中模型运行时间比较^[7]

Fig. 2 Travel time in our model compared to those in the literature^[7]

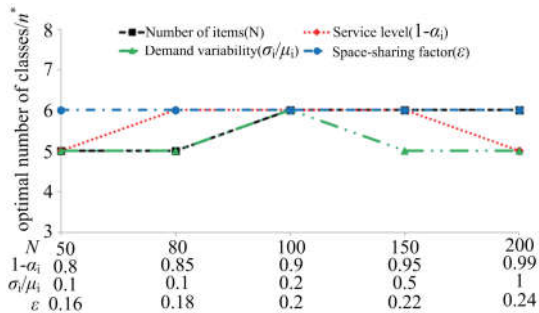


图 3 依赖于 $N, \alpha_i, \sigma_i/\mu_i$ 和 ϵ 的最优分类数^[7]

Fig.3 Optimal number of classes, depending on $N, \alpha_i, \sigma_i/\mu_i$ and ϵ ^[7]

此外,我们也讨论了各参数对最优分类数量的影响,如图 3 所示.在参数变化时,最优分类数量不超过 6 个,这也证实了我们的研究结论.同时也对实践中没有企业使用全周转率存储策略这一现象背后的原因进行了深入的解释.

1.3 存储策略和存储系统最优规格的研究

仓储系统的形状和仓储系统中货物分类区域的边界大小和形状等在文献中被广泛研究,并被认为对系统的运作效率有着重要的影响.但是过去的相关研究都是结合一个具体的仓储系统展开的.比如,为了设计出一个最优的 3 类分类存储策略,首先要给定系统的出入口、订货策略等,并在此基础上把每一类的边界都当作模型中的决策变量.但是我们的研究^[8]揭示,关于系统最优尺寸和分类仓储边界决策与关于存储策略的决策是可以分开决定的.也可以首先在随机存储策略下得出系统的最优形状,然后将模型中系统的尺寸大小用上一步求出的最优值替代,这个新的模型就只需要求解出最优的产品分类边界即可,从而大幅度降低了模型求解的复杂度.

我们在文献^[9]中利用基于传送带的容量为 1000 的紧致化存储系统对我们上述的研究结果进行了测试.目标是分别在随机存储和 two-class-based 存储两种策略下,以最小化期望取货时间为标准来得出系统的最优尺寸.结果表明,基于传送带的紧致化系统的最优规格在两种存储策略下是相同的,这与我们的研究发现相一致.

1.4 考虑实际存储空间需求影响的传统仓库中存储策略绩效评估

经典文献中对存储策略的研究均建立在“物品所需存储空间等于其平均库存水平”假设的基础上.然而,通过前面对考虑物品种类有限性影响的分类存储的研究,我们已知物品在仓储系统中所需存储空间受到其处于同一类别中的物品种类数量的影响,即处于同一类别中的物品越多,那自身所需的存储空间就会越小(越接近于其平均库存水平).并且文献中鲜有针对单位负荷的传统仓库的物品分类数量和类别最优边界的研究.因此,我们的研究^[10]在单位负荷的传统仓储系统中,在考虑存储空间受物品种类数量影响的基础上,对各种存储策略(随机存储、分类存储和全周转率存储)进行了绩效评估,给出系统的最优存储策略.此外,针对不同的仓库物品需求结构(即不同的 ABC 需求曲线),该研究给出了能够提供最短存取响应时间的仓储系统最优长宽比例.

首先,如图 4 所示,无论 ABC 需求曲线如何变化,一般化的分类存储策略总是优于随机存储策略和全周转率存储策略,并且当 ABC 曲线的曲度较小(横坐标较小)时,全周转率存储甚至次于随机存储策略.这是因为,在对物品进行分类时存在以下权

衡:增加分类能够将物品更好地按照其周转率排序,提高存取效率;与此同时,类别的增加将导致每一个类别中的物品数量减小,使得其所需的存储空间变大.而全周转率存储只考虑到提高存取效率,忽视了存储空间的变化;随机存储虽然将物品所需的存储空间缩到最小,却忽视了周转率排序对效率的提高.因此,一般化的分类存储策略能够更好地权衡二者之间的利弊,从而实现仓库物品存储的最优化.

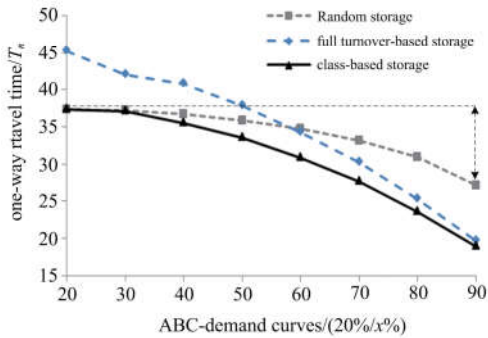


图 4 在带最优分类和最优长宽比系数的不同存储策略下作为需求曲线函数的单程运行距离^[10]

Fig.4 One-way travel distance as a function of demand curves under different storage policies with optimal item classification and optimal warehouse factor^[10]

此外,如图 5 所示,在分类存储策略和全周转率存储策略下,随着 ABC 需求曲线曲度的增加,仓库的最优形状参数(仓库的长宽比例)变小.这就说明,当仓库中的不同物品的周转率存在显著不同时,管理者应该选择较窄较长的仓库布局来提高运作效率;相反,若仓库中的物品的周转率基本相同、没有显著差异,管理者应该选择较宽较浅的仓库布局来提高运作效率.

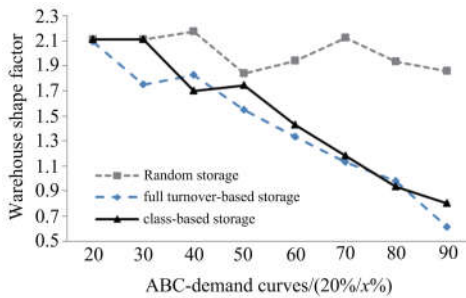


图 5 在不同存储策略下作为需求曲线函数的最优仓储形状比系数^[10]

Fig.5 Optimal warehouse shape factor as a function of demand curves under different storage policies^[10]

1.5 生鲜产品在一类紧致化过库系统中的存储策略研究

在现实生活中,出于对冷冻成本的考虑,存储新鲜农产品的过库中心会采用一类紧致化的存储系统(图 6).这类系统的主要缺陷是:由于不恰当的货物摆放次序导致系统要对相应货物进行重排,进而致使系统需求响应时间增加.在实际操作中,为了避免对货物进行重排,一般采用专用存储策略.但是采用该策略会导致系统的利用率相对较低,从而需要更大的空间来存储相同数量货物,最终会导致冷冻成本和潜在的响应需求时间增加.

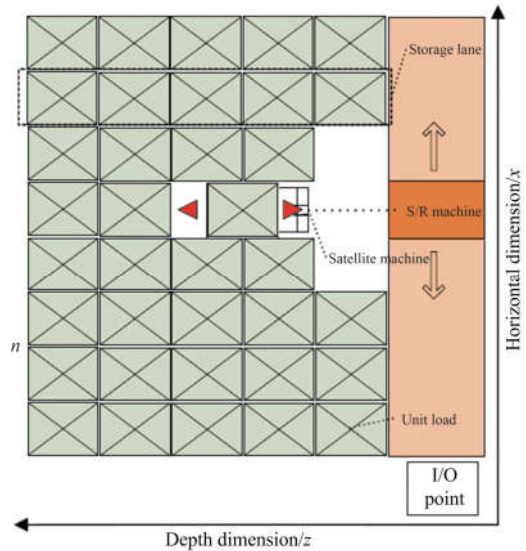


图 6 三维紧致化存储系统的顶视图^[11]

Fig.6 Top view of a compact storage system^[11]

考虑到进入过库中心的货物都是已经被订购的货物这一特征,我们可以获得订货信息(包括取货车预计到达时间).利用该信息,在避免对货物进行重排的约束下,提出了一种共享存储策略,在使存储系统更加紧致化的同时实现最小化系统的响应需求时间.以管理者关心的方式描述我们的研究结果^[11]就是:①可以减少装货过程中产品暴露在非冷冻环境下可能导致的产品变质;②增加一定时间内系统的货物吞吐量和效率.具体来说,我们首先提出了一个最优化模型,但是由于它是一个 NP 难问题,为了解决现实中规模较大的问题,提出了一个启发式算法,并从理论上证明了它的近似最优性.基于现实中的过库冷冻中心的数据,我们发现,与专用存储策略相比,共享存储策略平均可以使系统的响应时

间减少 16%。

1.6 货物出入口在货架下方中间位置的三维紧致化仓储的最优设计

作为新一代的自动化仓储系统,三维紧致化仓储系统渐渐在全球范围应用,主要用于库存物品仓库、配送中心和制造工厂.由于三维紧致化系统的新颖性和复杂性,通过研究调查这些系统发现在系统的设计方面还存在不足.在这项研究中,所设计的三维紧致化仓储系统把货物出入口放在货架存取表面底端的中间位置(图7),这样可以实现系统存储性能的最优并同时满足系统容量要求,论文^[12]同时给出了该系统的最优三维尺寸与最优期望运行时间.研究进一步得出,货物出入口在货架下方中间位置的三维紧致化仓储系统比传统的出入口在货架左下角的三维紧致化仓储系统存取货物的效率提高了约 20%,表明货物出入口在货架下方中间位置的三维紧致化系统存取货物的期望运行时间更短,因此该系统具有更高的货物吞吐量。

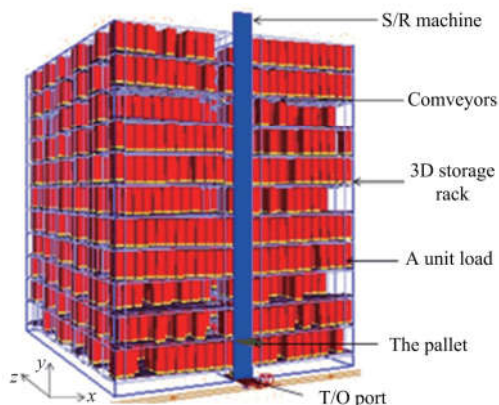


图7 三维紧致化存储系统的组件^[12]

Fig.7 The components of the 3D compact storage system^[12]

在该研究中还利用了几个数值算例来说明模型在实践中如何应用于三维紧致化仓储系统,并给出了一个详细的计算步骤.首先,给定水平、垂直和深度三个方向速度的数值,并给出一个存储单位的长宽高的数值;通过给定的数值,求出在时间上的体积,然后通过本文的最优尺寸和最优期望时间 $t_v^* = 0.99 \sqrt[3]{V}$, $t_h^* = 0.71 \sqrt[3]{V}$, $t_b^* = 1.42 \sqrt[3]{V}$, $ESC^* = 1.10 \sqrt[3]{V}$ 求出三个方向的时间上的尺寸和最优期望时间;进而通过给定的数值求出实际设计出的仓储在三个方向的尺寸,以及通过得到的尺寸再求出三个方向上的货物存储位置的数量.其次,通过每个方

向上的货物存储位置的数值计算出在时间上的最优尺寸以及最优期望时间.最后,求出实际仓储可以储存货物的数量,然后对实际仓储的期望运行时间与本文最优模型的期望运行时间进行对比求出误差.该研究填补了关于货物进出口位置变化对三维紧致化仓储系统效率的影响的研究空白。

2 集装箱码头中货物存取调度等路径优化问题的研究进展

2.1 集装箱码头双起重机调度问题的启发式算法研究

每年都会有数百万的集装箱从一个集装箱码头进出,近水端和近陆端通过集装箱码头相连通,如果存取运作不够高效就会导致大量轮船、火车、卡车的延误,影响整个流程的运作效率.为了提高存取效率,有的码头在近水端和近陆端各采用一个起重机去存取集装箱(图8).然而由于两个起重机无法互通过,且为保证正常运作两者必须保持足够的安全距离,另外由于空位的不同以及存取的集装箱具有不同的优先级别等诸多限制,使得解决双起重机问题是NP难的.最近邻域算法虽能很好地解决传统单起重机调度问题,但在这里已不再适用,因此对于此新问题找出一个能高效求解出好方案的算法在理论和实践中均具有重要意义。

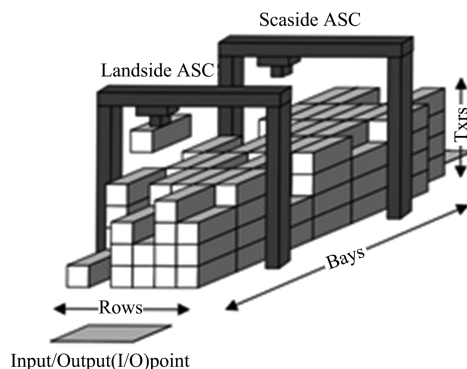


图8 集装箱堆垛^[13]

Fig.8 Block of containers^[13]

根据上述限制条件,通过把双起重机问题建模成具有优先级限制的一般非对称邮递员问题,我们的研究^[13]给出了一种合适的邻域启发式搜索算法来解决该问题.通过大量的实验模拟验证,对于小规模集装箱码头,该算法能很快地找到好的解决方案,并且与采用复杂 CPLEX 方式找出的最优解相

差平均不到 0.34%；对于大规模的集装箱码头，我们的算法得出的结果优于运行复杂的 CPLEX 4h 找出的结果 6.77% 以上，平均优于其他次复杂启发式算法得出的结果 24% 以上，而对于大规模的松弛问题使用我们方法得出的结果与最优解只相差不到 3%。我们的方法得到的虽然是近似最优解，可是在求解时间上却要比 CPLEX 少很多，效率也要高很多。

2.2 双进出口自动化存储系统存取顺序优化的多项式时间算法研究

产品存取是供应链中极为重要的一环，直接影响到供应的数量与时间。在过去几十年里，一种新的存储系统——自动化存取系统(automated storage/retrieval system, AS/RS)——的出现与应用显著地提高了存取效率，有研究表明这种系统下的整个存取时间能减少 70%，并且 AS/RS 也不仅仅局限在产品仓库的存取应用中，集装箱码头也开始使用这种系统，如图 8 所示。随着 AS/RS 的普及，伴随而来的是大量关于设计优化这种系统运行规则的研究，而这其中最重要的部分就是如何设计存取货物指令的顺序以最小化存取时间。尽管双出入口的 AS/RS 已经在仓库及码头中使用，但是基于给定存储策略下的存取指令顺序研究却是空白。

本研究^[14]把双出口 AS/RS 存取顺序优化归入到一类特殊的不对称旅行商问题(asymmetric traveling salesman problem, ATSP)。ATSP 实际是一种 NP 难问题，但我们有效利用以下 5 种情形中双进出口 AS/RS 的不同存储特点，分别给出了相应的多项式时间算法。①基础情形：AS/RS 的两个进出口都可以用作存货和取货，并且取货时可以到其中任一集中点；②给定取货出口：AS/RS 的两个进出口都可以用作存货和取货，但是指定了其中之一作为取货时的出口；③进出口分开：AS/RS 的两个进出口，一个只作为存货入口，另一个则是取货出口；④唯一进出口：作为特例，考虑了 AS/RS 只有一个进出口的情形；⑤不限定存储机器(S/R machine)起始位置：前面 4 种情形都设定 S/R machine 的起始位置必须在 AS/RS 的进出口，这里则不做限定。

对比已经普遍使用的先来先服务(first come first service, FCFS)和最近邻居(nearest neighbor, NN)算法，我们的算法可以把平均存取时间分别减

少超过 30% 和 15%。图 9 给出了以上 5 种情形下存取时间的对比。

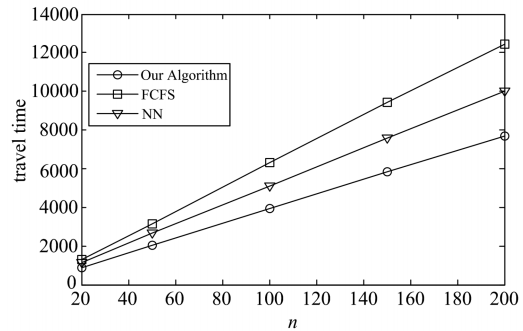


图 9 所给算法与 NN 和 FCFS 在运行时间的比较^[14]

Fig.9 Travel time of our algorithm compare with NN and FCFS^[14]

2.3 集装箱码头最小化翻箱次数的堆叠决策树启发式算法研究

集装箱装卸工业在近数十年间几乎呈现了指数型发展，从 1990 年到 2005 年，全球运送的集装箱数目从 0.287 亿增长到了 1.776 亿。这使得码头的日常运作负荷急剧上升，这其中集装箱的重新分配问题起着重要作用，但与此相关的研究却并不多见。因此，研究在集装箱码头(图 10)中通过最小化翻箱次数以达到减小时间消耗和缩短船只停泊时间的目的，对集装箱装卸工业的持续发展有着重要的意义。

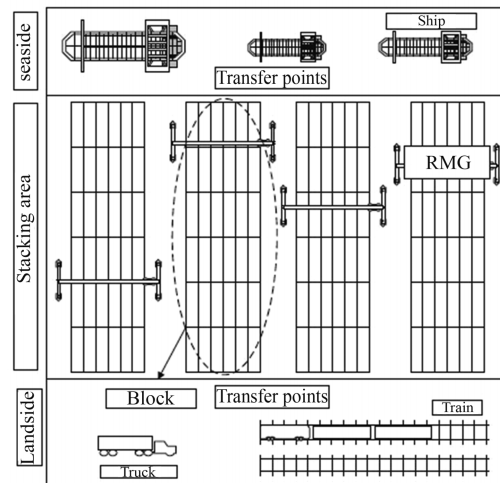


图 10 集装箱码头顶视图^[15]

Fig.10 A top view of a container terminal^[15]

我们的研究^[15]利用一个已有的随机动态规划(dynamic programming, DP)模型来解决堆数较少的问题，并在此基础上总结出一个可以解决大规模问题的决策树(decision tree, DT)启发式算法。DP