

多区块仓库下订单 分批与拣选路线规划研究

DUOQUKUAI CANGKU XIA DINGDAN
—— FENPI YU JIANXUAN LUXIAN GUIHUA YANJIU ——

陈方宇 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

多区块仓库下订单 分批与拣选路线规划研究

DUOQUKUAI CANGKU XIA DINGDAN

—— FENPI YU JIANXUAN LUXIAN GUIHUA YANJIU ——

陈方宇 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

多区块仓库下订单分批与拣选路线规划研究 / 陈方宇著. —北京: 知识产权出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5130-5339-6

I. ①多… II. ①陈… III. ①物资配送-研究 IV. ①F252.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第311894号

内容提要

本书从实际项目实践出发,以蚁群算法、信息共享等方法与技术为基础,从订单分批与拣选路线规划及其相关环节的策略设计上着手尝试解决订单拣选作业中由复杂性、动态性和不确定性产生的问题。针对多区块仓库,本书分别设计了针对单拣货员的基于偏离度的订单拣选路线规划算法、针对双拣货员和多拣货员的基于蚁群算法的考虑堵塞的订单拣选路线规划算法、针对在线订单的订单分配与路线规划算法 Green-Area。所设计算法效率均在各自仿真实验中得到验证,与传统方法相比有很强的实用性。

责任编辑:李娟

责任印制:孙婷婷

多区块仓库下订单分批与拣选路线规划研究

陈方宇 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

网 址: <http://www.ipph.cn>

电 话: 010-82004826

<http://www.laichushu.com>

社 址: 北京市海淀区气象路50号院

邮 编: 100081

责任编辑: 010-82000860 转 8689

责编邮箱: lijuan1@enipr.com

发行电话: 010-82000860 转 8101

发行传真: 010-82000893

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

开 本: 720mm×1000mm 1/16

印 张: 13

版 次: 2017年12月第1版

印 次: 2017年12月第1次印刷

字 数: 175千字

定 价: 58.00元

ISBN 978-7-5130-5339-6

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

目录 CONTENTS

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 问题提出、研究目的和意义	1
1.3 相关文献综述	5
1.3.1 订单拣选策略研究总体情况	5
1.3.2 订单拣选路线规划	9
1.3.3 拣货员堵塞	11
1.3.4 订单拣选的动态性与不确定性	13
1.4 研究内容、思路与逻辑结构	17
2 订单分批与拣选路线规划研究理论基础	21
2.1 引言	21
2.2 单区块仓库布局及其常用订单拣选路线规划方法	22
2.3 多区块仓库布局及其常用订单拣选路线规划方法	29
2.4 常用订单分批策略	35
2.4.1 种子选取规则	36
2.4.2 订单附加规则	44
2.5 本章小结	49
3 基于偏离度的单拣货员订单拣选路线规划	51
3.1 引言	51

3.2	基于偏离度的订单拣选路线规划算法	52
3.2.1	偏离度定义	53
3.2.2	基于偏离度的通道访问策略	55
3.2.3	多区块仓库下的算法流程构建	61
3.3	偏离度算法的仿真实验	62
3.3.1	实验设计	62
3.3.2	实验结果	63
3.4	偏离度算法实验结果分析与讨论	68
3.5	本章小结	70
4	考虑双拣货员堵塞的订单拣选路线规划	72
4.1	引言	72
4.2	双拣货员堵塞问题描述	73
4.2.1	双拣货员堵塞定义与分类	73
4.2.2	双拣货员拣选问题假设	74
4.2.3	考虑双拣货员堵塞的拣选路线评价模型	75
4.3	考虑双拣货员堵塞的订单拣选路线规划算法	77
4.3.1	算法初始化	78
4.3.2	逻辑距离的定义与取值	79
4.3.3	蚁群构建路线	83
4.3.4	信息素更新机制	84
4.3.5	灾变机制	86
4.4	A-TOP算法的仿真实验	86
4.4.1	实验设计	86
4.4.2	实验结果	89
4.5	A-TOP算法实验结果分析与讨论	98
4.5.1	仓库布局对拣选服务时间影响	98

4.5.2	订单属性对拣选服务时间影响	100
4.5.3	仓库布局对等待时间的影响	101
4.6	本章小结	102
5	考虑多拣货员堵塞的订单拣选路线规划	104
5.1	引言	104
5.2	多拣货员堵塞与不确定信息问题描述	105
5.2.1	多拣货员堵塞	105
5.2.2	不确定信息	107
5.2.3	考虑多拣货员堵塞的拣选路线评价模型	107
5.3	考虑多拣货员堵塞的订单拣选路线规划算法	109
5.3.1	确定信息下多拣货员订单拣选路线规划算法	109
5.3.2	不确定信息下多拣货员订单拣选路线规划算法	110
5.4	A-MOP与A-MOP-N算法的仿真实验	113
5.4.1	实验设计	113
5.4.2	A-MOP实验结果	115
5.4.3	A-MOP-N实验结果	123
5.5	A-MOP与A-MOP-N实验结果分析与讨论	129
5.5.1	确定信息环境下实验参数影响	129
5.5.2	不确定信息环境下实验参数影响	130
5.6	本章小结	131
6	在线订单的实时分配与拣选路线规划	133
6.1	引言	133
6.2	在线订单实时分配问题描述	135
6.2.1	在线订单系统	135
6.2.2	订单分配与路线规划评价模型	136
6.3	Green-Area算法	138

6.3.1 绿区的定义	138
6.3.2 S-Shape的绿区	140
6.3.3 Largest Gap的绿区	143
6.3.4 路线实时调整	147
6.4 Green-Area算法的仿真实验与结果分析	149
6.4.1 实验设计	149
6.4.2 实验结果	151
6.4.3 结果分析	164
6.5 本章小结	165
7 总结与展望	167
7.1 全书总结	167
7.2 研究展望	170
参考文献	173
附录	192
附录1 S-Shape下绿区判定规则伪代码	192
附录2 Largest Gap下绿区判定规则伪代码	195

1 绪 论

1.1 研究背景

本著作来源于工作期间主持并参与的以下科研项目。

国家自然科学基金青年项目：“电子商务环境下在线订单拣选策略设计研究”（项目编号：71701213）、“不确定需求环境下汽车供应网络的牛鞭效应研究”（项目编号：71401181）；

教育部人文社科青年项目：“人因在订单拣选策略设计中的影响机制研究”（项目编号：15YJC630008）、“行为因素对供应链牛鞭效应的影响机制研究”（项目编号：14YJC630136）。

以及攻读博士学位期间参与的以下科研项目：

国家杰出青年基金：“管理系统工程”（项目编号：71125001）；

长江学者和创新团队发展计划：“复杂系统的动力学行为分析、优化与决策”（项目编号：IRT1245）。

1.2 问题提出、研究目的和意义

作为供应链的必要组成部分，仓库的主要作用是在供应链各个环节间提供缓冲以调节因产品季节性、批量生产运输、多供应商产品整合配送及

个性化定制服务等因素带来的物料流转的波动。市场竞争的加剧意味着需要对产品配送网络的设计和运营不断地进行改进，这就转变为仓库提高运营效率的需求。随着更多企业开始将削减成本和提高生产效率的工作重心放在其组织内部的仓储设施和配送中心上，订单拣选作业开始受到管理人员和研究学者的重视^[1-2]。订单拣选是为了响应客户订单需求，而从仓储区或缓冲区收集货物的作业过程，在人工作业仓储系统中，订单拣选是最消耗人力成本的运作环节，而在自动化仓库中，则是最消耗资源成本的运作环节^[1]。因此，仓储管理的研究人员都将订单拣选视为提高生产率的关键措施。

近年来，在制造和配送领域的一些变化更是使得订单拣选作业流程的设计和管理变得更加重要和复杂。制造领域更多地采用如准时生产制（just-in-time, JIT）、供应商管理库存（vendor managed inventory, VMI）、小批次（small lot size）、直送工位交付（point-of-use delivery）、精细制造（lean production）及订单与产品的个性化定制等生产方式。在配送领域，管理者则更倾向于为客户订单提供更迅速快捷的服务。这些变化为仓储系统提出了新的需求，如更精密的库存控制、更短的响应时间和更多的产品多样性。为此，基于有成本、技术和管理规范上的优势，大量的大型仓库和配送中心相继适应这种需求。这类大型仓库和配送中心日吞吐量巨大，订单拣选流程的改善不仅能直接优化其自身的服务水平和降低运营成本，也能间接地提高整个供应链的管理水平。

订单拣选流程始于一个订单到达仓库，终于它被完成并移交至之后的运输环节。对于作业人员而言，这中间有许多环节会出现操作错误以影响到订单完成的准确性，更不用说时间上的消耗。这也恰恰是管理人员和研究人員着眼的优化空间。近年来，管理人员通过采用多种信息技术，如条码（bar coding）、无线射频识别（radio frequency identification devices,

RFID)^[3]、电子地图^[4]、室内定位 (indoor positioning system)、自动导航 (autonomous navigation)^[5]和仓库管理系统 (warehouse management systems, WMS)^[6-7]等, 以提高仓库的自动化、信息化程度^[8]。这些新技术为改进订单拣选流程提供了技术基础, 如订单实时拣选、多拣货员间通信、拣货流程全自动化。研究人员则将研究重点放在解决这一领域出现的新问题并提出新的解决方案, 然而, 目前的研究成果和实际需求之间仍然存在不小的差距。因为新的拣选模式尚未得到充分研究, 拣选相关环节策略设计, 如布局设计、货位分配、订单分配等的最优组合的确定也刚刚起步, 而在拣选各个环节中, 更是有不少待解决的问题。在应用技术已经取得长足发展的背景下, 复杂环境下的订单拣选相关环节策略设计更是凸显出解决问题的紧迫性。

以往的大多数研究, 将订单拣选作业设置在简单的、静态的、确定的仓库环境中开展, 这就意味着这类研究忽略了订单拣选作业中广泛存在着的复杂性、动态性及不确定性。这类差距体现在以下问题中: 首先, 多数拣选策略都是针对流程中的一个订单或一个拣货员进行, 而实际作业中, 拣选系统中会存在多个订单或多个拣货员, 这类假设忽略了多个订单之间、多个拣货员之间的相互作用对拣选效率产生的影响; 其次, 订单的生成在很多研究中都是提前设置好, 在之后的流程中都是静态的批量处理, 现实情况中, 订单是实时到达, 批处理不能很好地满足快速响应的需求; 最后, 为了简化处理, 订单的详细信息一般假设为确定, 而且认为作业人员的拣选作业都能够正确无偏差地完成, 而在电子商务大环境下, 订单内容无法提前预知, 更不用说实际情况下作业人员的误操作, 导致订单的实际拣选过程有许多不确定性。

综上所述, 针对拣选作业流程中普遍存在的复杂性、动态性及不确定性, 对拣选作业流程各个环节进行建模与分析, 对于降低仓库运营成本、

提高供应链管理水平具有重要意义。本书旨在从项目实践出发,围绕订单拣选作业中的订单拣选路线规划问题,应用蚁群算法及信息共享等方法,探究拣选作业流程各环节的运行规律,为拣选作业中的布局设计、人员配置、拣选策略选择及技术应用等问题提出建议,同时,扩展了相关理论的应用领域。本书以订单拣选作业中的订单分批与拣选路线规划问题为核心,具体关注以下研究问题。

1) 拣货员堵塞的订单拣选路线规划。绝大多数拣选策略研究^[9-10]是假设仓库中只有一个拣货员(order picker),而实际操作中,为提高效率,仓库中会有多个拣货员同时工作。当多个拣货员同时访问同一个货位或通道时,堵塞情况就会发生^[11],这就意味着,现有的基于单个拣货员假设的拣选策略缺乏处理堵塞的机制。在堵塞发生时,拣货员为了避免冲突,只能原地等待,直到被占用的货位或通道能够被访问。这毫无疑问增加了拣选作业时间,而且增加的部分是不能带来任何附加价值的等待时间。所以,在规划拣货员的行走路线时,考虑拣货员堵塞的情况,在理论研究和实际应用方面都十分必要。

2) 不确定信息环境下的订单拣选路线规划。传统的拣选策略设计中大多假设订单中的详细信息是可预知的,然而现实中订单内容无法预知且待拣选货物的规格与数量上存在差异。因此,拣选单个货位的拣选用时具有不确定性^[12-13],进而导致实际拣选作业中的相关作业信息具有不确定性。这种不确定性引发的问题对拣选效率有影响,且已有的拣选策略并不能完全应对。所以,考虑拣选作业信息的不确定性,对于设计适用于这种不确定信息环境下的订单拣选路线规划有实际意义。

3) 在线环境下的订单分配与订单拣选路线规划。电子商务的兴起使得直接面向客户的配送中心订单与生产企业的内部订单有很大的不同。配送中心的客户订单一方面具有小批量、实时到达的特性,另一方面,有更

高的快速响应、正确性、完整性的服务要求。这时，以往大多数研究中静态批量处理订单的思路^[14-15]就显得不太符合要求。所以在在线环境下，设计出符合电子商务特性的订单分配与订单拣选路线规划方法具有十分重要的意义。

拣货员堵塞、不确定信息环境等问题是订单拣选研究中的热点与难点，但是现有研究集中在货位分配等战术层面，而在运作层面的相关环节设计中尚未得到充分涉及。本书通过研究针对拣货员堵塞、不确定信息环境等问题的订单拣选路线规划，既促进了相关理论的发展，也能够对实际拣选作业起到改进效率的指导作用。

1.3 相关文献综述

本节内容从介绍订单拣选策略的总体研究情况出发，紧密围绕本书研究的订单拣选路线规划问题，从研究涉及的拣货员堵塞、订单拣选的动态性与不确定性等方面进行分类综述。

1.3.1 订单拣选策略研究总体情况

关于订单拣选策略的研究国内外都有较长的发展历程，成果也十分丰富，相关的综述性文章见文献[2, 16, 17]。除了评价订单拣选系统的效率^[18-19]，订单拣选策略的设计可以按照从战术层到运作层，并根据时间维度^[16]分成如下几类，许多研究已就各自针对的具体领域展开。

1) 仓库布局设计 (layout design)。

为了最优化仓库利用率和提高拣选效率，对仓库设备的尺寸和位置进行选取与决定的过程即仓库布局设计。涉及订单拣选的布局设计问题可以分为两方面：订单拣选系统的设施选址和拣选系统内部的布局设计。第一类一般称为设施配置问题^[20-22]，其主要内容是如何设置拣选、储存、打包

等拣选相关作业设施，如堆垛机^[23]、自动导引小车^[24]等，以及相关设施，如托盘^[25]、货架、拣选通道^[26]的尺寸功能设计。该问题的目的是降低订单作业各环节间的运营成本及提高设施利用率，在自动化立体仓库领域比较受到关心^[27-28]。文献[1]给出了几种比较有效的设计步骤，文献[29]则对该类问题做了详细综述。之后，文献[30]提出了一个规划作业区域和存储区设置的模型以及相应的启发式策略。第二类问题则是订单拣选研究更关心的问题，即存储区的设计。无论是平面（low-level）仓库^[31-32]还是立体（high-level）仓库^[33-34]，都会考虑通道（pick aisle）数量与长度、横向通道数量^[35]等问题。此外，通道的布局方式也经常成为研究对象，除了比较经典的平行通道（parallel）式布局外，还有飞翼型（Flying-V）^[36]、鱼骨型（Fishbone）^[37]、U型^[38]等布局。需要注意的是，布局问题与仓库采取的货位分配策略紧密相关，所以布局设计一般会针对具体的货位分配策略展开研究，如具体针对随机存储、分类存储等货位分配策略的布局设计^[39-40]。

2) 货位分配（storage assignment）。

产品在被拣选前，会放在仓库中，为了能在拣选时用最快的时间取出，管理人员会决定以什么样的方式为这些货物分配货位，哪些放在快速流通区域^[41]，哪些放在长期存储区域，这种分配策略就是货位分配^[42]。由于该问题是NP-Hard（non-deterministic polynomial，意为所谓的非确定性，意思是说，可用一定数量的运算去解决多项式时间内可解决的问题。NP问题通俗来说是其解的正确性能够被“很容易检查”的问题，这里“很容易检查”指的是存在一个多项式检查算法。相应的，若NP中所有问题到某一个问题是图灵可归约的，则该问题为NP困难问题）^[43]，除了使用如分支定界法^[44-45]这类常用算法外，更多的相关文献集中在启发式策略研究上^[46]。相关综述^[47-48]将常用的货位分配策略分为如下五类：随机存储（random storage）、最靠近出口存储（closest open location storage）^[49]、定位存储

(dedicated storage)、分类存储 (class-based storage)^[50-52]和货物周转率存储 (full turnover storage)^[53-55]。近年来,随着数据挖掘在货位管理上的应用^[56],关联存储 (correlated storage)^[57-58]开始兴起,该策略是分析货物间的关联性,将经常会在订单中一起采购的货物放在邻近货位^[59-60]。当然,也有使用如禁忌搜索 (tabu search)^[61-62]、遗传算法 (genetic algorithm)^[63-64]、模拟退火 (simulated annealing)^[65]等智能优化算法的相关策略。

3) 作业分区 (zoning)。

作业分区是将拣选区域分成数个工作区,拣选人员只完成其所委派区域内的待拣选货物^[2],目的是分解拣选任务后并行拣选以加快订单处理速度^[66-68]。文献[69]认为分区和货位分配及订单分批综合考虑更能影响订单处理速度。因此,近年来该环节的策略也主要是与订单分批策略一起设计^[70-72],或者是研究在有分区情形下的货位分配优化问题^[73]。

4) 订单分批 (batching)。

当单个订单的货物量较多,即订单尺寸 (order size) 较大时,则每个订单会单独完成,比如在一次拣选时只完成一个订单。这种拣选模式称为“单订单拣选”策略 (single order picking policy) 或是“按订单拣选” (pick-by-order)。然而,当订单尺寸很小时,则可以通过在一次拣选作业中完成一批订单的方式提高效率。订单分批策略的目的就是确定哪些订单可以构成一个拣选批次^[74-75]。文献[76]认为订单分批策略主要分为两大类:位置邻近分批、时间窗分批。

位置邻近分批 (proximity batching) 是指将拣货点相邻近的订单组成一个批次,该类策略的主要问题是衡量这些假定将在同一批次拣选的订单之间的邻近度。文献[77-78]通过研究人工拣选的仓库中的邻近度分批算法,将这类问题定义为NP-Hard问题,因此,相关研究多用两类启发式方法:种子算法 (seed algorithms) 和节省算法 (savings algorithms)。种子算

法分为两步：(i) 按照随机、最多拣选位置、最长拣选路线等原则选择一个订单作为种子^[79-80]；(ii) 按照与种子拣选路线重合度最高等原则将其他订单附加在该种子订单上^[81]。节省算法则是基于文献[82]提出的针对车辆路径问题（vehicle routing problem）的 Clarke-Wright（克拉克-莱特，外国人名）算法，选择分批后总距离最小的方案，文献[83]给出了四种基于该算法的分批策略。

时间窗分批（time window batching）是指将在一个时间间隔内到达的订单分为一个批次^[84]。相关文献[84-85]通过仿真实验证明这种方式的准确率较高，且规则简单，比较容易在实际中应用。

除了这两类外，也有在计算机辅助^[86]下，使用邻近搜索^[87]、遗传算法^[88-90]、禁忌搜索^[91]、数据挖掘^[92]、聚类分析^[93-94]、模拟退火^[95]及模糊逻辑^[96]等方法寻找订单间的关联性，进行分批的思路。当然，也有一类联合优化研究，如拣选路线规划和分批策略联合优化^[97-101]、分批策略与货位分配联合优化^[102]及分批策略与拣选次序联合优化^[103]等。最近，也有研究关注如何在分批过程中对堵塞问题进行应对^[104]。

5) 订单拣选路线规划（routing）。

订单拣选路线规划是在确定拣选任务后，为拣货员生成一条行走距离较短的拣选路线^[105-109]。仓库管理优化的目的是在有限的人力、设备及资本条件下，最大化地提高服务水平^[110]。服务水平由多种因素组成，如订单拣选服务时间、订单完整性及订单准确性等^[2]。订单拣选与服务水平之间的关键联系就在于，订单如果能更快地拣选完成，就能更快地进入对客户的投递环节。在有运输批次的投递系统中，亦是如此，如果拣选效率低下，则会错过批次，客户的等待时间就更长。此外，更短的订单拣选服务时间也为处理在订单下达后发生的变动提供了更高的灵活性。因此，减少订单拣选服务时间就成为订单拣选流程优化的核心目的。尽管有的案例研究^[111]

表明拣选作业中的其他活动也会对订单拣选服务时间产生潜在影响，但行走时间仍然构成了拣选服务时间的绝大部分。行走时间耗费了工作时间但没有增加价值^[112]，所以行走时间自然就成为拣选服务时间优化的首选对象。大多数文献[113-114]都认为行走时间与行走距离成正相关，所以，研究如何取得最短的行走距离的订单拣选路线规划问题就显得十分重要。该问题无论是在自动化仓库还是传统仓库，都受到了足够的重视。所以，有一部分文献集中在设计订单拣选路线规划算法以取得最高的拣选效率^[115-117]。关于订单拣选路线规划具体的研究情况将在 1.3.2 节做详细介绍。

1.3.2 订单拣选路线规划

由于仓库系统不同，对应的订单拣选路线规划算法的研究方式也多有不同。自动化仓库中由于信息化程度高，可以实现计算机辅助拣选，所以相应的订单拣选路线规划多采用智能优化算法，如蚁群算法^[118]、遗传算法^[119]等。对于应用范围最广的人工作业方式下的平行通道式仓库，更受研究人员和作业人员欢迎的是启发式策略，因为启发式策略得出的路线具有逻辑性且规则简单，便于在仓库中实施^[78]。针对单区块平行通道式仓库，一个订单拣选路线规划最优算法最先在 1983 年被提出^[115]。之后，文献[120]给出了几种常用的启发式策略，文献[121]将这些启发式策略与最优算法对比，发现这些策略与最优算法之间的差距在最佳时不超过 5%，具有可操作性。针对实际中仓库存在多区块的情况，文献[117]提出，这些现有策略经过一些改动是可以应用在多区块仓库中的。之后，一些研究^[116]给出了一些经过改进后应用于多区块仓库情形的策略。当然也有使用其他方法，如基于 Lin & Kernighan^[122]提出的 k-opt（算法名）方法设计的订单拣选路线规划算法^[123-124]。与本书密切相关的部分订单拣选路线规划算法与策略使用情况将在“2 订单分批与拣选路线规划研究理论基础”中详细叙述。

当然，除了新算法的提出和算法效率对比，也有尝试将拣选路线规划和其他拣选环节的策略设计相结合进行综合优化的相关研究，这一类的文献如表 1-1 所示。

虽然现阶段人工作业仓库中多使用启发式策略，但随着信息技术的投入，在仓库中使用采用了最优算法规划拣选路线的信息化辅助拣选也成为可能。围绕本书的研究内容，下面针对订单拣选路线规划设计与研究中会涉及的拣货员堵塞、拣选作业不确定性与动态性两个方面展开文献综述。

表 1-1 订单拣选路线规划与其他策略综合优化相关文献列表

文献	涉及策略			
	布局设计	货位分配	分区	订单分批
Petersen and Schmenner (1999) ^[9]		√		
Hwang et al. (2004) ^[10]		√		
Bozer and Kile (2008) ^[14]				√
Henn et al. (2010) ^[15]				√
Schleyer and Gue (2012) ^[19]				√
Roodbergen and Vis (2006) ^[31]	√			
Vis and Roodbergen (2011) ^[32]	√			
Chiang et al. (2011) ^[56]		√		
Parikh and Meller (2008) ^[71]			√	√
Yu and De Koster (2009b) ^[72]			√	√
Ho and Tseng (2006) ^[79]				√
Ho et al. (2008) ^[80]				√
Henn and Wäescher (2012) ^[91]				√
Chen et al. (2005) ^[92]				√
Hwang and Kim (2005) ^[93]				√
Chen and Wu (2005) ^[94]				√
Dekker et al. (2004) ^[111]		√		
Petersen and Aase (2004) ^[114]		√		
Bindi et al. (2009) ^[125]	√	√		