



浙江工业大学

硕士学位论文

论文题目：大批量订单分布式并行整体分拣系统设计

作者姓名	李天舒
指导教师	赵云波 教授
学科专业	控制科学与工程
学位类型	工学硕士
培养类别	全日制学术型硕士
所在学院	信息工程学院

提交日期：2019年08月

Design of Distributed Parallel Integrated Sorting System for Large Volume Orders System

Dissertation Submitted to

Zhejiang University of Technology

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Engineering



By

Tian-shu LI

Dissertation Supervisor: Prof. Yun-bo ZHAO

Aug. 2019

浙江工业大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经加以标注引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不含为获得浙江工业大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

作者签名：李天舒

日期：2019 年 8 月

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于 1、保密 ，在一年解密后适用本授权书。

2、保密 ，在二年解密后适用本授权书。

3、保密 ，在三年解密后适用本授权书。

4、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：李天舒

日期：2019 年 8 月

导师签名：李波

日期：2019 年 8 月

中图分类号 TP29

学校代码 10337

UDC 620

密级 公开

研究生类别 全日制学术型硕士研究生



浙江工业大学

工学硕士学位论文

大批量订单分布式并行整体分拣系统设计

Design of distributed parallel integrated sorting system for
large volume orders system

作者 李天舒

第一导师 赵云波 教授

申请学位 工学硕士

学科专业 控制科学与工程

培养单位 信息工程学院

研究方向 智能订单分拣

答辩委员会主席 何德峰

答辩日期: 2019 年 8 月 27 日

大批量订单分布式并行整体分拣系统设计

摘 要

大型生产和销售中往往伴随着大批量订单的按单分拣过程，典型场景可见于大型电商的仓库系统。在较短时间内仓库收到从电商平台产生的大量订单，仓库系统需按照每份订单中包含的商品的种类和数量从仓库中拣选货物并打包，随后交付物流系统。这一订单分拣过程的准确性和快速性极大的影响着整体电商流程的效率，已经引起了各大电商如亚马逊，京东等的广泛注意，各种尖端技术的应用层出不穷。

整体分拣是指对任意订单中的货物完整的分拣出来并打包。目前的订单分拣方式本质上不适应这一整体分拣的要求，其核心原因是订单打包点的限制。大多数方法的订单打包点都设置为较少的特定地点，打包口附近会产生拥堵，现有有限的对整体分拣研究，未从根本上解决这一难题。因此，对大批量订单中的货物进行高效整体分拣是影响大型电商整体物流效率的一个关键因素，但这一问题尚缺少严格模型和有效解决方法。

本文对大批量订单整体问题进行了数学建模，并提出了分布式整体分拣策略和方法，极大的提升了订单分拣系统的整体分拣效率。具体工作如下：

1. 本文建立大批量整体分拣问题的数学模型。该模型定量的描述了订单整体分拣的静态状态和动态演化过程，并对订单分拣算法、系统限制条件和分拣效率等进行严格定义和区分，给出了整体分拣问题的明确定义。

2. 依托这一模型，提出了一种全新的分布式并行解决方案。该方案的核心思想是使用智能货架作为订单分拣点，将订单分拣过程从原先的单一分拣点改造为分布式并行分拣点，有效解决了在订单整体分拣问题中的打包点数量瓶颈问题。这一改造方式引出了若干技术上的困难，如无人车在不碰撞前提下的高效运行方式，订单的分配方案等，本文在预测控制和优化等框架下对问题进行了有效解决。

3. 最后利用 MATLAB 建立所提数学模型的仿真平台。该平台模拟了订单自动分拣的过程，验证分布式并行解决方案的有效性，并根据订单到达率给出了模型硬件要求的具体建议。接着，又搭建了常规分拣模型的仿真平台，并从分拣效率和成本两个方面证明了该方法的高效性。

关键词：大批量订单，整体分拣，数学模型，分布式并行

DESIGN OF DISTRIBUTED PARALLEL INTEGRATED SORTING SYSTEM FOR LARGE VOLUME ORDERS SYSTEM

ABSTRACT

Large-scale production and sales are often accompanied by a single-order sorting process for large-volume orders. Typical scenarios can be found in large-scale e-commerce warehouse systems. In a short period of time, warehouses receive a large number of orders generated from e-commerce platforms, and warehouse systems need to follow the type and quantity of goods included in each order are sorted and packaged from the warehouse and then delivered to the logistics system. The accuracy and rapidity of this order sorting process greatly affects the efficiency of the overall e-commerce process, which has caused the extensive attention of major e-commerce companies such as Amazon, Jingdong, etc., the application of various cutting-edge technologies emerges endlessly.

Overall sorting refers to the complete sorting and packaging of goods in any order. The current order sorting method is essentially not suitable for this overall sorting requirement, and the core reason is the restriction on the order packing point. Most of the method's order packing points are set to a small number of specific locations, congestion will occur near the packing port, and the limited research on the overall sorting has not fundamentally solved this problem. Therefore, efficient overall sorting of goods in large-volume orders is a key factor affecting the overall logistics efficiency of large e-commerce, but this problem still lacks strict models and effective solutions.

This paper establishes a mathematical model for the overall problem of large-volume orders, and proposes a distributed overall sorting strategy and method, which greatly improves the overall sorting efficiency of the order sorting system. The specific work is as follows:

1. Thesis establishes a mathematical model for large-scale overall sorting problems. The model quantitatively describes the static state and dynamic evolution process of the overall order sorting, and strictly defines and distinguishes the order sorting algorithm, system constraints and sorting efficiency, and gives a clear definition of the overall sorting problem.

2. Based on this model, a new distributed parallel solution is proposed. The core idea of the scheme is to use the intelligent shelf as the order sorting point, and transform

the order sorting process from the original single sorting point to the distributed parallel sorting point, effectively solving the bottleneck problem of the number of packaging points in the overall order sorting problem. This transformed method has a number of technical difficulties, such as the efficient operation mode of the unmanned vehicle without collision, the order allocation plan, etc. This paper effectively solves the problem under the framework of predictive control and optimization.

3. Finally, we use MATLAB to build a simulation platform for the proposed mathematical model. This platform simulates the process of automatic order sorting, verifies the effectiveness of distributed parallel solutions, and gives specific recommendations for model hardware requirements based on order arrival rates. Then, we build a simulation platform based on the conventional primary sorting model, and prove the efficiency of the method from two aspects: sorting efficiency and cost.

KEY WORDS: Large volume orders, Overall sorting, Modeling, Distributed parallel solution

目 录

摘 要.....	II
ABSTRACT.....	III
插图清单.....	VII
符号说明.....	VIII
第一章 绪 论.....	1
1.1 课题背景.....	1
1.2 本文研究的内容及意义.....	3
1.3 本文内容安排.....	3
第二章 大批量订单整体分拣文献综述.....	4
2.1 仓储布局.....	4
2.2 大批量订单整体分拣研究现状.....	8
2.2.1 手工分拣研究.....	8
2.2.2 自动分拣研究.....	11
2.3 大批量订单非整体分拣研究现状.....	16
2.4 本章小结.....	17
第三章 大批量订单整体分拣问题的模型化.....	18
3.1 订单分拣系统在 t 时刻的静态状态描述.....	18
3.2 订单分拣系统在 $[t, t+1)$ 时间间隔内的动态演化.....	19
3.3 大批量订单整体分拣问题.....	21
3.4 本章小结.....	23
第四章 大批量订单整体分拣的一种分布式并行分拣方法.....	24
4.1 分布式并行整体分拣策略及硬件要求.....	24
4.2 分布式并行整体分拣的模型化描述.....	25
4.3 分布式并行分拣的关键技术问题.....	28
4.3.1 f_{gv} 的构建：优先级优先分配算法.....	28

4.3.2 α_i^l 的确定：模型预测优化算法	29
4.4 分布式并行整体分拣算法.....	31
4.5 本章小结.....	31
第五章 大批量整体分拣的仿真平台及方法验证.....	32
5.1 环境搭建.....	32
5.1.1 初始化静态参数.....	32
5.1.2 订单分拣系统循环过程.....	33
5.2 参数选择.....	33
5.2.1 分拣效率 $J_2(t)$ 与预测控制 N 的关系	33
5.2.2 分拣效率 $J_2(t)$ 与订单到达率 λ 的关系.....	34
5.3 常规模型与本文模型参数对比关系.....	35
5.3.1 常规模型.....	35
5.3.2 订单效率对比关系.....	36
5.4 本章小结.....	37
第六章 结论与展望.....	39
6.1 结 论.....	39
6.2 展 望.....	40
参考文献.....	41
致 谢.....	45
作者简介.....	46
1 作者简历.....	46
2 攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	46
3 参与的科研项目及获奖情况.....	46
4 发明专利.....	46
学位论文数据集.....	47

插图清单

图 1-1	常见的订单分拣方式模型图	2
图 2-1	仓库设计和运营计划图	5
图 2-2	常规区域分拣图	6
图 2-3	常规传送带运输分拣模型图	7
图 2-4	常规分拣路线图	10
图 2-5	A 字型分拣模型图	12
图 2-6	AS/RS 自动分拣模型图	14
图 2-7	集中分离系统模型图	15
图 2-8	RMFS 自动分拣模型图	16
图 4-1	分布式并行分拣模型示意图	24
图 4-2	分布式并行分拣方法的模型化示意图	26
图 5-1	分布式并行整体分拣策略的仿真示意图	32
图 5-2	分拣效率 $J_1(t)$ 随时间的演化规律图	33
图 5-3	分拣效率 $J_2(t)$ 与预测控制 N 间的关系图	34
图 5-4	常规分拣仿真示意图	36
图 5-5	在统计时域 $[t, t+1)$ 内, 两种分拣方法的分拣效率 $J_1(t)$ 随时间的演化规律图	37

符号说明

D_g^s	——	带运送货物 G_g 与空闲无人车的距离向量;
f_{gv}	——	将 $G_g(t)$ 中的货物分配给空闲无人车 $V_i(t)$ 的算法;
G_g	——	标号为 g 的货物;
I_g	——	货物 G_g 的处理状态;
N_g	——	所有货物种类总数;
N_o	——	t 时刻所有待处理订单的个数;
N_s	——	仓库中货架个数;
N_v	——	无人车数量;
O_o	——	标识号为 o 的订单;
PRI_o	——	待处理订单 O_o 的处理优先级;
S_i	——	第 i 个货架;
V_i	——	第 i 辆无人车;
$V_i(t)$	——	无人车 V_i 在 t 时刻的状态, 其中 $l_i(t), v_i(t), a_i(t)$ 分别其位置, 速度和加速度;
$\mathcal{A}(t)$	——	计算每一辆无人车在 $[t, t+1)$ 内的运行规则的算法;
\mathbb{G}_g	——	需分配无人车进行分拣和运送的货物的集合;
$\mathbb{I}_o(t)$	——	t 时刻所有待处理订单的标识号集合;
\mathbb{I}_o^g	——	订单 O_o 中所有货物的标识号集合
\mathbb{V}	——	所有无人车的集合, 分别表示 t 时刻空闲的和忙碌的无人车集合;
$\Theta(t)$	——	t 时刻待处理订单集合;
$\Theta_c(t+1)$	——	在 $[t, t+1)$ 时间内处理完的订单集合;

|·| —— 集合中元素的个数。

第一章 绪 论

1.1 课题背景

自 2009 年阿里提出“双 11 购物节”，日营业额突破 1 亿起，各大网商通过优惠券，满减等优惠力度让人们购物的热情达到巅峰。同样的，物流是双 11 另一大话题，每年的双 11 几乎次次爆仓。从 2013 年物流订单量的 1.52 亿，短短 5 年时间增长到了 10 亿，大批量订单分拣的需求越来越高。分拣场景不限于京东、亚马逊等 B2C 电商，也适用于具有大批量订单分拣需求的场景，如大型医院的药方分拣、英国 Argos 零售店的订单分拣等。目前有部分电商为了使取货过程快速自动化，订单中多种货物完全分开独立处理，这不仅增加物流包裹的数量和成本，还增加了客户收货的负担。因此，大批量订单整体分拣的效率成为了相关行业需要考虑的重点问题^[1,2]。

近年来，订单分拣方式也随着科技的进步逐渐趋于自动化。起初的仓库系统主要以手工分拣为主，从接收到订单后完全由拣货员将订单里的货物从仓库内取出并打包，可通过电子标签，优化物品和货架摆放等方式提升效率，完全使用人力会使得订单分拣的效率低，如图 1-1 的 A 所示。为了减轻拣货员的工作负担，物运送过程则通常可以借由传送带或无人车自动化进行，如图 1-1 的 B 所示，它的分拣效率需要通过传送带路线设置、无人车路径规划等方式提高。随着劳动力成本的提高，常规的仓储布局发展为立体式货架仓库 AS/RS，如图 1-1 的 C 所示，其货物的拣选分为两个阶段，第一个阶段为订单中的货物从货架中取出，第二个阶段传送带以订单的形式将批量货物分离，货物运送则用无人车和传送带共同完成，其保证了订单的完整性但是二次分拣产生了额外的工作负担。由于 AS/RS 系统的成本很高，一旦设计好仓库之后难以改变，扩展性和灵活性不高。由此，如图 1-1 的 D 所示，移动货架分拣渐渐进入了网商系统，货物运送是用 kiva 机器人将订单中货物所在货架运输到拣货台，再用手工或机械手进行拣选打包^[3]，若订单较多，订单内货物不能同时到达拣货台，那么就会分开打包来避免拣货台排队现象，该方法虽然高效却失去了其完整性。

常用订单分拣方式往往将所有待处理订单中的所有货物归为统一的待拣货集合进行统一处理。系统从仓库货架上依照待拣货集合逐一拣选出商品，然后运送至特定地点进行打包。这样，订单分拣过程就分为了三个步骤，即货架拣选，货物运

送和订单打包^[4]。货架拣选大多手工进行,可通过优化物品和货架摆放等方式提升效率^[5-8]。货物运送过程则通常可以借由传送带或无人车自动化进行^[9],传送带路线设置、无人车路径规划等是这一步骤效率提升所需考虑的问题^[10,11]。订单打包的物理过程较为简单,但其执行依赖于订单中的货物是否可以准确快速的到达,是衡量整个分拣系统效率的标志。



图1-1 常见的订单分拣方式模型图

Figure 1-1. Common order sorting model diagram

现有订单分拣方式存在的主要问题是大批量订单“整体分拣”能力低下。所谓整体分拣,是指对任意订单中的货物完整全部的分拣出来并打包,而不将订单分拆为子订单,每一子订单仅包含所考虑订单货物的真子集。整体分拣是电商系统的天然要求,因为电商的每一个订单都对应唯一一个运送目的地,将一个订单分拆为多个子订单将成倍的增加后续物流包裹的数量,极大增加物流成本。但是,现有订单分拣方式本质上不适应这一整体分拣的要求。其核心原因是对订单打包点的限制。大多数方法的订单打包点都设置为较少的特定地点,比如使用传送带方式进行已拣选货物的运送,打包点应在传送带的出口(可设置多个出口);若使用无人车方式进行已拣选货物的运送,运送点的集中也导致拥堵和效率低下。现有有限的对整体分拣的研究,也未从根本上解决这一难题^[12,13]。不唯如此,在订单分拣问题的研究中大多关注于具体情境下的具体设置和算法,缺少描述问题的统一数学框架,更加造成了对这一问题研究的不足。

1.2 本文研究的内容及意义

面向上述的大批量订单整体分拣问题缺少严格模型和有效方法的现实，本文首先对该过程进行严格的数学模型化，并进而提出一种基于智能货架的分布式并行解决方案。该模型定量描述了整体分拣的静态状态和动态演化，给出了整体分拣问题的明确定义。依托这一模型，提出了相应的解决方案，其核心思想是使用智能货架作为订单分拣点，将订单分拣过程从原先的单一分拣点改造为分布式并行分拣点，从本质上满足了整体分拣的需求。这一改造方式引出了若干技术上的困难，如无人车在不碰撞前提下的高效运行方式，订单的分配方案等，我们在预测控制和优化等框架下对问题进行了有效解决，仿真实验证明了我们所提出方法的有效性。

本文研究的意义在于：

应用意义：针对大批量订单自动整体分拣在领域中遇到的瓶颈，本文按照订单性质重新布局，扩大了以往自动分拣模型的物品类型；对于使用智能仓库的企业，提供一个新的分布式并行解决方案来提高订单自动分拣的效率。

学术意义：本文提供了分布式并行整体分拣模型的数学框架，并基于该框架重新定义了分拣方式及解决方案。

1.3 本文内容安排

本文的第二章通过订单分拣模型与方法的文献综述，进一步体现整体分拣的重要性；第三章通过对订单分拣系统的静态状态、动态演化和系统目标等的描述给出了大批量订单整体分拣问题的数学模型；第四章描述所提出的分布式并行整体分拣方法，包括其基本思路、改进模型、关键技术问题和完整算法等方面；第五章利用仿真对比实验证明了所提出的分布式并行方法的有效性；第六章总结全文的主要工作与结论，以及未来扩展的方向。

第二章 大批量订单整体分拣文献综述

许多仓储,智能零售,医药行业存在着大批量订单分拣不能同时兼备高效与整体的能力,为了在市场竞争中具有强大的竞争力,在保证订单的完整性的前提下,企业面临着更短的订单交付周期,处理更多种类的订单的压力。由于仓储布局间接地影响分拣方式的选择,本文提出了解决大批量订单整体分拣的一个全新仓储布局,为了体现常规仓储布局与本文布局的差异,本章首先对仓储布局进行文献综述。在仓储布局的基础上,有效的分拣方法和对应的操作方式对提高仓库的全局操作效率有着重要影响。整体分拣主要存在手工分拣与自动分拣两种方式,手工分拣效率低,订单的容错率较高,而自动分拣的仓储布局多样,通常进行二次分拣也降低了订单整体分拣效率。为了对比整体分拣,本章需要列举常见的非整体分拣并分析其局限性^[14-18]。

2.1 仓储布局

仓储布局是仓库操作设计与仓库运营的基础,它的重要作用分为两个方面:其一,按照合理的规则放置货物,不仅可以增加拣货员对货物的熟悉程度,还可以减少拣货员的行走路线;其二,合理的摆放货架以及区域安排能间接决定其分拣方式。仓库操作流程是由仓储布局和订单的分拣方式共同决定,仓库操作流程的合理性直接影响仓库的正常运作。目前大部分的仓储布局是通过货架、机械手、传送带、无人车间的组合构成的。由图 2-1 所示,当订单到达仓储,拣货员/拣货器需要根据订单中货物在仓储中的位置进行合理的分拣操作。仓储布局主要由三个部分组成:库存存储、分区、货物位置分配。

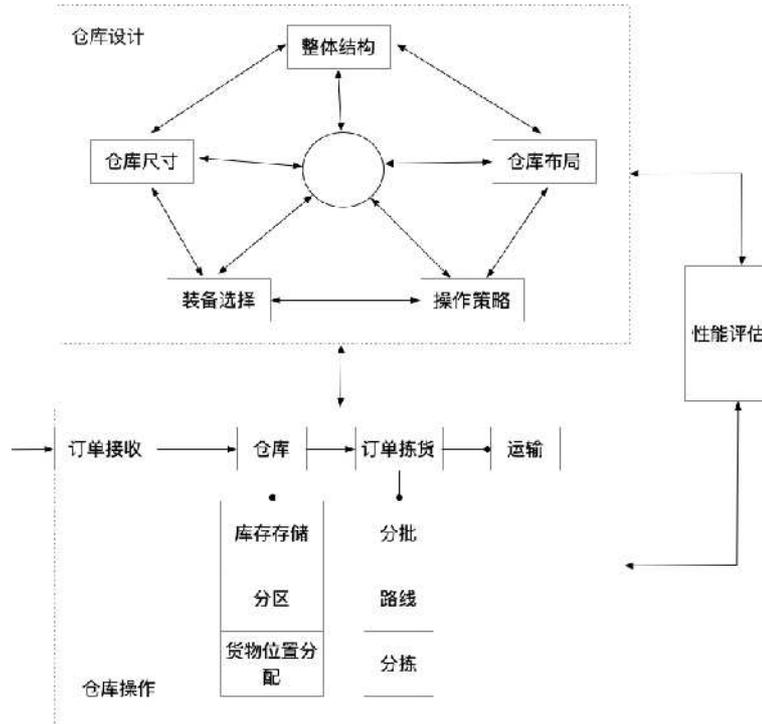


图2-1 仓库设计和运营计划图^[19]

Figure 2-1. Warehouse design and operation plan

库存存储涉及到仓库中的货物，为实现仓库的高空间利用率以及分拣时的有序性起着重要的作用。存储是一种主要的仓库功能。存储功能有三个基本策略：仓库中应保留多少库存；应如何及时地补充货物的库存；应将货物存储在仓库中的哪个位置，并在不同的存储区域之间进行分配和移动^[19]。Gallego^[20]介绍了前两个策略，以最大限度地减少总库存订购和运输成本，并且不会超过一个资源的容量限制为目标，利用启发式算法解决时间分阶段的嵌入式错误问题。存储分配问题，主要是将SKU分配给各个存储区域（分区）以及存储区域库存移动的策略。这个策略的两个主要标准是存储效率，其一对应于保持容量，以及访问效率，其二对应于插入（存储）和提取（订单拣选）过程所消耗的资源^[21,22]。Wutthisirisart^[23]利用线性位置算法，提出了货物间的放置距离，以及如何将有一定关系的订单聚类成簇来提高分拣效率。

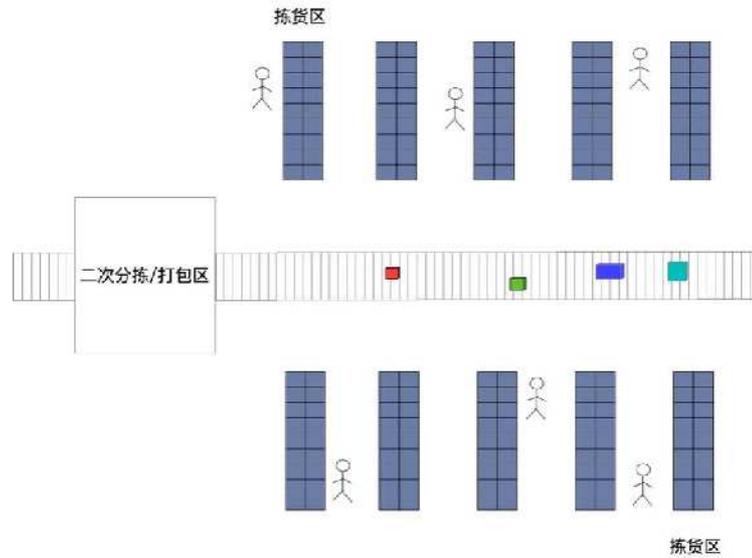


图2-2 常规区域分拣图

Figure 2-2. Conventional area sorting map

分区问题是在仓库内指定不同的存储区域，并将货物分配给指定的区域。分区决策影响着仓库的设计和仓库运营。将货物的存储划分为区域的主要原因是提高上货、拣货、统计库存的效率，常见的分区仓库模型见图 2-2 和图 2-3。区域拣选具有两个基本优势：其一，拣货员必须通过有限的空间来选择订单，拣货员对货物的熟悉程度增加，其二，采取并行拣选区域策略，订单拣选时间跨度减少。其劣势在于并行区域拣选中的分拣和顺序区域拣选中的排队引起的额外成本。因此，需要为区域拣选规划货物的存储，以确定区域的规格（数量，大小和形状），并将货物分配给对应区域，从而最大限度地减少总拣选成本并平衡跨区域的工作负荷。

目前关于区域拣选存储规划的文献非常有限。Gray^[24]提出了一个分区框架，通过多阶段分层方法，确定了区域和拣货员的数量，区域大小（每个区域的存储空间），区域内和区域内的存储分配以及订单批量大小。Petersen^[25]研究了区域形状（即每个区域的过道数量和过道长度），区域大小和批量大小对运营成本的影响。Jane^[26]以平衡拣货员的工作量为目标，提出了一种简单的启发式方法，将货物以区域的形式摆放。Jewkes^[27]考虑一种特定的顺序区域拣选方法，其中拣货员在其固定的区域内工作，并且在每次拣选后需要返回相应区域。

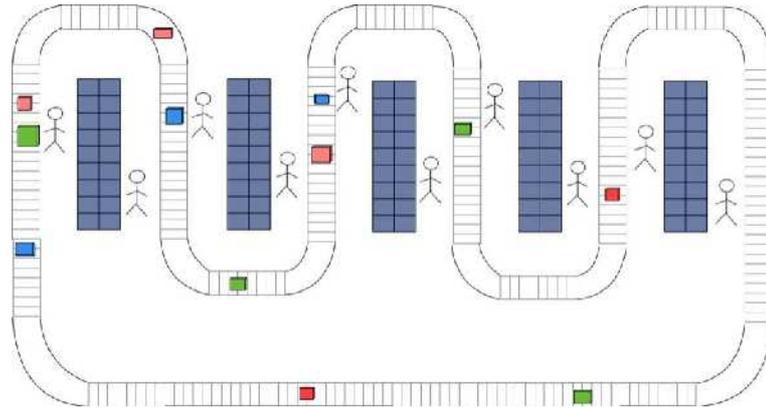


图2-3 常规传送带运输分拣模型图

Figure 2-3. Conventional conveyor transport sorting model diagram

货物的位置分配存在着四种方式：随机存储，专用存储，基于类的存储和相关存储。在随机存储中，根据货物的尺寸及可用空间作为库存分配存储位置，并记录该位置以供将来检索使用。专用存储策略基于空间吞吐量和存储要求将货物分配给预定位置，即指定的货物都被路由到专用存储位置。基于类的存储是随机存储和专用存储之间的折衷，基于某些标准（即需求，产品类型，大小）为库存分配类，并且为每个类分配一个存储位置块。在每个存储位置块内，货物随机存储^[28-30]。相关存储分配策略（CSAS）需要考虑到每个存储单元(SKU)之间的相关性，确定更经济的解决方案，以提高订单拣选效率^[31-33]。

Muppani^[34]主要采取基于类的存储策略，根据每个订单的多维数据集索引（COI）排序，然后将排序后的结果以类的形式对货物进行存储，建立用于类形成和存储分配的整数编程模型，通过模拟退火算法（SAA）来解决所有可能的货物组合，存储空间成本和订单拣选成本等问题。

Xiao^[35]通过考虑生产物料清单(BOM)信息来处理相关的存储位置分配问题。由于BOM中包含大量零件，因此会考虑运输工具的承载空间。他建立了数学模型，并通过启发式改进算法和迭代方法来放松原始问题中订单的紧密相互关系，将订单间的关系与运输工具的承载空间相结合。为了评估启发式的性能，通过使用随机生成的数据集在单块多通道仓库中进行数值对比实验。

Liu^[36]以最小化拣货机在配送中心的总行程距离为目标，展示了如何应用聚类技术来改善仓库中的库存位置和拣货操作。方法的创新之处在于：基于订单的数量规则，分别为订单类型和客户定义了两个相似性度量，并为订单类型和客户分别提供了一个零整数编程模型，为了找到最优的聚类结构，他还开发了一种原始的双模型算法。

2.2 大批量订单整体分拣研究现状

整体分拣方式主要分为手工分拣以及自动分拣。手工分拣是按照接收到的订单，将分散在仓库里的订单内的货物手动进行拣货。手工分拣初期投资成本较低，灵活性高，但是仅适合小批量订单分拣。手工分拣的不足点为容错率高，为此仓储借用仓库管理系统(WMS)以及电子标签来降低出错率。自动分拣方式是在计算机的指挥下，借助无人车、传送带、机械手等工具将订单内的物品集中在一起。随着物品种类的多样化以及优胜劣汰的商业竞争，手工分拣已经无法满足当代的分拣需求，部分自动分拣方式已经慢慢进入各大智能仓储中，为智能仓储奠定了基础。

2.2.1 手工分拣研究

订单拣选是一种仓库功能，用于处理从其存储位置检索物品，以满足客户订单指定的给定需求。订单拣选过程由于其高劳动力成本而导致大部分仓库运营成本。尽管已经进行了各种尝试以使拣选过程自动化，但是手动拣选系统在实践中仍然普遍存在。Wutthisirisart^[23]从订单特征出发设计仓库布局，改进拣配流程，将货物分配到存储位置，并讨论多批量订单可在单个路径中一起挑选，以最小化拣选者的总步行距离为目标，使用最小延迟算法(MDA)提高了手工分拣的效率。由此看出，提高手工分拣效率有两个方面：仓储布局，批量拣选。

Petersen^[37]探讨了拣货和存储对订单拣货员步行距离的影响。首先，他使用基于配送中心操作的仿真模型，以随机存储的方式进行货物摆放，拣货员以订单批量处理的方式进行挑选建立第一个模型。其次，他用基于类的方式进行货物摆放，拣货员使用单个订单拣选策略进行拣货建立第二个模型。结果表明，当小批量订单待分拣时，第一个模型中拣货员步行距离较短。当大批量订单待分拣时，两个模型拣货员步行距离几乎相同。上一节已经阐述了仓储布局的重要性，接下来叙述订单批量拣选对于手工分拣的意义。

订单拣选系统中使用的两个基本概念为“单个订单拣选”和“批量拣选”。单个订单拣选，指拣货员负责将整个订单中所有的货物单独挑选出来。批量拣选主要分为订单分批以及区域分批。订单分批拣选，指以拣货员行走路线最短或订单的相似性进行组合同时进行分拣。区域分批拣选，指多个订单以区域的形式分开，每个区域分别进行分拣。一般而言，批量拣选将产生更高的拣货率，因为当拣货员被限制在一个区域并允许同时拣选多个订单时，拣货员在连续拣货之间的平均行驶距离将被最小化。由于批量拣选是将区域订单/多个订单同一批次进行拣选，而多订单需要以单个订单的形式分出，增加了分货的过程^[38,39]。在手工分拣中，为了减少拣货员的步行距离通常使用批量拣选。

(1) 订单分批拣选

关于订单分批拣选的研究较多。Gademann^[40]提出了列生成算法解决了订单分批时线性规划松弛问题。Bozer^[41]利用节约算法,将多个订单进行随机合并再对其节约分拣距离进行排序,并按照节约值进行分批。并开发了一种新的关于订单分批的混合整数规划(MIP)模型,以获得近乎精确的问题解决方案。MIP为问题提供了良好的下限和上限,略微识别和修改了批量启发式的顺序,在数值实验中获得了较好的结果。Lam^[42]提出了一个拣选操作系统(OPOS)来协助制定拣选计划和批处理序列。该研究将数学模型和模糊逻辑技术相结合,将接收订单分成批次,并分别优先处理批次处理顺序。通过所提出的系统,可以将订单拣选过程作为具有共同拣选位置的批次来管理以最小化行进距离,并且还可以确定批次拣选序列。为了演示系统的使用,提出了第三方物流仓库的案例研究,结果表明该方案能够更好的减轻拣货员的劳动力。

Tsai^[43]提出了一种批量拣选模型,该模型不仅考虑了拣货成本,还考虑了早期和迟到惩罚,以满足当前复杂和快速响应的环境。使用多遗传算法(GA)方法求解该模型以生成最佳批量拣选计划。多GA方法的核心包括GA_{BATCH}和GA_{TSP}算法。GA_{BATCH}算法通过最小化旅行成本和早期和迟到惩罚的总和来找到最佳批量拣选计划。GA_{TSP}算法通过最小化行程距离来搜索批次的最有效行进路径。为了展示所提出的模型的好处,使用具有不同订单特征和仓库环境的多个数据集进行一组模拟和灵敏度分析。

Henn^[44]提出订单批处理,可以分为两种问题类型:在离线(静态)批处理中,所有客户订单都是预先知道的;在线(动态)批处理中,客户订单随着时间的推移动态可用。他考虑了在线订单批处理问题,其中必须最小化在特定时间段内到达的客户订单的最大完成时间,并且展示了如何修改离线订单批处理的启发式方法以处理在线情况。在竞争分析中,提出了所提算法的竞争比率的下限和上限。所提出的算法在一系列广泛的数值实验中进行评估。已经证明,这种分批方法可以显著减少最大完成时间。

Russell^[45]根据需求水平,人工费率,订单大小和其他因素为此问题开发了一个描述性模型。该模型使用时间研究和模拟数据验证了描述模型中的主要权衡关系。它的创新功能为:可以综合订单属性,提出使用手动分拣还是自动分拣的建议。除了建议是否自动化分拣系统方面提出的结果之外,还提供了一个分析模型,以确定手动系统的最佳批次订单,给出一组下限和上限进行拣选和包装。这种模型可用于评估新技术,管理方案和工人生产率对配送中心配料水平的影响。

题^[51,52]。

Laih^[53]探讨了同步区手动订单拣选系统，所有区域同时处理相同的订单。以平衡所有拣货员之间的工作量为目标，从而提高订单拣选系统的利用率，并减少履行每个请求订单所需的时间。首先使用客户订单对任何两个项目进行相似性测量，以便以相同的顺序测量两个项目的共同外观。通过这种相似性测量，构建了一个自然聚类模型，它是一个充分研究的 NP-硬均匀聚类模型的松弛。然后提出启发式算法来解决用于将所有项目定位到不同区域的模型。最后，经验数据和模拟实验验证了项目集群模型的目标。

Chen^[54]使用数据挖掘技术构建配送中心订单批次的问题。在选择大量订单之前，有效地将订单分组到批次中可以加速产品在存储区域内的移动。订单批处理程序必须在 WMS 中实施，并且可以每天多次在线运行。文献提出了许多批量启发法，以尽量减少旅行距离或旅行时间。并且介绍了具有并行通道布局的配送中心订单批处理问题的聚类过程。采用关联规则挖掘的数据挖掘技术开发订单聚类方法。Hsieh^[55]设计了一种自发建图订单批量启发式 (SOMB) 方法。它应用自组织映射的概念将具有较高相关性的订单聚类为批次，以减少总订单拣选距离。订单中的货物数量和订单批次涵盖的相同过道数量是关键决策因素。订单中货物增加会影响 SOMB 的最佳权重；执行仿真实验以验证 SOMB 启发式可以减少订单拣选距离并提高拣选车辆的利用率。

2.2.2 自动分拣研究

目前可用的一些技术选项包括大规模自动存储/检索系统 (AS/RS)，微型堆垛机和自动转盘，动力输送机和自动导引车系统 (AGVS)，包装的自动分拣，拣货单生成软件，和条形码。由于这些现代技术系统必须以综合方式安装（在大量资本投入之后），因此增量调整变得困难^[18,24,32,56]。

自动分拣系统，虽然前期成本投入高，随着自动分拣相关研究的深入。自动分拣的模型也多样化，分拣效率和分拣准确性都有一定的提升。自动分拣模型一般分为拣货库存区、分货传送带区、发货区。拣货库存区一般用 AGV，堆垛机等搬运工具，分货传送带区一般针对批量拣货的模型，发货区是将同一订单的货物放入纸箱中，在用传送带运往物流车内。

目前我们可以将自动分拣方法分成两类：“一次分拣”和“二次分拣”。一次分拣为，拣货和分货同时运行，每个选择器负责选择完整的客户订单，并且他可能必须遍历整个仓库以寻找包含该订单的物品。二次分拣为，拣货和分货分开运行，有两种典型的类型：其一为多个订单在同一批次中，其二为不同区域分别同时挑选多个订单再集中分货。

(1)一次分拣

A 字型分拣是小型物品批量分拣的常用设备，它广泛应用于烟草与药品等场景中，如图 2-5 所示。它上方的 A 型为物品贮存口，下方为传送带。当接收到订单时，订单中相应的物品会滑至传送带中，再运输到打包箱。A 型分拣模型具有分拣速度快，相对自动分拣设备成本低等优点，但是它贮存口数量固定，物品品种扩展性低，并且补货难等缺点^[57-59]。

Scholz^[5]设计基于多个可自动摘货无人车的自动分拣系统，并在具有宽通道的仓库中假设允许无人车相互超越，将订单进行分批处理，并解决分配和排序以及拣货路线等问题。他进一步分析在狭窄通道仓库中出现的拣选拦截。其一，当两个无人车向相反方向移动时，可能会阻挡子通道；其二，当几个无人车必须同时访问同一存储位置时可能发生的交通拥堵。

Caputo^[12]设计了开发决策支持系统（DSS）并改进管理规则，能在智能仓储运行基于分配器的单件式自动拣选系统（AOPS）。他利用了模拟分析随机需求，设置参数和 AOPS 性能之间的关系，主要解决了两个方面：其一，它能够自动定义要分配到机器上的项目集，选择分配给每个项目的存储位置数量，并设置每个项目的重新订购级别和最大拣配数量，从而大大简化了物流经理的任务；其二，利用该 DSS 可以保持高水平的拣选自动化效率，同时大幅削减所需的支持人员，从而显著提高大批量高转速配送中心的利润率。

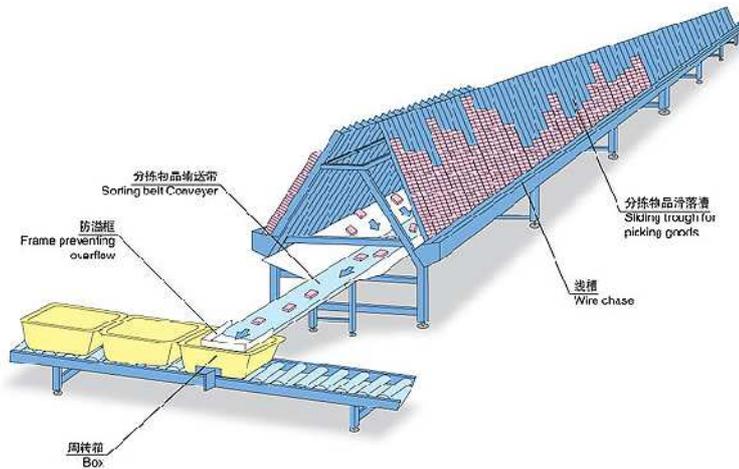


图2-5 A字型分拣模型图

Figure 2-5. A-shaped sorting model diagram

Lee^[60]采用了自动化的转盘式传送带，它可以存储/检索中小型物品。该系统用于以动态方式处理来自客户的一系列订单。每个订单包括一个或多个货物，并从转盘库存或箱子中进行挑选。系统的难点在于在最小化总订单处理或相关的拣选成本前提下，确定订单与每个订单内的项目之间的序列之间的顺序。这种多阶选择问

题被公式化为 0-1 整数规划模型，类似于众所周知的多 TSP 旅行包路径问题。

Byung-InKim 和 Sheragu^[61]为了更有效地使用龙门机器人，考虑灵活的下降缓冲器分配，并针对新的操作条件修改所提出的算法。解决了自动化仓库中的订单拣选顺序问题，其中订单拣货员的路径是固定的，布局的长度明显长于宽度，并且拣货员在给定时间只能容纳一个项目。问题是找到具有给定垂直路径的最佳序列，因此它是一种特殊类型的 TSP 旅行商问题。为此问题开发了一种简单的基于排序的启发式算法和一种基于聚类的有效算法。

Ratliff 和 Rosenthal^[62]研究了最小化矩形仓库中给定拣选之旅总长度的拣选停靠顺序，无人车在停车和启动车辆的时间和增加的步行距离之间进行权衡。他们的算法用于确定停靠点的最佳数量和位置，以及指定每个停靠点处要采集的项目。

(2) 二次分拣

常见的二次分拣模型为自动存储/检索系统 (AS/RS)，轮盘和集中分离系统。自动存储/检索系统 (AS/RS) 模型，如图 2-6 所示。AS/RS 由一个或多个平行通道组成，每个通道旁边有两个高架托盘架。在过道内行进存储/检索 (S/R) 机器或自动堆垛机。S/R 机器在安装在地板和天花板上的导轨上行进。在典型配置中，S/R 机器可以同时携带至多一个托盘。用于存储的托盘到达输入站并在蓄能器输送机处等待，直到 S/R 机器将它们运送到机架中的存储位置。因此，存储根据先来先服务 (FCFS) 例程执行。S/R 机器在输出站存放检索到的负载，之后运输系统将它们路由到它们的目的地。S/R 机器有三个独立的驱动器，用于水平，垂直和往复运动。由于独立的水平和垂直行程，S/R 机器的行程时间是通过隔离的水平 and 垂直行程时间的最大值来测量的。在许多应用中，S/R 机器仅限于一个通道。我们可以通过在连接过道的轨道中提供曲线来实现 S/R 机器在过道之间的移动。为了保持巨型建筑的稳定性，起重机必须承担曲线中的蠕动速度。使 S/R 机器进入多个通道的另一种可能性是使用在过道之间传送 S/R 机器的穿梭装置^[21]。

AS/RS 的操作步骤：当仓库接收到订单时，堆垛机从高架立体仓库中取出订单中的货物，然后放到出库口，无人车 (AGV) 到出库口拿取货物到分拣传送带中，分拣传送带进行二次分拣放入打包箱中。Manzini^[66]采用了货物-选择器存储系统的多参数动态模型，该系统具有基于类的产品存储分配。为了测量替代设计和操作配置对预期系统性能的影响以及确定影响系统响应的最关键因素和因素组合，模拟了数以千计的假设情景。基于类的存储被证明是减少拣选周期时间和最大化系统吞吐量的非常有效的方法。

Foley^[64]计算 AS/RS 模型下最小通道数，给出了挑选时间分布以及所需的系统吞吐量和存储容量，作为存储机架尺寸，主机器速度和拾取器速度的函数。另外，他还确定存储/检索机器的行程时间的分配函数，该存储/检索机器存储一个容器并

在返回到 I/O 点之前检索另一个容器 (“双命令循环”)。

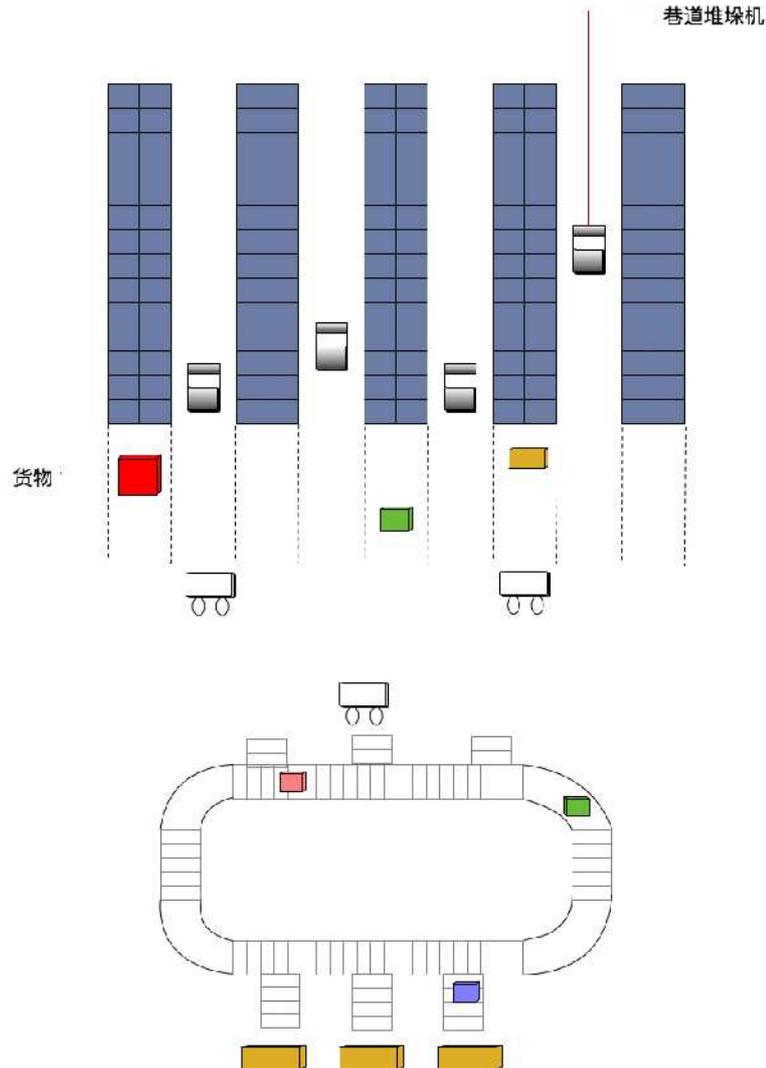


图2-6 AS/RS自动分拣模型图

Figure 2-6. AS/RS automatic sorting model diagram

轮盘是一种计算机控制的仓储系统，用于存储和订购中小型产品。旋转传送带可以容纳许多存储在箱子或抽屉中的不同产品，这些产品围绕闭环旋转。订单拣货员占据转盘前部的固定位置。根据要求，转盘自动将带有所请求货物的容器旋转到订单拣货员的位置。订单拣货员可以有效地利用转盘的旋转时间进行诸如分类，包装和标记检索货物的活动。在某些情况下，订单拣货员并行提供两到四个转盘。这种配置的优点为：当订单拣货员从一个转盘中提取物品时，其他转盘正在旋转。这减少了订单拣货员的等待时间。旋转机架是水平旋转传送带的更昂贵版本，具有每个存储级别可独立旋转的额外功能，从而显著减少了订单选择器的等待时间^[65]。

集中分离系统，如图 2-7 所示。拣货员或无人车进行波次或批量取货，然后放

入传送带中进行二次分拣，待订单里的货物全部到达时，打包订单。

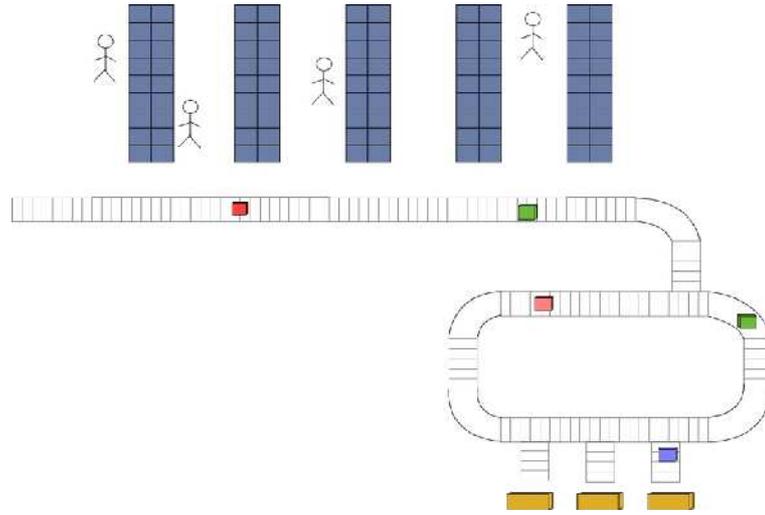


图2-7 集中分离系统模型图

Figure 2-7. Centralized separation system model diagram

Elsayed^[66]介绍了四种用于处理自动仓储系统订单的启发式算法。假设订单将通过使用自动存储和检索机器（SIR 机器）来处理，以最小化检索机器（SIR 机器）在仓库系统内行进的总距离为目标来处理批量订单。

Johnson^[67]开发了一个用于自动配送中心的订单分拣系统的分析模型。在这个系统中，首先将订单进行分批，同批次的订单组被输送到再循环输送机，同批次的订单组在传送带上以单个订单的形式进行分离并打包，再通过运输通道将打包好的订单装载到等待的卡车上。他设计了一个分类模型，其中包含了这些系统的随机元素，还能固定优先级方案和下一个可用规则。固定优先级方案包括诸如“首先对最大（或最小）订单进行排序”这样的规则。他证明，在几乎没有车道阻塞的系统中，将下一个可用订单分配给发货车道的规则在排序时间和系统吞吐量方面将优于任何固定优先级方案，而在具有显著车道阻塞的系统中，排序规则明显优于固定优先级方案。

Meller^[68]采用了一个两级订单积累/分拣系统，并开发了一种算法，根据物品到达分拣系统的顺序，优化地将订单分配给车道。通过使用该算法，他明显地缩短了基于对完整订单拣货波进行分拣的时间。

其他二次分拣的常用方式有：Mcaree^[69]在本文中，开发了两种混合整数规划模型，即聚合箱分配模型（ABAM）和聚合机架分配模型（ARAM），并分析联邦快递公司可能的大型包装分拣设施设计。Armstrong, Cook 和 Saip^[70]提供了选择列表生成问题的有效混合整数规划公式。他们假定给定的批量大小，并且可以从多个区域中检索某些项目。

Wilhelm^[71]提出随机流动模型，解决即时生产和减少在制品库存等问题。他介绍了小批量装配系统中元件积累的概念模型和描述元件库存的套件周长，套件延迟和过程时间的数学模型，并通过灵敏度分析来促进对累积过程的理解，分析累积时间与重要参数（例如累积中所需的组分数目）之间的关系，从而更好的解决二次分拣中拣货和分货时间衔接的问题。

2.3 大批量订单非整体分拣研究现状

非整体分拣比较常规的模型就是基于 Kiva 拣选系统^[56,72]移动货架拣选方式，见图 2-8。该系统可以分为货物储存区，分拣打包区，出库区。该系统的分拣步骤为：仓库接收订单，多个无人车运行到订单中货物所在货架，托起货架往分拣台运输，分拣员挑选出该货架中订单内的货物进行打包。

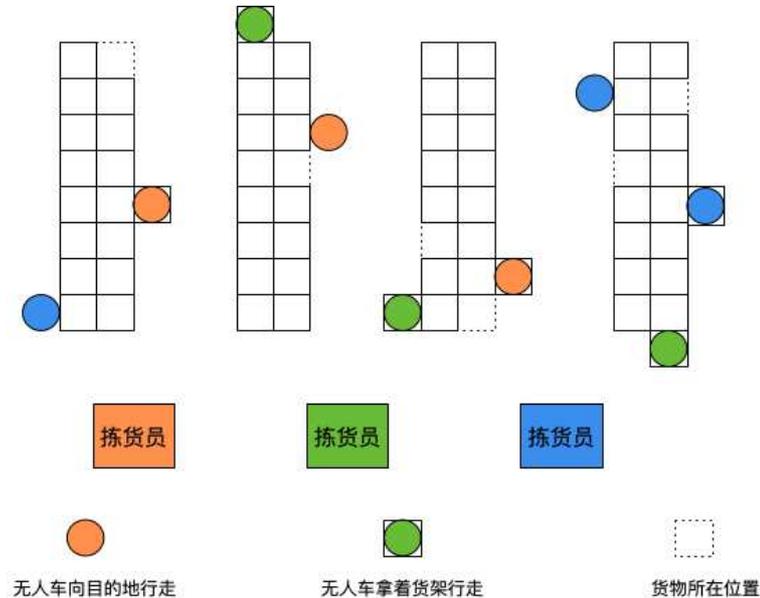


图2-8 RMFS自动分拣模型图

Figure 2-8. RMFS automatic sorting model diagram

Yuan^[3]在这个模型下，研究了一种机器人移动履行系统（RMFS），建立了具有单服务开放排队网络的专用机器人模型和用于 RMFS 的具有多服务开放排队网络的混合机器人模型。计算仓库机器人的最佳数量和速度，以便在总吞吐量时间方面实现有效的仓储操作。

该方法的优点为提高订单拣选准确性和操作灵活性。但是当大批量订单同时到达仓库时，订单内的全部货物很小概率在同一货架中，拣货台会存在排队现象，为了让拣货有序的进行，不得不将同一订单拆分为几个子订单，这样不仅成倍的增加后续物流包裹的数量，极大的增加了成本。

2.4 本章小结

本章主要涉及的两个研究问题——仓储布局和大批量整体分拣问题进行文献综述，研究人员从不同的仓储布局中提出相应的解决策略，从而提高订单分拣的效率。目前大部分的研究都从批量分拣入手，再进行二次分拣，这样会让拣货员/拣货器重复操作从而增加了工作量。而非整体分拣并不是以批量分拣入手，它在实现高效一次分拣的过程中由于排队失去了订单的整体性。同时指出了当前研究中存在的问题，并由此确立了本文的研究方向。

第三章 大批量订单整体分拣问题的模型化

考虑某一封闭仓库区域 \mathcal{H} 内使用无人车进行货物运送的订单分拣系统。该系统具有如下特点：1.在任一时刻有大量的订单待处理；2.所有订单需将其包含的所有货物全部分拣出来并整体打包，不允许进行分拆。本节对这一订单整体分拣问题模型化。首先描述订单系统在任一固定时刻 t 的静态状态，然后刻画订单系统在时间 $[t, t+1)$ 内的动态演化过程，最后给出问题的明确定义。

3.1 订单分拣系统在 t 时刻的静态状态描述

首先对所考虑订单分拣系统在 t 时刻的静态状态给出符号化描述，这包含了货物和货架的状态，待处理订单情况和无人车的状态几个方面。

▪ **货物和货架** 设该仓储区域内中有 N_s 个货架，记第 i 个货架为 S_i ，设货物种类总数为 N_g ，每一货物以其标识号 g 唯一识别，并均存放于某一货架 S_g 上。记标号为 g 的货物为 G_g ，则 G_g 可表示为

$$G_g := \{g, S_g, I_g\} \quad (3-1a)$$

其中 I_g 为货物 G_g 在当前时刻的处理状态，定义如下

$$I_g := \begin{cases} 1 & \text{货物已分拣} \\ 0 & \text{货物在分拣中} \\ -1 & \text{货物尚未分拣} \end{cases} \quad (3-1b)$$

注意其中 $I_g=0$ ，即“货物在分拣中”的含义是该货物已经交由某无人车运送处理，但尚未取回。

▪ **待处理订单** 每一个订单包含其唯一的订单标识 o ，该订单进行整体分拣处理的打包点 p_o ，订单到达订单分拣系统的时刻 t_o ，和它所包含的所有货物。记该订单为 O_o ，则

$$O_o := \{o, p_o, t_o; G_g \mid g \in \mathbb{I}_o^g\} \quad (3-2a)$$

其中 \mathbb{I}_o^g 为订单 O_o 中所有货物的标识号集合。

记 $\mathbb{I}_o(t)$ 为 t 时刻所有待处理订单的标识号集合，其个数记为 $N_o(t) = |\mathbb{I}_o(t)|$ 。则 t 时刻待处理订单的集合可写为

$$\Theta(t) := \{O_o \mid o \in \mathbb{I}_o(t)\} \quad (3-2b)$$

▪ **无人车** 设该仓库区域内有 N_v 辆无人车用于货物运送。记第 i 辆无人车为 V_i 。所有无人车的集合记为 \mathbb{V} ，即

$$\mathbb{V} := \{V_i | i=1, \dots, N_v\} \quad (3-3a)$$

无人车接受货物运送的指令，从相应货架取得货物，并将之运送到目的地。在时刻 t 的无人车状态由其当前位置和运动情况，承担货物运输情况等信息描述。记无人车 V_i 在 t 时刻的状态为 $V_i(t)$ ，则

$$V_i(t) := \{l_i(t), v_i(t), a_i(t), o_i^v(t), g_i^v(t)\} \quad (3-3b)$$

其中 $l_i(t)$ ， $v_i(t)$ 和 $a_i(t)$ 分别为无人车 V_i 的位置，速度和加速度。在笛卡尔坐标系下（假设已经建有原点和 x ， y 轴），我们有

$$l_i(t) = [l_i^x(t), l_i^y(t)] \quad (3-3c)$$

$$v_i(t) = [v_i^x(t), v_i^y(t)] \quad (3-3d)$$

$$a_i(t) = [a_i^x(t), a_i^y(t)] \quad (3-3e)$$

其中上标 x 和 y 分别表示相应向量在 x 轴和 y 轴的分量。

$o_i^v(t)$ 和 $g_i^v(t)$ 是无人车 V_i 运送的货物的所属订单标识号和货物标识号。若当前无人车为空闲状态，则标记其 $o_i^v = g_i^v = 0$ 。注意货物所在货架和运送目的地可分别由(3-1a)和(3-1b)得到。

由上面的定义， t 时刻空闲的无人车的集合 $\mathbb{V}_i(t)$ 可计算如下

$$\mathbb{V}_i(t) = \{V_i | o_i^v(t) = g_i^v(t) = 0, i=1, \dots, N_v\} \quad (3-3f)$$

从而，正在执行某项任务的无人车集合 $\mathbb{V}_o(t)$ 可计算如下

$$\mathbb{V}_o(t) = \{V_i | o_i^v(t) \neq 0, g_i^v(t) \neq 0, i=1, \dots, N_v\} \quad (3-3g)$$

易知在 t 时刻订单分拣系统的静态状态可由式(3-2b)中的待处理订单集合 $\Theta(t)$ 和式(3-3b)中的所有无人车的状态 $V_i(t), i=1, \dots, N_v$ 完全描述。

3.2 订单分拣系统在 $[t, t+1)$ 时间间隔内的动态演化

本节定量描述订单分拣系统在 $[t, t+1)$ 时间间隔内的动态演化。这包含了新订单的产生过程，订单的处理过程和无人车的运动几个部分。注意， $[t, t+1)$ 时间间隔的大小主要由无人车的运动情况确定：在该时间间隔内，无人车的运动不会过大而影响算法设计，具体数值需由具体应用确定。

▪ **新订单的产生** 考虑大型电商订单的复杂性，我们有理由假定订单的到来是随机的。类似情形的随机分布一般建模为指数分布。指数分布假设在很小的时间间隔 Δt 内一个新订单到来的概率是 $\lambda \Delta t$ ，其中 λ 是指数分布的强度，即

$$Pr\{\text{一个新订单在 } [t, t + \Delta t) \text{ 到达}\} = \lambda \quad (3-4a)$$

由上式, $[t, t+1)$ 时间间隔内新到订单数的期望为 $\lambda / \Delta t$ 。

按(3-2a)式, 新到的订单可记为

$$O_N = \{o_N, p_N, t, G_g \mid g \in \mathbb{I}_{o_N}^g\} \quad (3-4b)$$

新订单 O_N 中的货物假设为随机从所有货物集合中取出。这一“随机性”由两个过程构成。即, 首先从 N_g 种不同货物种类中随机选择订单 O_N 中的货物种类多少, 即 $\mathbb{I}_{o_N}^g$ 中元素的个数, 记为 $|\mathbb{I}_{o_N}^g|$, 然后再就每一个货物种类确定其具体货物标识号。以上过程写为

$$Pr\{|\mathbb{I}_{o_N}^g| = i\} = \kappa_i, i = 1, \dots, N_s \quad (3-4c)$$

$$Pr\{S_g = S_j\} = \eta_j, j \in \mathbb{I}_{o_N}^g \quad (3-4d)$$

在具体的订单系统中, 可通过调节上述概率 κ_i 和 η_j 描述订单包含货物的数量变化和货物在货架的摆放情况等。

同时也注意, 上述新订单产生过程是对真实订单分拣系统的模拟, 是为了在数学模型中对该过程进行描述, 有利于后续订单分拣方法的设计。而在实际的订单分拣系统运行中并不需要上述模拟过程, 新订单是系统实际产生的。

▪ **订单的处理** 在 $[t, t+1)$ 时间内, 待处理订单中的货物 G_g 若被订单分拣系统处理, 则其状态会相应发生变化。将货物的状态变化标记为 ΔI_g , 令

$$\Delta I_g = \begin{cases} 1 & \text{在 } [t, t+1) \text{ 内 } I_g \text{ 有变化} \\ 0 & \text{在 } [t, t+1) \text{ 内 } I_g \text{ 无变化} \end{cases} \quad (3-5a)$$

注意我们选择的时间间隔足够小, 保证了在每一步货物的三种状态最多只能发生一步变化。因此

$$I_g(t+1) = I_g(t) + \Delta I_g \quad (3-5b)$$

令 c_o 为订单 O_o 中所有货物的处理状态的最小值, 即

$$c_o := \min_{I_g \in G_g \in O_o} I_g \quad (3-5c)$$

注意到订单 O_o 仍待处理的充要条件是该订单中仍有货物未分拣完, 即

$$O_o \text{ 处理状态: } \begin{cases} \text{若 } c_o = 1 & \text{则订单已处理完} \\ \text{若 } c_o < 1 & \text{则订单未处理完} \end{cases} \quad (3-5d)$$

注意 $c_o < 1$ 包含了 $c_o = 0$ 和 $c_o = -1$ 两种可能。若 $c_o = 0$, 则 O_o 内所有货物都已经安排分拣, 但尚有货物还未分拣完成; 若 $c_o = -1$, 则 O_o 内尚有货物未安排分拣。不管是哪种情况, 订单 O_o 都尚未完成分拣。

由此, 在 $[t, t+1)$ 时间内处理完的订单集合为

$$\Theta_c(t+1) = \{O_o \in \Theta(t) | c_o(t+1) = 1\} \quad (3-5e)$$

从而， $t+1$ 时刻的待处理订单集合可由下式计算，

$$\Theta(t+1) = \begin{cases} \Theta(t) \cup \{O_N\} \setminus \Theta_c(t+1) & \text{有新订单产生} \\ \Theta(t) \setminus \Theta_c(t+1) & \text{无新订单产生} \end{cases} \quad (3-5f)$$

其中符号“ \setminus ”表示集合的差集。

▪ **无人车的运动** 无人车 V_i 在 $[t, t+1)$ 内的运动取决于无人车的初始位置 $l_i(t)$ ，初速度 $v_i(t)$ 和此时间间隔内的加速度 $a_i(t)$ 。由于 $[t, t+1)$ 很小，可假设在此时间内加速度为常值，即在 $[t, t+1)$ 内，

$$a_i(t) = a_i^t \quad (3-6a)$$

其中 a_i^t 为某一常值。

由(3-3b)，无人车在 $t+1$ 时刻的状态可写作

$$V_i(t+1) = \{l_i(t+1), v_i(t+1), a_i(t+1), V_i^o(t+1), V_i^g(t+1)\} \quad (3-6b)$$

其中 $a_i(t+1)$ 在 $t+1$ 时刻由算法确定，且

$$l_i(t+1) = l_i(t) + v_i(t) + \frac{1}{2} a_i^t \quad (3-6c)$$

$$v_i(t+1) = v_i(t) + a_i^t \quad (3-6d)$$

若无人车 V_i 在 $[t, t+1)$ 内有货物运送状态改变， $g_i^v(t+1)$ 需按实际情况改变，

$$g_i^v(t+1) = \begin{cases} g' & g_i^v(t) = 0 \text{ 且有新货物 } g' \text{ 运送} \\ 0 & g_i^v(t) = 1 \text{ 且货物 } g \text{ 运送完成} \end{cases} \quad (3-6e)$$

$o_i^v(t+1)$ 可类似得到，不再赘述。

3.3 大批量订单整体分拣问题

综合 3.1 和 3.2 两小节给出了订单分拣系统运行的基本描述。我们希望设计算法尽可能提升系统的运行效率。在此之前，需要给出“算法”及其限制条件和“运行效率”的定量描述。

▪ **算法的定义** 所设计的算法应处理两方面的工作。一方面是将待处理订单中的货物分配给无人车进行分拣和运送，另一方面是协调指挥无人车的运动。

注意到 t 时刻所有尚需分配无人车进行分拣和运送的货物的集合为

$$\mathbb{G}_g(t) = \{G_g | G_g \in O_o \in \Theta(t), I_g(t) = -1\} \quad (3-7a)$$

首先，算法要将 $\mathbb{G}_g(t)$ 中的货物分配给空闲无人车 $V_i(t)$ 进行运输，即设计如下函数

$$f_{gv} : \mathbb{G}_g(t) \rightarrow \mathbb{V}_I(t) \quad (3-7b)$$

注意这里我们假设函数 f_{gv} 与时刻 t 无关。这是因为，上述映射的确定应仅决定于当前的待处理货物集合 $\mathbb{G}_g(t)$ 和空闲无人车集合 $\mathbb{V}_I(t)$ ，而与时刻 t 无显式的依赖关系。

另一方面，算法也需要给出每一辆无人车在 $[t, t+1)$ 内的运行规则。在已知 t 时刻无人车 V_i 的动力学状态前提下(即 $l_i(t)$ 和 $v_i(t)$)，等价于给出在此时间内每一辆运行中无人车的加速度 $a_i(t), V_i \in \mathbb{V}_o(t)$ 。

从而，所设计的算法具有如下形式

$$\mathcal{A}(t) := \{f_{gv}, a_i^t, V_i \in \mathbb{V}_o(t)\} \quad (3-7c)$$

▪ **限制条件** 在我们的问题中，限制条件主要指无人车的物理性质和其动力学而言。

显而易见，无人车所运行的范围，速度和加速度都有其限制，总结如下：

$$\forall t, \forall i = 1, \dots, N_v \begin{cases} l_i(t) \in \mathcal{H} \\ 0 \leq v_i(t) \leq v_{\max} \\ 0 \leq a_i(t) \leq a_{\max} \end{cases} \quad (3-8a)$$

这里 v_{\max} 和 a_{\max} 分别是无人车的速度和加速度上界。本文假定所有无人车都有相同的动力学特性，因此 v_{\max} 和 a_{\max} 对所有无人车都相同。这在大多数实际系统中都是成立的。

无人车在运行过程中不可相互碰撞。定义两辆无人车 V_i, V_j 间的欧氏距离为

$$d_{ij}^v(t) = d(V_i(t), V_j(t)) \quad (3-8b)$$

$$d_{ij}^v(t) = \sqrt{(l_i^x(t) - l_j^x(t))^2 + (l_i^y(t) - l_j^y(t))^2} \quad (3-8c)$$

其中 $d(\cdot, \cdot)$ 表示两点之间的欧氏距离。

任意两辆无人车的距离都不可超过某一事先预定的距离 d_v ，即

$$d_{ij}^v(t) > d_v, \forall t, \forall i, j = 1, \dots, N_v \quad (3-8d)$$

注意到，由于订单是大批量的，意味着 $\mathbb{G}_g(t)$ 中含有的货物量很大，同时也意味着无人车的数量 N_v 也较大。从而，如何设计函数 $f_{gv}(t)$ 就并不简单；进一步的，在有限的空间内如何调度所有无人车尽量高速运行而不碰撞也变得异常复杂。

▪ **分拣效率的定义** 订单分拣系统的运行效率可由在统计时域 $[t, t+N_s)$ 内处理订单或货物的多少来衡量，其中 N_s 为某正整数，其值的大小表示了统计时域的大小。注意到使用货物或订单的完成量描述分拣效率并不等价，后者更多的与分拣的整

体性相关。因此，本文使用在该统计时域内订单分拣系统所完成的订单分拣数量来衡量分拣效率 $J_{N_i}(t)$ ，注意到(3-5e)的定义，我们有

$$J_{N_i}(t) := \sum_{\tau=t}^{t+N_i-1} |\Theta_C(t+1)| \quad (3-9)$$

综上所述，大批量订单整体分拣问题定义如下。

问题 1 (大批量订单整体分拣) 给定封闭仓库区域 \mathcal{H} ，(3-1)中定义的摆放在于 N_s 个货架上的 N_g 种货物，(3-3)中定义的无人车集合 \mathbb{V} 及其状态和(3-6)描述的无人车运动方式，(3-4)中描述的新订单产生方式和(3-5)中描述的订单处理过程。在限制条件(3-8)下，设计(3-7c)中定义的算法 $\mathcal{A}(t)$ 以优化在(3-9)中定义分拣效率 $J_{N_i}(t)$ 。

3.4 本章小结

本章通过对订单分拣系统的静态状态和动态演化进行数学刻画，建立了大批量订单整体分拣的一般模型，弥补了目前研究大批量订单整体分拣数学模型的空缺。为了尽可能的提升整体分拣效率，还对订单分拣算法、系统限制条件和分拣效率等进行严格定义和区分，并给出了大批量订单整体分拣问题的明确定义。

第四章 大批量订单整体分拣的一种分布式并行分拣方法

面向第三章定义的大批量订单整体分拣问题，本章提出一种基于智能货架的分布式并行解决方法。首先描述该方法的基本思路和硬件要求并阐述一个订单的分拣流程及其优势，进而给出了针对分布式并行整体分拣的模型化描述，并且分别解决了待处理订单中货物分配给无人车进行配送和协调指挥无人车的运动两个技术难点，最后给出详细的算法描述。

4.1 分布式并行整体分拣策略及硬件要求

注意到大多数现有整体分拣系统的效率瓶颈在于打包处的稀缺性，本文提出如图 4-1 所示的一种新型大批量订单的分布式并行整体分拣模型。该模型的核心要点是允许所有的货架都作为潜在的订单打包处，从而使得订单的打包成为分布式并行的。

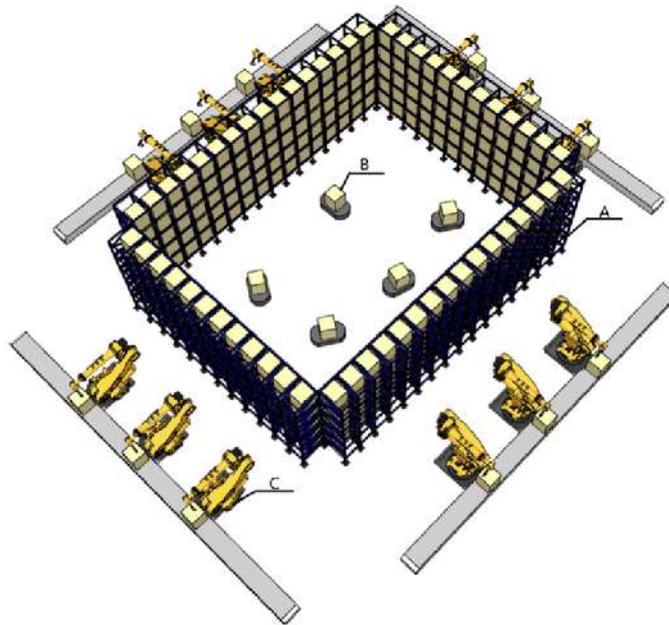


图4-1 分布式并行分拣模型示意图

Figure 4-1. Schematic diagram of distributed parallel sorting model

在该模型中，将所有 N_s 个货架首尾相连，其封闭的内部区域作为无人车的运行区域，即 \mathcal{H} 。要求任意两个货架在 \mathcal{H} 内直线可达，无人车在货架内侧取货，并沿直线运送至目的货架。

该模型对现有订单分线系统的硬件改造主要涉及货架，即原有单纯陈列货物的货架，现其内侧陈列货物，并可相应货物交付无人车（实现方式可为推取式或机械手^[73]等），外侧则改造为订单的打包处。可接收分配的订单。利用无人车从其他涉及的货架上分拣货物，并在订单的所有货物到齐后打包送出。所使用的无人车可以是较为简单的，只需要具有无线通信和运输能力，并能在货架配合下取卸货物即可。

采用该分布式并行分拣模型的分拣流程如下所述：新订单到达后被分配至某一货架打包处处理，利用无人车将订单的所有货物从相关货架中取出并运至该打包货架，待所有货物齐备后完成订单打包任务交给外部物流系统。

一个特定订单的分拣流程工作如下：

订单到达分拣系统，中央控制器分配订单到某一货架处理（需考虑订单中所含货物在哪个货架较多，和当前货架是否空闲等），在订单所在货架上的货物直接取下，在其他货架上的货物则交给无人车运输到订单所在货架，待所有货物到齐，打包并送出。

该模型的主要优势为：所有的货架都能作为订单的打包口，同时可以处理多个订单，但是也存在一些可扩展的问题，当物品种类足够多时，货架圈就会越围越大，仓库成本也相应增多，无人车所行走的路程就会变大，即使速度变快路程变长也无法提高效率。解决这类问题的方法为：同一个货架能放入多种物品，库存类似于贩卖机一样叠在后侧，再将频率高的物品放在一起。

4.2 分布式并行整体分拣的模型化描述

本章把在第三章中提出的通用模型针对所提出的分布式并行策略进行具体化。该策略对一般模型描述的订单和无人车均有影响，详述如下。

▪ **分布式并行整体分拣下的订单及其预处理** 首先，在分布式并行策略下，订单的打包点是某一货架，因此(3-2a)中对订单的一般静态定义转化为

$$O'_o := \{o, S_o, t_o; G_g \mid g \in \mathbb{I}_o^g\} \quad (4-1a)$$

其次，在分布式并行整体分拣下，每一个货架都可以独立接受订单的到来，这意味着(3-4)中新订单产生的描述应理解为对每一个货架适用。从而,(3-4a)中的新订单产生过程变为

$$Pr\{\text{一个新订单在}[t, t + \Delta t)\text{到达货架}S_k\} = \lambda_k \quad (4-1b)$$

(3-4c)可相应定义。

再次，与(3-4b)中的一般性表述不同，新到来的订单都自动分配至某一货架作为打包点，这就引发了一个自然的预处理过程，即所有已经在该货架上的货物都应

该直接可以用来打包，无需再使用无人车运送。也就是说，在分布式并行整体打包框架下，所有 $[t, t+1)$ 新到来订单都要进行预处理以得到如下新的订单形式

$$O'_N = \{o_N, S_{o_N}, t; G_g \mid g \in \mathbb{I}_{o_N}^g \setminus \mathbb{I}_{o_N}^{g'}\} \quad (4-1c)$$

其中 $\mathbb{I}_{o_N}^{g'} := \{g' : G_{g'} \in O_N, S_{g'} = S_{o_N}\}$ 是新来的订单 O'_N 中存放于该订单打包的货架 S_{o_N} 上的货物的集合。

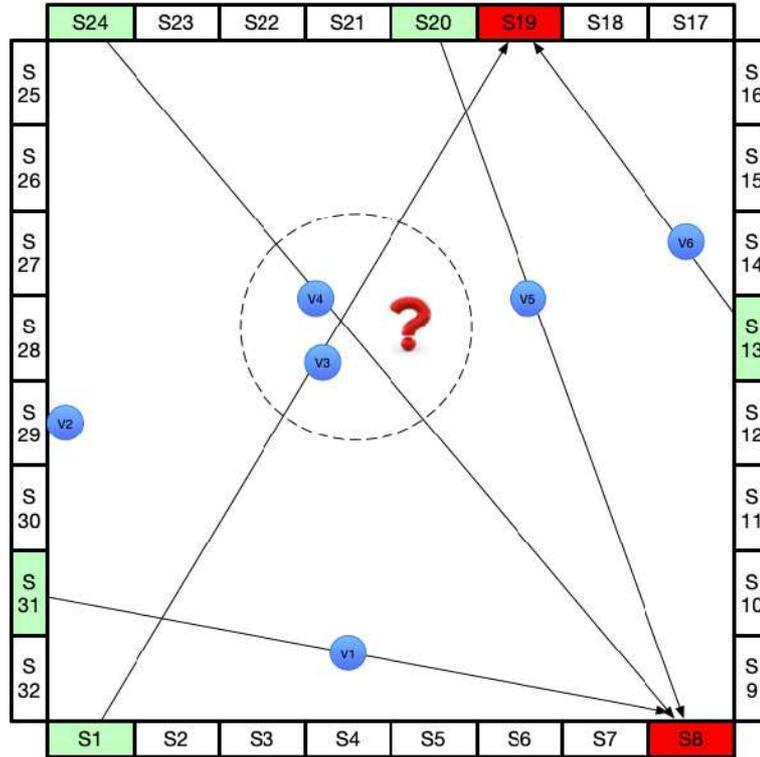


图4-2 分布式并行分拣方法的模型化示意图

Figure 4-2. Modeling schematic diagram of distributed parallel sorting method

▪ 分布式并行整体分拣下的无人车 首先，在分布式并行整体分拣框架下，运行中的无人车在 t 时刻的位置与一般描述并无不同，但 t 时刻空闲的无人车 $V_i \in \mathbb{V}_i(t)$ 的位置 $l_i(t)$ 却一定与某一货架相同。在系统运行之后，这一货架即为该无人车上次执行货物运送时所运送货物所属订单的打包点，即

$$l_i(t) = \begin{cases} S_i^0 & \text{若 } \max_{\tau < t} o_i^v(\tau) = 0 \\ S_{o_i^v(t')} & \text{若 } \max_{\tau < t} o_i^v(\tau) > 0 \end{cases} \quad (4-2a)$$

其中 S_i^0 为无人车 V_i 在系统尚未运行时的初始位置(也为某一货架)， $t' = \max_{\tau \leq t, o_i^v(\tau) > 0} \tau$ 是无人车 V_i 在 t 时刻之前最后将某一货物运送到某货架打包并进而空闲的时刻。

其次，在分布式并行策略的货架摆放下，无人车的运行轨迹可以尽可能的靠近从货物摆放货架到目的打包货架的直线。事实上，为了简化问题，我们假定任意无人车的运行轨迹一定是上述直线，而不允许有所偏离。容易想到，这样的处理是对系统的整体运行效率有益的。在此假设下，任一无人车的速度方向与加速度方向应保持一致。从而， $\forall i=1, \dots, N_v, \forall t$ ，若无人车 V_i 在 t 时刻的速度和加速度都至少在某一方向分量不为 0，即 $\max\{\mathbf{v}_i^x(t), \mathbf{v}_i^y(t)\} > 0$ 且 $\max\{\mathbf{a}_i^x(t), \mathbf{a}_i^y(t)\} > 0$ ，则不为 0 的方向对速度和加速度是一致的(不失一般性的设为 x 方向)，且

$$\frac{\mathbf{v}_i^y(t)}{\mathbf{v}_i^x(t)} = \frac{\mathbf{a}_i^y(t)}{\mathbf{a}_i^x(t)} \quad (4-2b)$$

按照(4-1a)，待处理订单 O'_o 的打包处在货架 S_o 上。设其中某货物的存放货架为 S_g ，则无人车需要在货架 S_o 和 S_g 之间往返一次。设 S_o 和 S_g 货架在选定的笛卡尔坐标系下的坐标分别为

$$S_o = [x_o, y_o], S_g = [x_g, y_g] \quad (4-2c)$$

因为 S_o 和 S_g 为不同货架，则 $x_g - x_o$ 和 $y_g - y_o$ 至少有一个不为零。若，记货架 S_o 和 S_g 之间连线与 x 轴的夹角为 θ_{og} ，则

$$\theta_{og} = \arctan \frac{y_g - y_o}{x_g - x_o} \quad (4-2d)$$

进而，如果 $x_g - x_o = 0$ 且 $y_g - y_o \neq 0$ ，则显然若 $y_g - y_o > 0$ 则 $\theta_{og} = 0$ ，若 $y_g - y_o < 0$ 则 $\theta_{og} = \pi$ 。

由于 $\mathbf{v}_i(t)$ 和 $\mathbf{a}_i(t)$ 方向相同(或相反)，无人车在任一时刻从打包货架到目的货架(未达到目的地前)的行进距离为

$$l_v^{og} = \sum_{\tau=0}^t (\mathbf{v}_i(\tau) + \frac{1}{2} \mathbf{a}_i^\tau) \quad (4-2e)$$

从而，在 t 时刻无人车 V_i 的坐标为

$$l_i^x(t) = x_o + l_v^{og} \cos \theta_{og} \quad (4-2f)$$

$$l_i^y(t) = y_o + l_v^{og} \sin \theta_{og} \quad (4-2g)$$

若无人车是从 S_g 到 S_o 行进，其运行轨迹可类似得到，只不过此时 $\theta_{go} = \pi - \theta_{og}$ 。

4.3 分布式并行分拣的关键技术问题

本小节针对大批量订单整体分拣问题在上述分布式并行框架下对(3-7c)中的算法 $\mathcal{A}(t)$ 进行具体化。其中包含了对(3-7b)中函数 f_{gv} 的构建和无人车在 $[t, t+1)$ 内的加速度 $a'_i, i=1, \dots, N_v$ 的确定两个方面。

4.3.1 f_{gv} 的构建：优先级优先分配算法

由(3-7b)定义, f_{gv} 将当前待处理货物集合 $\mathbb{G}_g(t)$ 映射到空闲无人车集合 $\mathbb{V}_l(t)$ 。在分布式并行整体分拣框架下, f_{gv} 的构建应考虑两个重要因素: 1. 待处理订单的完成情况, 越接近完成分拣(剩余分拣货物较少)的订单应给予较高处理优先级, 这有利于优化(3-9)中定义的整体分拣的分拣效率; 2. 空闲无人车与打包点距离, 货物运送应安排给较近的无人车执行以减小运输距离。

首先, 从(3-2b)定义的待处理订单集合 $\Theta(t)$ 中, 计算每个待处理订单 O_o 中尚需处理的货物数量

$$N_g^r(O_o, t) = |\{G_g \in O_o, I_g = -1\}| \quad (4-3a)$$

待处理订单 O_o 的处理优先级 PRI_o 以如下方法确定:

若订单 O_{o_1} 中剩余待处理货物较少, 即 $N_g^r(O_{o_1}, t) < N_g^r(O_{o_2}, t)$ 则剩余待处理货物较少的订单 O_{o_1} 的处理优先级较高, 即 $\text{PRI}_{o_1} > \text{PRI}_{o_2}$;

若订单 O_{o_1} 和 O_{o_2} 中剩余待处理货物相同且订单 O_{o_1} 中货物总数大于订单 O_{o_2} , 即 $N_g^s(O_{o_1}, t) = N_g^s(O_{o_2}, t)$ 且 $|\mathbb{I}_{o_1}^g| > |\mathbb{I}_{o_2}^g|$, 则货物总数较多的订单 O_{o_1} 优先级较高, 即 $\text{PRI}_{o_1} > \text{PRI}_{o_2}$;

若订单 O_{o_1} 和 O_{o_2} 中剩余待处理货物和货物总数均相同, 即 $N_g^r(O_{o_1}, t) = N_g^r(O_{o_2}, t)$ 且 $|\mathbb{I}_{o_1}^g| = |\mathbb{I}_{o_2}^g|$, 则二者处理先后顺序随机确定。

将优先级以自然数从 1 到 $N_o(t)$ 表示, 其中数字越小优先级越大。将带有处理优先级的订单 O_o 记为 O_o^{PRI} , 而每一待处理货物的优先级则与其所属订单的优先级相同, 并将货物 G_g 在赋予了优先级后记为 G_g^{PRI} 。则原先的待处理订单集合 $\Theta(t)$ 变为

$$\Theta^{\text{PRI}}(t) = \{O_o^{\text{PRI}} \mid o \in \mathbb{I}_o(t)\} \quad (4-3b)$$

原先的待处理货物集合 $\mathbb{G}_g(t)$ 变为

$$\mathbb{G}_g^{\text{PRI}}(t) = \{G_g^{\text{PRI}} \mid G_g^{\text{PRI}} \in O_o^{\text{PRI}} \in \Theta^{\text{PRI}}(t), I_g(t) = -1\} \quad (4-3c)$$

其次, 空闲无人车的集合及其所在位置可由(3-3f)和(4-2a)确定。对任一待处理货物,

可计算其与所有空闲无人车距离，该距离可类似(4-2e)进行计算。例如，待处理货物 G_g^{PRI} 与空闲无人车 $V_i \in \mathbb{V}_i(t)$ 的距离，记为 d_{gi}^s ，可计算如下

$$d_{gi}^s = \sqrt{(l_i^x(t) - S_o^x(t))^2 + (l_i^y(t) - S_o^y(t))^2} \quad (4-3d)$$

进而，对每一待处理货物 G_g^{PRI} ，可计算其与所有空闲无人车的距离，并按升序排列，将该向量记为 \mathbf{D}_g^s ，

$$\mathbf{D}_g^s = \text{asc}([d_{g1}^s \dots d_{gi}^s \dots d_{gN_v}^s]) \quad (4-3f)$$

其中 $\text{asc}(\cdot)$ 表示将向量按升序排列的函数。

主要从优化订单整体分拣的角度提出算法 1 中描述的解决方案，其核心想法是以货物的运送优先级为先。注意该方法有利于在短期内完成更多的订单，但这个过程可能会使用更多的远距离无人车，从而造成对长期目标的优化不利。如何做到全局优化仍是一个待研究的复杂问题。

算法 1 f_{gv} 的优先级优先分配算法

输入： t 时刻的待处理货物集合 $\mathbb{G}_g(t)$ 和空闲无人车集合 $\mathbb{V}_i(t)$

输出： f_{gv} 函数

§1: 由(4-3a),(4-3b)和(4-3c)计算带有优先级的待处理货物集合 $\mathbb{G}_g^{\text{PRI}}(t)$ ；由(4-3f)计算每件待处理货物与空闲无人车的距离向量 \mathbf{D}_g^s ；

§2: 将优先级最高的待处理货物分配给其与无人车的距离向量中的第一个无人车(距离最短)；

§3: 更新空闲无人车信息，将刚分配任务的无人车从 $\mathbb{V}_i(t)$ 中删除；更新所有待处理货物与无人车的距离向量，将刚分配任务的无人车的距离从向量中删除；

§4: 从剩余待处理货物中选择优先级最高的，重复§2 和§3 步骤，直至任一条件满足：1)所有待处理货物全部分配完毕；2)空闲无人车集合为空集。

4.3.2 a_i^t 的确定：模型预测优化算法

在本文的分布式并行整体分拣框架下，无人车的所有运动决策都由某中心控制器给出。这一决策的核心是给出 $[t, t+1)$ 内每辆运行中无人车的加速度。

容易看出，从单独一辆无人车的角度看，为了使得其运行效率最高，应该使其一直在最高速度运行。但多辆无人车在限定区域 \mathcal{H} 中交叉运行如果不进行限制不可避免会遭遇碰撞。按(3-8d)中的要求， V_i, V_j 发生碰撞即二者之间距离小于某预定 d_v 。注意到为了整体的效率优化，我们不得不考虑在多步运行后的无人车状态：比如，如果让某无人车在 $[t, t+1)$ 内保持高速运行会极大提高在此后与其他无人车碰撞的可能，我们有理由限制其在 $[t, t+1)$ 内的运行速度，而这一点是只考虑在

$[t, t+1)$ 内的运动无法得到的。原则上讲，为了系统运行的整体最优，我们需要预测系统很多步后的可能运动状态，并从中选取合适的运动序列，但这种对未来轨迹的预测对计算能力有很高的要求，这一原因促使我们在本文中做了两个决定：一方面，我们的系统架构中采用中央控制器进行每辆无人车的路径规划，而并不允许每辆无人车自行其是；另一方面，在路径规划上，我们采用如下的模型预测控制策略，以有限步长的滚动优化来决定无人车的运动。

记无人车预测步长为 T ，在 $[t, t+T)$ 内所有执行任务的无人车集合为 $\mathbb{V}_o(t:t+T)$ ，其中包含了在此时间内：1) 一直执行任务的无人车；2) 在 t 时刻执行任务但在 $[t, t+T)$ 完成了该项任务的无人车；和 3) 在 t 时刻未执行任务但在 $[t, t+T)$ 开始执行任务的无人车。需确定 $\mathbf{a}'_i, \forall V_i \in \mathbb{V}_o(t:t+T)$ 。

由(3-3c)可得

$$\mathbf{v}_i(t+\tau) = \mathbf{v}_i(t) + \sum_{\tau'=0}^{\tau-1} \mathbf{a}'_i{}^{t+\tau'} \quad (4-4a)$$

由上式并注意到无人车不会倒向行驶，无人车 V_i 在 $[t, t+T)$ 内的运动总长度 $L_i(t, t+T)$ 为

$$\begin{aligned} L_i(t, t+T) &:= \sum_{\tau=0}^{T-1} |\mathbf{l}_i(t+\tau+1) - \mathbf{l}_i(t+\tau)| \\ &= \sum_{\tau=0}^{T-1} (\mathbf{l}_i(t+\tau+1) - \mathbf{l}_i(t+\tau)) \\ &= \sum_{\tau=0}^{T-1} (\mathbf{v}_i(t+\tau) + \frac{1}{2} \mathbf{a}'_i{}^{t+\tau}) \\ &= \sum_{\tau=0}^{T-1} (\mathbf{v}_i(t) + \sum_{\tau'=0}^{\tau-1} \mathbf{a}'_i{}^{t+\tau'} + \frac{1}{2} \mathbf{a}'_i{}^{t+\tau}) \\ &= T\mathbf{v}_i(t) + \sum_{\tau=0}^{T-1} (T - \frac{1}{2} - \tau) \mathbf{a}'_i{}^{t+\tau} \end{aligned} \quad (4-4b)$$

从而，求解 $\mathbf{a}'_i, \forall V_i \in \mathbb{V}_o(t:t+T)$ 的模型预测问题可描述如下。

$$\max_{\mathbf{a}'_i{}^{t+\tau}, \tau=0, \dots, T-1} \sum_{V_i \in \mathbb{V}_o(t:t+T)} L_i(t, t+T) \quad (4-4c)$$

$$s.t. \quad \begin{cases} \mathbf{l}_i(t) \in \mathcal{H} \\ 0 \leq \mathbf{v}_i(t) \leq \mathbf{v}_{\max} \\ 0 \leq \mathbf{a}'_i(t) \leq \mathbf{a}_{\max} \\ d_{ij}(t) > d_v, \forall t, \forall i, j = 1, \dots, N_v. \end{cases} \quad (4-4d)$$

求解上述优化问题可以得到对 $V_i \in \mathbb{V}_o(t:t+T)$ 的加速度序列 $\mathbf{a}'_i{}^{(t+\tau)*}, \tau = 0, \dots, T-1$ 。

进而，按照模型预测控制，我们选取第一个控制量作为 t 时刻的加速度，即

$$\mathbf{a}_i^t = \mathbf{a}_i^{t*}, V_i \in \mathbb{V}_o(t) \quad (4-4e)$$

4.4 分布式并行整体分拣算法

将所提出的分布式并行整体分拣方法总结为算法 2。注意该算法中所有货架都做为打包点并行进行订单处理，这是本方法效率提升的主要原因。而所造成的技术难题，即 f_{gv} 函数的确定和 $\mathbf{a}_i^t, i \in \mathbb{V}_o(t)$ 的确定，仍有很多可以提升的空间。

算法 2 分布式并行整体分拣算法

输入： $t=0$ ， N_s 个货架的位置，待处理订单集合 $\Theta(0)=\emptyset$ ，无人车集合 $\mathbb{V}=\mathbb{V}_l(0)$ ， $\mathbb{V}_o(0)=\emptyset$ ，及其初始状态 $V_i(0), V_i \in \mathbb{V}$ 。

输出：订单的整体分拣运行。

在 t 时刻，

§1: 按(3-4)和(4-1)产生新订单并更新待处理订单集合，按(3-7a)更新待处理货物集合；

§2: 按(4-3)和算法 1 确定 $f_{gv}(t)$ 函数，按(4-4)确定 $\mathbf{a}_i^t, V_i \in \mathbb{V}_o(t)$ ；

§3: 按(3-6)更新无人车状态，按(3-5)更新待处理订单集合，按(3-7a)更新待处理货物集合；

§4: 令 $t=t+1$ 。

4.5 本章小结

本章提出一种基于智能货架的分布式并行解决方法，它不仅拥有订单分批同时处理多个订单的能力，还可以避免产生二次分拣，又实现了订单的完整性。此外，在能够实现多个订单同时整体分拣的同时，有效的解决了订单整体分拣问题中的打包点瓶颈问题。最后，利用优先级分配算法和预测控制算法，分别解决了待处理订单中的货物分配给无人车进行配送和协调指挥无人车的运动的问题。

第五章 大批量整体分拣的仿真平台及方法验证

基于上述的解决方案，本章利用 MATLAB 搭建仓库环境，模拟了订单分拣的过程，通过特定的仓库参数，改变可操纵的变量，从中得出本文算法基本设置参数的规律。由于二次分拣通常使用人工或传送带的方式无法在仿真中实现，由此本文选择了基于无人车的常规一次分拣并对其搭建仿真环境。最后，两种方法设置相同参数进行性能对比，从仓库模型，分拣效率，成本三个方面得出结论。

5.1 环境搭建

5.1.1 初始化静态参数

考虑封闭仓库区域 \mathcal{H} 为一长宽各为 50m 和 45m 的方形区域，将笛卡尔坐标系的坐标原点建于其中某顶点， x 轴和 y 轴各沿方形的一边，如图 5-1 所示。

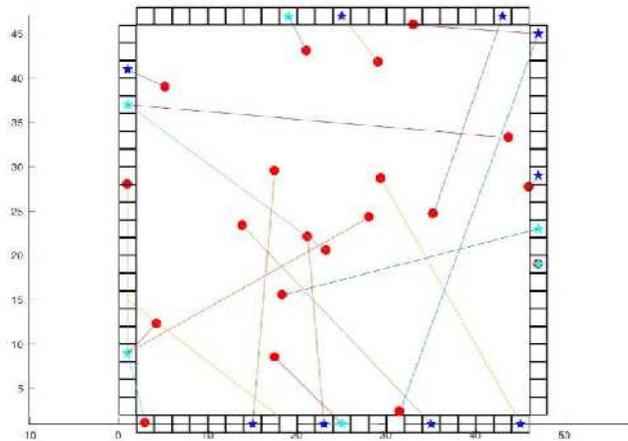


图 5-1 分布式并行整体分拣策略的仿真示意图。其中浅蓝色五角星表示某订单的打包所在货架，深蓝色五角星表示某待取货的商品所在货架，红色圆心表示运输无人车。

Figure 5-1. Schematic diagram of the distributed parallel overall sorting strategy. The light blue five-pointed star indicates the shelf where the order is packaged, the dark blue five-pointed star indicates the shelf where the goods to be picked up are located, and the red center indicates the transport of the unmanned vehicle.

- **货物和货架** 封闭仓库区域 \mathcal{H} 里有 $N_s=88$ 的货架，货架编号 S_i 从坐标(3,1)起逆时针围城正方形，其中货架边长等于 20 的正方形。由公式(3-1)叙述的货物 G_g 主要包含货架 S_g 和处理状态 I_g ，在仿真中，选货过程是忽略的，货架上可以

有多种货物，但是货物所在位置就是货架位置。

- **无人车** 设该仓库区域内有 N_v 辆无人车用于货物运送，每一辆无人车都从 $[1, N_s]$ 中随机取一个整数 m ，并停放在货架 S_m 的底下。

5.1.2 订单分拣系统循环过程

- **新订单产生** 一个新订单在 $[t, t+1)$ 到达的指数分布强度 $\lambda = 0.3$ ，若到达一个新订单(3-4)，从 $[1, 10]$ 随机取一个整数作为订单内货物个数，服从均匀分布，其概率为 $\kappa = 0.1$ ，产生的货物又均匀分布在货架中，货物在货架的摆放情况 $\eta_j = 1/88$ ，其中新产生的货物优先级 $G_g^{PRI} = 0$ 。
- **订单处理** 在 $[t, t+1)$ 时间内，按(4-3)和算法 1 将待处理的货物 G_g 分配给无人车 $v_i(t)$ ，也就是将货物所在位置发送给无人车，即 $g_i^v(t) = S_g$ ， $o_i^v(t) = S_o$ 。无人车先往 S_g 取货，在送往 S_o 进行订单打包。计算机按(4-4)计算 a_i^t ，无人车在按照(3-6)进行运输。
- **限制条件** 无人车的最大速度约束为 $v_{\max} = 1-3\text{m/s}$ ，最大加速度约束为 $a_{\max} = 2\text{m/s}^2$ ，任意两辆无人车的距离都不可超过某一事先预定的距离 $d_v = 3.15$ 。

5.2 参数选择

在仿真中，从订单的产生到完成是一个循环的过程，令 $T_s = [t, t+1]$ 为循环的一步，由于程序一步无法看出订单的运行规律，则本文需要仿真多步来验证分拣效率 $J(t)$ (3-9)。

5.2.1 分拣效率 $J_2(t)$ 与预测控制 N 的关系

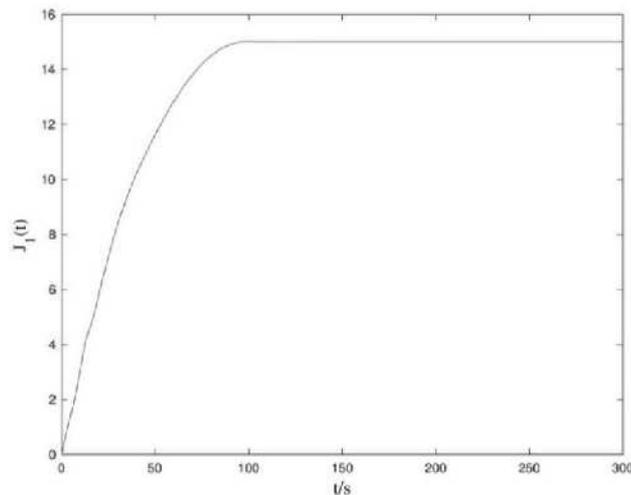


图5-2 分拣效率 $J_1(t)$ 随时间的演化规律图

Figure 5-2. Evolutionary rule of sorting efficiency $J_1(t)$ with time

考虑 $N_r=1$, $N=3$, $N_v=30$ 时的分拣效率 $J_1(t)$, 即在单位时间 $[t, t+1)$ 内所完成的订单数。其演化规律见图 5-2。由于不同的预测步数和车辆数, 分拣效率也有所不同, 接下来将用图 5-2 中稳定的订单数作为图 5-3 中数据进行分析。

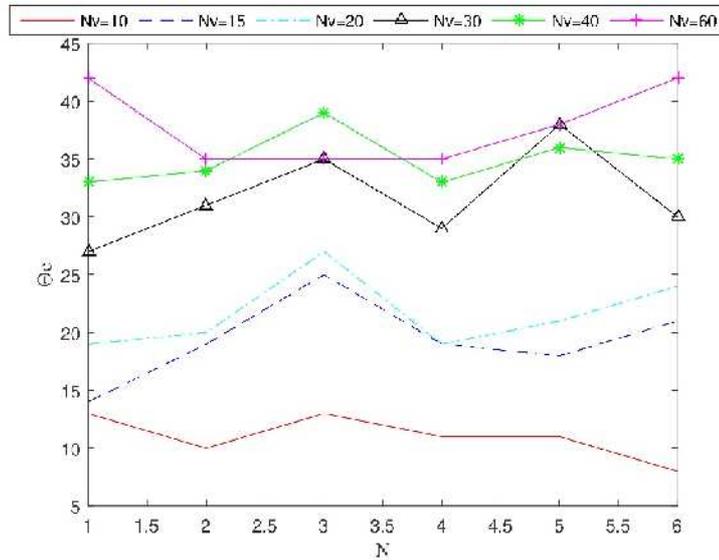


图 5-3 分拣效率 $J_2(t)$ 与预测控制 T 间的关系图

Figure 5-3. Diagram of the relationship between sorting efficiency $J_2(t)$ and predictive control T

图 5-3 为分拣效率 $J_2(t)$ 以及车辆数、预测步数的变化图。当车辆数 N_v 相同的情况下, 分拣效率 $J_2(t)$ 随预测控制步数 N 的增加略有浮动但整体呈现上升趋势, 当 $N=3$ 时, 分拣效率 $J_2(t)$ 出现峰值。当预测步数 N 相同的情况下, 分拣效率 $J_2(t)$ 随无人车数 N_v 增大而增大。曲线间的间隔代表随着车辆数 N_v 订单完成度增长的幅度, 可以看出从 20 辆车增长到 30 辆车时分拣效率 $J_2(t)$ 增长的最为明显。

5.2.2 分拣效率 $J_2(t)$ 与订单到达率 λ 的关系

考虑预测控制 $N=3$ 时, 指数函数 λ 与分拣效率关系见表 5-1。从表中看出当订单数量很少时, 订单分拣的效率与车辆数无关, 车辆的利用率不仅很低还占用电脑资源, 由此可见仓库可以根据订单量灵活选取适合的车辆数, 这不仅能保证订单分拣的效率, 还能延长无人车的使用寿命。

表 5-1 分拣效率 $J_2(t)$ 与订单到达率 λ 间的关系表

Table 5-1. Table of relationship between sorting efficiency $J_2(t)$ and order arrival rate λ

$\lambda=0.02$							
Type1	N_v	10	15	20	30	40	60
	$J_2(t)$	3	1	4	2	3	1

(续表)

$\lambda=0.03$							
Type2	N_v	10	15	20	30	40	60
	$J_2(t)$	4	4	5	3	3	3
$\lambda=0.1$							
Type3	N_v	10	15	20	30	40	60
	$J_2(t)$	13	12	19	14	11	15
$\lambda=0.15$							
Type4	N_v	10	15	20	30	40	60
	$J_2(t)$	9	18	15	26	24	20
$\lambda=0.2$							
Type5	N_v	10	15	20	30	40	60
	$J_2(t)$	10	24	22	29	23	20
$\lambda=0.3$							
Type6	N_v	10	15	20	30	40	60
	$J_2(t)$	13	25	27	35	39	35

通过大量仿真实验，我们可以通过总货架数 N_s ，订单到达率 λ 来确定无人车数量 N_v 以及预测控制步数 N ，当订单到达率 $\lambda < 0.1$ 时， $N_v=0.1N_s$ ， $N=1/N=2$ ，分拣效果效率与传统分拣效率差别不大。当订单到达率 $0.1 < \lambda < 0.15$ 时，则 $N_v=0.25N_s$ ， $N=3$ 。当订单到达率 $\lambda > 0.15$ 时，则 $N_v=0.5N_s$ ， $N=[3,5]$ ，从大量数据看出本文算法针对大批量订单，系统的灵活性强，可以同时处理多个订单。

5.3 常规模型与本文模型参数对比关系

5.3.1 常规模型

对于大批量订单自动整体分拣，前辈们在传统布局^[77]下已有多种解决方案。在封闭仓库区域 \mathcal{H} 中，同样存在 $N_s=88$ 个货架，编号从(1,25)开始从上往下 S 型进行编号，过道的宽度够两辆无人车并行行驶。本文考虑与传统订单分拣系统做比较以证明所提出方法的有效性^[74]，系统架构见图 5-4。可以看出，该传统方法并不使用本文中提出的分布式整体分拣策略，无人车的行进路线也不限于直线，订单的分拣点在仓库一侧。常规的无人车路径分拣策略主要有返回法 (Return)、最大间隙法 (Largest Gap)、S 型法 (S-Shape)。

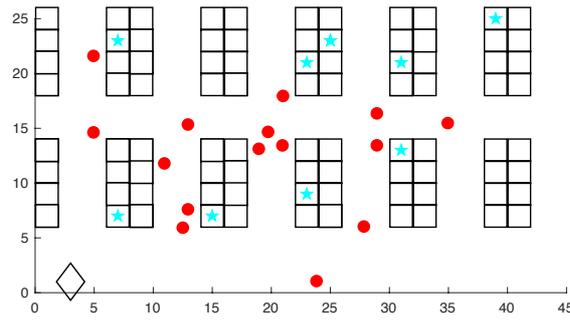


图5-4 常规分拣仿真示意图

Figure 5-4. General sorting simulation diagram

算法 3 常规分拣算法

输入: $t=0$, N_s 个货架的位置, 待处理订单集合 $\Theta(0)=\emptyset$, 无人车集合 $\mathbb{V}=\mathbb{V}_l(0)$, $\mathbb{V}_o(0)=\emptyset$, 及其初始状态 $V_i(0), V_i \in \mathbb{V}$ 。

输出: 订单的整体分拣运行。

在 t 时刻,

§1: 按(3-4)和(4-1)产生新订单并更新待处理订单集合, 按(3-7a)更新待处理货物集合;

§2: 用文献^[75,76]中的方法确定 $f_{g_i}(t)$ 函数, 规划路径发送给无人车, 采取横向优先, 直走先行, 转弯即停的原则确定 $a_i^t, V_i \in \mathbb{V}_o(t)$;

§3: 按(3-6)更新无人车状态, 按(3-5)更新待处理订单集合, 按(3-7a)更新待处理货物集合;

§4: 令 $t=t+1$ 。

大部分的文献将拣货和分货分开, 将订单时间顺序相近的订单结合起来一起拣货到打包口后进行二次分拣, 由于二次分拣在仿真内不好体现, 本文假设一辆无人车拣选一个订单内的全部货物来实现一次分拣。传统的分拣方法将其视为 TSP 旅行问题, 利用遗传、启发式等算法来计算无人车行走的最短路径。

由于常规算法受传统货架摆放方式的影响, 无人车在取货的过程中避免不了要转弯, 再加上货物惯性的作用, 转弯的速度必须要控制的很慢, 不然会导致物品的损坏, 这样一来无人车的速度调节范围很窄。因此, 本文改造货架的摆放方式让其避免转弯快速实现自动整体一次分拣。

5.3.2 订单效率对比关系

考虑 $N_l=1$ 时的分拣效率 $J_l(t)$, 即在单位时间 $[t, t+1)$ 内所完成的订单数。其演化

规律在四种方法下的比较见图 5-5。从中可以看出，采用分布式整体分拣方式的分拣效率比常规分拣方法高出 3 倍有余。这一效率提升的原因可从分布式并行分拣允许多个订单打包点的本质特点解释。

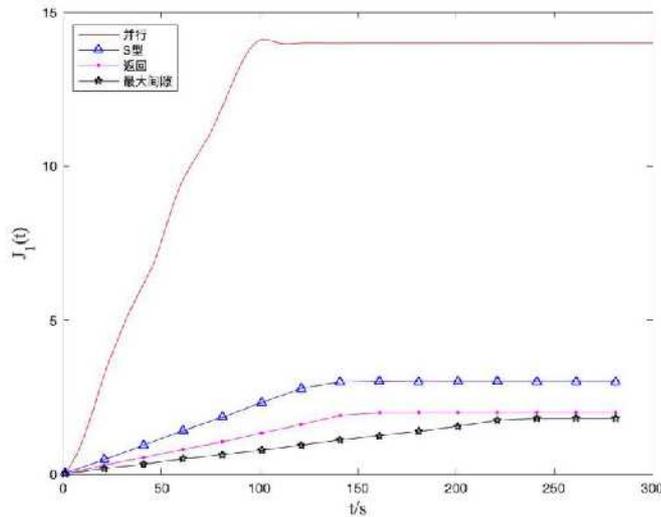


图 5-5 在统计时域 $[t, t+1)$ 内，四种分拣方法的分拣效率 $J_I(t)$ 随时间的演化规律图

Figure 5-5. In the statistical time domain $[t, t+1)$, the evolutionary rule of the sorting efficiency $J_I(t)$ of the four sorting methods over time

由于常规算法受传统货架摆放方式的影响，无人车在取货的过程中避免不了要转弯，再加上货物惯性的作用，转弯的速度必须要控制的很慢，不然会导致物品的损坏，这样一来无人车的速度调节范围很窄。因此，本文改造货架的摆放方式让其避免转弯快速实现自动整体一次分拣，并且增强了整个系统的扩展性和灵活性。

注意四种分拣方式在系统初装和运行成本上的差别主要在无人车方面。常规方法的无人车一般需要有相当的自主能力，如避障等能力，而所提出的分布式整体策略的无人车则可以大为简化，只要可接受指令行进即可。分布式整体方法需要对货架进行一定改造，但原先货架若允许无人车分拣也应已经具有一定智能，添加打包点能力的改装并不额外增加太多成本。因此总体上来说，分布式整体分拣方法的初装和运行成本也可以有一定降低。

5.4 本章小结

本章利用第三章与第四章的数学描述搭建了 MATLAB 的仓库环境。从订单到达率，无人车数量，预测步数等各个角度仿真了分布式并行整体分拣的参数规律，并给出不同订单到达率下的无人车数量选择等建议。同样的方式，描述了常规分拣

模型仿真算法并搭建仿真环境，在与分布式并行整体分拣设置相同参数的情况下，进行了仓库模型，分拣效率，成本的对比。从仓库模型上说，在都能够实现多个订单同时一次分拣的前提下，分布式并行整体分拣模型允许多个订单打包点以及无人车只需直线运行正好避免了货物在转弯时的惯性作用，增强了整个系统的扩展性和灵活性。从分拣效率上说，本文的分拣效率比常规分拣模型高出三倍有余。从成本上说，两种分拣方式在系统初装和运行成本上的差别主要在无人车方面，由于常规方法的无人车性能强于分布式并行整体分拣系统，因此，分布式整体分拣方法的初装和运行成本也有所降低。

第六章 结论与展望

6.1 结 论

近年来,人们生活物质水平不断提高,商品的种类也逐渐趋于多样化,人们的主要消费方式从实体慢慢转化为到网商。随着市场竞争的加剧,订单的收货效率逐渐提高,但是会出现同一个订单分多个包裹寄出现象。针对目前大批量订单存在“整体分拣”能力低下这一问题,本文对订单的整体分拣进行了文献综述。随着科技的发展,分拣方式从手工,半自动,自动慢慢进步,起初订单的分拣效率低但是整体性高,最终提升了分拣效率却失去了订单的整体性,造成了额外的物流成本。

针对这一研究现状,本文提出了一个全新的仓储布局,提升了大批量订单整体分拣的效率。首先从订单自动分拣系统进行静态描述,系统动态分拣过程进行严格的数学刻画,弥补了大批量订单整体分拣数学模型的空缺。然后利用智能货架与无人车的功能,提出了分布式并行整体分拣模型及分拣策略。在这个模型的基础上,提出了 f_{gv} 优先级优先分配算法以及利用预测控制解决无人车在不碰撞前提下的高效运行方式。最后利用 MATLAB 仿真,搭建该模型的自动分拣仓库,能实现订单的自动拣货,无人车运行,物品库存和管理等基本功能,通过与常规订单分拣模型在分拣效率方面的对比,证明了分布式并行整体分拣的分拣效率比常规分拣方法高出 3 倍有余,在成本方面,分布式整体分拣方法的初装和运行成本也可以有一定降低。相比于 A 字型自动分拣模型,该模型可以放各种体积的货物,不受货物类型的限制。相比于自动存储/检索系统 AS/RS,该模型能实现并行一次分拣,模型的形状可以随货物/仓库的情况进行改变,灵活性较高。相比于移动货架分拣系统,由于该模型的打包口很多,几乎不会出现排队现象,也能够保证订单的整体型。不仅如此,还可以根据订单量的变化来选择无人车的数量,这样可以在保证分拣效率的前提下,延长无人车的使用寿命。

总的来说,大批量订单的整体分拣是物流系统中的一个重要问题,其效率提升对整体物流效率的提升具有关键作用。本文提出的分布式并行模式的整体分拣策略和方法利用多打包点的想法,使用优先级订单分发和基于预测的无人车动态规划等技术,极大的提升了订单分拣系统的整体分拣效率,具有较好的潜在应用价值。

6.2 展 望

结合本文的工作，尚有如下问题需要进一步研究：

1. 在货物摆放方式方面，本文为了简单并没有特意设计，仅仅用随机存储的方法进行摆放，未来可以根据订单中常组合的物品进行数据分析，将经常凑成订单的物品放入相邻货架中，减少无人车的行走距离，或者基于类的方式进行摆放。

2. 在分布式并行整体分拣模型方面，当物品种类繁多时，单单将所有货物围城一圈，不仅大大增加了无人车的行驶距离还增大了仓库面积。针对这种情况，可以将物品根据相应的规则（如易碎，生鲜，服饰，家具等）进行分类，一个种类围城一圈，根据订单到达率选择相应的车辆数。

3. 在 f_{gv} 的算法方面，为了简单，本文采取一辆车只能运输一个货物，未来可以采取“顺风车”的理念，实时规划更新无人车路线，尽可能实现行驶路程少处理订单多的高效算法。

参考文献

- [1] KULAKO, TANER M E. Joint order batching and picker routing in single and multiple-cross-aisle warehouses using cluster-based tabu search algorithms[J]. Flexible Services & Manufacturing Journal, 2012,24(1): 52-80.
- [2] HARKHWANG, WONJANGBAEK, MOON-KYULEE. Clustering algorithms for order picking in an automated storage and retrieval system[J]. International Journal of Production Research, 1988, 26(2): 189-201.
- [3] YUAN Z, GONG Y Y. Bot-In-Time Delivery for Robotic Mobile Fulfillment Systems[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2017, 64(1): 83- 93.
- [4] ÖNÜT S, TUZKAYA U R, DOĞAÇ B. A particle swarm optimization algorithm for the multiple-level warehouse layout design problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(4): 783-799.
- [5] SCHOLZ A, SCHUBERT D, WÄSCHER G. Order picking with multiple pickers and due dates-Simultaneous solution of Order Batching, Batch Assignment and Sequencing, and Picker Routing Problems[J/OL].European Journal of Operational Research, 2017, 263(2): 461-478.
- [6] SCHOLZ A, WÄSCHER G. Order Batching and Picker Routing in manual order picking systems: the benefits of integrated routing[J]. Central European Journal of Operations Research, 2017, 25(2): 491-520.
- [7] LIN C C, KANG J R, HOU C C, et al. Joint order batching and picker Manhattan routing problem[J].Computers & Industrial Engineering, 2016, 95: 164 -174.
- [8] VALLE C A, BEASLEY J E, da CUNHA A S. Optimally solving the joint order batching and picker routing problem[J/OL]. European Journal of Operational Research, 2017, 262(3): 817-834.
- [9] BO Z, LINWEI L, YINGHAO Z, et al. The Research on E-Commerce Logistics Picking AGV Path Optimization Method Based on the Improved A* Algorithm[C/OL].// 2016 International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC). 2016: 99-103.
- [10] WERNERS B, WÜLFING T. Robust optimization of internal transports at a parcel sorting center operated by Deutsche Post World Net[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201(2): 419-426.
- [11] KIM D H, KIM H J, SANG B K. Closed Loop Motion Synchronous Velocity Control for AC Motor Drives-A Solution for Increasing Speed of a Cross-Belt Sorting Conveyor System[C].// International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications. 2016: 577-586.
- [12] CAPUTO A C, PELAGAGGE P M. Management criteria of automated order picking systems in high-rotation high-volume distribution centers[J]. Industrial Management & Data Systems, 2006, 106(9): 1359-1383.
- [13] LEE S, KUO Y. Exact and inexact solution procedures for the order picking in an automated carousal conveyor[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(16): 4619-4636.
- [14] GONG Y, KOSTER R B M D. A review on stochastic models and analysis of warehouse operations[J].Logistics Research, 2011, 3(4): 191-205.
- [15] FARIA F, REIS V. An Original Simulation Model to Improve the Order Picking Performance: Case Study of an Automated Warehouse[C].// International Conference on Computational

- Logistics. 2015.
- [16] H Donald Rosenthal RATLIFF A S. Order-Picking in a Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem[J]. *Operations Research*, 1983, 31(3): 507-521.
- [17] BERGA J P V D, GADEMANN A J R M, POCHET Y. Forward-reserve allocation in a warehouse with unit-load replenishments[J]. *European Journal of Operational Research*, 1998, 111(1): 98-113.
- [18] 卢尧,任晓明,吴勇志等. 智能仓储控制系统的设计与实现[J]. *自动化仪表*, 2017, 38(2): 28-30.
- [19] GU J. Research on warehouse operation: A comprehensive review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(1): 1-21.
- [20] GALLEGO G, QUEYRANNE M, SIMCHI-LEVI D. Single Resource Multi-Item Inventory Systems[J]. *Operations Research*, 1996, 44(4): 580-595.
- [21] HACKMAN S, ROSENBLATT M, OLIN J. Allocating Items to an Automated Storage and Retrieval System[J]. *A I I E Transactions*, 1990, 22(1): 7 -14.
- [22] FRAZELLE E H, HACKMAN S T, PASSY U, et al. The forward-reserve problem[C].// *Optimization in Industry*. 1994.
- [23] WUTTHISIRISART P, NOBLE J S, CHANG C A. A two-phased heuristic for relation-based item location[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 82: 94-102.
- [24] GRAY A E, KARMARKAR U S, SEIDMANN A. Design and operation of an order-consolidation warehouse: Models and application[J]. *European Journal of Operational Research*, 1992, 58(1): 14-36.
- [25] PETERSEN C G. Considerations in order picking zone configuration[J]. *International Journal of Operations & Production Management*, 2002, 22(7): 793-805.
- [26] JANE C C. Storage location assignment in a distribution center[J]. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 2000, 30(1): 55-71.
- [27] JEWKES E, LEE C, VICKSON R. Product location, allocation and server home base location for an order picking line with multiple servers[J]. *Computers & Operations Research*, 2004, 31(4): 623-636.
- [28] LARSON T N, MARCH H, KUSIAK A. A heuristic approach to warehouse layout with class-based storage[J]. *A I I E Transactions*, 1997, 29(4): 337-348.
- [29] ZHANG Y. Correlated Storage Assignment Strategy to reduce Travel Distance in Order Picking [J]. *Ifac Papersonline*, 2016, 49(2): 30-35.
- [30] 肖建,郑力. 考虑需求相关性的多巷道仓库货位分配问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(12): 2447-2451.
- [31] FRAZELE E A, SHARP G P. Correlated assignment strategy can improve any order-picking operation[M].1989.
- [32] 李梅娟. 自动化仓储系统优化方法的研究[D]. [S.l.]:大连理工大学, 2008.
- [33] 别文群. 遗传算法在立体仓库货位优化分配中的研究[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(29): 211-213.
- [34] MUPPANI V R, ADIL G K. Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: A simulated annealing approach[J]. *Omega*, 2008, 36(4): 609-618.
- [35] XIAO J, ZHENG L. A correlated storage location assignment problem in a single-block-multi-aisles warehouse considering BOM information[J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(5): 1321-1338.

- [36] LIU C M. Clustering techniques for stock location and order-picking in a distribution center[J]. Computers & Operations Research, 1999, 26(10-11): 989-1002.
- [37] PETERSEN C G, AASE G. A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 92(1): 11-19.
- [38] BOZER Y A, SHARP G P. An empirical Evaluation of a General Purpose Automated Order Accumulation and Sortation System used in Batch Picking[M]. 1989.
- [39] 伍经纬,蔡临宁. 订单分批算法的适用性研究[J]. 工业工程与管理, 2007, 12(4): 104-107.
- [40] GADEMANN N, VELDE S V D. Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse[J]. Iie Transactions, 2005, 37(1): 63 - 75.
- [41] BOZER Y A, KILE J W. Order batching in walk-and-pick order picking systems[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(7): 1887-1909.
- [42] LAM C H Y, CHOY K L, HO G T S, et al. An order-picking operations system for managing the batching activities in a warehouse[J]. International Journal of Systems Science, 2014, 45(6): 1283-1295.
- [43] TSAI C Y, LIOU J J H, HUANG T M. Using a multiple-GA method to solve the batch picking problem: considering travel distance and order due time[J]. International Journal of Production Research, 2008,46(22): 6533-6555.
- [44] HENN S. Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(11): 2549-2563.
- [45] RUSSELL M L, MELLER R D. Cost and Throughput Modeling of Manual and Automated Order Fulfillment Systems[J]. Iie Transactions, 2003, 35(7): 589-603.
- [46] HENN S, KOCH S, DOERNER K, et al. Metaheuristics for the Order Batching Problem in Manual Order Picking Systems[J]. Business Research, 2012, 222(3): 484-494.
- [47] 李诗珍. 基于工作量均衡的分区同步拣货系统储位分配与评价[J]. 包装工程, 2010(11): 114-118.
- [48] 李诗珍,杜文宏. 基于聚类分析的订单分批拣货模型及启发式算法[J]. 统计与决策, 2008(12): 53-56.
- [49] XU S Y, LI T K, WANG L, et al. Cluster-Based Algorithm for Order Grouping Problem of Round Steel[J].Applied Mechanics & Materials, 2014, 488-489: 1371-1374.
- [50] CHEN M C, HUANG C L, CHEN K Y, et al. Aggregation of orders in distribution centers using data mining[J]. Expert Systems with Applications, 2005, 28(3): 453-460.
- [51] 高榕,李晶,肖雅夫等. 基于云环境 K-means 聚类的并行算法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2015,61(4): 368-374.
- [52] 冀素琴,石洪波. 面向海量数据的 K-means 聚类优化算法[J].计算机工程与应用, 2014, 50(14): 143-147.
- [53] LAIH Y W. A clustering algorithm for item assignment in a synchronized zone order picking system[J].European Journal of Operational Research, 2005, 166(2): 489-496.
- [54] CHEN M C, HUANG C L, CHEN K Y, et al. Aggregation of orders in distribution centers using data mining[J]. Expert Systems with Applications, 2005, 28(3): 453-460.
- [55] HSIEH L F, FAN C Y. A New SOM Batching Heuristic for Order Picking Systems[C].// IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management. 2010.
- [56] 周晓光,张喜妹,刘玉坤. 一种基于移动机器人的配送中心柔性拣选系统[J]. 物流技术, 2015(7): 238-240.

- [57] 张绪鹏, 沈敏德, 马琳等. 药品自动分拣设备的研究进展[J]. 中国药房, 2012(5): 452-454.
- [58] 谢伟东, 王磊, 余翊妮等. 条烟自动分拣的异步法及其装置[J]. 工程设计学报, 2007, 14(2): 112-116.
- [59] 孙壮志, 张雨佳. 订单结构对卷烟自动分拣线分拣效率的影响[J]. 计算机应用, 2010, 30(s1): 315-316.
- [60] LEE S D, KUO Y C. Exact and inexact solution procedures for the order picking in an automated carousal conveyor[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(16): 4619-4636.
- [61] BYUNG-INKIM, SHERAGU S, JGRAVES R, et al. Clustering-based order-picking sequence algorithm for an automated warehouse[J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(15): 3445-3460.
- [62] GOETSCHALCKX M, RATLIFF H D. An efficient algorithm to cluster order picking items in a wide aisle[J]. Engineering Costs & Production Economics, 1988, 13(4): 263-271.
- [63] MANZINI R, GAMBERI M, REGATTIERI A. Design and control of an AS/RS[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(7-8): 766-774.
- [64] FOLEY R D, FRAZELLE E H. Analytical Results for Miniload Throughput and the Distribution of Dual Command Travel Time[J]. A I I E Transactions, 1991, 23(3): 273-281.
- [65] BERG J P V D, ZIJM W H M. Models for warehouse management: Classification and examples[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59(1-3): 519-528.
- [66] ELSAYED E A. Algorithms for optimal material handling in automatic warehousing systems[J]. International Journal of Production Research, 1981, 19(5): 525-535.
- [67] JOHNSON M E. The impact of sorting strategies on automated sortation system performance[J]. Iie Transactions, 1997, 30(1): 67-77.
- [68] MELLER R D. Optimal order-to-lane assignments in an order accumulation/sortation system[J]. Iie Transactions, 1997, 29(4): 293-301.
- [69] MCAREE P, BODIN L, BALL M, et al. Design of the federal express large package sort facility[J]. Annals of Operations Research, 2006, 144(1): 133-152.
- [70] ARMSTRONG R D, COOK W D, SAIPE A L. Optimal Batching in a Semi-Automated Order Picking System[J]. Journal of the Operational Research Society, 1979, 30(8): 711-720.
- [71] WILHELM W, WANG L. Management of component accumulation in small-lot assembly systems[J/OL]. Journal of Manufacturing Systems, 1986, 5: 27-39.
- [72] ANON. Kiva the disrupter (managing business disruption and ensuring business continuity)[J]. Strategic Direction, 2002.
- [73] ZENG A, YU K T, SONG S, et al. Multi-view self-supervised deep learning for 6D pose estimation in the Amazon Picking Challenge[C/OL].// 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). 2017: 1386-1383.
- [74] ROODBERGEN K J. Storage Assignment for Order Picking in Multiple-Block Warehouses[J]. Warehousing in the Global Supply Chain, 2012: 139-155.
- [75] HONG S, KIM Y. A route-selecting order batching model with the S-shape routes in a parallel-aisle order picking system[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(1): 185-196.
- [76] Henn S, Koch S, Wäscher G. Order Batching in Order Picking Warehouses: A Survey of Solution Approaches[J]. Femm Working Papers, 2012:105-137.

致 谢

在本论文完成之际，我谨向所有给予我无私帮助的老师、亲人、同学和朋友致以真诚的谢意！

首先我要感谢浙江工业大学对我的辛苦培养，我更要衷心感谢研究生期间导师赵云波教授对本人科研论文工作的精心指导和帮助，他经常对我的研究方向和内容提出建议，使得论文的内容研究更加完整，是他的辛勤付出让我可以在学术过程中顺利成长，也使我的视野更加开阔。此外赵老师严谨的治学态度以及在数学建模和理论实践等丰富的经验都给我留下很深的印象，他对我的教诲会令我终生受益。

十分感谢信息工程学院的诸位老师，你们在课堂中孜孜不倦的投入令我受益匪浅，使我在仓库拣选优化这一领域打下了扎实的基础。

同时，我要感谢学长学姐们对我学业和生活上的帮助，是他们在我刚来工大期间与我的沟通使我顺利度过最开始的适应期，并喜欢上新的校园。在研究生期间的课题研究中，与他们的交流学习，使我的学术能力快速增长，也使我的研究思路更加宽广，是他们的耐心帮助使我克服研究课题中遇到的困难。

最后，感谢陪伴我度过的研究生阶段的同学和朋友，你们的热情、专注以及对我的帮助令我终身难忘。

作者简介

1 作者简介

1993年4月出生于新疆乌苏市。

2016年9月—2019年9月，浙江工业大学大学信息工程学院院（系）控制科学与工程专业学习，获得工学硕士学位。

2 攻读硕士学位期间发表的学术论文

[1] 赵云波,李天舒,汪钰皓. 大批量订单的整体分拣问题建模及其分布式并行解决方法.高技术通讯.2019.

3 参与的科研项目及获奖情况

[1] 基于资源调度和预测控制的无线网络化控制系统的联合设计. 中国国家自然科学基金项目(61673350).

4 发明专利

学位论文数据集

密 级*	中图分类号*	UDC*	论文资助
公开	TP29	620	
学位授予单位名称	学位授予单位代码	学位类型*	学位级别*
浙江工业大学	10337	全日制学术型硕士	硕士
论文题名*	大批量订单分布式并行整体分拣系统设计		
关键词*	大批量订单, 整体分拣, 数学模型, 分布式并行		论文语种*
并列题名*	Design of distributed parallel integrated sorting system for large volume orders system		中文
作者姓名*	李天舒	学 号*	2111306092
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址	邮政编码
浙江工业大学信息学院	10337	杭州市潮王路 18 号	310032
学科专业*	研究方向*	学 制*	学位授予年*
控制科学与工程	智能订单分拣	3 年	2019 年
论文提交日期*	2019 年 8 月		
导师姓名*	赵云波	职 称*	教授
评阅人	答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
盲评	何德峰	刘毅, 陈晋音	
电子版论文提交格式: 文本 () 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 ()			
电子版论文出版 (发布) 者	电子版论文出版 (发布) 地	版权声明	
论文总页数*	47		
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。			