

国防科技大学学术著作专项经费资助出版



物流配送路径优化 与配送区域划分

雷洪涛 刘亚杰 张涛 郭波 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科技大学学术著作专项经费资助出版

物流配送路径优化 与配送区域划分

雷洪涛 刘亚杰 张涛 郭波 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

物流配送路径优化与配送区域划分/雷洪涛等编
著. —北京:国防工业出版社,2015.10

ISBN 978-7-118-10516-2

I. ①物... II. ①雷... III. ①物资配送-物资
管理 IV. ①F252.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第240780号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张9¼ 字数180千字

2015年10月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价36.00元

{ 本书如有印装错误,我社负责调换 }

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

随着我国经济与军事的高速发展,当前日益凸显的矛盾是:生产领域内的自动化、高效化以及大生产化的机制日益完善,使得生产力加速发展,人们经济收入逐步上升、消费能力增强,而将生产同消费连接起来的物流系统结构比较落后,商品流通渠道不畅通,进而大大阻碍了生产与消费的发展;军事领域内,特别是在现代战争中,规模庞大、物资繁杂和快速流动的跨国军事物流系统运作已经成为战争取胜的关键环节,而现代战场中作战进程空前加快,各类不确定影响因素越来越多,以往经验性以及确定性的解决方法已经很难适应现代军事物流系统优化需求。因此,开展相关环境下的物流系统优化问题研究显得尤为迫切。

物流系统是一个复杂的网络系统,配送路径优化和配送区域划分研究作为其研究的重要组成部分和核心关注点,无论是在国民经济生活中还是在军事战争领域里都有着重要的理论意义和实用价值。以往的物流系统优化问题的研究主要关注静态信息以及确定性领域。而在实际中,涉及大量的不确定信息以及复杂的约束条件,传统的模型难以描述随机条件下或者动态条件下的物流系统优化问题;而且,随着系统规模的扩大,使得物流系统优化问题求解变得越来越困难。因此,有必要进一步研究在随机条件下以及动态条件下的物流系统优化问题,并为问题求解构造出更有效、更符合实际的模型与算法。

本书主要针对随机和动态环境下的物流配送路径优化和物流配送区域划分相关问题开展研究,介绍了研究的背景意义及国内外研究现状,给出了相关物流系统优化基本理论模型和方法,分别针对随机需求下带时间窗配送路径优化问题、随机需求下可拆分服务配送路径优化问题、随机服务时间配送路径优化问题、考虑随机客户物流配送区域划分问题以及考虑动态客户物流配送区域划分问题,建立了相应模型,讨论了目标计算方法,设计了求解算

法,并进行了实验计算。希望本书的内容能够起到抛砖引玉的作用,能够为物流系统优化领域研究提供有价值的理论和方法指导,使广大研究者在研究和实践中取得更加丰硕的成果。

本书开展的研究得到了国家自然科学基金项目(71201170)、教育部博士点基金项目(20124307120024)和湖南省自然科学基金项目(13JJ4010)的资助。

由于编者的水平有限,疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2015年7月于长沙

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 物流配送路径优化问题国内外研究现状	3
1.2.2 物流配送区域划分问题国内外研究现状	8
1.2.3 存在的问题	10
1.3 主要内容及贡献	11
1.4 本书结构安排	12
第 2 章 物流系统优化基本理论及相关方法	14
2.1 物流配送路径优化模型	14
2.1.1 带时间窗的配送路径优化模型	14
2.1.2 需求可拆分服务的配送路径优化模型	15
2.1.3 随机配送路径优化模型	16
2.2 物流配送区域划分模型与方法	19
2.2.1 基于离散点选址的区域划分模型	19
2.2.2 基于 Voronoi 图的区域划分方法	22
2.2.3 基于最小生成树的区域划分方法	22
2.2.4 基于聚类分析的区域划分方法	22
2.3 求解算法	23
2.3.1 精确算法	23
2.3.2 启发式算法	24
第 3 章 随机需求下带时间窗的物流配送路径优化	27
3.1 问题描述	27

3.2	数学模型	31
3.2.1	符号	31
3.2.2	模型	32
3.3	期望额外总费用计算	33
3.3.1	服务失败概率计算	33
3.3.2	期望费用计算	35
3.4	自适应大邻域启发式搜索算法	38
3.4.1	大邻域搜索及惩罚性目标函数	39
3.4.2	初始解获得	39
3.4.3	启发式删除型和插入型子算法	40
3.4.4	自适应搜索	43
3.4.5	解接受标准及算法搜索终止标准	44
3.4.6	算法优化框架	44
3.5	实验	45
3.5.1	示例构造	45
3.5.2	计算结果及分析	47
第4章	随机需求下可拆分服务的物流配送路径优化	52
4.1	研究概述	52
4.1.1	问题描述	52
4.1.2	需求可拆分服务的配对车辆回归策略	53
4.1.3	研究界定	55
4.2	数学模型	55
4.2.1	符号	55
4.2.2	模型	56
4.3	期望回归费用计算	57
4.3.1	无协作回归策略下期望回归费用计算	57
4.3.2	协作回归策略下期望回归费用计算	61
4.4	大邻域启发式搜索算法	62
4.4.1	启发式初始解构造算法	63
4.4.2	删除及插入启发式子算法	63
4.4.3	子算法选择机制	66
4.4.4	解接受及算法终止标准	67

4.4.5	算法总结	67
4.5	实验	67
4.5.1	示例构造	67
4.5.2	计算结果及分析	68
第5章	随机服务时间下的物流配送路径优化	73
5.1	问题描述	73
5.2	数学模型	75
5.2.1	符号	75
5.2.2	模型	75
5.3	解的期望费用计算	76
5.4	G型变邻域启发式搜索算法	78
5.4.1	初始解构造	78
5.4.2	邻域结构	78
5.4.3	抖动机制	81
5.4.4	局域搜索	82
5.4.5	小粒度搜索	82
5.4.6	接受及终止标准	82
5.4.7	算法搜索过程	83
5.5	实验	84
5.5.1	示例构造	84
5.5.2	计算结果及分析	87
第6章	考虑随机客户的物流配送区域划分	95
6.1	问题描述	95
6.2	数学模型	96
6.3	区域路径费用近似	96
6.4	区域稠密度度量	98
6.5	大邻域搜索算法	98
6.5.1	目标函数	98
6.5.2	基本单元定义	98
6.5.3	初始解构建	100
6.5.4	插入与删除操作算子	100

6.5.5	接受与停止准则	102
6.5.6	求解算法总结	102
6.6	实验	103
6.6.1	在修改 Solomon 示例集上的实验	103
6.6.2	在修改 Gehring & Homberger 示例集上的实验	105
6.6.3	不同参数下的实验	107
第 7 章	考虑动态客户的物流配送区域划分	110
7.1	问题描述	110
7.2	数学模型	111
7.3	子区域稠密度度量	112
7.4	周期间区域划分近似度	113
7.5	旅行商收益平衡度量	113
7.6	子区域配送路径费用近似	113
7.7	元启发式求解算法	115
7.7.1	基本单元定义	115
7.7.2	初始解构造	115
7.7.3	删除与插入算子	116
7.7.4	自适应算子选择机制	117
7.7.5	禁忌占用期	118
7.7.6	多周期动态区域设计	118
7.7.7	接受与停止准则	118
7.7.8	ALNS 元启发式算法总结	119
7.8	实验	119
7.8.1	实验设计	119
7.8.2	实验结果	121
7.8.3	不同参数下的实验	125
参考文献		130
结束语		137

第1章 绪 论

1.1 背景及意义

随着世界经济的快速发展和现代科学技术的进步,现代物流作为现代经济的重要组成部分,已在全球范围迅速发展,并逐渐成为国民经济发展的动脉和基础产业,其发展程度已成为衡量一个国家现代化程度和综合国力的重要标志之一。物流产业被誉为经济发展的“加速器”、产业结构演变的“润滑剂”和现代企业的“第三利润源”。据美国物流研究委员会估计^[1],运输业已占美国国民生产总值的15%。欧洲和北美的大量实际应用表明^[2],对物流系统合理规划以及对配送过程进行优化,可以在物流成本中获得5%~20%的节省,而物流成本在商品最终总成本中占10%~20%。目前我国的物流业仍处于起步阶段,与发达国家存在很大差距,最突出的问题是物流成本较高。例如^[3],2005年中国物流总费用高达33860亿元,占GDP的18.6%,而美国等发达国家物流成本占GDP的10%左右,中等发达国家(如韩国)的比例在15%左右。中国的货物运输成本比西方发达国家高出3倍,物流费用占货品总成本多达30%^[3]。这表明中国物流业的整体水平严重落后,过高的物流成本,制约了国民经济的发展,削弱了企业的市场竞争能力,成为中国企业发展的关键“瓶颈”之一。

同样在军事领域里,纵观过去发生的几场高技术局部战争,无论是伊拉克战争还是利比亚战争,无一不是规模庞大、物资高度繁杂和高效流动的跨国军事物流的战争,军事物流保障系统合理规划、维修保障网络的有效建立以及军事物资的及时运输补给已经成为影响战场作战任务顺利执行,乃至战争胜负的重要环节。20世纪80年代末,以美国为先导的发达国家提出了“配送式后勤”,但因技术水平有限,一直受配送信息不明、网络不畅、运输手段滞后等问题所困。而后1991年,美国国会制定的智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)发展战略规划中指出:ITS的主要目标是应用先进的技术和现代算法方法学来提高运输效率。1996年美军首次提出了主动配送模式,并将其界定为“信息、后勤

和运输技术的融合”。在《2010 年联合构想》中,美军又首次把“配送保障”作为与“主宰机动、精确打击、全维防护”相并列的四大作战原则之一^[4,5],并强调了军民物流的紧密结合。而这些都是建立在完善、高效的物流系统基础之上的。

正是在这样一个背景下,无论是民用领域还是军事领域,都迫切需要建立高效的物流系统,提高配送效率、降低配送成本。物流配送路径的优化以及物流配送区域的合理划分是物流系统优化中的关键环节^[2,6]。对配送路径进行全局规划是物流集约化发展、构建综合物流系统、建立现代调度指挥系统、发展智能交通运输系统和开展电子商务的基础^[7,8];而对配送区域进行合理划分,则可以提高物流配送经济效益、实现物流系统构建的科学化。在军事领域内,对维修保障区域的合理划分,有利于明确维修保障任务范畴与保障人员责任,提高保障力度,对区域内维修保障路径的优化则可提升保障工作时效性,进而保证整个作战任务执行的成功度^[4]。

区域划分是一个战略层面(strategic level)的优化问题,路径优化则是一个作业层面(operational level)的优化问题。在实际生活中,针对物流系统优化问题研究时,往往既需要在战略层面上从物流系统结构上规划好配送区域获得长期收益,又要考虑实际生活需要在操作层面上构建好配送路径获得及时效益,这对企业物流系统决策者来说是一个中长期规划与短期计划相结合的、重要的实际问题,而对于研究人员来说则是一个不同层次不同粒度研究相结合、非常值得研究的理论问题。此外,一般物流优化问题的传统模型和方法都假设物流系统中的相关信息(如客户数、客户需求等)是确定的,且主要是从时间、费用成本、服务满足率等方面做静态系统的优化分析。然而,这些简化假设使得许多应用领域的分析结果与实际结果并不相符,并没有很好地反映出现实生活中各项特性,从而失去了其实际应用价值。现实物流系统中存在着大量的不确定性,如客户随机出现或者位置发生动态变化、客户需求量发生随机变化和多周期变化以及优化决策者的主观偏好等。特别在现代战争中,作战进程空前加快,各类不确定影响因素越来越多,而且信息的量化难度越来越大,在物流操作规模不断扩大的情况下,使得确定性物流系统的优化模型及方法从某种程度上失去了实际意义。因此,传统的优化模型及方法难以适用于随机和动态优化问题的求解,需要进一步研究与之相应的模型及算法来解决随机和动态环境中的物流配送路径优化与配送区域划分中出现的新问题。

综上所述,本书考虑到理论研究意义以及实际应用需求,开展了对在随机环

境和动态环境下的物流配送路径优化与配送区域划分相关问题的研究,无论是在民用技术范围内还是国防关键领域里,无论是在理论研究上还是在实际应用中,都有着非常重要的意义和价值。

1.2 国内外研究现状

本节将介绍研究所涉及的相关问题的国内外研究现状。主要分为两个部分:配送路径优化问题国内外研究现状和配送区域划分问题国内外研究现状。

1.2.1 物流配送路径优化问题国内外研究现状

由于配送路径优化问题的研究和实际的生产生活有着密切的联系,自从配送路径优化问题在 1959 年被 Dantzig^[9] 首次提出后,经过几十年的发展和研究,已经衍生出多种类型的配送路径优化问题,如带时间窗的配送路径优化问题和不带时间窗的配送路径优化问题、开放式配送路径优化问题和闭合式配送路径优化问题、单车库配送路径优化问题与多车库配送路径优化问题、确定性配送路径优化问题与随机配送路径优化问题等。这一节主要介绍带时间窗的配送路径优化问题、需求可拆分服务的配送路径优化问题以及随机配送路径优化问题的国内外研究现状。

1. 带时间窗的配送路径优化研究现状

带时间窗的配送路径问题 (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW) 是在基本配送路径问题基础上添加了时间窗约束衍生而来的,因此可以将带时间窗的配送路径问题定义描述为:配送车辆从物流仓库点出发服务客户,完成客户需求后仍返回仓库点,规定每个客户只能被一辆车服务且仅服务一次,对客户的服务必须在客户事先指定的时间窗内进行,问题的优化目标是如何选择适当的路径,使得在满足一定的约束条件下,目标函数最优。

Desrochers^[10] 针对 VRPTW 问题结合线性规划松弛和列生成法提出一种最优优化算法,并求解了规模为 100 个点的计算实例。Fisher 等人^[11] 将求解 VRP 问题的一种优化算法——最小 K 树法推广到求解 VRPTW 问题,同时指出其只适用于求解时间窗比较宽松的一类问题。

由于 VRPTW 问题属于 NP - Hard 问题,精确算法虽然最终能够找到最优解,但其计算时间会随着规模的扩大而呈现爆炸式增长,从而有可能导致不能在

允许的短时间内找到最优解。因此,不少学者使用启发式算法,通过不断的迭代来搜索到一个时间允许范围内尽可能好的可行解,以求解 VRPTW 问题。

Solomon^[12]于 1986 年对有时间窗约束的配送路径问题的启发式算法开始进行研究。Solomon^[13]将求解 VRP 问题的启发式算法比较系统地应用到了求解 VRPTW 的问题中,同时指出由于时间约束,求解 VRPTW 问题要比 VRP 更加困难。

Kontoravdis 和 Bard^[14]使用了自适应导向性贪婪搜索算法对 VRPTW 问题进行了求解。张丽艳等^[15]、李宁等^[16]尝试了粒子群算法求解 VRPTW 问题。Ropke 和 Pisinger^[17]设计了一种自适应大邻域搜索算法对一类同时取送货的带时间窗配送路径优化问题进行研究。

Tan 等^[18]在其论文里分别使用前向插入启发式算法、禁忌搜索、模拟退火算法以及遗传算法对 VRPTW 问题进行了求解,并将实验结果进行了对比分析。Russell 和 Chiang^[19]采用了一种分散启发式搜索算法。Favaretto 等^[20]应用了蚁群算法对一类含多时间窗限制及客户多次访问要求的配送路径优化问题进行了求解。

Braysy 和 Gendreau^[21,22]在他们的论文里对 VRPTW 问题及各类求解算法进行了较好的归纳和总结。

2. 需求可拆分服务的配送路径优化研究现状

需求可拆分服务的配送路径优化问题(Split Delivery Vehicle Routing Problem, SDVRP)是一种约束松弛的 VRP 问题。它取消了在一般 VRP 中对每个需求点上的需求只能由一辆车服务完成的约束,即可以有两个或两个以上的车辆对需求点进行服务,这一约束松弛可以使得车辆的数量和行驶的费用都得以节省。

SDVRP 问题首先是由 Dror 和 Trudeau^[23]在 1989 年发表的文章中正式提出并定义的。他们对需求和车辆载重进行单元化,即设定每辆车的最大载重量 k ,而每个客户的需求是小于 k 的整数,在此基础上构造了 SDVRP 的整数规划模型,也称为 k -SDVRP 模型,这一模型至今仍是研究 SDVRP 的主要数学模型。他们使用一种节约式插入算法对小规模的 SDVRP 问题实例进行了求解。Dror 和 Trudeau^[23,24]针对 k -SDVRP 模型证明了当 $k > 2$ 时,SDVRP 是一个 NP-hard 难题,并对解的特性进行了研究,证明了在一个 SDVRP 优化解的两条不同路线中最多只会存在一个相同需求点,同时提出了 k -split cycle 的概念,证明了一个

SDVRP 优化解不会存在 k -split cycle, 以上两条定理被后来的研究者作为判断解方案是否优化和可行的一个基本判据。

Dror 等^[25]研究了 SDVRP 问题中所蕴含的各种不等条件并为问题求解设计了一种约束松弛的分支定界算法。Belenguer 等^[26]在非满载范围内提出了降低约束的 SDVRP 整数规划模型,在此基础上为 SDVRP 构建了一个多面体模型,并从这一多面体模型出发对 SDVRP 的多项特性进行了分析,并设计了一种以割平面法为主的混合算法来解决整数规划问题,对包含 50 个需求量相对较小的客户点的问题进行了求解,取得较好的效果。

Sierksma 和 Tijssen^[27]以及 Mullaseril 和 Dror^[28]分别在各自的文章中设计了列生成算法以求解 SDVRP。Archetti 等^[29]指出当平均需求大于 $1/2$ 并小于 $2/3$ 时,利用 SDVRP 模型进行求解所带来的收益程度最大。Archetti 等^[30]探讨了研究 SDVRP 的意义和 SDVRP 应用的条件。

此外,一些研究者还对 SDVRP 进行了扩充,Frizzell 和 Giffin^[31,32]将客户的时间窗口限制引入了 SDVRP,构造了带时间窗的 SDVRP,即 SDVRPTW 问题,并提出了一种两阶段启发式爬山算法来求解 SDVRPTW 问题。在求解算法中,第一阶段通过 DUC(Dynamic Urgency Classification)方法构建路线,第二阶段则利用客户点交换的搜索方式对初始解进行优化,在求解的过程中他们利用道路网络格方式使问题求解得到了一定的简化。

Ho 和 Haugland^[33]提出利用禁忌搜索算法求解 SDVRPTW 的思路,该算法主要分为 3 个阶段:第一阶段通过先安排路径再分组的算法产生初始解,在构造初始解过程中已经包含了需求拆分的步骤,第二阶段对利用禁忌搜索算法对初始解进行优化得到更高质量的解,第三阶段再对得到的解进行路径内的优化,求出最终解。在算法搜索过程中,主要的需求拆分在第一阶段已经确定,在后面的优化过程中只是将拆分的需求当作不同的需求点来对待,并进行部分拆分点的调整,由于算法中的邻域搜索方法不够全面,因此所得到的解并不能保证其需求拆分是优化合理的。最后实验利用所设计的算法对 Solomon 的 VRPTW 标准测试实例进行了计算并取得了满意的结果。

Lee 和 Marina^[34]等人提出了需求可拆分的多车场路径优化问题,即 m -SDVRP,并结合动态规划和最短路径法构造了一种三阶段启发式方法求解 m -SDVRP。Nowak 等^[35]将需求可拆分引入了取送货结合的 VRP 问题,这些问题的提出都丰富了 SDVRP 的研究内容。

国内学者对 SDVRP 的研究是从最近几年才开始的,相关研究较少。谭家美和徐瑞华^[36]采用蚁群算法对标准 SDVRP 问题进行了研究,通过实验证明需求可分所带来的车辆需求数量和总行驶里程下降都比不可分情况下要好很多。侯立文等^[37]研究了同时考虑客户需求可分以及时间窗口限制的 SDVRPTW 问题,使用了蚁群算法对问题求解,并通过计算得到在大规模物流运输下需求可分能带来较好的收益效果。孟凡超等^[38]运用禁忌搜索算法对 SDVRP 问题进行了研究并取得了较好的试验结果。谢毅^[39]在其硕士论文中对 SDVRP 问题的数学模型及解的特性进行了讨论,设计了求解问题的禁忌搜索算法和遗传算法,并通过算例和案例对模型和算法进行了检验。

3. 随机配送路径优化研究现状

实际的配送路径优化问题研究中经常会受到一些随机因素影响,如随机的需求量、随机的车辆行驶时间以及某个客户当天是否有需求等,这些含有随机影响因素的配送路径优化问题都统称为随机配送路径优化问题(Stochastic Vehicle Routing Problem, SVRP)。Gendreau^[40]将随机配送路径优化问题划分为六类子问题:第一类是具有随机客户的旅行商问题(Travel Salesman Problems with Stochastic Customers, TSPSC),顾客以某种概率 p 出现,该问题实际上就是概率旅行商问题;第二类是具有随机旅行时间的旅行商问题(Travel Salesman Problems with Stochastic Travel Times, TSPSTT),顾客是确定的,但是旅行商在顶点间的行驶时间是一个随机变量;第三类是随机旅行时间多旅行商问题(m -TSP with Stochastic Travel Times, m TSPSTT),将具有不确定旅行时间的旅行商问题扩展到 m 辆车,这 m 条行车路线都起始和终止于同一个车场;第四类是客户具有随机需求量的配送路径规划问题(VRP with Stochastic Demands, VRPSD),顾客是确定的,但其需求量是一个随机变量;第五类是具有随机顾客的配送路径优化问题(VRP with Stochastic Customers, VRPSC),顾客以某个概率出现,该问题是对具有不确定顾客的旅行商问题的一般化;第六类是同时具有随机顾客和随机需求量的配送路径规划问题(VRP with Stochastic Customers and Demands, VRPSCD),顾客的出现及其需求量都是随机变量。实质上,这六类子问题按照随机影响因素可归纳为三大类问题^[41]:随机需求下的配送路径优化问题、随机客户的配送路径优化问题以及随机时间的配送路径优化问题。

最早研究随机配送路径优化问题的是 Tillman^[42],他提出了求解随机需求量的配送路径问题的算法,该算法是基于 Clarke 和 Wright 节约型算法,当车辆

空驶或超载时增加相应的惩罚值。

Jaillet^[43]提出了概率旅行商问题(PTSP)的概念,并对其数学模型、上/下界和渐进性能等问题进行了探讨。PTSP不同于传统静态TSP的地方,在于旅行商从驻地出发前并不知道有哪些城市需要访问。任意一个城市,是否需要被访问都是以一个概率给出的。随后,Jaillet提出了一种求解PTSP的预优化两阶段法^[44]:第一阶段,先使用解静态配送路径问题的方法来得到一条预先优化路线;第二阶段当旅行商到达客户点时,则可确定客户点需不需要被访问,对于不需要被访问的客户点,简单地将其从路线中去除而直接去访问下一个需要访问的客户点。

对随机配送路径优化问题研究作出突出贡献的是Bertsimas,他在其博士论文^[45]中研究了PTSP问题以及VRPSC问题的特性,并提出了空间填充曲线、概率2-opt边交换等启发式方法,并对VRPSD问题的上/下界、渐进结果和其他理论特性进行了研究。Waters^[46]针对配送路径问题中非0-1需求的情况,对3种更新策略进行实验分析。

Stewart等^[47]针对VRPSD问题提出了一种机会约束模型和两种补偿规划模型。在第一种补偿模型中,惩罚费用与违反车辆容量约束的概率成正比;在第二种补偿模型中,惩罚费用与超出车辆容量的需求期望值成正比。此外,还考虑了多种随机需求分布情况,设计了两种启发式算法进行测试,一种基于C-W节约算法,另一种基于Lagrangean松弛算法。Laporte等^[48]研究了在一般需求分布下,如何确定配送路径及车场的位置,提出了机会约束模型和有界惩罚模型,设计了一种分支切割算法,对顶点数为30的问题进行了测试,获得了较好的结果。Gendreau^[40]针对VRPSD问题提出了两阶段求解方法。在第一个阶段,先设计一个预先优化的路线。在第二个阶段,车辆达到各客户顶点并获得需求量后,若需求量超过(或达到)车辆的剩余容量,则车辆先返回车场装(卸)货,然后再回到原路径继续服务。Laporte等^[49]针对一类VRPSD问题设计了一种整数L-型算法,求解问题的顶点规模达到了100并获得了不错的结果。Secomandi^[50]采用Roll-Out算法对VRPSD问题进行了求解,与前面大多求解VRPSD问题的预优化策略^[51,52]不同,这种算法采取的是一种重优化策略^[51,52]。Secomandi和Margot^[53]则用了一种新的动态规划方法对相同的问题进行了求解,结果比Roll-Out算法获得解的质量平均提升2.3%。Tan等^[54]通过进化计算对一类多目标VRPSD问题进行求解,并与其他启发式算法进行了对比。Mendoza等^[55]对

一类多隔间 VRPSD 问题设计了一种进化算法求解,取得了不错效果。

在对 VRPSCD 问题研究中,Bertsimas^[45]提出了求解 VRPSCD 的一个补偿整数规划模型,并对上/下界、渐进结果和几种优化策略进行了分析。Gendreau 等^[56]提出了一种可精确求解 VRPSCD 的整数 L 型算法,该算法最多可求解顶点数为 46 的随机顾客和需求量的配送路径问题,另外,该项研究还表明随机顾客的情况比随机需求的情况要复杂得多。Gendreau 等^[57]设计了一种禁忌搜索算法求解 VRPSCD 问题,并获得了较好的结果。

Laporte 等^[58]提出了一类随机旅行时间的配送路径问题的机会约束模型和补偿模型,并用分支切割算法进行求解;Lambert 等^[59]针对银行运款车收集存款实例中的随机行驶时间配送路径优化问题,使用了 Clarke 和 Wright 节约算法^[60]进行求解。Kenyon 和 Morton^[61]研究了随机行驶时间和服务时间的配送路径优化问题,对解的特性进行了讨论,并提出一种结合了分支切割法和蒙特卡洛仿真的求解算法。

国内也是近几年兴起对随机路径优化问题的研究热潮,但大多数研究局限于基本的随机路径优化问题的研究。王芳等^[62]设计了一种求解随机需求配送路径问题的改进的粒子群优化算法,通过实验证明求解效果优于基本粒子群算法和遗传算法。娄山佐和史忠科^[63]针对 VRPSDC 问题,设计一种基于蒙特卡洛和交叉熵法的求解方法。陆琳和蔡绍洪^[64]针对一类 VRPSC 问题,设计了一种蚁群算法,并选用 60 个节点的基准问题对建立的 VRPSC 动态模型进行了仿真计算。郭强和谢秉磊^[65]对随机行驶时间的配送路径优化问题,提出了一个考虑车辆容量的机会约束模型,并构造了求解该模型的遗传算法。张杨等^[66]对一类随机行驶时间的配送路径问题建立了一个考虑堵塞点动态产生且单个堵塞点出现,堵塞时间为随机变量的模型,并采用了 Ford 算法进行求解。李相勇和田澎^[67]研究带随机车辆旅行时间、服务时间以及时间窗的配送路径问题,给出了机会约束模型和带补偿的随机规划模型,设计了基于禁忌搜索的启发式算法,对生成的测试问题给出了算法的计算结果。谢秉磊^[68]的博士论文分别针对随机顾客和需求量的配送路径优化问题、随机行驶时间的配送路径优化问题以及动态随机需求量的配送路径优化问题开展了研究,设计了遗传算法和模拟退火算法等求解算法,并进行了实验测试。

1.2.2 物流配送区域划分问题国内外研究现状

在区域划分领域,国外学者已经开展了许多相关研究。Ferland 和