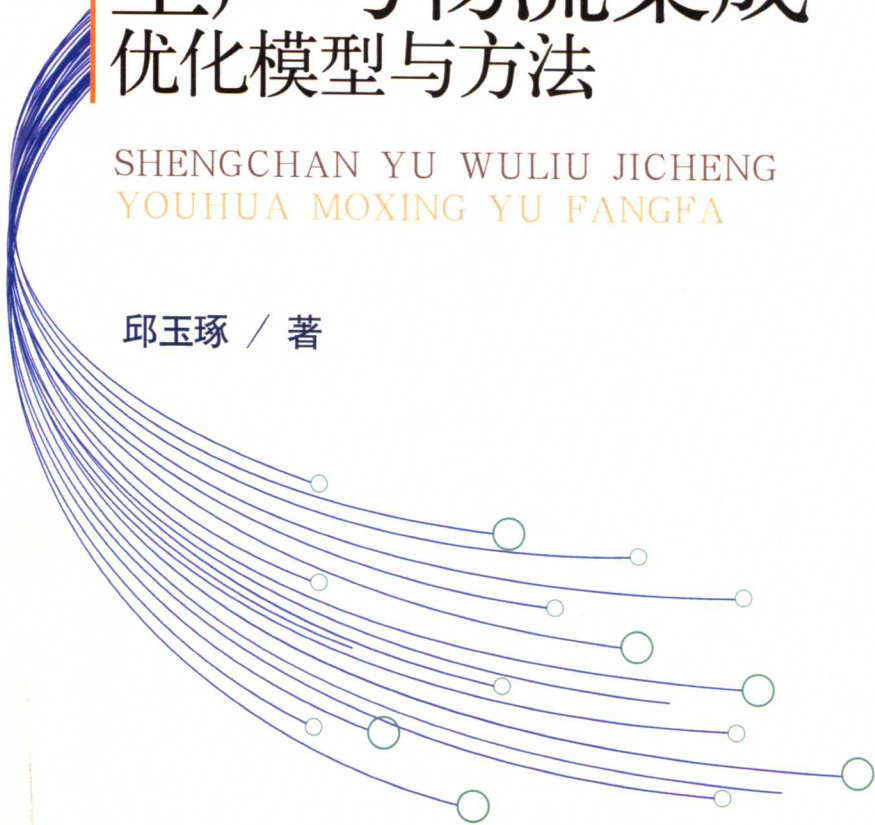


# 生产与物流集成 优化模型与方法

SHENGCHAN YU WULIU JICHENG  
YOUHUA MOXING YU FANGFA

邱玉琢 / 著



非  
外  
借

中国财经出版传媒集团  
中国财政经济出版社

# 生产与物流集成优化 模型与方法

邱玉琢 著

中国财经出版传媒集团  
中国财经出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

生产与物流集成优化模型与方法/邱玉琢著. —北京: 中国财政经济出版社, 2017. 12

ISBN 978 - 7 - 5095 - 7925 - 1

I. ①生… II. ①邱… III. ①物流管理 - 物资配送 - 研究  
IV. ①F252. 14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 310379 号

责任编辑: 马 真

责任校对: 李 丽

封面设计: 秦聪聪

中国财政经济出版社出版

URL: <http://www.cfeph.cn>

E-mail: [cfeph@cfeph.cn](mailto:cfeph@cfeph.cn)

(版权所有 翻印必究)

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮政编码: 100142

营销中心电话: 88190406 北京财经书店电话: 64033436 84041336

北京财经印刷厂印刷 各地新华书店经销

787 × 1092 毫米 16 开 14.75 印张 234 000 字

2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月北京第 1 次印刷

定价: 43.00 元

ISBN 978 - 7 - 5095 - 7925 - 1

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

本社质量投诉电话: 010 - 88190744

打击盗版举报电话: 010 - 88190414 QQ: 447268889

# 前 言

本书旨在系统总结作者近年来在生产与车辆路径集成优化问题建模、分析与求解方面的研究成果，特别是作者主持的国家自然科学基金项目“碳排放约束条件下生产与路径集成优化问题及其算法研究”（批准号：71571092）的有关研究成果。

本书先后研究了包括生产与车辆路径集成优化的一般问题，碳排放限额与交易机制下生产与路径集成优化问题，多产品生产与路径集成优化问题，带时间窗口的生产与路径集成优化问题，易腐品的生产与路径集成优化问题、考虑逆向物流的生产与路径集成优化问题，考虑逆向物流与再制造的生产与路径集成优化问题等在内的生产与路径集成优化问题。本书运用运筹学方法特别是混合整数规划模型及其算法，解决生产与路径集成优化问题，在算法的设计中以目前研究热点中的确切算法为主。在问题导向方面，特别注重考虑环境保护的背景，一方面通过显性地引入碳排放限额与交易机制来解决碳排放约束条件下的生产与路径集成优化问题，另一方面通过考虑逆向物流与再制造、易腐品等，内生地解决绿色、低碳生产与路径集成优化问题。本书可用来指导低碳生产与物流集成、低碳物流的实践。

# 目 录

第一章 绪论 .....	( 1 )
第一节 引言 .....	( 1 )
第二节 问题的提出 .....	( 6 )
第三节 研究目的 .....	( 13 )
第四节 本书的主要内容及结构 .....	( 14 )
本章参考文献 .....	( 15 )
第二章 生产批量模型及其算法概述 .....	( 22 )
第一节 经济批量问题 .....	( 22 )
第二节 动态生产批量问题 .....	( 27 )
本章小结 .....	( 29 )
本章参考文献 .....	( 29 )
第三章 VRP 模型及其算法概述 .....	( 30 )
第一节 车辆路径问题概述 .....	( 30 )
第二节 车辆路径问题的研究现状 .....	( 32 )
本章小结 .....	( 35 )
本章参考文献 .....	( 35 )
第四章 生产与路径集成优化模型及其算法 .....	( 37 )
第一节 引言 .....	( 37 )
第二节 问题描述和模型表述 .....	( 39 )
第三节 可变邻域搜索启发式算法 .....	( 42 )
第四节 计算结果 .....	( 49 )
本章小结 .....	( 55 )

本章参考文献 .....	( 55 )
本章附录 .....	( 58 )
<b>第五章 碳排放限额与交易机制下生产与路径集成优化模型及其 算法 .....</b>	<b>( 68 )</b>
第一节 引言 .....	( 68 )
第二节 文献综述 .....	( 69 )
第三节 生产库存路径集成优化的问题描述和模型 .....	( 70 )
第四节 生产库存路径集成优化中的排放模型与污染生产库存 路径集成优化的数学形式 .....	( 74 )
第五节 列生成数学模型 .....	( 76 )
第六节 分支一定价解决方案 .....	( 79 )
第七节 计算实验 .....	( 82 )
本章小结 .....	( 92 )
本章参考文献 .....	( 93 )
<b>第六章 多产品生产与路径集成优化模型及其算法 .....</b>	<b>( 96 )</b>
第一节 引言 .....	( 96 )
第二节 问题描述和模型表述 .....	( 98 )
第三节 有效的不等式 .....	( 101 )
第四节 分支一割平面算法 .....	( 104 )
第五节 计算结果 .....	( 106 )
第六节 案例分析 .....	( 111 )
本章小结 .....	( 113 )
本章参考文献 .....	( 113 )
<b>第七章 带时间窗口的生产与路径集成优化模型及其算法 .....</b>	<b>( 118 )</b>
第一节 引言 .....	( 118 )
第二节 问题描述和模型表述 .....	( 119 )
第三节 有效不等式 .....	( 123 )
第四节 分支一割平面算法 .....	( 127 )
第五节 计算结果 .....	( 130 )

第六节 案例分析 .....	(137)
本章小结 .....	(139)
本章参考文献 .....	(139)
本章附录 .....	(143)
<b>第八章 易腐品的生产与路径集成优化模型及其算法 .....</b>	<b>(160)</b>
第一节 引言 .....	(160)
第二节 问题描述和模型表述 .....	(162)
第三节 有效不等式 .....	(168)
第四节 分支—割平面算法 .....	(171)
第五节 计算结果 .....	(173)
第六节 案例分析 .....	(179)
本章小结 .....	(181)
本章参考文献 .....	(181)
本章附录 .....	(184)
<b>第九章 考虑逆向物流与再制造的生产与路径集成优化模型及其 算法 .....</b>	<b>(187)</b>
第一节 引言 .....	(187)
第二节 考虑逆向物流的生产与路径集成优化模型及其算法 ...	(187)
第三节 考虑逆向物流与再制造的生产与路径集成优化模型 及其算法 .....	(204)
本章小结 .....	(219)
本章参考文献 .....	(219)
<b>第十章 结论与研究展望 .....</b>	<b>(224)</b>
第一节 结论 .....	(224)
第二节 研究展望 .....	(226)
后记 .....	(228)

# 绪 论

## 第一节 引 言

### 一、研究背景

近年来,我国雾霾天气范围扩大,环境污染矛盾突出,雾霾治理形势越来越紧迫。与此同时,我国物流业保持较快增长,支撑国民经济发展的基础性、战略性产业地位日渐突出。据2014年国务院发布的《物流业发展中长期规划(2014—2020年)》数据显示,我国社会物流总额2013年达到197.8万亿元,按可比价格计算,年均增长11.5%,物流业已成为国民经济的重要组成部分。但货物运输过程中的温室气体排放对PM2.5的贡献也持续增长,是导致雾霾天气的重要原因之一。而治理雾霾最主要的方法是减少排放,因此,在“十三五”时期我国经济“中高速”增长“新常态”下,我国物流业发展面临碳排放约束条件和应对雾霾等空气质量问题的挑战,传统的物流运作模式已难以为继,迫切需要发展低碳集成物流管理理论与方法。

#### (一) 节能减排与发展低碳物流的需要

在经济结构调整和发展方式转型升级的要求下,大力发展低碳物流,对于“新常态”下促进产业结构调整、转变发展方式、提高国民经济竞争力和建设生态文明具有重大意义。



### 1. 物流业能源消耗和碳排放量大

根据《2013年中国能源统计年鉴》测算,我国2012年物流业能源消耗约2.95亿吨标准煤,碳排放量约1.8亿吨。而据美国能源部测算,物流运输约消耗了所有能源的27.8%,其中97%来自石油燃料,而物流运输部门温室气体(GHG)排放量约占GHG总排放量的32.7%。沃尔玛(Walmart)近来还发现其食品杂货店使用冰柜造成的碳排放超过了运输车队的排放,英国最大的零售企业Tesco也发现其26%的直接碳排放来源于冰柜的使用,交通运输所造成的碳排放只占12%。因此,对于物流中碳排放的管理不能仅仅关注车辆运输,还应该考虑生产和库存决策,对碳排放进行集成管理。

### 2. 低碳物流已经成为物流发展的必然趋势并得到业界的高度重视

欧盟和很多国家已经立法或建立了限制碳排放总量的政策,其中碳排放交易是最有效的市场机制之一,为欧盟和很多国家所采用,全球已有20多个交易平台。现在澳大利亚、加拿大、日本、美国也已经开始建立碳排放交易市场。与此相呼应,沃尔玛和欧盟的很多大型零售企业不仅自身将减少碳排放作为企业管理的目标,还要求其供应商等供应链成员企业加入遵守碳排放协议的企业联盟。这些实践促使低碳物流成为业界的发展趋势,也提高了我国企业加入全球化竞争的准入门槛。《物流业发展中长期规划(2014—2020年)》也提出,“鼓励采用节能环保的技术、装备,提高物流运作的组织化、网络化水平,降低物流业的总体能耗和污染物排放水平”,“鼓励采用低能耗、低排放运输工具和节能型绿色仓储设施”,“鼓励生产者、再生资源回收利用企业联合开展废旧产品回收”。

因此,按照我国建设生态文明的要求,企业必须加快运用先进运营管理理念,不断提高信息化、标准化和自动化水平,促进一体化运作和网络化经营,大力发展低碳物流,推动节能减排,切实降低能耗、减少排放、缓解交通压力,把包括PM2.5在内的污染排放绝对量较快地降下来。

### (二) 协同计划与发展集成物流的需要

物流业是融合运输、仓储、货代、信息等产业的复合型服务业,因此,物流管理需要多主体协同,其各个环节需要进行集成管理。而当前我国与发达国家在集成物流管理理论研究和应用水平上还有较大差距。虽然近年来我国物流产业规模快速增长,服务能力显著提升,技术装备条件明显改善,基础设施网络日趋完善,已步入转型升级的新阶段,但物流业发展总体水平还不高,发展方式比较粗放,主要表现为物流成本高、效率低。2013

年全社会物流总费用与国内生产总值的比率高达 18%，高于发达国家水平 1 倍左右，也显著高于巴西、印度等发展中国家的水平。此外，企业自营物流比重高，物流企业规模小，先进技术难以推广，物流标准难以统一，迂回运输、资源浪费的问题突出。导致以上问题的原因主要是，在传统的管理模式下，物流中各环节是分散决策的。生产和库存计划的建立均未考虑实际需求发生的时间、地点及其配送安排，从而必然带来迂回运输、空返和资源浪费等问题。

随着经济全球化趋势深入发展，网络信息技术革命带动新技术、新业态不断涌现，越来越多的管理者开始认识到，在生产、仓储、运输货物的车辆路径安排之间存在相互依赖的关系，应该充分利用新兴网络和信息技术对物流活动进行综合优化与集成管理。在新的管理模式下，企业按需生产，在做出生产、库存决策的同时考虑货物的车辆路径安排，必然会减少迂回运输、空返，降低资源浪费。

### （三）生产一路径集成理论与实践发展的需要

我国关于集成物流管理的研究由来已久，近年来也取得了一定的成果。随着电子商务的发展和全球化竞争的加剧，企业按需生产、零库存管理、准时制的实践对及时、高效的配送提出了更高要求，此时生产、库存与车辆路径的协同决策就尤为重要了。本项目提出的碳排放约束条件下生产与路径的集成优化，是在前人研究的基础上，以新兴的网络和信息技术为基础，结合碳排放规制所提出的一种全新的低碳集成物流管理理论。

以新兴的网络和信息技术为基础进行集成物流管理，被认为是提高物流效率、降低物流成本、实现产业升级的有效手段和方法。当前，国内外均结合物流管理实践对集成物流管理展开研究，探索有关的管理理论与方法。集成物流管理的研究主要集中在两两集成的选址一路径问题（Location Routing Problem, LRP）、库存一路径问题（Inventory Routing Problem, IRP）、选址一库存问题（Location Inventory Problem, LIP）以及三者综合集成的选址一库存一路径问题（Location Inventory Routing Problem, LIRP）等。

本项目研究的生产一路径集成优化问题是在库存一路径问题（IRP）中引入生产批量决策，可以使库存管理、配送管理与生产批量决策相协同，从而进一步降低物流系统的成本。IRP 作为生产一路径集成优化问题研究的基础，在过去十年中得到了非常多的关注，广泛应用于海事物流中，也应用于天然气、汽车零部件、易腐品、水泥、燃料、血浆和有机油配送等非

海事产业中。因此，生产一路径集成优化方法也有广阔的应用领域。已经有学者从理论上证明了生产与路径集成优化可以大大降低成本。在管理实践中，年销售总额 70 亿美元的凯洛格（Kellogg）通过部署生产和配送集成计划系统每年节约成本 4000 万美元。可口可乐旗下生产薯片的菲多利（Frito-Lay）公司通过部署生产库存和配送系统，节约了 10% 的物流成本。《物流业发展中长期规划（2014—2020 年）》也提出，“支持建设与制造业企业紧密配套、有效衔接的仓储配送设施和物流信息平台”，“鼓励传统运输、仓储企业向供应链上下游延伸服务，建设第三方供应链管理平台，为制造业企业提供供应链计划、采购物流、入厂物流、交付物流、回收物流、供应链金融以及信息追溯等集成服务”，“鼓励物流企业与制造企业深化战略合作，建立与新型工业化发展相适应的制造业物流服务体系，形成一批具有全球采购、全球配送能力的供应链服务商”。

因此，从科学研究、企业管理实践及全球应对气候变化和环境污染的挑战来看，除了物流各环节的集成，进一步将生产决策与物流集成起来，研究在碳排放约束条件下生产与路径的集成优化，是未来的研究趋势和实践发展方向。

鉴于上述情况，本项目提出了碳排放约束条件下生产与路径集成优化问题及其算法研究，借助于碳排放规制、低排放车辆（Low Emission Vehicles, LEVs）混合车队、逆向物流管理等，解决低碳集成物流管理问题，采用整数规划、动态规划、随机规划等建模方法，解决生产与路径的集成优化问题，通过平衡生产与路径选择中的运作成本与碳排放规制成本，实现低碳物流集成优化。选择以上几个方面进行研究是出于如下考虑：生产与路径集成优化中最难解决的问题就是动态生产批量、随机库存管理、车辆路径选择这三个部分的集成，之所以难以解决就是因为生产、库存决策是动态的，构成了问题的时间维度，而车辆路径选择是 NP 困难（NP-hard）的组合优化问题，构成了问题的空间维度，适宜的整数规划、动态规划、随机规划形式模型是解决生产与路径集成优化“时空复杂性”的关键所在。而低碳物流中，碳排放规制政策、LEVs 管理、逆向物流管理等问题也日趋重要。融入碳排放约束条件后，不仅带来了新的约束条件，还引入了新的决策变量，改变了目标函数的结构，使得问题更加难以解决。基于以上原因，本项目选择碳排放规制下、LEVs 混合车队和逆向物流中的生产与路径问题，并构建确定型、随机型、动态随机型模型进行研究，以期提出有效

的低碳集成物流管理和控制方法。

## 二、研究意义

本项目研究符合低碳物流发展要求,面向集成物流管理,综合运用整数规划、动态规划、随机规划建模方法,提出碳排放约束条件下生产与路径集成优化的有效协同管理和控制方法,实现低碳物流、智慧物流,具有重要的理论与实践意义。

### (一) 为解决物流中的碳排放问题提供了新的研究视角

本项目研究具有重大的战略意义,我国集成物流管理水平低、碳排放问题突出,低碳集成管理需求强烈。碳排放约束条件下生产与路径集成优化的长处在于综合考虑了生产、库存与配送环节中的碳排放,将这些环节的总运作成本与总排放规制成本综合平衡,对这些环节的碳排放实施有效的管理,可以明显地提高物流的集成管理和低碳发展水平,为解决物流中的碳排放问题提供新的理论与方法。从管理实践上来看,可以指导企业和供应链选择环境友好的生产批量、库存批量和路径选择协同优化决策,有助于企业降低成本,提高协作效率,提升企业和供应链的核心竞争力,并从根本上降低企业和供应链的能源消耗及其对环境的污染,提高企业和供应链的可持续发展能力。

### (二) 有助于创新生产与路径集成优化理论与方法

本项目将以低碳物流中的碳排放规制、LEV<sub>s</sub>管理、逆向物流管理等问题为导向,借助于整数规划、动态规划、随机规划理论及其确切算法和启发式算法,解决生产与路径集成优化中的时空复杂性问题,创造性地提出低碳物流生产与路径集成优化理论。从管理实践上来看,有助于指导企业和供应链合理利用物联网环境提供的动态在线信息,缩短企业决策周期,提高企业反应速度,实现在线实时优化管理,对于提高我国物流的自动化、智能化和低碳化管理水平具有很大的推动作用。

### (三) 有利于创新物流研究方法,丰富低碳物流集成管理知识体系,提高低碳集成物流管理水平

在生产与路径集成物流管理中以低碳为导向,而不是仅以物流运作成本最小化为目标,是生产与路径集成优化研究中的方法创新。在生产与路径集成优化中引入碳排放规制、LEV<sub>s</sub>混合车队、逆向物流,丰富了低碳物流集成管理知识体系。本项目的研究成果预计可以运用到碳排放约束条件

下企业的生产与路径集成管理中，提高企业的低碳集成管理水平，减少物流碳排放，提高物流效率，弥补传统的以牺牲环境为代价的发展模式的缺陷，满足“新常态”下低碳物流发展的需要。

## 第二节 问题的提出

### 一、国内外研究现状

集成管理和绿色管理一直是学术界广大学者关注的热点问题。有学者认为：集成优化已成为物流系统优化的趋势，而面对气候变化与环境保护问题以及即将出台的国家相应法律法规，低碳集成物流管理也成为制造商与物流服务商的社会责任。其中，生产与路径问题是最近才引起学者关注的集成物流管理前沿热点问题。

生产与路径问题，英文文献通常表述为 Production Routing Problem、Production Inventory Routing Problem、Production Inventory Distribution and Routing Problem 三种主要形式，本项目采用的表述为 Production Routing Problem (PRP)，即生产与路径问题。PRP 涵盖了三个环节，在生产、库存环节需要解决的是生产和库存批量问题 (Lot - Sizing Problem, LSP)，在配送环节需要解决的是车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP)。因此，VRP 和 LSP 构成了 PRP 的研究基础。此外，库存—路径问题 (IRP) 将库存管理与路径选择集成起来考虑，更进一步为研究 PRP 提供了参考借鉴。

因此，为了更好地厘清和准确地把握碳排放约束条件下生产与路径集成优化相关问题的研究现状，项目组从批量问题、车辆路径问题、库存—路径问题、生产路径 (Production Routing) 等关键词出发，选择 Elsevier、Springer、Wiley - Blackwell、EBSCO、Emerald、中国期刊网等数据库和 GERAD Tech. Rep、CIRRELT Tech. Rep 等工作论文进行文献的深度检索，搜索到了 150 多篇与碳排放约束条件下生产与路径集成优化问题及其算法研究相关的文献。国内外研究分析的具体逻辑路线如图 1-1 所示，其中，实线部分是和本项目吻合度较高的文献分析。因此，本项目着重对这几类问题的相关文献进行更深入的分析 and 归纳。

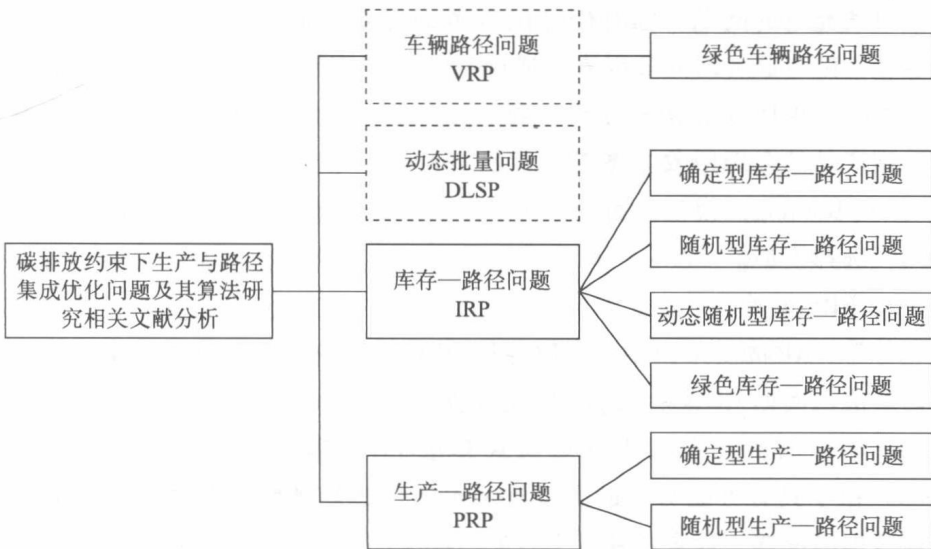


图 1-1 国内外研究分析逻辑路线

## (一) 车辆路径问题

### 1. VRP 和绿色 VRP

自从 Dantzig 和 Ramser 提出具有载重量限制的车辆路径问题 (CVRP), VRP 就成为运筹管理领域中的核心问题之一。VRP 除了经典的 CVRP, 还有很多变形, 包括时变 VRP、随机 VRP、周期性 VRP、动态 VRP、需求可拆分 VRP、开放式 VRP、模糊 VRP、广义 VRP、LRP、IRP、绿色 VRP 等。这些不同类型的 VRP, 往往和时间窗口、空载等约束条件相结合, 形成更复杂的 VRP。

在各种 VRP 中, 近来引起广泛关注的是绿色 VRP (Green - VRP)。该问题主要又可分为三类, 即污染路径问题 (Pollution Routing Problem)、零排放车辆 (Zero Emission Vehicle, ZEV) VRP 和逆向物流中的 VRP。在污染路径问题中, 一般假设碳排放成本即二氧化碳排放量与燃料消耗量成正比, 而单位时间燃料消耗量一般取决于速度和车辆载重量。该问题中目标函数一般包括运营在途成本、排放成本和驾驶员成本。Koc 等人采用元启发式算法求解了包含异质车队的污染路径问题。Tiwari 和 Chang 则使用了基于距离的方法计算二氧化碳排放, 并考虑了车辆载重因素, 设计了基于簇的再组合方法求解绿色 VRP。在零排放车辆 VRP 中, 由于零排放车辆的燃料或电力往往不能覆盖整个行程, 所以存在运输途中到替代燃料站 (AFS) 补

充燃料或充电的问题。已有研究没有考虑异质车辆、燃料站或充电站的燃料容量、随机服务时间等因素。逆向物流中的 VRP 则主要研究回收点的合理设置、垃圾回收的合理方案、废品循环利用的合理网络设计方案、寿命期已到产品的合理回收方案等, 但已有研究没有使用更符合现实的路段路径 (Arc Routing) 模型, 而且针对多层级配送系统采用的是选址模型, 而不是路径选择模型。

## 2. VRP 的算法

尽管 VRP 的变形很多, 求解各种 VRP 的方法主要可分为启发式算法和确切算法, 例如 Clark - Wright 启发式算法和 Christofides - Eilon 分支定界算法等。早期的研究多集中在启发式算法上, VRP 确切算法 (Exact Algorithm) 由于具有可证明为最优 (Proven Optimal) 的特性, 并且可以为启发式算法提供依据, 近来得到了学者的广泛关注。

学者们提出了很多 VRP 形式 (Formulation), 但只有几种形式被用来导出确切算法。Lysgaard 等人改进了 Laporte 等人提出的双下标车辆流 (Vehicle Flow) 形式和分支一割平面 (Branch and Cut) 算法。这种形式的模型, 可以通过进一步加入有效约束条件 (Valid Inequalities) 强化, 从而获得更理想的下界。这些约束条件包括: 取整容量 (Rounded Capacity)、广义容量 (Generalized Capacity)、限定容量 (Framed Capacity)、VRP 梳约束条件 (Comb Inequalities) 等。Baldacci 等人则提出了 VRP 的商品流 (Commodity Flow) 形式及其分支一割平面算法。Fukasawa 等人将车辆流形式与 Agarwal 等人提出的集合划分 (Set Partitioning) 形式相结合, 还采用了 Letchford 等人以及 Lysgaard 等人所提出的有效约束条件来强化所得到的模型, 并设计了相应的分支一割平面一定价 (Branch - Cut - and - Price) 算法。Baldacci 等人则基于集合划分形式, 采用了对车辆流形式和集合划分问题有效的约束条件来强化所得到的模型。最近, Baldacci 等人通过  $ng$ -路径松弛、引入新的有效约束条件和新的定价策略进一步改进了 Baldacci 等人的模型。

### (二) 动态批量问题

除了 VRP 之外, Wagner 和 Whitin 提出的动态批量问题 (Dynamic Lot Sizing Problem, DLSP) 也是运营管理领域中的核心问题之一。大部分研究都是在 Wagner - Whitin 算法的基础上设计各种启发式算法。近来有学者开始寻求 DLSP 的确切算法。例如, Belvaux 和 Wolsey 开发了离散时间 DLSP 的建模和优化原型系统 bc - prod, 该系统采用了分支一割平面算法来求解对

应的混合整数规划。Lulli 和 Sen 则为一个随机批量问题建立了多阶段随机整数规划模型, 并设计了相应的分支一定价 (Branch and Price) 算法。最近, Degraeve 和 Jans 为具有生产能力限制和考虑生产准备时间的 DLSP 建立了 Dantzig - Wolfe 分解模型, 并设计了相应的分支一定价算法。

### (三) 库存一路径问题

在上述研究基础上, 有学者开始将配送问题与库存批量问题集成起来, 研究库存配送联合优化问题。Teo 和 Shu 则集成了运输和多层级库存成本函数来研究无限时间范围的配送网络设计问题。在库存配送联合优化问题中, IRP 在过去十年得到了非常多的关注。该问题考虑了库存和车辆路径选择决策的集成, 以联合优化总的库存与路径选择成本。

#### 1. 确定型库存一路径问题

在早期研究确定型 IRP 时, Burns 等人首先分析了运输成本与库存成本之间的权衡取舍。Blumenfeld 等人则考虑了运输、库存和生产准备成本三者之间的平衡。Anily 和 Federgruen 提出了 IRP 问题的第一个簇算法。Viswanathan 和 Mathur 提出静态嵌套联合库存策略求解多产品 IRP。Chan 等人提出了固定分区策略, 并进行了最坏情形分析。最近, Benoist 等人提出使用随机局部搜索来处理现实的 IRP。由于 IRP 问题的复杂性, 这些研究大多采用了启发式算法。

近来有学者开始寻求 IRP 的确切算法。Archetti 等人开发了分支一割平面算法求解单车 IRP, 并分析了三种不同的客户库存策略: 第一种是库存至目标库存水平 (Order - up - to Level, OU) 策略, 即客户的订货量刚好可以使其库存回到预先设定的目标水平; 第二种是最大库存水平策略 (Maximum Level, ML), 即允许任意大于零的交货量但每个客户的库存不能超过其最大库存水平; 第三种策略与 ML 类似, 但没有设定客户的最大库存水平。Solyali 和 Sural 提出了库存策略为 OU 的单车 IRP 的最短路径网络表现形式, 使用了与 Archetti 等人类似的分支一割平面算法。Grønhaug 等人研究了液化气的海上 IRP, 并使用了分支一割平面算法来求解。Engineer 等人考察了单一产品海上 IRP, 并使用了分支一割平面一定价算法来求解。最近, Michel 和 Vanderbeck 针对单一产品取货 IRP 开发了截断 (Truncated) 分支一割平面一定价算法。

#### 2. 随机型库存一路径问题

在随机需求环境下, Federgruen 和 Zipkin 较早地研究了考虑库存和短缺



成本的 IRP。Federgruen 等人将前述研究拓展到多商品情形，并考虑了商品的易腐性。Minkoff 提出了基于 Markov 决策模型的启发式算法。Berman 和 Larson 使用了动态规划求解需求概率分布已知的 IRP。Adelman 使用了最优对偶价格来近似当前决策的未来成本，以求解随机 IRP。Hvattum 等人则使用了情景树来刻画有限时间范围的随机 IRP。Solyalı 等人在动态不确定需求情景下引入了鲁棒 IRP，使用鲁棒优化方法建立了鲁棒混合整数规划模型，并设计了相应的分支—割平面算法。Yu 等人研究了需求可拆分的随机 IRP，并开发了包含将非线性约束条件线性化、Lagrangian 松弛分解和局部线性化等方法的混合算法。最近，赵达等人则研究了无车辆配送容量约束条件随机 IRP 的送奶路线配送策略和考虑车辆配送容量约束条件随机 IRP 的最优策略形式。

### 3. 动态随机型库存一路径问题

在动态 IRP 中，客户需求随着时间逐渐揭示，即在每一个时期末，必须根据可得信息重复求解该问题。Ghani 等人对实时车辆路径问题进行了综述，提出了开发新一代快速在线算法解决不确定性问题的需求。在动态随机型 IRP 中，客户需求不仅随着时间逐渐揭示，而且也只知道其概率分布。目标是最小化总的库存、配送和短缺成本。Bertazzi 等人研究了动态随机型 IRP 中的 OU 策略，Coelho 等人则研究了动态随机型 IRP 中的 OU 策略和 ML 策略，并比较了两者的成本。

### 4. 绿色库存一路径问题

除了对基本 IRP 问题的研究，也有少数学者开始关注绿色 IRP 问题的研究。Alkawaleet 等人首先使用混合整数规划模型研究了具有碳排放约束条件的 IRP，并采用了禁忌搜索算法来求解。Al Shamsi 等人则建立混合整数非线性规划模型研究了易腐品的绿色 IRP，发现通过集成管理可以减少 61% 的碳排放，并减少 23% 的空返。

### （四）生产一路径问题

在 IRP 中，生产批量是作为已知参数引入的，生产与库存、生产与配送的协同优化被忽略了。当将生产批量作为决策变量引入 IRP 之后，IRP 就变成了生产与路径问题（PRP），除了库存与配送之间的协同，生产与库存、生产与配送的协同也得到了很好的解决。从 20 世纪 90 年代研究生产、库存与配送联合优化开始，PRP 在过去几年中得到了越来越多的关注，逐渐向广泛深入的研究主题拓展，即从确定型 PRP 向多车辆、随机型 PRP 拓展。