



多产品联合补货与 配送调度：

理论、模型、算法与仿真

王 林 刘 瑞 / 著



科学出版社

多产品联合补货与配送调度： 理论、模型、算法与仿真

王 林 刘 瑞/著

华中科技大学文科学术著作出版基金资助
国家自然科学基金面上项目（71371080）资助

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

随着大数据时代的到来,利用现有数据进行合理规划,为企业现实运作提供科学的决策支持,越来越受到重视。联合补货是众多补货策略中极为重要的一种,本书以联合补货策略为主干,协同考虑配送活动,构建多种实用的决策模型并设计高效稳定的求解算法。第一,对联合补货问题、联合补货与配送调度协同优化问题进行简要的分析;第二,研究了三种存在资金约束、基于商品相关性和不确定环境下的联合补货模型及其求解算法;第三,设计了基于定界算法和变邻域搜索的方法对基本联合补货与配送模型的求解过程;第四,研究了需求随机、允许缺货环境下的联合补货与配送优化模型;第五,构建了存在数量折扣和资源约束的联合补货与配送模型并设计求解算法;第六,构建了多中心仓库的联合补货与配送模型并设计求解算法;第七,研究了动态需求下联合补货与配送模型。这些研究成果可帮助企业提升整体运营管理水平。

本书适合从事运营管理、物流管理、优化算法研究和教学的学者及研究生阅读,也可以作为企业运营管理和物流管理人员的学习与培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

多产品联合补货与配送调度:理论、模型、算法与仿真/王林,刘瑞著.
—北京:科学出版社,2018.11

ISBN 978-7-03-059308-5

I. ①多… II. ①王… ②刘… III. ①物资配送-物流管理-研究
IV. ①F252.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第247560号

责任编辑:徐倩/责任校对:贾娜娜
责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第一版 开本:720×1000

2018年11月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:210 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



作者简介

王林，男，华中科技大学管理科学与工程专业博士、计算机技术专业博士后，现为华中科技大学管理学院教授、博士生导师。主持国家自然科学基金面上和青年项目 3 项、国家自然科学基金重点项目子课题 1 项；出版专著 1 本，以第一作者或通信作者发表 SCI/SSCI 期刊论文 40 余篇和中文重要期刊论文 20 多篇，其中包括 ESI 热点和高引用论文 10 余篇；多次获得省级科技进步奖、省级高等学校人文社会科学研究优秀成果奖、全国电力行业管理创新奖、省优秀博士、硕士、学士论文指导奖、全国大学生物流设计大赛一等奖指导奖；曾主持或者作为技术负责人完成多项与中国广核集团有限公司、中国长江电力股份有限公司、国家电网有限公司、河南中烟工业有限责任公司、中国石油化工集团公司等企业合作的管理咨询和信息系统开发项目；主要研究方向：智能优化算法、物流与供应链管理、大数据商务分析等。

刘瑞，男，华中科技大学管理科学与工程专业博士，现为哈尔滨工业大学-深圳市房地产评估发展中心博士后研究人员；先后参与国家自然科学基金重点项目 1 项，国家自然科学基金面上项目 2 项，发表 SCI/SSCI 期刊论文 6 篇；主要研究方向：供应链管理、人工智能及其应用。

前 言

本书是王林主持的国家自然科学基金面上项目“基于改进量子进化算法的不常用备件联合补货与配送调度协同优化研究”(批准号: 71371080)主要研究成果之一。

联合补货(joint replenishment, JR)是众多补货策略中极为重要的一种,通过平衡订货成本与库存成本之间的矛盾,达到更优的补货效果。进行补货活动的同时不可避免地要涉及配送规划,对补货和配送过程进行协同优化,可提升整体运营管理水平。本书以联合补货策略为主干,协同考虑配送活动,并对其进行多方向的扩展研究。在深入研究基本联合补货与配送(joint replenishment and delivery scheduling, JRD)模型基础上,提出了更优的求解方法,并将基本联合补货与配送模型拓展为更加通用化的模型,如存在数量折扣与资源约束的联合补货与配送模型,多中心联合补货与配送模型,以及动态需求联合补货与配送模型。此外,针对新提出的数学模型设计了有效的求解算法。本书的主要内容如下。

第1章,对联合补货问题、联合补货与配送调度协同优化问题进行简要的分析。

第2章,研究了存在资金约束、基于商品相关性和不确定环境下的联合补货模型及其求解算法。资金约束下的联合补货模型在推导出决策变量界限后,利用简单有效的差分进化算法(differential evolution algorithm, DE)进行寻优;基于商品相关性的联合补货模型则是利用直接分组策略与间接分组策略相结合,再利用差分进化算法求解,得出较优的补货策略与对应的总成本,同时通过敏感性分析得出有益的管理启示;针对不确定管理决策环境,设计了带有次要订货成本和库存持有成本为模糊参数的联合补货模型,该模型为相关机会规划模型。为更好地计算可信性,设计了更精确的模糊模拟新方法,嵌入差分进化算法设计了智能求解新算法,并获得较满意的效果。

第3章,针对当前对基本联合补货与配送模型求解方法研究不足的情况,通过深入挖掘模型数学性质,并将其融入寻优过程,提出了基本 JRD 模型优良下界的定界算法。之后,为进一步降低总成本,将该算法嵌入一个新设计的多种邻域结构的变邻域搜索算法(variable neighborhood search, VNS)中用于求解基本 JRD 模型。大量数值实验结果表明,无论是大规模算例,还是小规模算例,定界算法都能得到非常优良的下界,同时变邻域搜索算法结果总是优于当前最好启发式算法和亚启发式算法。

第4章，研究了需求随机、允许缺货环境下多企业多产品联合补货与配送集成优化模型。根据模型最优化性质，设计了基于混合差分进化算法(hybrid differential evolution, HDE)的求解算法。数值实验结果显示，混合差分进化算法效果优于进化差分算法、标准差分进化算法及目前最佳的启发式算法。混合差分进化算法实现难度低，在精度、稳定性方面性能良好。

第5章，构建了存在数量折扣与资源约束的联合补货与配送模型。通过挖掘新建模型数学特征提出两个求解算法：基于启发式算法RAND算法的改进算法和基于定界规则的禁忌搜索(tabu search, TS)算法。大量数值实验结果表明，无论是大规模算例还是小规模算例，两种算例都能得到满意的结果。同时，从实验结果中可以看出，当资源约束较为宽松或者模型规模较小时，数量折扣起到了降低成本的作用，而当模型规模较大时，资源约束限制明显，数量折扣作用减弱。

第6章，针对现实补货中往往存在多个中心仓库的情况，考虑中心仓库的选择问题，构建了多中心联合补货与配送模型。同时，设计了两种求解算法：禁忌搜索-RAND算法和自适应差分进化算法。数值实验结果表明禁忌搜索-RAND算法效果较好，而自适应差分进化算法只适合处理小规模模型。此外，由于存在着更加灵活和更低成本的选择，多中心仓库JRD模型成本显著低于基本JRD模型成本。

第7章，针对补货需求随着周期不断变化的情况，构建了动态需求下联合补货与配送模型。研究通过分析数学模型内在性质，在综合平衡订货成本、库存成本及配送成本的基础上，设计了一种四阶段的启发式求解算法。大规模数值实验表明，四阶段算法结果优良并且求解效率远高于经典数学规划方法。此外，研究对主要订货成本和次要订货成本对总成本及算法效率的影响进行了深入讨论。

王林、刘瑞

2018年1月

目 录

前言

1 联合补货及其拓展问题分析	1
1.1 引言	1
1.2 联合补货问题分析	2
1.3 联合补货与配送问题分析	7
1.4 本章小结	10
2 联合补货模型与求解算法	12
2.1 经典联合补货模型概述	12
2.2 资金约束下的 JRP 模型与算法	13
2.3 基于商品相关性的联合补货模型与算法	19
2.4 不确定环境下的联合补货模型与算法	26
3 确定性 JRD 模型的求解算法	42
3.1 基本 JRD 问题描述	42
3.2 数学模型描述	43
3.3 模型下界与决策变量界限分析	47
3.4 定界启发式算法与变邻域搜索算法设计	52
3.5 实验验证与分析	57
3.6 本章小结	64
附录 3-1 基本 JRD 模型通用性说明	64
附录 3-2 部分数值实验数据及结果	66
4 随机 JRD 模型与求解算法	70
4.1 模型构建	70
4.2 求解算法设计	72
4.3 算例及结果分析	73
5 存在数量折扣与资源约束的 JRD 模型及算法	81
5.1 问题提出	81
5.2 数学模型构建	82
5.3 决策变量界限分析	85
5.4 模型求解算法设计	88

5.5	实验检验与分析	94
5.6	本章小结	101
	附录 5-1 部分数值实验数据及结果	101
6	多中心仓库 JRD 模型及算法	107
6.1	问题提出	107
6.2	数学模型构建	108
6.3	决策变量界限分析	111
6.4	模型求解算法设计	112
6.5	实验检验与分析	116
6.6	本章小结	121
7	动态需求联合补货与配送模型及算法	123
7.1	问题提出	123
7.2	数学模型构建	124
7.3	启发式求解算法设计	128
7.4	实验检验与分析	138
7.5	本章小结	146
	参考文献	147
	后记	157

1 联合补货及其拓展问题分析

1.1 引言

随着大数据时代的到来,如何利用现有数据进行合理规划,为企业现实运作提供决策支持,越来越受到重视。从企业现实运作来看,随着经济的不断发展,竞争日益激烈,建立一个高效的供应链是摆在眼前的重要任务。然而,由于生产总量巨大、生产品类众多,同时需求量巨大,需求碎片化,现有供应链效率低下,远远不能满足需要。这其中涉及生产、配送、库存等多方面问题。为了解决这些问题,配送中心应运而生。配送中心可以有效减少生产与消费之间的流通环节,降低客户库存,提高客户满意度,也会产生规模效应。例如,很多大型公司建设大量配送中心。京东、沃尔玛、顺丰等都在全国各地建设了多个大型配送中心。但这并没有从根本上解决供应链效率不高,成本不低的尴尬局面。仅仅从物流方面来看,来自中国物流与采购联合会数据显示,2014 年我国社会物流总费用为 10.6 万亿元,同比增长 6.9%,占 GDP (gross domestic product, 国内生产总值)的比重不仅高于美国、日本、德国等经济发达国家,而且跟经济发展水平基本相当的金砖国家相比也偏高。例如,印度为 13.0%,巴西为 11.6%。而 2015 年我国社会物流总费用为 10.8 万亿元,社会物流总费用占 GDP 的比重为 16.0%。由此可见,尽管我国企业对包括物流在内的供应链体系不断改进与优化,但和发达国家的水平相比仍有较大差距。随着目前国内物流业的迅猛发展及全球补货的兴起,很多大型连续生产企业都面临着巨额的库存与配送成本,在这种背景下,迫切需要进行协调供应链各个环节成本的相关理论研究,以达到整个供应链决策的更优。

联合补货策略,即从同一个供应商处或不同供应商处但向同一供应地进行补货时,各商品通过联合补货,从而达到分摊主要订货成本、节省补货总费用的目的策略。目前,联合补货策略,无论是在理论上还是在实践中都被证实可以显著降低企业的补货与库存成本。但是联合补货策略相对于整个供应链管理策略来说,较为独立,远不能达到对整个供应链的整体优化。例如,联合补货问题(joint replenishment problem, JRP)并没有涉及配送的优化,也没有全面考虑供给端与消费终端的协同。而且,即使少量研究在联合补货策略的基础上也考虑了配送,但多假设单周期、需求确定不变、无资源约束或忽略配送路径等,假设条件过于严格,并不能满足现实需要。另外,由于大部分联合补货策略及其扩展模型

已被证明是一个 NP-hard (non-deterministic polynomial hard) 问题, 这意味着很难找到有效的算法来求解这些问题, 特别是联合补货策略与配送策略相结合的协同优化问题, 求解方法仅仅限于少量启发式算法与一些人工智能优化算法, 连求解结果的优劣都无法衡量。

在这种背景下, 本书主要着力于对联合补货策略与配送策略的协同优化进行研究, 从供应链视角出发, 对补货、库存、配送等环节进行集成优化研究, 构建更能满足现实需求的模型, 如带资源约束、带数量折扣、多配送中心和多周期等扩展模型; 针对高度复杂的模型, 设计高效的启发式算法和通用性高的人工智能优化算法, 如针对基本 JRD 模型设计的定界启发式 (bound heuristic, BH) 算法, 针对动态联合补货与配送问题设计的四阶段启发式算法等; 进而分析不同环境中, JRD 协同策略的效果。

本书在理论上将完善基于 JRD 的协同优化和求解算法的研究。在应用上具有较强的实用价值, 提供多种 JRD 模型供决策者选择, 此外每种模型给出对应优化算法, 为企业提供更优的辅助决策。

1.2 联合补货问题分析

1.2.1 基本联合补货问题

联合补货策略是库存领域一个极为重要的策略。在联合补货过程中, 多种商品被补货, 当至少一种商品被订购时将发生一次主要订货成本, 而每种被订购的商品产生次要订货成本 (Shu, 1971; Goyal, 1973, 1974)。当不同种商品同时被订购时, 这些商品将共同分担本次订购的主要订货成本, 显著降低成本。同时, 由于多种商品被联合订购, 必然会加大订货的总数量与总金额, 有机会争取到较大的数量折扣。此外, 在实际运营中, 更大的订单量还可以降低商品的单位物流成本。正是由于有着巨大的现实价值, 联合补货策略被广泛地应用与研究。

事实上, JRP 策略为经济订货批量 (economic order quantity, EOQ) 策略的扩展。两者的假设条件也类似, 包括不允许缺货, 不存在数量折扣与资源约束, 需求率与各种费率为恒定常数。Goyal (1973, 1974) 构建的基本 JRP 数学模型中包括订货成本 (主要订货成本和次要订货成本) 与库存成本。本质上, 该模型寻求的是订货成本与库存费用的平衡。

作为一种十分复杂的组合优化问题模型, JRP 模型的求解十分困难, 研究的焦点也集中在该问题的求解上。早期, 研究者的求解主要是先降低决策变量的搜索空间, 再通过枚举法找到最优的组合方案, 或者利用一些特殊的数学方法。例如, Goyal (1974) 提出的枚举算法, 首先通过计算降低决策变量的上下界之间的

距离, 缩小解空间, 然后通过枚举法求得解空间中的最优者。Wildeman 等(1997)利用利普希茨最优化理论设计了基本 JRP 的求解方法。也有一些研究者基于决策变量和模型的数学性质, 设计了高效的启发式求解算法(Andres and Emmons, 1975, 1976; Silver, 1975, 1976; Kaspi and Rosenblatt, 1983, 1991; van Eijs et al., 1992; Goyal and Deshmukh, 1993; van Eijs, 1993; Hariga, 1994; Viswanathan, 1996, 2002; Fung and Ma, 2001; Axsäter et al., 2002; Nilsson et al., 2007; Porras and Dekker, 2008)。进入 21 世纪, 人工智能类算法得到较大发展, 在很多组合优化问题的求解上取得了非常好的效果。部分研究者也将人工智能算法应用于 JRP 求解, 如 Olsen(2005)用遗传算法(genetic algorithm, GA)求解 JRP, Wang 等(2012c)利用差分进化算法求解 JRP, 都展示了人工智能类算法在求解 JRP 时的可行性(Khouja et al., 2000; Hong and Kim, 2009; Wang et al., 2013b, 2015, 2016)。

1.2.2 扩展的 JRP

由于基本 JRP 问题的假设条件相当严格, 在现实中的应用也受到了极大的限制。现实中, 需求往往是动态变化的或是服从一定分布的, 补货中数量折扣是很常见的, 而资源约束(存储能力、资金约束、运量约束)也需要考虑。因此, 很多研究者通过放松基本 JRP 的部分假设条件, 构建更加符合现实情况的 JRP 模型, 达到理论与现实需求的结合。本节将对扩展的 JRP 进行分类总结。由于扩展的 JRP 涉及范围很广, 为了尽可能多地覆盖这些扩展的 JRP, 我们将扩展的 JRP 分为四大类: 动态联合补货问题(coordinated dynamic lot-size problem, CDLSP)、随机需求 JRP(stochastic JRP, SJRP)、带资源约束 JRP(JRP with resource constraint, C-JRP)及其他扩展的 JRP 模型。

(1) CDLSP

在多种商品与多个时间周期的补货中, 将来自不同供应商的商品在同一周期一起订购是一种可以节约成本的有效策略。这种策略中假定需求是确定且随周期变化的。与 JRP 相似, 每个周期中, 当至少一种商品被订购时将发生一次主要订货成本, 而每种被订购的商品产生次要订货成本; 当不同种商品同时被订购时, 这些商品将共同分担本次订购的主要订货成本, 显著降低成本。这种补货策略就是动态联合补货(coordinated dynamic lot-size, CDLS)策略。

由于 CDLS 策略在现实与理论中均具有重要意义, 自 Wagner 和 Whitin(1958)提出 CDLSP 模型后, CDLSP 模型受到了极大关注。Arkin 等(1989)证明了 CDLSP 模型为一个 NP-hard 问题, 这表明要找到一种求解 CDLSP 模型的有效多项式算法很困难。Silver(1979)考虑了需求确定但随时间变化的多种商品联合补货的情形,

并基于构建的混合整数规划模型的数学性质设计了动态规划算法,可有效求解较小规模的算例。Haseborg (1982) 也设计了一个动态规划法求解存在主要订货成本与次要订货成本的多商品动态联合补货模型。Joneja (1990) 提出了一种新的高效的结构化启发式算法及该算法的三个扩展算法,并分析了这些算法最坏情况下的表现。Raghavan (1993) 设计了分支切割法与 Dantzig-Wolfe 分解法能有效地解决较大规模的 CDLSP 模型。Federgruen 和 Tzur (1994) 针对长周期的 CDLSP 模型,设计了一个能将长周期的 CDLSP 模型分解为几个较短周期的 CDLSP 模型的启发式算法,然后利用分支定界法求解这些短周期的 CDLSP 模型。此外利用分支定界法求解 CDLSP 模型的还包括 Kirca (1995) 与 Robinson 和 Gao (1996)。Boctor 等 (2004) 提出了两种新的 CDLSP 模型,通过在 cplex 上的数值实验表明新模型的求解效率远高于原模型。此外,Boctor 等 (2004) 还设计了一个扰动启发式算法,并通过大量数值算例证明了该算法优于当时其他启发式算法。Narayanan 和 Robinson (2010) 在 Boctor 等 (2004) 的基础上进一步比较了各种启发式算法的性能。Robinson 等 (2007) 提出了三种结构化启发式算法和一种模拟退火算法,通过大量数值算例测试显示,模拟退火算法效果最好。Robinson 等 (2009) 总结了 2009 年之前的 CDLSP 的各种模型构建方法和多种求解方法。Absi 等 (2013) 考虑了存在缺货情况下的 CDLSP 模型,并设计了基于平滑算法的拉格朗日算法和自适应局部搜索进行求解。Baki 等 (2014) 考虑了商品回收与再制造情况下的 CDLSP 模型,并设计了一个能将 CDLSP 模型分解为单商品多周期的子问题模型的启发式算法,然后利用动态规划法进行求解。Gicquel 和 Minoux (2015) 设计了一个复杂的割平面法求解较大规模的 CDLSP 模型。其他的 CDLSP 模型研究还包括 Erenguc 和 Mercan (1990), Chan 和 Chiu (1997), Lu 和 Qi (2011)。

(2) SJRP

现实中的生产运作中,存在着多种影响因素。在多种影响因素影响下,需求往往并不是确定不变的。为了更好地贴近现实,很多研究者在研究需求相关的问题时会将确定需求扩展为带有不确定性的需求。这种带有不确定性的需求往往被设定为符合一定概率分布的需求,如需求服从正态分布或泊松分布。基本 JRP 中将需求不确定化,就将基本 JRP 扩展为 SJRP。

SJRP 相比基本 JRP 更加贴合现实,因此该问题一直备受关注。Atkins 和 Iyogun (1988) 将确定不变的需求设定为服从泊松分布的需求,然后构建了 SJRP 模型,并设计了高效的结构化启发式算法进行求解。Eynan 和 Kropp (1998) 则将确定不变的需求放松为服从泊松分布的需求,并提出了一个简单有效的启发式算法用于求解这个 SJRP 模型。Johansen 和 Melchior (2003) 考虑了每种商品的需求服从伯努利分布的 SJRP 模型,并基于马尔科夫决策理论设计了高效的启发式求解算法。Nielsen 和 Larsen (2005) 同样利用基于马尔科夫决策理论设计了一个启发式

算法来求解 SJRP 模型。其他 SJRP 相关的研究还包括 Lee 和 Chew (2005), Viswanathan (2007), Tanrikulu 等 (2010), Braglia 等 (2016), 等等。

(3) 资源约束 JRP

资源约束在很多现实的生产运作活动中存在。在联合补货中, 存在资源约束 JRP 模型是一个研究热点。这些约束包括资金约束、运量约束和存储能力约束等。不少研究者将这些约束加到基本 JRP 模型中进行研究。

Goyal (1975) 分析了存在资金约束情况下的 JRP 模型。Moon 和 Cha (2006) 考虑了存在资金约束的情况, 构建了存在资金约束的 JRP 模型, 并在 RAND 算法 (Kaspi and Rosenblatt, 1991) 的基础上提出了改进的 RAND 算法, 大量数值算例显示改进的 RAND 算法效果好, 速度快, 优于遗传算法。Hoque (2006) 构建了一个存在库存约束、运量约束与资金约束的 JRP 模型, 然后基于 JRP 模型的数学性质设计了一个全局优化的启发式算法。Ongkunaruk 等 (2016) 则是利用差分进化算法与遗传算法求解一个与 Hoque (2006) 类似的 JRP 模型。Porras 和 Dekker (2006) 设计了全局优化算法求解存在最小订货量的 JRP 模型。欧阳强国等 (2010) 和王林等 (2011) 分别构建了存在资金约束和存储能力约束的 JRP 模型, 前者利用改进的差分进化算法求解该问题, 后者则设计了自适应差分进化算法求解。曾宇容等 (2012) 设计了高效的差分进化算法用于求解费用与资源约束双重模糊下的 JRP 模型。Amaya 等 (2013) 提出了一个基于线性规划的启发式算法用于求解存在资金约束的 JRP 模型。其他的带资源约束 JRP 模型研究还包括王林等 (2012, 2014), Büyükkaramikli 等 (2014), Rahmouni 等 (2015), 等等。

(4) 其他扩展的 JRP 模型

除了以上部分的扩展 JRP 模型, 还存在着大量其他扩展的 JRP 模型。Chan 等 (2003) 利用改进的遗传算法求解多个买方的 JRP 模型。Cha 和 Moon (2005) 考虑了存在数量折扣的 JRP 模型。Narayanan 和 Robinson (2010) 构建了带资源约束的 CDLSP 模型, 然后设计了一个六阶段启发式算法和一个模拟退火算法, 两个算法均能较好地求解这个混合整数规划问题。Wang 等 (2012b) 对比了直接分组的 JRP 模型与间接分组的 JRP 模型, 并通过大量数值算例得出差分进化算法求解效果优于进化计算。Gutiérrez 等 (2013) 构建了带有存储能力约束的 CDLSP 模型, 并设计了一个结构化的启发式算法用于求解该问题。大量数值算例结果显示 Gutiérrez 等 (2013) 设计的算法较之前的启发式算法在准确性与稳定性方面有明显优势。Paul 和 Wahab (2014) 研究了存在次品和价格折扣的 JRP 模型。Qu 等 (2015) 构建了联合补货策略下随机需求的选址-库存模型。通过与独立补货策略下随机需求的选址-库存模型对比表明, 联合补货策略的应用能显著降低随机需求的选址-库存模型的成本。除了以上的研究还有很多 JRP 模型相关扩展研究

(Zangwill, 1966; Kao, 1979; Jackson et al., 1985; Lee and Yao, 2003; Sindhuchao et al., 2005; 李成严等, 2008; Xu et al., 2012; 李军等, 2012; Tsao and Teng, 2013; 冯海荣等, 2013; Verma et al., 2014; 聂佳佳和张娜娜, 2015; 肖旦等, 2016; 张云丰等, 2016)。

1.2.3 文献小结

Goyal 和 Satir (1989)、Khouja 和 Goyal (2008) 对基本 JRP 模型扩展做出了较为全面的总结。本节在以上二者的基础上进一步对基本 JRP 模型的扩展问题进行汇总分析, 见表 1-1。

表 1-1 基本 JRP 的扩展问题汇总分析

扩展标准	文献来源	研究方法
1 动态需求	Silver (1979)	动态规划法
	Haseborg (1982)	动态规划法
	Arkin 等 (1989)	复杂性理论
	Joneja (1990)	结构化启发式算法
	Raghavan (1993)	分支切割法与 Dantzig-Wolfe 分解法
	Federgruen 和 Tzur (1994)	分支定界法
	Kirca (1995)	分支定界法
	Robinson 和 Gao (1996)	分支定界法
	Boctor 等 (2004)	扰动启发式算法
	Narayanan 和 Robinson (2010)	结构化启发式算法
	Robinson 等 (2007)	两阶段启发式算法 + 模拟退火算法
	Absi 等 (2013)	基于平滑算法的拉格朗日算法 + 自适应局部搜索
	Baki 等 (2014)	启发式算法 + 动态规划
2 随机需求	Gicquel 和 Minoux (2015)	割平面法
	Atkins 和 Iyogun (1988)	结构化启发式算法
	Eynan 和 Kropp (1998)	结构化启发式算法
	Johansen 和 Melchiors (2003)	基于马尔科夫决策理论的启发式算法
	Nielsen 和 Larsen (2005)	基于马尔科夫决策理论的启发式算法
	Lee 和 Chew (2005)	结构化启发式算法
	Viswanathan (2007)	结构化启发式算法
	Tanrikulu 等 (2010)	(s, Q) 策略
	Braglia 等 (2016)	结构化启发式算法

续表

扩展标准	文献来源	研究方法
3 资源约束	Moon 和 Cha (2006)	一种改进的 RAND 算法 + 遗传算法
	①资金约束 欧阳强国等 (2010)	改进差分进化算法
	王林等 (2011)	自适应差分进化算法
	②库存 (补货) 约束 Porras 和 Dekker (2006)	全局优化启发式算法
	欧阳强国等 (2010)	改进差分进化算法
	③运量约束 Amaya 等 (2013)	基于线性规划的启发式算法 + 改进的 RAND 算法
	Rahmouni 等 (2015)	结构化启发式算法
	① + ② + ③ Hoque (2006)	全局优化启发式算法
	Ongkunaruk 等 (2016)	遗传算法 + 差分进化算法
4 数量折扣	Cha 和 Moon (2005)	结构化启发式算法
	Moon 等 (2008)	遗传算法
	Paul 和 Wahab (2014)	结构化启发式算法
1 + 3	Narayanan 和 Robinson (2010)	六阶段启发式算法 + 模拟退火算法
	Federgruen 等 (2007)	结构化启发式算法
	Gutiérrez 等 (2013)	结构化启发式算法
1 + 4	Chung 等 (1996)	结构化启发式算法

从表 1-1 中的汇总分析结果看,基本 JRP 模型被从多个角度扩展为更为贴合现实的模型。从需求方面来看,不少学者将基本 JRP 模型中恒定不变的需求假设,放松为需求率为动态可变或者服从一定概率分布。事实上,现实中的需求确实变化莫测。而在进行扩展之后,问题变得更加复杂,求解方法也发生了变化。求解的方法主要包括动态规划法、分支定界法及基于问题结构性质设计的启发式算法。从资源约束方面来看,研究者主要在基本 JRP 模型中加入了资金约束、库存(补货)约束及运量约束中的一个方面或几个方面。而求解这类非线性组合优化问题,研究者主要应用人工智能优化算法和基于问题结构性质设计的启发式算法。其他方面的扩展包括允许数量折扣等。从整体上来看,基本 JRP 模型的扩展模型越来越接近现实需求,同时也变得越来越复杂。而由于问题越来越复杂,精确地求解方法往往难以设计,取而代之的是应用较为灵活的人工智能类优化算法与基于问题结构性质设计的启发式算法。

1.3 联合补货与配送问题分析

1.3.1 基本 JRD 问题

基本 JRD 问题是基本 JRP 的一个扩展。与 1.2 节的扩展不同,基本 JRD 问题

是在基本 JRP 的基础上加入了配送环节。配送环节的加入使这个 JRP 扩展问题在供应链中有了更广的延伸。其实，现实中补货和库存与配送活动之间存在着极大的联系。很显然，无论是商品从供应商进入仓库，还是从中心仓库进入零售商，配送环节必不可少。因此，将配送活动整合到 JRP 中，对构建 JRD 模式意义重大。而基本 JRD 策略在众多行业有着广泛的应用。例如，2012 年，通用汽车与标致雪铁龙达成协议，共同建立全球补货合资公司。双方将联合从供应商处补货各类成品、零部件及其他商品服务等，因此包括补货与配送在内的整条供应链将达到更佳协同效应。两家公司联合购买力高达惊人的 1250 亿美元，预计在达成合作之后的五年内，每年将产生约为 20 亿美元的收益。除此之外，JRD 策略也被应用于电子商务领域。2015 年，京东集团与永辉超市宣布将建立联合补货机制，打通线上与线下。京东商城为世界最大电商平台之一，2016 年其成交总额(gross merchandise volume, GMV)超过 6582 亿元，而永辉超市为中国最大的零售公司之一。两公司通过联合补货将有助于降低补货与库存成本，而配送成本也可在两公司的协同规划下降低。

Moon 等（2008）提出基本 JRD 模型。该模型存在多个供应商，一个中心仓库和多个零售商。中心仓库为满足下游零售商的商品需求，以一定周期从供应商订购商品。在中心仓库订购环节，与基本 JRP 类似，当至少一种商品被订购时将发生一次主要订货成本，而每种被订购的商品产生次要订货成本。当不同种商品同时被订购时，这些商品将共同分担本次订购的主要订货成本。与基本 JRP 不同的是，基本 JRD 问题中中心仓库会根据零售商的商品需求以一定频率配送商品到零售商。基本 JRD 问题模型远比基本 JRP 模型复杂，精确求解难度很大。Moon 等（2008）在研究中设计了一个改进的 RAND 启发式算法和一个遗传算法，并取得了较好的效果。目前其他求解基本 JRD 模型的方法较少，还有很大的探索空间。

1.3.2 扩展的 JRD 问题

由于 JRD 策略在理论与现实中均有重要的意义，因此在 Moon 等（2008）提出基本的 JRD 模型之后，受到了学术界的广泛重视。与 JRPs 的研究类似，不少研究者提出了基本 JRD 的扩展模型。本节对基本 JRD 的扩展问题进行汇总分析，见表 1-2。

表 1-2 基本 JRD 的扩展问题汇总分析

文献来源	扩展方向	研究方法
Cha 和 Park（2009）	数量折扣	混合遗传算法
Moon 等（2011）	可以拼货配送	结构化启发式算法

续表

文献来源	扩展方向	研究方法
Wang 等 (2012a)	随机需求	混合差分进化算法
Qu 等 (2013)	异质商品	自适应差分进化算法
Wang 等 (2013a)	单位成本模糊化	差分进化算法
Wang 等 (2013d)	随机需求 + 单位成本模糊化	自适应差分进化算法
Wang 等 (2013e)	随机需求 + 允许缺货	混合差分进化算法
Cui 等 (2014)	随机需求 + RFID 技术	差分进化算法
Coelho 和 Laporte (2014)	动态需求 + 易变质商品	分支切割法
Cui 等 (2015)	旅行商配送策略	量子差分进化算法
Li 等 (2016)	运量约束 + 易变质商品	遗传算法 + 差分进化算法
Lui 等 (2017)	多个中心仓库	结构化启发式算法 + 自适应差分进化算法

注: RFID 指 radio frequency identification, 即射频识别

从表 1-2 中的汇总分析结果看, 基本 JRD 被从多个角度扩展为更为贴合现实的模型。Cha 和 Park (2009) 考虑了存在数量折扣情况的 JRD 模型, 并设计了一个混合遗传算法进行求解。Moon 等 (2011) 在基本 JRD 的基础上, 增加可以在配送阶段进行拼货, 相比基本 JRD 模型一对一配送, 扩展模型的配送方式更加经济, 显著降低了总成本。Wang 等 (2012d) 放松了需求恒定不变的假设, 构建了随机需求的 JRD 模型, 并设计了混合差分进化算法对该 JRD 模型进行求解。Qu 等 (2013) 考虑了异质商品因素的约束, 即某些不同性质的商品不能一起运输, 如药品与某些化工商品。Qu 等 (2013) 构建了存在异质商品条件下 JRD 模型, 当异质商品被一起运输时会增加额外的惩罚费用, 并利用自适应差分进化算法高效地处理该模型。Wang 等 (2013c, 2013e) 和 Cui 等 (2014) 都提出了随机需求下的扩展 JRD 模型, 并且都是利用差分进化算法进行求解。不同的是, Wang 等 (2013c) 提出的模型中将次要订货成本与单位库存成本模糊化, Wang 等 (2013e) 则是在 JRD 模型中考虑了缺货情况, 而 Cui 等 (2014) 和崔利刚 (2014) 则是将模型与 RFID 技术结合起来。Coelho 和 Laporte (2014) 考虑到需求的动态性, 构建了动态需求下易变质商品的联合补货、配送与库存模型, 并设计了分支切割法对模型进行了求解, 对较大规模算例求解的精度误差不超过 1.5%。Cui 等 (2015) 通过将配送策略修改为旅行商配送策略, 构建了旅行商配送策略的 JRD 模型, 大量数值实验现实该模型总成本明显优于基本 JRD 模型总成本。瞿慧 (2015) 提出了多个 JRD 扩展模型, 包括更复杂配送方式 JRD 和基于联合补货策略的选址-库