

文章编号:1001-9081(2010)02-0453-05

库存路径问题及其最新进展

傅成红^{1,2}, 符卓²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114; 2. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075)

(fch407@126.com)

摘要:在分析库存路径问题(IRP)相关文献基础上,给出了IRP的一般化定义,并对其进行分类。从拓扑结构、计划期、客户需求、供应能力、补货策略、配送模式等方面阐明了IRP的特征属性的描述方法。最后重点总结了2000年以来IRP研究文献的建模及求解方法,对比国内外研究进展,指出目前的求解算法研究已经很充足,继续研究应该拓展IRP问题本身。

关键词:库存路径问题;进展;综述

中图分类号: TP182 **文献标志码:** A

Inventory routing problem and its recent development: Review

FU Cheng-hong^{1,2}, FU Zhuo²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Teleology, Changsha Hunan 410114, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China)

Abstract: Based on the analysis of the literature related to Inventory Routing Problem (IRP), this paper provided a general definition of IRP, and classified it. Its traits and attributes were elaborated in terms of topologic structure, plan time, guest request, deliverability, resource plot and distribution model. The main change of literature published after 2000 was analyzed. Finally, the paper compared the development between home and abroad. The conclusion marks that the further work should expand the IRP itself since its resolution method has been investigated sufficiently.

Key words: Inventory Routing Problem (IRP); development; review

0 引言

库存和运输是物流系统最重要的功能要素,是物流获得“时间价值”和“空间价值”的两大主要环节,它们的耗费约占物流总成本的2/3^[1]。

库存研究主要是研究库存控制问题,即多长时间补充多少货物。运输研究的核心是车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP),即根据需求确定车辆行驶路线。实际生产活动中,因库存、运输有其自身的相对独立性,很长时间以来,对它们的研究一般是分开进行的。从供应链管理的角度看,由于库存和运输存在“效益背反(Trade-off)”关系,分开的库存控制或运输路径优化很可能不利于从整体上控制物流成本。

为了提高供应链的效能,人们提出供应商管理库存(Vendor Managed Inventory, VMI)的模式。VMI允许供应商在保证(部分或全部)满足下游客户需求前提下,自主确定向下游客户送货的时间及数量,这就需要同时协调解决库存和运输两个问题。

库存和运输协调研究已经成为理论和实践必须解决的问题,其中一个热点被称为“库存路径问题(Inventory Routing Problem, IRP)”。

1 IRP定义与分类

1.1 定义

与IRP类似的名称是“库存运输整合优化(Inventory-Transportation Integrated Optimization, ITIO)”。尽管关于IRP与ITIO曾经存在一些争论,如Sarmiento和Nagi认为二者是

不同问题,不同之处在于目标函数^[2], Viswanathan和Mathur也提出了类似的观点^[3]。但就IRP和ITIO研究的内容、目标、方法等方面来看,IRP侧重于操作层面,ITIO偏重于长期决策,二者并无本质区别。因大多数文献采用IRP的表达,本文统一称为IRP。

IRP整合了库存管理和运输问题,根据文献研究,本文整理出其一般化定义:在一个(单层级、多层级)供应链系统中,已知:1) (单个、多个)客户对某(单、多)品种货物的(确定、随机)需求规律,当地(有限、无限)库存容量,初始库存量;2) 供应商(工厂、配送中心)的(生产、库存)能力;3) 配送(取货、分送)运输工具(车辆、船舶等)运送能力(装载容量,最大里程或时间行程等);目标是:在一定条件下(服务水平,服务时间窗),决策库存补货策略(补货品种、时间、数量)、配送组织方案(运输线路、车辆数量、送货时间),以使得系统计划期(单周期、有限多周期、无限长周期)内的(单位)总成本最小或者收益最大。

显然,IRP需要同时解决三个关键问题:1) 何时给客户送货? 2) 车辆装载多少货物,送多少给各客户? 3) 车辆线路如何安排?

1.2 分类

Baita等人对1984—1997年的主要IRP(Dynamic Routing-Inventory Problems, DRIP)文献作了很好的总结,概括出IRP包含三个基本特征。即:1) 路径。组织货物在车场、仓库、工厂、零售商等地理分散的场所间移动。2) 库存。处理货物在上述场所的数量分配、价值差别、库存策略等。3) 动态。前两个问题是动态相关的,从时间上看,前一周期的决策会对下

收稿日期:2009-08-07;修回日期:2009-11-11。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70671108);湖南省教育厅资助科研项目(07C106)。

作者简介:傅成红(1971-),男,重庆人,副教授,博士研究生,主要研究方向:物流工程、交通运输规划与管理;符卓(1960-),男,海南文昌人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:物流配送优化、交通运输规划与管理。

周期产生影响^[4]。

IRP 涉及的情况非常复杂,可以根据拓扑结构、货物品种、需求类型、决策方式、约束(有时作目标)、成本、求解方法等特征进行分类,详见表1。

表1 IRP 分类^[4-5](表中1表示单个,M表示多个)

特征	可能属性选项
拓扑结构	两层级: 1-1, 1-M(M-1), M-M 三层级: 1-1-1, 1-1-M, 1-M-M, M-1-M, M-M-M
计划期	单周期, 有限多周期, 无限期
需求类型	货物品种: 单品种, 多品种 数量随时间: 常数, 变化(周期变化、随机) 配送方式: 需求不拆分, 需求可拆分
决策方式	时间(时点)、频率(周期)
约束/目标	车辆类型: 相同, 不同 车辆容量: 有限, 无限 车辆数量: 给定, 决策变量, 无限 供应或存储能力: 有限, 无限
成本	库存成本: 持货, 缺货, 订货 运输成本: 固定, 距离, 装卸点
求解方法	问题分解: 时间, 分区一路径 分区依据: 时间, 频率, 距离 寻优方法: 精确法, 近似法, 启发式算法

2 IRP 的特征描述

2.1 拓扑结构

早期的 IRP 研究主要集中在两层级系统(一般称为 One-Warehouse Multi-Retailer, 1-M), 主要包括 1-M(一个供应商服务多个客户的“树形”结构, M-1 可以认为是其颠倒结构)和 M-M 两种结构形式。

近年, 三层级系统 IRP 引起了研究者的兴趣。如 Sombat 等人研究的 M-1-M IRP^[6]。Vidyarthi 等人考虑的 IRP 涉及 M-M-M^[7]。Zhao 等人针对 1-1-M IRP 展开研究^[8]。Shen 和 Honda 研究了 1-M-M IRP, 还允许车辆及存货在同层级内横向转移^[9]。

2.2 计划期

大致上, 对应计划期为单周期(日、周)、有限长周期(月、季)和无限计划期(多年)的决策层次是作业型、战术型和战略型。单周期 IRP 一般只解决单次的库存分配和配送路径, 相对较为简单, 但它是进一步研究的基础, 可以通过单周期的连续滚动扩展来研究长周期(多个连续单周期、无限计划期) IRP。有限周期 IRP 或战术型 IRP 基本上是为了解决一段时间内(包含较少的多个连续单周期), 如何协调库存和运输来应对供应、需求互动的问题^[10-11]。对于无限长周期, 一般用于工厂、中心的选址, 以及运输车队的规模等战略决策^[12-13]。

2.3 客户需求

客户需求货物一般设定为单品种, 有时虽然研究多品种^[14-15], 但通过约定一辆车只装载一种货物转化成单品种, 如文献^[6]。在 IRP 求解困难的背景下, 确定需求 IRP 比随机需求情况当然简单得多, 一些侧重求解算法的研究, 基本设定需求是确定的。

需求变化的情况可以分为两种: 一种是呈周期变化^[16-17], 另一种是随机需求。随机 IRP 更加符合现实情况, 所以, 近年的研究更多关注随机 IRP^[18]。Berman 和 Larson 考虑客户需求是随机过程, 特别类似维纳过程(Wiener Process), 而且约定配送量在车辆到达客户后才知道^[19]。

2.4 供应能力

单供应商 IRP 研究最多, 常常假设能力无限, 一般还忽略其持货成本。供应商能力有限时, 需求可能部分满足。比如文献^[19]研究的随机需求 IRP 可能缺货。对于缺货, 假设发生缺货惩罚成本(应急直接送货实际是支付惩罚成本), 允许延迟供货时, 按照缺货量及延迟时间计算缺货成本。

2.5 补货策略

确定需求时, 通常不许缺货, 主要采用(0, R)策略, 或者称为 ZIOP 策略(Zero-Inventory-Ordering Policy), 即当库存降低至零时补货(假设提前期可以忽略), 采用这种策略主要是基于确定需求的 EOQ 思想, 这样有利于降低库存成本。

随机需求时, 为了简化, 多数文献只考虑客户库存, 并假定缺货不补则必须惩罚。(R-1, R)策略, 主要用来应对随机需求, 这样的策略在实际中可行, 也有利于 IRP 问题的求解^[20]。补货时间(分拆)描述将在 3.1 节详细陈述。

2.6 运输(配送)模式

前面提到, IRP 侧重于作业层面决策, 因此, 一般设定车辆数固定或者不考虑车辆数限制以便于后期求解 VRP。有时 IRP 也把最小化车辆数作为目标。对车辆类型的设定, 约定有限装载能力, 并用同类型车辆实施配送; 三层级 IRP 涉及到上下两个层面的运输(配送)车辆时, 都认为上车辆装载能力大于下游车辆, 这样更加符合实际情况。

客户补货量可以整体配送, 也可拆分配送(单个客户同一周期需求由多辆车分别实施配送)^[21-23]。对于三层级 IRP, 还涉及货物通过中心的方式, 可以分为: 中心整车转运(无库存)、中心配送(有库存)。

已经有文献研究货物取送结合的复杂 IRP^[16, 24-28]。

3 IRP 建模及求解方法

受到求解的限制, 一般在已有的 VRP、EOQ 研究基础上建模, 以利于求解时用“两阶段法”搜寻最优解或近优解。也有部分文献把 IRP 看作为马氏过程, 用马尔可夫决策过程(Markov Decision Process, MDP)建模求解。

为了把握 IRP 的最新研究进展, 以下分析 2000 年以来的 IRP 文献, 此前的研究情况可以参见文献^[4]。

3.1 时间或频率

一般把时间作为驱动因素来记录系统变化, 不同的时间分拆方法不同, 会影响到库存量、补货量、车辆路径, 直至影响最后决策。可以把时间的分拆分为两大类, 一类是等间隔时间周期(固定频率), 第二类是在离散的时点上决策^[4]。

很多学者指出, 用一般 EOQ 得到的连续频率取值不符合实际, 比如每周配送 $\sqrt{2}$ 次, 在现实中显然是不能操作的, 而近似取整带来偏差可能非常大^[29]。为了解决这个问题, 有两种方法得到广泛应用: 整数倍(Integer-Ratio)周期和 2 的幂次方(Power-of-Two, POT)周期^[1, 3, 8]。

整数倍周期的思想是: 以一个基本的时间长度 t 为单位, 用其整数倍 $t, 2t, 3t, \dots$ 来划分整个计划期, 然后在这些时间点上决策。POT 周期则是把时间划分为 $t, 2t, 4t, 8t, \dots$, 这样的划分处理较整数倍周期更容易求解, 有两个直接的好处: 一是可行域空间大为缩小; 二是大周期客户补货时, 小周期客户一定要补货, 这样有利于寻优求解搜索。

3.2 决策目标

基本目标是最小化系统计划期单位时间总成本, 总成本的构成一般都包括固定运输成本、可变运输成本、客户库存成

本(订货成本、缺货成本、持货成本),复杂的情况还考虑供应商持货成本、订货成本;相当一部分文献不考虑供应商库存成本^[8,30]。少部分研究把最大化系统计划期单位时间总收益作为目标^[31]。

无论决策目标是成本或者收益,得到的库存、配送方案具有相同的效果。

3.3 求解方法

可以认为 IRP 是 VRP 的深化发展,VRP 已经是著名的 NP-难问题,IRP 在 VRP 的基础上还整合了库存管理,依然是 NP-难问题。因此,探索有效的求解方法,一直是 IRP 研究的重点、难点和热点。

目前,VRP 的研究成果基本上都引入到了 IRP 研究。比如,经典的 VRP 三下标模型在绝大多数文献中得到应用和扩展^[32]。类似 VRP 研究的整数规划^[9,22,24,25]、拉格朗日松弛(Lagrange relax)^[7,15,22]、分支-定界(branch-bound)^[33]、分支-裁剪(branch-cut)^[24]、分支-定价(branch-price)^[6]、C-W 节约法^[30],以及遗传算法(Genetic Algorithm)、禁忌搜索法(Tabu Search)^[34]、模拟退火(Simulated Annealing)、大规模邻域搜索法(Large scale neighborhood search)^[6,28]等现代启发式方法也都有使用。

3.3.1 两阶段法

IRP 的复杂性导致描述它的数学模型有很大差别,加上求解难度很大,建模时必须考虑求解的可能性。已有的文献绝大多数建模时都利用了 IRP 包含库存和路径两个问题的特点来求解,这种思路或方法称被统称为“两阶段法”。

两阶段法的基本思路是先把客户按照一定的限定分成多个分区,再把供应商与分区一起看成 VRP 确定配送线路;也可以先确定配送线路,再确定分配给客户的配送量。客户的分区可以根据客户点的地理空间分布、配送需求量或者时间、频率;线路的确定当然可以利用已有的 VRP 研究成果。

Campbell 和 Savelsbergh 提出 IRP 的一个有时间窗线性规划模型,求解法是先分区,再定线路^[35-36]。Jaillet 等人用类似两阶段法,所不同的是客户库存水平检查不是连续的,并考虑了卫星设施。另一个不同是目标含两个:不同时间(日)访问客户的成本差别大于优化日的不同配送,单日成本最小化^[37]。Gaur 等人研究超市供应链 IRP,先从时点上分析最佳补货方案,再决定空间上配送线路,用类似节约法、3-交换(3-opt)思路设计算法。结果第一年节约4%的成本,预期可以达到12%~20%的节约^[17]。Rusdiansyah 和 Tsao 研究的 IRP 建立在 PVRPTW (Periodic VRP with Time-Window)基础上,把访问客户的频次作为决策变量(一般是作为条件或目标)。求解时先分区,再调整配送频率,确定 TSP 线路^[38]。Liu 和 Lin 把 IRP 拆成两个子问题:中心分配、路线及库存安排,提出 TS (Taboo Search)、SA (Simulate Annealing) 的混合算法^[39]。Jung 和 Mathur 分析 IRP 时,先对客户按照车载能力分区,把同分区客户看成一个整体,用 EOQ 思想对库存建模;然后,把同分区内客户按照客户需求率排序降序,用 POT 对配送建模;求解时,用拉格朗日乘子松弛,把问题转化成一个最小网络流—最大割方法求解^[40]。

研究不预先分区,如 Savelsbergh 和 Song 研究的多周期 IRP 考虑单品种、多工厂、多客户,但只考虑运输成本,不考虑库存成本,他们的思路有个好处是并不预先分配工厂-客户^[32]。

在随机需求情况下,可先将需求采用均值进行确定化,将问题转化为确定需求 IRP;或者将问题描述成为随机过程的形式,以无限期折扣成本为目标进行优化,其优点是不单独对需求进行确定化处理,而分别处理随机需求下库存、路径问题,最后进行整合,不足的是求解时受到问题规模的限制非常明显。

3.3.2 马尔可夫决策过程

因为 IRP 的层级之间库存存在转移,客户还要面对消费者需求,各级库存的量随时间变化具有马氏性,所以,一些学者提出用 MDP 的思想来解决 IRP。

Kleywegt 等人研究直接送货 IRP,其 MDP 离散模型建立在6个假设基础上:客户库存一天只记一次成本;缺货流失不补;客户有持货成本;中心的实施配送后补货;中心能力无限;供应者决策前知道成本,也知道缺货惩罚。因求解困难,最后转为近似求解非线性背包问题,问题规模限制在:60 客户,30 辆车,2 种库存水平^[41-42]。Adelman 也用类似离散 MDP 研究随机 IRP,所不同的是提出了一个二重价格的数学规划,用线性规划松弛价值函数,而不是用模拟法。模型中考虑了缺货成本,还证明结果优于 Kleywegt 等人提出的直接运输策略^[43]。

Hvattum 和 Løketangen 把 IRP 看成 MDP,近似地用决策树方法求解^[44]。Croston 等人研究的 IRP 在中心无库存,货物通过多个中心直接转运^[45]。Adelman 提出基于价格导向的新方法,用两个线性规划描述 MDP,然后用单客户库存替换,结果近似提供了长计划期低成本的静态下界,用动态库存、随机运输分配的线性规划求解^[43]。

4 IRP 研究进展与发展趋势

4.1 研究进展

4.1.1 国外概况

国外 IRP 研究最早出现在 20 世纪 70 年代^[46];但一般认为,IRP 的真正研究是从文献[47-48]开始的。1985 年,Golden 对 VRP 的文献研究指出,未来的物流研究主题将会包括:VRP(随机、时间窗、车队规模等)建模、计算机辅助实现 VRP 求解、IRP、仿真、专家系统等^[49]。20 世纪 90 年代计算机能力的提升极大地促进了 VRP、IRP 研究,印证了 Golden 的判断。

2000 年以前的 IRP 文献主要研究单周期、一对多、单品种、确定需求情况,通常给定车辆数或不限,决策方式则集中在确定固定的配送频率,目标只考虑客户库存成本(一般不考虑中心库存成本)。求解时,采用“分区—路径”分解问题或者沿用 EOQ (Economic Order Quantity) 思路占绝大多数,寻找合适的求解方法一直是研究热点、重点和难点。

2000 年以来,在继续构建高效率求解方法的同时,IRP 本身的研究得到了深入,随机需求 IRP、三层级 IRP、取送结合 IRP 受到更多研究的重视。

4.1.2 国内动态

国内 IRP 研究文献出现在 2001 年以后。截止到 2009 年 6 月,在中国知网(CNKI)上检索到直接与 IRP 相关的文献仅 33 篇,其中包含 7 篇综述文章,说明 IRP 已经引起国内研究的注意,但研究工作才刚刚开始。与前述综述文章的不同,本文着重于针对 2000 年以后的 IRP 文献进行分析。

相对而言,西南交通大学的学者研究较为深入。杜文等人对1-M 随机IRP进行分析,并重点论述了如何转化为CCLP求解^[50];袁庆达从决策的三个层次即战略、战术和作业层次,扩展了已有研究的决策范围,构造了描述此类问题特征的数学模型和有效的启发式算法^[51];叶志坚等人在对库存运输整合问题建模后,对模型采用一系列简化求解,并分析了参数敏感性,但没有考虑车辆路径问题^[52];赵达以零售商系统下随机需求的IRP为研究对象,提出了一种基于马尔可夫决策过程与修正的C-W节约算法的启发式分解算法^[53]。

求解方法方面,国内学者使用遗传算法的较多,如杨信丰等人考虑客户对配送时间的要求和车辆行驶时间的不确定性,建立了以车辆配送总行驶距离最小化为目标的机会约束规划模型,并构造了求解该模型的单亲遗传算法^[54];傅成红等人也用这个方法求解单周期随机需求IRP^[55]。唐加福等人讨论了多产品、单分销商、多用户的分销网络中,分销中心在租赁车辆外包模式和多次直接运输策略下的配送计划问题,设计开发了基于部分链的遗传算法^[56];姜山佐等人建立一个组合经常性库存成本、安全库存成本和随机路径成本模型后,引入了一种基于Monte-Carlo抽样求解路径期望成本方法、协调参数的遗传算法^[57]。

MDP方法也引起了国内学者的关注,朱晨波等人研究了直接配送的三层级IRP(实际上路径问题被简化),用MDP方法建模求解;武秀焕、李延晖研究随机需求库存路径问题,考虑其马尔可夫、随机等特性,将IRP描述为一个MDP,在运用非线性背包问题的求解方法得到初始解构成直接配送线路的基础上,设计一种局部搜索法进行优化^[58]。

总体看来,国内研究(中文文献)可以概括为两点:一是开始对IRP的基本问题展开研究,并介绍、接受国际研究成果;二是对两层级系统随机需求IRP研究有所深入。

4.2 发展趋势

随着理论发展和现实的需要,IRP的研究还会更加深入。现阶段,求解算法的研究已经相当充分,而IRP的基本问题还较为简单,未来研究需要在扩展问题本身方面长足发展,可能会集中在以下几个方面:

1) 扩展拓扑结构。在第三方物流大量介入的情况下,车辆运行可能不是封闭线路,应该考虑加入开放式VRP的IRP研究;虽然两层级IRP是研究基础,但现实中大量存在三层级IRP,在生产实践越来越依靠高效的供应链管理的发展进程中,三层级IRP必须得到更为深入的理论研究。

2) 多产品IRP。供应商、配送车辆通常涉及的货物品种都不是单一的,多品种IRP应该会是未来扩展、深化研究的方向之一。

3) 有时间窗约束。在追求高效率的供应链中,在VMI背景下,准时制是理想选择,时间约束不应该随意省略或简化。加入时间窗约束时,IRP会变得相当复杂,甚至有时可能无可行解,目前还缺乏这种复杂IRP的研究。

4) 实时信息IRP。在客户需求随机的情况下,配送车辆可能只有到达客户点后,才能知道其需求,因此,实时信息条件下的在线IRP是物流信息化发展需要攻关的难关。

5) 取送作业结合。为了充分利用车辆,需要安排车辆往返都要载货,所以取送作业结合的IRP已经受到重视。但因为这类问题非常复杂,有必要更全面、深入展开。

参考文献:

- [1] HERER Y, LEVY R. The metered inventory routing problem, an integrative heuristic algorithm [J]. *International Journal of Production Economics*, 1997, 51(1): 69–81.
- [2] SARMIENTO A M, NAGI R. Review of integrated analysis of production-distribution systems [J]. *IIE Transactions*, 1999, 31(11): 1061–1074.
- [3] VISWANATHAN S, MATHUR K. Integrating routing and inventory decisions in one-warehouse multiretailer multiproduct distribution systems [J]. *Management Science*, 1997, 43(3): 294–312.
- [4] BAITA F, UKOVICHA W, PESENTIET R, *et al.* Dynamic routing-and-inventory problems: A review [J]. *Transportation Research A*, 1998, 32(8): 585–598.
- [5] KLEYWEGT A J, NORI V S, SAVELSBERGH M W P. The stochastic inventory routing problem with direct deliveries [J]. *Transportation Science*, 2002, 36(1): 94–118.
- [6] SINDHUCAO S, ROMENJUN H E, AKÇALI E, *et al.* An integrated inventory-routing system for multi-item joint replenishment with limited vehicle capacity [J]. *Journal of Global Optimization*, 2005, 32(1): 93–118.
- [7] VIDYARTHI N, ÇELEBI E, ELHEDHLI S. *et al.* Integrated production-inventory-distribution system design with risk pooling: Modeling formulation and heuristic solution [J]. *Transportation Science*, 2007, 41(3): 392–408.
- [8] ZHAO QIU-HONG, CHEN SHUANG, ZANG CUN-XUN. Model and algorithm for inventory/routing decision in a three-echelon logistics system [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 191(3): 623–635.
- [9] SHEN SHENG-YUAN, HONDA M. Incorporating lateral transfers of vehicles and inventory into an integrated replenishment and routing plan for a three-echelon supply chain [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(2): 754–775.
- [10] RAA B, AGHEZZAF E H. Designing distribution patterns for long-term inventory routing with constant demand rates [J]. *International Journal Production Economics*, 2008, 112(1): 255–263.
- [11] RAA B, AGHEZZAF E H. A practical solution approach for the cyclic inventory routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 192(2): 429–441.
- [12] STACEY J P. The inbound inventory routing problem with storage constraint [D]. The Tuscaloosa: The University of Alabama. 2006.
- [13] GIESEN R. Online inventory replenishment and fleet routing decision under real-time information [D]. College Park: University of Maryland, 2007.
- [14] ADELMAN D. A simulation frame for real-time management and control of inventory routing decision [J]. *Operations Research*, 2004, 52(4): 499–514.
- [15] BERMAN O, WANG QIAN. Inbound logistic planning: minimizing transportation and inventory cost [J]. *Transportation Science*, 2006, 40(3): 287–299.
- [16] BARD J F, NANANUKUL N. The integrated production-inventory-distribution-routing problem [J]. *Journal of Scheduling*, 2009, 12(3): 257–280.
- [17] VISHAL G, MARSHALL L F. A periodic inventory routing problem at supermarket chain [J]. *Operations Research*, 2004, 52(6): 813–822.
- [18] CHEN HONG DENG. A period inventory routing problem and its

- implication in designing the distribution structure in a supply chain [D]. New York: The City University of New York, 2004.
- [19] BERMAN O, LARSON R C. Deliveries in an inventory routing problem using stochastic dynamic programming[J]. *Transportation Science*, 2001, 35(2): 192–213.
- [20] ERHAN K, DIVI L. Integrated inventory and transportation mode selection: A service parts logistics system [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2008, 44(5): 665–683.
- [21] ZHAO QIU-HONG, WANG SHOU-YANG, LAI K K. A partition approach to inventory/routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(26): 786–802.
- [22] ZUO-JUN MAX SHEN, LIAN QI. Incorporating inventory and routing costs in strategic location models[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007(179): 372–389.
- [23] YU YU-GANG, CHU FENG, CHEN HAO-XUN. A model and algorithm for large scale stochastic inventory routing problem[C]// *Proceedings - ICSSM'06: 2006 International Conference on Service Systems and Service Management*. Troyes: IEEE, 2007, 1: 355–360.
- [24] AL-KHAYYAL F, HWANG S-J. Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk, part I: Applications and model[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 176(1): 106–130.
- [25] HSIAO Y-C. Optimal single-cycle policies for the one-warehouse multi-retailer inventory/distribution system[J]. *International Journal Production Economics*, 2008, 114(1): 219–229.
- [26] SAVELSBERGH M, SONG J-H. An optimization algorithm for the inventory routing problem with continuous moves[J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(7): 2266–2282.
- [27] KORSVIK J E, FAGERHOLT K. A tabu search heuristic for ship routing scheduling with flexible cargo question[J]. *Journal of Heuristics*, 2008(8): 1381–1231.
- [28] LIU SHU-CHU, CHUNG CHICH-HUNG. A heuristic method for vehicle routing problem with backhauls and inventory [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2009, 20(1): 29–42.
- [29] SPERANZA M G, UKOVICH W. Minimizing transportation and inventory costs for several products on a single link [J]. *Operations Research*, 1994, 42(5): 879–894.
- [30] AGHEZZAF E-H, RAA B, LANDEGHEM H V. Modeling inventory routing problem in supply chains of high consumption products[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 169(3): 1048–1063.
- [31] BARD J F, NANANUKUL N. Heuristics for a multiperiod inventory routing problem with production decisions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 57(3): 713–723.
- [32] SAVELSBERGH M, SONG J-H. Inventory routing with continuous moves [J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(6): 1744–1763.
- [33] BERTAZZI L, PALETTA G, SPERANZA M G. Deterministic order-up-to level policies in an inventory routing problems[J]. *Transportation Science*, 2002, 36(1): 119–132.
- [34] CHUAH K, YING L J. Routing for a Just-in-time supply pickup and delivery system [J]. *Transportation Science*, 2005, 39(3): 328–339.
- [35] CAMPBELL A M, SAVELSBERGH M W P. A decomposition approach for the inventory routing problem[J]. *Transportation Science*, 2004, 38(4): 488–502.
- [36] CAMPBELL A M, SAVELSBERGH M W P. Delivery volume optimization [J]. *Transportation Science*, 2004, 38(2): 210–223.
- [37] JAILLET P, BARD J F, HUANG L, *et al.* Delivery cost approximations for inventory routing problems in a rolling horizon framework[J]. *Transportation Science*, 2002, 36(3): 292–300.
- [38] RUSDIANSYAH A, TSAO D. An integrated model of the periodic delivery problems for vender-machine supply chain[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 70(3): 421–434.
- [39] LIU S C, LIN C C. A heuristic method for the combined location routing and inventory problem [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 26(4): 372–381.
- [40] JUNG J, MATHUR K. An efficient heuristic algorithm for a two-echelon joint inventory and routing problem[J]. *Transportation Science*, 2007, 41(1): 55–73.
- [41] KLEYWEGT A J, NORI V S, SAVELSBERGH M W P. The stochastic inventory routing problem with direct deliveries [J]. *Transportation Science*, 2002, 36(1): 94–118.
- [42] KLEYWEGT A J, NORI V S, SAVELSBERGH M W P. Dynamic programming approximations for a stochastic inventory routing problem[J]. *Transportation Science*, 2004, 38(1): 42–70.
- [43] ADELMAN D. A price-directed approach to stochastic inventory/routing[J]. *Operations Research*, 2004, 52(4): 499–514.
- [44] HVATTUM L M, LØKKETANGEN A. Using scenario trees and progressive hedging for stochastic inventory routing problems[J]. *Journal of Heuristics*, 2008, 15(6): 527–557.
- [45] CROXTON K L, GENDRON B, MAGNANTI T L. Models and method for merge in transit operations [J]. *Transportation Science*, 2003, 37(1): 1–22.
- [46] BELTRAMI E, BODIN L. Networks and vehicle routing for municipal waste collection [J]. *Networks*, 1974, 4(1): 65–94.
- [47] FEDERGRUEN A, ZIPKIN P. A combined vehicle routing and inventory allocation problem [J]. *Operations Research*, 1984, 32(5): 1019–1037.
- [48] GOLDEN B, ASSAD A, DAHL R. Analysis of a large-scale vehicle-routing problem with an inventory component[J]. *Large Scale Systems in Information and Decision Technologies*, 1984, 7(2/3): 181–190.
- [49] GOLDEN B L, BAKER E K. Future directions in logistics research [J]. *Transportation Research, Part A: General*, 1985, 19(5/6): 405–409.
- [50] 杜文, 袁庆达, 周再玲. 一类随机库存/运输联合优化问题求解过程分析[J]. *中国公路学报*, 2004, 17(1): 114–118.
- [51] 袁庆达. 库存—运输联合优化问题研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
- [52] 叶志坚, 杜文, 王清荣, 等. 供应商管理库存系统中库存和运输计划整合[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2003, 3(4): 82–88.
- [53] 赵达, 李军, 马丹祥. 求解随机需求库存—路径问题的一种算法 [J]. *系统工程*, 2006, 24(5): 23–28.
- [54] 杨信丰, 杨庆丰. 随机车辆路径问题的模型及其算法 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2006, 6(4): 75–80.
- [55] 傅成红, 符卓. 单周期离散随机需求的库存—运输整合优化 [J]. *系统工程*, 2007, 25(1): 9–12.
- [56] 唐加福, 董颖, 潘震东, 等. 租赁车辆运输外包模式下多次直接运输策略的集成库存运输计划 [J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(6): 1158–1164.
- [57] 娄山佐, 吴耀华. 基于分解协调法解决多库库存—路径问题 [J]. *公路交通科技*, 2007, 24(9): 145–149.
- [58] 武秀焕, 李延晖. 马氏过程的随机库存路径问题模型与算法 [J]. *工业工程与管理*, 2009, 24(1): 66–70.