


WILEY

国际运筹学汇刊

国际机场。反式。执行部分第
27 (2020) 314–335 号决议

的可变邻域搜索模拟启发式算法 随机需求下的多周期库存路径问题

阿尔约沙·格鲁莱拉·、哈维尔·帕纳德罗阿、赫西卡·德阿尔玛
布、
何塞·莫雷诺·佩雷茨克和安赫尔·胡安娜

ain 3—西班牙卡斯特尔德费尔斯加泰罗尼亚开放大学计算机科学系
西班牙巴塞罗那 Pompeu Fabra 大学经济和商业系
西班牙特内里费拉古纳大学地区发展大学学院

电子邮件: agruler@uoc.edu [格鲁勒]; jpanaderom@uoc.edu [潘纳德罗];
jesica.dearmas@upf.edu [德阿马斯]; jamoreno@ull.es [佩雷斯]; ajuanp@uoc.edu [胡安]

2017 年 2 月 5 日收到; 2018 年 2 月 2 日收到修订版; 2018 年 3 月 8 日接受

摘要

库存路径问题 (IRP) 结合了库存管理和配送路线规划决策。本文提出了一种模拟启发式方法, 该方法将蒙特卡罗模拟集成到可变邻域搜索 (VNS) 框架中, 用于求解具有随机顾客需求的多周期 IRP。在这个问题的现实变体中, 我们的目标是为每个客户-周期组合建立最优的再填充策略, 也就是说, 那些最小化周期内总期望成本的单独的再填充策略。该成本是预期库存成本和运输成本的总和。我们的 simheuristic 算法允许考虑由于每个周期中随机需求的实现而产生的周期之间的库存变化, 这种变化会影响下一个周期中要交付的数量, 并因此影响相关的路线计划。为了说明我们的模拟优化方法的潜力, 进行了一系列的计算实验。

关键词: 多周期库存路径问题; 随机需求; 可变邻域搜索; 元启发式; 模拟试探法

1. 介绍

货运物流和公路运输具有微观和宏观的重要性。一方面, 与运输和储存货物相关的成本构成了不同部门组织的主要经济因素 (欧盟委员会, 2016 年)。另一方面, 货运车辆的使用导致了负面的外部性, 如空气污染、噪音过大和交通拥堵 (联合国, 2011; 欧洲联盟, 2012 年; 美国环境保护署, 2013 年)。虽然与货运物流相关的实践和理论讨论

© 2018 作者。

国际运筹学汇刊 © 2018 年国际运筹学学会联合会, 由 John Wiley & Sons Ltd 出版, 地址: 英国牛津市加辛顿路 9600 号, 邮编: 02148, 美国马萨诸塞州马尔登市主街 350 号。

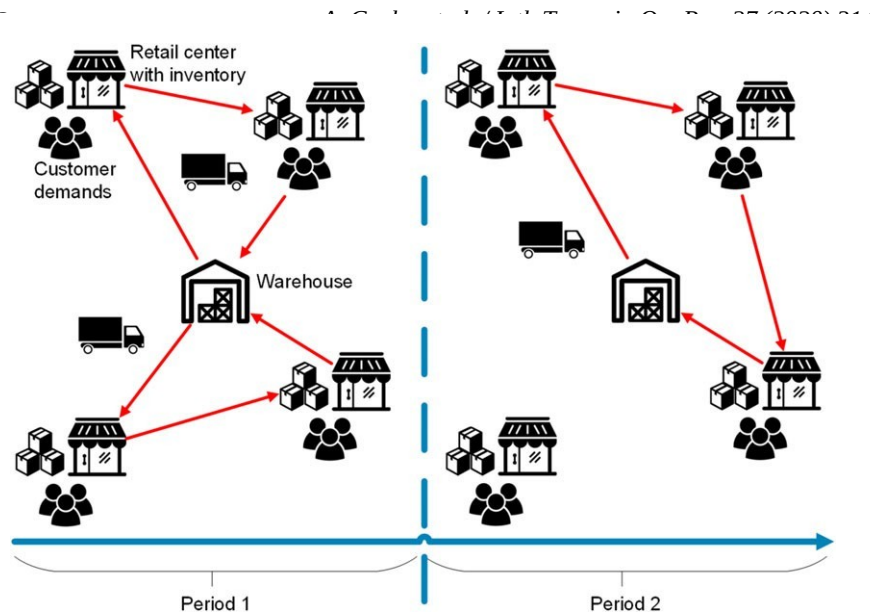
和运输(L&T)长期以来一直专注于单个公司运营的优化,协作业务战略正获得越来越多的关注(Ming et al., 2014; Ramanathan 和 Gunasekaran, 2014 年)。通过共享客户订单、信息和资源,在同一供应链中运营的公司希望通过集中的 L&T 计划来降低整体价值链成本。

在这种情况下,供应商管理库存(VMI)的概念是基于将库存管理决策转移给中央供应商。在 VMI 中,共有 n 个零售中心(RC)从位于中央仓库的单一供应商处进货。每个 RC 的库存水平和供应商交付的必要补货数量由最终客户需求决定。在非合作供应链中,每个 RC 根据自己的库存管理决策定义自己的补货水平,这直接影响供应商的交货路线规划流程。相反,VMI 的实施集中了供应商的库存和路线决策,允许从整个供应链的角度优化这两个决策(Andersson et al., 2010; Coelho 等人, 2013 年)。

从最优化的角度来看,这种供应链策略由库存路径问题(IRP)来表示。这个组合优化问题(COP)可以看作是著名的车辆路径问题(VRP)的延伸,使得问题设置 NP-hard(伦斯特拉和坎, 1981; 卡塞雷斯-克鲁兹等人, 2014 年)。由于 IRP 固有的复杂性,特别是元启发式求解方法被用于创建大规模 IRP 实例的库存和路由计划。然而,与其他复杂产品系统的情况一样,大多数求解框架只能提供过于简化的问题解决方案,其中大多数现实系统的自然不确定性未被考虑。本文通过提出流行和有效的可变邻域搜索(VNS)元启发式算法(Mladenovic 和 Hansen, 1997; Hansen 等人, 2010 年),用于求解每个 RC 处随机客户需求的多周期 IRP(图 1)。模拟启发式算法将元启发式框架与模拟相结合,以解决不确定条件下的优化问题(Juan 等人, 2015; Grasas 等人, 2016 年)。

通过将蒙特卡洛模拟(MCS)集成到 VNS 过程中,我们的模拟启发式算法能够考虑客户需求的随机实现,并相应地考虑多周期计划范围内库存水平、交货订单和路线计划的变化。在这个问题的现实变体中,我们的目标是为每个客户-周期组合建立最优的再填充策略,也就是说,那些最小化周期内总期望成本的单独的再填充策略。此总预期成本计算为预期库存成本和运输成本的总和。

本文扩展了 Juan 等人(2014)的工作,他们将简单的多起点启发式算法与模拟相结合,以解决需求不确定情况下的单周期 IRP。本文的主要贡献可以概括如下:(1)提出了一种新的求解多周期随机需求 IRP 的模拟启发式算法——该算法将模拟集成到 VNS 元启发式算法中;以及(b)在一系列说明其潜力的计算实验中测试该算法。本文的其余部分结构如下:第 2 节回顾了 IRP 的相关文献;第 3 节提供了具有随机需求的多周期 IRP 的数学公式;第 4 节概述了提出的算法;第 5 节描述和分析了一系列计算实验;最后,第 6 节总结了本文的工作,并提出了未来的研究方向。



图一。一个简单的两阶段库存路径问题。

表 1
结构 IRP 变量和本文的关系密切相关的作品

尺寸	结构变体			
时间范围	单周期 a	多期 b, c, d	循环的	-
供应链结构	一对一	一对多 a, b, c, d	多对多	多对一
库存政策	最高级别 a, d	订购-达到 b 级, c 级	-	-
库存决策	斯托克库特 a, d	积压 b, c	正的	-
输入变量	确定性的	随机 a, b, c, d	-	-

阿娟等人 (2014 年)。
bBertazzi 等人 (2013 年)。
cSolyal 等人 (2012 年)。
这张纸。

2. 文献评论

Andersson 等人 (2010 年) 和 Coelho 等人 (2013 年) 对不同的 IRP 环境和求解技术进行了大量的文献综述。除了与车队组成和其他路线相关方面相关的其他结构性问题变量之外，最重要的 IRP 问题备选方案如表 1 所示。为了更清楚的区分，描述了这一工作和最密切相关的出版物的特征。在这种情况下，本文提出的问题设置在一对多供应链环境中建立多个时间段的库存和路线计划。与为所有 RCs 定义全局补货库存水平的按级订购库存策略相比，本文讨论了最高水平策略，该策略为每个时间段的每个客户定义了单独的库存计划。此外，还考虑了每个期末产品缺货的可能性。最终客户需求被认为

具有随机性。下面将更详细地讨论用于确定性和随机 IRP 变量的一些元启发式求解方法。

2.1. 确定性 IRP 的元启发式求解方法

刘和李 (2011) 提出了一个可变邻域禁忌搜索 (VNTS) 的时间窗 IRP。基于最初的解决方案，在 TS 框架内研究了与车辆路线和库存控制策略相关的不同邻域结构。作者考虑了超过 100 个规划期的 100 个客户。Aksen 等人 (2014) 开发的自适应大邻域搜索 (ALNS) 元启发式算法中也使用了不同的邻域结构。作者研究了从不同来源节点收集植物油的选择性和周期性 IRP。解决了多达 100 个源节点和 7 天规划范围的问题设置。Popovic 等人 (2012 年) 开发了一种 VNS 算法，用于同质多舱车辆燃料输送的多产品、多时段 IRP。Mjirda 等人 (2014 年) 讨论了多产品 IRP 的两阶段 VNS。在第一个求解阶段，求解相关的 VRP，然后考虑运输和库存成本对其进行迭代改进。不同于以前引用的作者，多对一供应链网络，其中不同的供应商服务于单个装配线进行了讨论。

Abdelmaguid 等人 (2009 年) 提出了一种启发式方法，用于解决有限多期 IRP 的延期交货问题。在应用了一个建设性的试探法来估计每个客户在每个考虑期间的运输成本之后，应用了一个改进试探法。然后，在不同时期之间交换客户交付量，以改进初始解决方案。他们报告最多 15 个客户和 7 天规划范围的问题解决方案。Archetti 等人 (2012 年) 也提出了多期 IRP。然而，他们的工作中没有考虑缺货的情况。作者开发了一种基于禁忌搜索方案与特别设计的混合整数规划模型相结合的混合启发式算法 (Juan 等人, 2015; Grasas 等人, 2016 年)。Cordeau 等人 (2015) 讨论了多产品、多时期 IRP 的三阶段启发式方法，其中每个阶段代表一个决策过程。首先，使用基于 Langragian 的方法构建补货计划，指定在每个时期为哪个客户服务以及交付多少。其次，构建车辆路径。最后，规划和路线决策结合成一个混合整数线性规划模型。他们解决多达 50 名客户和五种不同产品的问题。

Moin 等人 (2011 年) 还研究了多达 98 个供应商的入站物流的相同案例，以测试他们针对多产品、多周期 IRP 的混合遗传算法 (GA)。该算法遵循先分配，后路由的策略。Park 等人 (2016) 最近提出了一个一对多供应链网络中多周期 IRP 的遗传算法，并考虑了销售损失。他们的实验是使用 12 个客户和 12 个时间段的问题集进行的。李等人 (2014) 提出了一种 TS 元启发式算法，解决了石油石化行业库存路径的特殊情况。以最小化路径旅行时间为目标，这个问题设置的特殊性包括避免缺货和其他操作约束的高度重要性。Shaabani 和 Kamalabadi (2016) 提出了一种基于群体的多产品、多零售商 IRP 易逝品模拟退火算法。

Nambirajan 等人(2016 年)也扩展了经典的 IRP 公式。一个更紧密的供应链合作被认为是包括在一个三级供应链中的一个中心仓库和不同仓库的补给活动。首先,定义了一组制造商对单个仓库的补货策略。然后,通过使用基于聚类、分配和路线安排的三阶段试探法来计划中央仓库到多个仓库的路线安排。Vansteenkoven 和 Mateo (2014)讨论了无限规划范围内循环 IRP 的迭代局部搜索算法。Chitsaz 等人(2016 年)、Raa 和 Dullaert (2017 年)以及 Zachariadis 等人(2009 年)也提出了用于循环 IRP 的其他启发式和元启发式技术。

2.2. 随机 IRP 的元启发式求解方法

与确定性情况不同,关于不确定性下 IRP 的文献更少。Jaillet 等人(2002 年)提出了无限期库存路线的随机需求,他们在滚动期框架中提出了增量成本近似值。阿德尔曼(2004)将随机 IRP 公式化为马尔可夫决策过程。作者通过使用线性规划的双重价格来应用成本近似值。此外,Kleywegt 等人(2004 年)讨论了需求不确定性的 IRP 的近似方法,该方法被建模为马尔可夫决策问题。Hvattum 和 Ikketangen(2008 年)和 Hvattum 等人(2009 年)提出了将随机 IRP 建模为马尔可夫决策过程的另一种方法。作者通过一般的离散分布对随机需求建模,而他们的解决方案框架是基于场景树的使用。通过使用标准 MIP 求解器、贪婪随机自适应搜索程序(GRASP)和渐进对冲算法(PHA)获得场景树问题的解决方案。

最近关于随机库存路径的工作包括 Bertazzi 等人(2013)的工作,他们考虑了缺货和有限范围的 IRP,用动态规划模型和混合转算法解决。Bertazzi 等人(2015 年)通过开发基于首次展示的数学算法,解决了随机需求和运输采购的 IRP 问题。Solyal 等人(2012 年)通过 MILP 公式在稳健优化方法中解决了类似的问题。特别是 Bertazzi 等人(2013 年)和 Solyal 等人(2012 年)的著作讨论了本文所述问题的其他变体。因此,虽然前者考虑的是按级订货的库存策略,即每次访问时每个 RC 都被装满到其最大容量,但我们版本的主要目标恰恰是找出这些再装满策略的最优值。此外,我们的方法允许通过使用不同的概率分布来模拟客户的需求,而 Solyal 等人(2012 年)是一种稳健的方法,假设这些需求具有统一的随机行为。

黄和林(2010)针对需求不确定的多产品问题提出了一种改进的蚁群优化元启发式算法。李等人(2016)讨论了一种考虑随机客户需求和补货提前期的稳健库存路径策略。Roldan 等人(2016 年)阐述了动态随机 IRP 的库存补充和客户选择政策的稳健性。Yu 等人(2012)解决了具有分批交付和服务水平约束的随机 IRP 问题。Soysal 等人(2015 年)通过在路线规划过程中估算二氧化碳排放量,在需求不确定的 IRP 解决方案中考虑了环境问题。Niakan 和 Rahimi (2015)的工作也将温室气体排放降至最低,他们提出了一种医疗药品分销多目标 IRP 的模糊可能性方法。Rahim 等人(2014 年)通过确定性方法解决了具有随机平稳需求的多期 IRP

表 2 符号

标志	指数	类型	意义
V	$i, j = 0, 1, \dots, n$	数	包含在计划展望期内的一组期间
p	$p = 1, \dots, P $	位置	一组位置, 包括 0 号仓库和 n 号 RCs
v	$i, j = 1, \dots, n$	数据	RCs 数据集 ($Vf = V \setminus \{0\}$)
c_{ij}	$i, j \in V$	成本	从 $i \in V$ 到 $j \in V$ 的数据成本
h	$h > 0$	容量	数据最大车辆容量
$li+$	$0 \leq li+ \leq 1$	容量	RC i 的数据最大存储容量
0	$i \in V$	库存	Var 在周期 p 期间 RC i 的可用初始库存
dip	$I \in Vf, p \in P$	需求	Var 在 p 期间 $q_{ip} \geq 0$ 期间, 客户在 RC i 的总需求 $I \in Vf, p \in P$ 期间开始时, 在 RC i 提供的数量
yip	$yip \geq 0$	变量	二进制变量, 定义在周期 P 是否访问 RC i
I, j, k	$I, j \in V, k \in K$	变量	二进制变量, 定义车辆 K 是否在周期 p 从 I 到 j

等效近似模型。陈和林 (2009) 还考虑了现实生活中多周期、多产品的情况, 解决了需求随机的问题。此外, 作者将风险厌恶纳入他们的模型。最后, Juan 等人 (2014) 提出了一种混合模拟-优化方法, 将多起点元启发式算法与 MCS 相结合, 以解决具有随机需求的单周期 IRP。

3. 模型描述

本节正式模拟了每个 RC 上随机客户需求的周期性 IRP。尽管数学公式对于所提出的基于元启发式的求解技术来说不是必要的, 但它允许更好地理解复杂的决策问题。表 2 列出了数据和变量所用的符号。

设 $V = \{0, 1, \dots, n\}$ 表示由仓库 (节点 0) 和 n 个 RCs 组成的有限位置集。这组 RCs 将由 $V \setminus \{0\}$ 表示。随机周期 IRP 以最小化总期望成本为目标, 在有限的计划范围 P 和 $P-1$ 周期内结合了库存和路线决策。在一个周期 $p \in P$ 内, 每个 RC $i \in V \setminus \{0\}$ 下的客户总需求是一个随机变量, D_{ip} , 它遵循一个已知的概率分布。在本研究中, 假设这些随机需求在整个 RCs 和整个周期内都是独立的——尽管它们

不需要相同地分布。同样, 假设客户在每个重现期和时段的总需求将始终得到满足。因此, 如果 RC i 在期间 p 发生缺货, 则在期间 p 结束时将从仓库向 i 进行额外的装运, 以弥补未满足的需求——额外装运的成本将被视为缺货成本。

关于库存管理, 决策变量指的是在周期 p ($\forall i \in v \setminus \{0\}, \forall p \in P$) 开始时必须在 RC i 供应的产品数量 $q_{ip} \geq 0$ 。如果 $li+ > 0$ 表示 RC i 的最大存储容量, L_0 表示 RC i 在

周期 p ($0 \leq L_0 \leq 1$), $L_0 \leq 1 + L_0$ 。第一期的初始库存水平 ($p = 1$)

然后 q

作为输入给出, 即 $L_0 = 1, \forall i \in v \setminus \{0\}$ 。在每个周期结束时, 一旦客户

总需求是已知的，下一个时期的初始库存水平可以计算为

$L_{i,p+1} = \max\{L_{i,p} + q_{ip} - \text{Dip}, 0\}$ 。同样，在这一点上，持有或缺货库存成本为

RC, I 和周期 p 可通过等式 (1) 获得，其中 λ 代表的单位成本

在期末持有剩余库存， c_{0i} 代表从仓库到 RC i 的直接运输成本 (该值乘以 2，以说明返回仓库的行程)：

$$f(L_{i,p}, q_{ip}, \text{Dip}) = \begin{cases} \lambda L_{i,p} + c_{0i} & \text{如果剩余 } L_{i,p} + q_{ip} \geq \text{Dip} \\ \lambda L_{i,p} + 2c_{0i} & \text{缺货时 } L_{i,p} + q_{ip} < \text{Dip} \end{cases}$$

因此，总库存成本可以表示为等式 (2) 所示：

$$I(q_{ip}, \text{Dip} \mid i \in V, p \in P) = \sum_{p \in P} \sum_{i \in V} f(q_{ip}, \text{Dip}) \quad (2)$$

对于每个周期 $p \in P$ ，需要求解 $q_{ip} > 0$ 的 RCs i 的 VRP。正如 Toth 和 Vigo (2014) 所讨论的，VRP 可以定义在一个完整的无向图 $G(V, E)$ 上，其中 V 包括 n 个需求点 (RCs) 由一组 K 辆同类车辆提供服务的仓库， E 是连接 V 中每对设施的边的集合。车队中的每辆车的最大装载能力由 $h > 0$ 给出。从一个设施 I 移动到另一个设施 j ($i, j \in V, I, j$) 有一个相关的旅行成本 c_{ij} , $c_{ji} > 0$ 。路由成本

在周期 p 取决于二进制决策变量 x_{pk} ，其定义了车辆 $k \in K$ 是否在周期 p 穿过连接设施 I 和 j 的边缘。注意，这可能取决于客户需求 Dip 的具体值，即 $x_{pk} = x_{pk}(\text{Dip})$ 。相应地，跨所有周期的总路由成本可以表示为等式 (3) 所示：

$$R(x_{pk}, \text{Dip} \mid i, j \in V, p \in P, k \in K) = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{ij} x_{pk} \quad (3)$$

同时设置 q_{ip} 和 x_{pk} 决策变量以最小化预期总库存和路线选择成本的目标在等式 (4) 中被公式化：

$$\min_{q_{ip}, x_{pk}} \sum_{i \in V} \sum_{p \in P} [f(q_{ip}, \text{Dip}) + R(x_{pk}, \text{Dip})] \quad (4)$$

约束 (5) 定义了每个库存补充决策变量的范围：

$$0 \leq q_{ip} \leq L_i + L_0 \quad \forall i \in V, \forall p \in P \quad (5)$$

等式 (6) 将周期 p 的总需求与下一周期的初始库存水平相关联：

$$L_{i,p+1} = \max\{L_{i,p} + q_{ip} - \text{Dip}, 0\} \quad \forall i \in V, \forall p \in \{1, 2, \dots, |P| - 1\} \quad (6)$$

等式(7)和(8)表明,对于每个RC, I , 如果 $q_{ip} > 0$, 则为 $y_{ip} = 1$, 否则为 $y_{ip} = 0$ (其中 M 是一个非常大的数字):

$$q_{ip} \leq M y_{ip} \quad \forall i \in V, \forall p \in P, \quad (7)$$

$$y_{ip} \leq q_{ip} \quad \forall i \in V, \forall p \in P. \quad (8)$$

给定在周期 p ($q_{ip} > 0$) 服务的一组 RC, 通过设置变量 x_{pk} , $I \in V$, $k \in K$ 来陈述建立的车辆路线。对于所有 $I \in V$ 和 $p \in P$, 如果 RC i 必须在周期 P 开始时服务 (即, 如果 $q_{ip} > 0$), 则让 y_{ip} 是取值为 1 的二进制变量, 并且 $y_{ip} = 0$ 否则取值 0。

约束(9)意味着每辆车 k 在每个周期恰好离开和返回停车场一次:

$$\begin{aligned} x_{pk} = x_{pk} = 1 \\ \forall k \in K, \forall p \in P. \end{aligned} \quad (9)$$

r

约束(10)保证每个被访问的 RC $I \in V$ 在任何时间段的服务操作之后被留下:

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij}^{pk} = \sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij}^{pk} \quad \forall i \in V, \forall k \in K, \forall p \in P. \quad (10)$$

等式(11)是每个周期的子图消除约束(子图的 RC 集将违反相应的约束):

$$\begin{aligned} x_{pk} \leq 2 \\ \forall S \subset V, \forall k \in K, \forall p \in P. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sum_{j \in S} x_{ij}^{pk} = \sum_{j \in S} x_{ij}^{pk} \quad \forall S \subset V, \forall k \in K, \forall p \in P.$$

同时, 等式(12)避免 RC 电源超过车辆负载能力:

$$\begin{aligned} x_{pk} q_{ip} \leq h \\ \forall k \in K, \forall p \in P. \end{aligned} \quad (12)$$

$$I \in V, j \in V$$

最后，约束 (13) 和 (14) 对辅助和路由决策变量实施二元条件：

$$u_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V \setminus \Sigma, \quad \forall p \in P. \quad (13)$$

$$x_{pk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, \quad \forall k \in K, \quad \forall p \in P. \quad (14)$$

具有随机顾客需求的多周期 IRP 包括在约束 (5) 下最小化目标函数 4。

前一节中描述的问题的可能解决方案将具有具有 V *行和 P 列的矩阵的形式，其中该矩阵中的元素 (I, P) 将表示与周期 $P(I \in V, p \in P)$ 处的 RC i 相关联的再填充策略。我们提出的解决多周期问题的方法

IRP 由三个不同的阶段组成。首先，一个建设性的启发式算法被用来产生一个初始解决方案。该初始解决方案将是一个“同质”矩阵，在其所有单元中包含相同的值，也就是说：它将提出一个独特的再填充策略，该策略将系统地应用于不同时期的所有 RCs。该策略将产生特定的预期库存成本（每个 RC-期间组合的所有预期库存成本的总和）以及特定的预期运输成本（每个期间的所有预期运输成本的总和）。请注意，在周期 p 结束时与每个 RC 相关联的库存成本以及周期 $p-1$ 时的路线成本将取决于周期 p 时每个 RC 的随机需求的精确值（因为这些值将确定在周期 p 结束时与每个 RC 相关联的库存水平）。第二，将建设性启发式算法集成到 VNS 框架的破坏-构建阶段，然后与 MCS 相结合，以便迭代地增强初始解。该过程基于多个不同解邻域的构造以及随后的探索当前解的邻域的局部搜索阶段。这里使用 MCS 来生成随机需求的实现，然后获得预期库存和路线成本的估计。最后，使用更高数量的模拟运行的细化阶段被应用于在前一阶段中获得的最“有希望的”或“精英的”解决方案，以便获得对预期成本的更精确的估计，并选择最终的解决方案矩阵。

在解决所提出的问题时，可以使用不同的元启发式算法，例如 GRASP、迭代局部搜索、禁忌搜索、遗传算法、模拟退火、VNS 等。然而，正如 Hansen 和 Mladenovic (2014) 所讨论的，VNS 方法相对容易实施，不包含大量需要耗时设置过程的参数，并且在简单性和性能之间提供了良好的平衡（就解决方案质量和计算时间而言）。

4.1. 初始解决方案的构建

为了生成一个初始解决方案，开发了一个建设性的启发式算法。这种启发式方法背后的思想是为每个 RC 和周期分配一个公共策略。所选择的策略将是提供最低预期总成本的策略，该总成本将包括预期库存和路线成本。试探法分为两个阶段。在第一个阶段，测试了不同的补货策略，并估算了相关的服务数量和预期库存成本。在第二阶段，为每个再填充策略计算路由成本。在此阶段，将使用前一阶段生成的待供应数量。最后，提供最低总预期成本的政策在每个 RC 和周期实施。

算法 1 更详细地描述了构造性启发式算法。输入参数如下：RC 的集合、时间段的集合、初始库存水平、每个 RC 的最大存储容量、每个 RC 在每个时间段的随机需求、再填充策略的集合以及

算法 1 生成初始解

Inputs:
 $V = \{0, 1, \dots, |V|\}$: Set of depot (0) and RCs (V^*)
 $P = \{1, 2, \dots, |P|\}$: Set of time periods
 L_{i1}^0 : Initial inventory level of RC i at period 1
 l_i^+ : Maximum storage capacity of RC i
 D_{ip} : Customers' aggregated demand at RC i during period p
 T : Refill policies as a % of l_i^+ (e.g., 0%, 25%, 50%, 75%, 100%)
 $maxRuns$: Maximum number of runs in the Monte Carlo simulation
 % Phase 1: Compute avg. multi-period inventory costs for each center-policy combination

```

1 foreach refill policy  $t \in T$  do
2    $expInvCost[t] \leftarrow 0$  % expected inventory cost associated with policy  $t$ 
3 end
4 foreach RC  $i \in V^*$  do
5    $accumInvCost \leftarrow 0$ 
6    $iter \leftarrow 0$ 
7   while  $iter < maxRuns$  do
8     foreach period  $p \in P$  do
9        $q_{ip}[t][iter] \leftarrow \max\{t \cdot l_i^+ - L_{ip}^0, 0\}$ 
10       $d_{ip} \leftarrow$  generate random observation of  $D_{ip}$  % Monte Carlo simulation
11       $L_{i(p+1)}^0 \leftarrow \max\{L_{ip}^0 + q_{ip}[t][iter] - d_{ip}, 0\}$ 
12       $invCost \leftarrow computeInventoryCost(t, L_{i(p+1)}^0)$ 
13       $accumInvCost \leftarrow accumInvCost + invCost$ 
14       $iter \leftarrow iter + 1$ 
15    end
16     $avgInvCostRC \leftarrow accumInvCost / maxRuns$  % avg. inventory cost of RC  $i$  under policy  $t$ 
17     $expInvCost[t] \leftarrow expInvCost[t] + avgInvCostRC$ 
18  end
19  % Phase 2: Compute avg. multi-period routing cost and total cost for each policy
20   $initSol \leftarrow emptySol$ 
21   $cost(initSol) \leftarrow \infty$ 
22  foreach refill policy  $t$  in  $T$  do
23     $accumRoutingCost \leftarrow 0$ 
24     $iter \leftarrow 0$ 
25    while  $iter < maxRuns$  do
26      foreach period  $p \in P$  do
27         $routingCost \leftarrow estimateRoutingCost(q_{1p}[t][iter], \dots, q_{|V|p}[t][iter])$  % use savings heuristic
28         $accumRoutingCost \leftarrow accumRoutingCost + routingCost$ 
29      end
30       $iter \leftarrow iter + 1$ 
31    end
32     $expRoutingCost \leftarrow accumRoutingCost / maxRuns$ 
33     $totalCost \leftarrow expInvCost[t] + expRoutingCost$ 
34    if  $totalCost < cost(initSol)$  then
35       $initSol \leftarrow setAllRefillDecisionsToValue(t)$ 
36       $cost(initSol) \leftarrow totalCost$ 
37    end
38  end
39  return  $initSol$ 

```

必须执行的最大模拟运行次数。在我们的案例中，考虑的可能再填充策略有：

- 。没有库存补充，也就是说，RC 只能依靠其当前的库存水平来满足其客户在下一期间的需求。
- 。最多再填充总库存容量的四分之一(1/4-再填充)，即，如有必要，额外添加产品将从仓库供应，以达到该水平。
- 。重新装满总库存容量的一半(1/2-重新装满)。
- 。重新装满总库存容量的四分之三(3/4-重新装满)。
- 。重新加注至满容量(完全重新加注)。

因此，对于每个策略和 RC，执行少量模拟运行(例如，30-100 次运行)以获得初始估计值。在每次运行期间，将获得每个 RC 期组合的服务数量(第 8 行)。该数量用于启发式算法的第二阶段，它是在考虑 RC 的最大存储容量及其初始库存水平的情况下计算的。对于每个 RC 和周期，使用随机抽样生成随机总需求的特定值(第 9 行)。因此，可以计算本期期末的库存水平(第 10 行)，这将是下一期的初始库存水平。其计算方法是初始库存水平和服务数量之和减去总客户需求。如果发生缺货，则应用惩罚成本，并将最终库存水平设置为 0(在新的周期开始时，它不能为负)。请注意，考虑到一个时期的需求实现与下一个时期开始时的库存水平之间的相关性，系统会不断发展。最后，计算每个 RC 和保单的库存成本(第 11 行)。如前所述，如果发生缺货，往返于仓库的费用将作为库存成本的一部分。否则，库存成本等于库存单位数乘以 λ 参数。在我们的计算实验中，该参数被设置为 0.25，正如一些作者所建议的那样(Juan 等人，2014)。重复此过程(第 6-13 行)，直到达到模拟运行的总次数。库存成本在每次运行中累计(第 12 行)，然后计算每个 RC 的平均库存成本(第 14 行)。将结果值添加到与当前策略相关的总预期库存成本中(第 15 行)。

在第一阶段结束时，获得每个考虑的补充策略的预期库存成本。此外，为每个 RC 和周期计算的服务数量将在每个模拟运行中存储。这些数量在第二阶段用于估计与每个策略相关的预期路由成本。因此，对于每一系列的交货量，节约启发式算法(Clarke 和 Wright, 1964)被用来估计相关的路线成本(第 23 行)。最后，计算预期的路由成本(第 26 行)。在这个阶段的最后，选择涉及最低期望总成本(库存加路线)的策略。

4.2. SimVNS 阶段

在我们方法的第二阶段，应用了经典的后裔 VNS 算法(Hansen 等人，2010)。算法 2 描述了这个过程。在第一阶段，VNS 保留给定数量的精英解，这些精英解由轨迹中发现的最佳解组成。它首先将算法 1 生成的初始解分配给当前基础解 baseSol，并将其添加到 an 中

Inputs:
 $V = \{0, 1, \dots, |V|\}$: Set of depot (0) and RCs (V^*)
 $P = \{1, 2, \dots, |P|\}$: Set of time periods
 $maxRuns$: Maximum number of simulation runs in the VNS phase
 $maxLongRuns$: Maximum number of runs in the refinement phase
 k_{max} : Maximum percentage of policies to reset (defines the number of neighborhoods)
 $eliteSetSize$: Number of best solutions for the second phase $initSol$: initial solution
% Phase 1: VNS with Monte Carlo simulation

```

1  $baseSol \leftarrow generate\ initial\ solution\ using\ Algorithm\ 1$ 
2  $eliteSols \leftarrow \{baseSol\}$ 
3 while stopping criteria not met do
4    $k \leftarrow 1$ 
5   repeat
6      $newSol \leftarrow shaking(k, maxRuns, baseSol)$ 
7      $newSol \leftarrow localSearch(newSol)$ 
8     if number of sols in eliteSols < eliteSetSize then
9        $eliteSol \leftarrow add(eliteSol, newSol)$ 
10    end
11    else
12       $ls, newSol \leftarrow localSearch(newSols)$ 
13    end
14    if  $cost(newSol) < cost(baseSol)$  then
15       $baseSol \leftarrow newSol$ 
16    end
17    else
18       $k \leftarrow k + 1$ 
19    end
20  until  $k > k_{max}$ 
21 end
22 % Phase 2: Refinement of best solutions
23  $bestSol \leftarrow baseSol$ 
24 for each sol  $\in eliteSols$  do
25    $ugSimulation(sol, maxLongRuns)$ 
26   if  $cost(sol) < cost(bestSol)$  then
27      $bestSol \leftarrow sol$ 
28   end
29 end
30 return  $bestSol$ 

```

elite solutions $eliteSols$ 的空池，然后继续主 VNS 循环，直到达到预定义的停止标准。在这个循环中，VNS 通过在需要时对越来越大的邻域进行搜索来调节开发和探索，并通过迭代应用局部搜索来改进找到的局部最优解。通过这 k 个邻域的移动是使用摇动算子来执行的(第 6 行)。我们的摇动操作符工作如下。要从原始策略矩阵修改的策略的数量由 k 给出， k 从最小值移动到最大值。然后，通过使用为获得初始解决方案而设计的建设性启发式算法，这些策略被重置(破坏过程)和重新定义(重建过程)(唯一的区别是，现在它只影响策略矩阵中元素的子集)。通过增加 k 的值，引入的变化越来越大，从而允许在邻域中移动。在这个摇动过程之后，算法执行(行

7) 随后的局部搜索以获得当前解邻域内的局部最小值。这种局部搜索包括随机选择一个策略矩阵元素，并将相关策略改变为提供最佳结果的策略。这一过程反复重复，同时实现总预期成本的新改进。表 3 总结了用于开发和探索解决方案搜索空间的特定于问题的操作符。每次生成局部最小值时，如果解的数量没有达到其大小(第 8 行和第 9 行)或者它比最差的精英解好(第 11 行和第 12 行)，则它被包括在精英解 eliteSol 的集合中。在经典 VNS 中，如果局部最小值比基础解更好，它就是新的基础解，k 的值再次被设置为 1(第 13 - 15 行)。否则，该值增加 1(第 17 行)，直到最大数量 kmax。

4.3. 细化阶段

本阶段的目的是以矩阵形式提炼 VNS 算法获得的精英解决方案，包括每个 RC 期组合的补充政策。

5. 计算实验和结果分析

一组计算实验已经完成，以说明我们的方法用于解决随机需求的多周期 IRP 的效用。由 Augerat 等人(1995)提出并由 Juan 等人(2014)改编用于 IRP 的 27 个 VRP 实例的集合被用作测试床。这些实例包含 27 到 80 个 RC 节点、一个中央仓库和一个由 5 到 10 辆同类车辆组成的车队。该算法作为 Java 应用程序实现，并使用以下参数规范执行：

- 。 存货持有成本: $\lambda = 0.25$ 。
- 。 算法停止标准: 100 秒考虑周期数。
- 。 阶段 1: 30 的模拟运行次数。
- 。 细化阶段的模拟运行次数: 1000。
- 。 抖动算子 k 的最大值: 40%。

假设总客户需求遵循对数正态概率分布，其平均值与原始实例中提出的平均值相同。此外，根据 Juan 等人(2014)的研究，考虑了三种不同的方差水平: 低(因子 0.25)、中(因子 0.50)和大(因子 0.75)。作为相对于以前工作的主要创新，分析了三个不同的规划范围: 3、5 和 7 个时间段。获得的结果在表 4-6 中报告。每个问题设置中的 RCs n 和 vehicles k 的数量反映在实例中

表 3
VNS 元启发式算子类型描述中使用的摇动和局部搜索算子

随机策略更改利用通过随机更改 k 个策略决策来破坏和修复解决方案
引导式策略更改探索通过将单个策略决策更改为找到的最佳决策来破坏和修复解决方案

表 4

将我们的最佳解决方案与初始解决方案进行比较(方差= 0.25)

情况	周期:3 周期:5 周期:7																	
	单 周 期(1)	多周期初 始化 (2)	多周期初 始化 (3)	多周期 OBS (3)	百分比差 距 (1)-(3)	百分比差 距 (2)-(3)	单 周 期(4)	多周期初 始化 (5)	多周期 OBS (6)	百分比差 距 (4)-(6)	百分比差 距 (5)-(6)	单 周 期(7)	多周期初 始化 (8)	多周期 OBS (9)	百分比差 距 (7)-(9)	百分比差 距 (8)-(9)		
A-n32-k5	3968, 9 3715, 5 3615, 1 8, 9 2, 7 6563, 1 5872, 4 5807, 2 11, 5 1, 1 9523, 5 8452, 6 8069, 615, 3 4, 5																	
A-n33-k5	3308, 5 3213, 5 2966, 6 10, 3 7, 7 5573, 8 5143, 5 4922, 7 11, 7 4, 3 8111, 7 7217, 8 6901, 514, 9 4, 4																	
A-n33-k6	3576, 5 3349, 5 3184, 5 11, 0 4, 9 5665, 0 5493, 7 5207, 6 8, 1 5, 2 8111, 7 7593, 9 7174, 4 11, 65, 5																	
A-n37-k5	3059, 4 3045, 4 2951, 2 3, 5 3, 1 5163, 6 5010, 3 4929, 7 4, 51, 6 7354, 5 7156, 7 6867, 0 6, 6 4, 0																	
A-n38-k5	3724, 5 3548, 5 3399, 38, 7 4, 2 6287, 3 5814, 4 5659, 7 10, 0 2, 7 8943, 4 8216, 1 7946, 9 11, 1 3, 3																	
A-n39-k6	4124, 9 3852, 9 3627, 9 12, 0 5, 8 6701, 6 6262, 3 6004, 1 10, 4 4, 1 9421, 2 8620, 6 8358, 1 11, 3 3, 0																	
A-n45-k6	4694, 5 4206, 5 4114, 3 12, 42, 2 7691, 9 6935, 3 6729, 9 12, 5 3, 0 10637, 6 9408, 4 9329, 8 12, 3 0, 8																	
A-n45-k7	5876, 1 5452, 1 5251, 2 10, 6 3, 7 9665, 6 8719, 5 8531, 7 11, 7 2, 2 13435, 4 11968, 5 11713, 7 12, 8 2, 1																	
A-n55-k9	5730, 4 5244, 4 4970, 5 13, 3 5, 2 9632, 4 8383, 7 8194, 6 14, 9 2, 3 13134, 4 11756, 9 11278, 7 14, 14, 1																	
A-n60-k9	7102, 5 6325, 8 6154, 8 13, 32, 7 11864, 4 10262, 7 10174, 6 14, 2 0, 9 16237, 1 14300, 9 13855, 0 14, 7 3, 1																	
A-n61-k9	5245, 1 4878, 1 4621, 9 11, 9 5, 3 8776, 0 7954, 4 7705, 5 12, 23, 1 12302, 1 11026, 5 10701, 3 13, 02, 9																	
A-n63-k9	8850, 0 7913, 2 7668, 7 13, 3 1 14579, 3 12810, 8 12479, 3 14, 4 2, 6 19657, 6 17629, 7 17008, 7 13, 5 3, 5																	
A-n65-k9	6388, 9 5658, 7 5549, 5 13, 1 1, 9 10453, 7 9304, 1 9050, 5 13, 4 2, 7 14757, 2 12895, 0 12581, 8 14, 7 2, 4																	
A-n80-k10	9673, 5 8716, 3 8322, 2 14, 0 4, 5 15563, 4 13717, 0 13463, 4 13, 5 1, 8 19862, 5 19268, 0 18505, 7 6, 8 4, 0																	
B-n31-k5	3447, 5 3344, 8 3108, 5 9, 8 7, 1 5826, 8 5442, 8 5098, 0 12, 5 6, 3 8164, 6 7608, 2 7121, 1 12, 8 6, 4																	
B-n35-k5	4766, 8 4554, 3 4298, 3 9, 8 5, 6 7890, 5 7361, 9 6987, 0 11, 55, 1 11080, 3 9927, 0 9801, 1 11, 5 1, 3																	
B-n39-k5	3082, 7 2981, 9 2910, 9 5, 6 2, 4 5131, 2 4920, 7 4756, 0 7, 3 3, 3 7223, 2 6903, 5 6637, 6 8, 13, 9																	
B-n41-k6	4374, 7 3942, 5 3823, 2 12, 63, 0 6970, 2 6392, 6 6208, 5 10, 92, 9 9863, 3 9096, 5 8680, 4 12, 0 4, 6																	
B-n45-k5	3882, 0 3548, 6 3411, 1 12, 13, 9 6213, 1 5755, 0 5529, 1 11, 0 3, 9 8661, 0 7883, 8 7761, 7 10, 41, 5																	
B-n50-k7	4036, 6 3655, 6 3538, 9 12, 3 3, 2 6860, 1 6059, 7 5856, 7 14, 6 3, 3 9494, 1 8354, 4 8112, 4 14, 6 2, 9																	
B-n52-k7	3894, 4 3825, 3 3652, 46, 2 4, 5 6466, 5 6276, 2 6001, 8 7, 2 4, 4 9064, 2 8368, 6 8257, 8 8, 9 1, 3																	
B-n56-k7	3464, 7 3380, 2 3286, 75, 12, 8 5848, 2 5606, 6 5516, 4 5, 7 1, 6 8129, 3 8113, 3 7580, 86, 7 6, 6																	
B-n57-k9	8205, 8 7454, 9 7174, 5 12, 63, 8 13288, 3 11987, 2 11544, 4 13, 13, 7 16863, 3 16566, 8 15867, 65, 9 4, 2																	
B-n64-k9	4617, 3 4339, 3 4219, 3 8, 6 2, 8 7580, 0 7066, 6 6889, 19, 1 2, 5 10893, 5 9872, 0 9600, 7 11, 9 2, 7																	
B-n67-k10	5793, 1 5315, 5 5125, 7 11, 53, 6 9448, 3 8581, 6 8369, 3 11, 4 2, 5 13218, 5 12064, 7 11535, 8 12, 7 4, 4																	
B-n68-k9	6485, 2 6107, 6 5824, 0 10, 24, 6 10720, 7 9943, 7 9414, 4 12, 2 5, 3 15266, 7 13490, 3 13196, 8 13, 6 2, 2																	
B-n78-k10	6498, 5 5881, 6 5653, 7 13, 0 3, 9 10631, 8 9664, 1 9207, 1 13, 4 4, 7 14778, 4 13399, 1 12756, 9 13, 7 4, 8																	
平均值	5106, 4 4720, 5 4534, 2 10, 6 4, 0 8409, 5 7657, 1 7416, 2 11, 2 3, 2 11636, 7 10635, 5 10266, 8 11, 7 3, 5																	

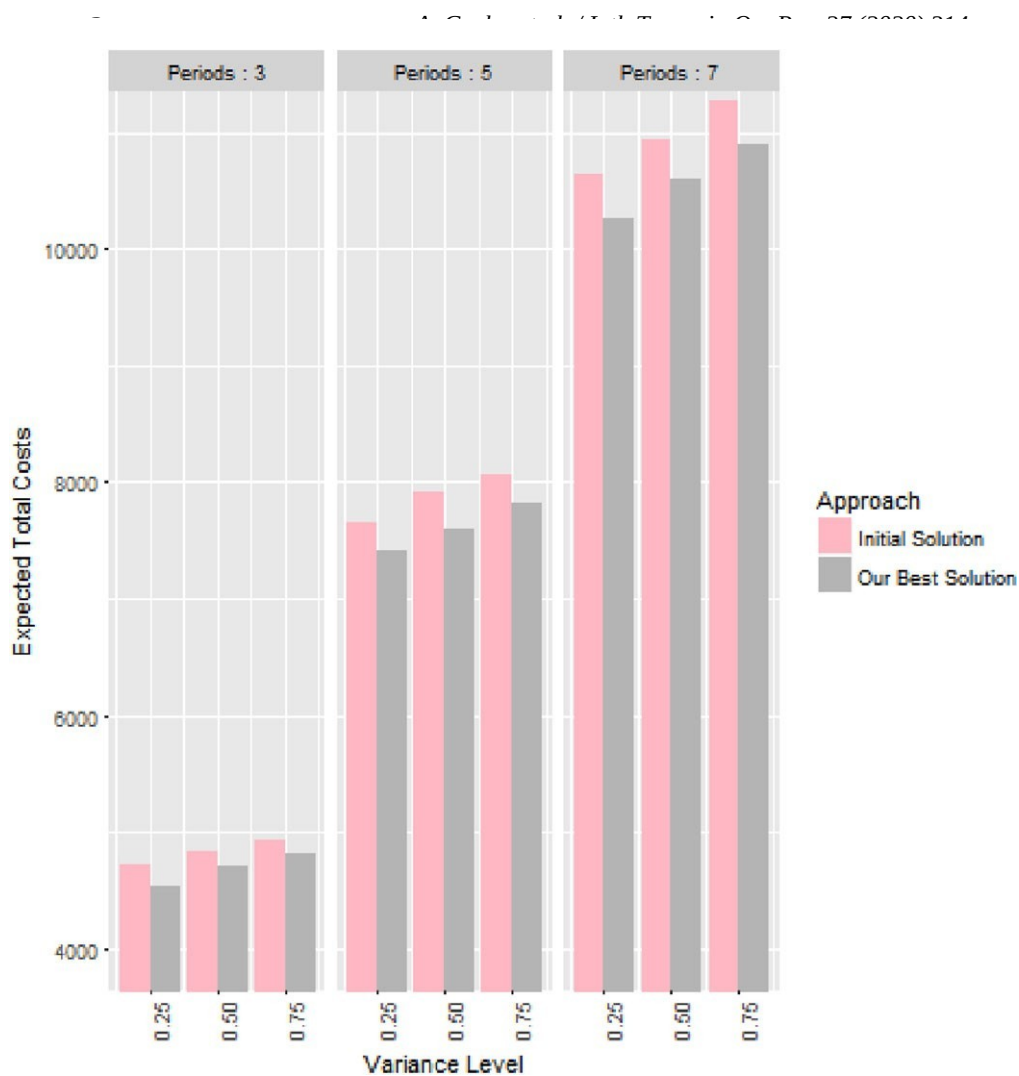
表 5
将我们的最佳解决方案与初始解决方案进行比较(方差= 0.5)

情况	周期:3 周期:5 周期:7														
	单 周 期(1)	多周 期(2)	多周 期(3)	多周 期(4)	多周 期(5)	单 周 期(6)	多周 期(7)	多周 期(8)	多周 期(9)	多周 期(10)	单 周 期(11)	多周 期(12)	多周 期(13)	多周 期(14)	多周 期(15)
A-n32-k5	3770, 6	3715, 6	3625, 1	3, 92, 4	6382, 3	6287, 8	6001, 0	6, 0	4, 6	8924, 2	8574, 7	8375, 4	6, 1	2, 3	
A-n33-k5	3323, 5	3215, 5	3094, 7	6, 9	3, 8	5604, 6	5236, 7	5014, 6	10, 5	4, 2	7987, 3	7327, 7	7132, 3	10, 7	2, 7
A-n33-k6	3310, 1	3354, 9	3222, 8	2, 6	3, 9	5696, 6	5587, 1	5294, 97,	1	5, 2	8342, 3	7697, 5	7538, 5	9, 6	2, 1
A-n37-k5	3132, 8	3115, 8	3054, 1	2, 52,	0	5254, 6	5190, 7	5043, 2	4, 0	2, 8	7734, 9	7314, 1	7095, 4	8, 3	3, 0
A-n38-k5	4035, 2	3619, 6	3546, 9	12, 12,	0	6530, 2	5967, 5	5713, 6	12, 5	4, 3	9197, 1	8372, 6	7947, 8	13, 65,	1
A-n39-k6	3851, 4	3883, 7	3721, 6	3, 4	4, 2	6413, 6	6373, 5	6171, 83,	8	3, 2	9043, 4	8859, 2	8658, 5	4, 3	2, 3
A-n45-k6	4697, 0	4365, 0	4278, 08,	9	2, 0	7736, 1	7044, 2	6887, 0	11, 0	2, 2	10867, 8	9661, 7	9603, 9	11, 60,	6
A-n45-k7	5986, 2	5576, 7	5395, 4	9, 9	3, 3	9592, 5	8972, 4	8634, 6	10, 0	3, 8	13347, 4	12557, 8	11959, 9	10, 4	4, 8
A-n55-k9	5781, 2	5332, 5	5172, 4	10, 53,	0	9247, 8	8670, 3	8242, 8	10, 9	4, 9	12897, 0	11844, 4	11487, 6	10, 9	3, 0
A-n60-k9	7378, 0	6550, 7	6480, 2	12, 2	1, 1	11647, 1	10601, 7	10276, 3	11, 8	3, 1	16347, 4	14956, 4	14282, 6	12, 64,	5
A-n61-k9	5262, 3	4887, 3	4824, 9	8, 3	1, 3	8629, 0	8126, 6	7827, 5	9, 3	3, 7	12234, 6	11327, 5	11010, 2	10, 0	2, 8
A-n63-k9	9036, 9	8165, 7	8008, 7	11, 4	1, 9	14446, 4	13224, 4	12733, 0	11, 9	3, 7	20479, 5	18163, 6	17927, 9	12, 5	1, 3
A-n65-k9	6220, 4	5793, 7	5663, 9	8, 9	2, 2	10234, 2	9495, 2	9199, 1	10, 13,	1	14493, 6	13162, 9	12930, 1	10, 8	1, 8
A-n80-k10	9747, 7	8784, 2	8690, 6	10, 8	1, 1	15732, 4	14362, 0	13951, 5	11, 32,	9	21991, 7	19902, 1	19343, 5	12, 02,	8
B-n31-k5	3657, 3	3401, 7	3265, 3	10, 7	4, 0	5766, 8	5513, 7	5184, 1	10, 1	6, 0	8159, 0	7507, 3	7203, 2	11, 7	4, 1
B-n35-k5	4702, 7	4683, 0	4512, 5	4, 0	3, 6	7635, 5	7726, 2	7274, 8	4, 7	5, 8	10686, 6	10516, 3	10126, 05,	2	3, 7
B-n39-k5	3435, 4	3117, 6	3025, 5	11, 9	3, 0	5670, 9	5189, 6	4953, 1	12, 7	4, 6	8005, 6	7196, 9	6882, 3	14, 0	4, 4
B-n41-k6	4306, 7	4134, 7	3910, 99,	2	5, 4	7090, 2	6690, 1	6370, 8	10, 1	4, 8	9903, 1	9375, 6	8867, 5	10, 5	5, 4
B-n45-k5	3807, 5	3566, 0	3540, 1	7, 0,	7	6230, 1	5953, 3	5746, 1	7, 8	3, 5	8818, 3	8130, 7	8020, 3	9, 0	1, 4
B-n50-k7	3972, 6	3862, 1	3702, 86,	84,	1	6533, 1	6188, 0	5995, 38,	2	3, 1	9216, 5	8563, 6	8425, 4	8, 61,	6
B-n52-k7	4263, 6	3870, 0	3795, 7	11, 0	1, 9	6987, 5	6447, 7	6153, 0	11, 9	4, 6	9718, 9	8851, 4	8510, 5	12, 4	3, 9
B-n56-k7	3567, 5	3526, 3	3450, 3	3, 3	2, 2	5913, 3	6008, 6	5651, 34,	45,	9	8271, 4	8336, 9	7850, 85,	1	5, 8
B-n57-k9	8299, 4	7658, 7	7418, 5	10, 6	3, 1	13253, 9	12408, 3	11833, 8	10, 74,	6	18283, 5	17006, 8	16444, 4	10, 13,	3
B-n64-k9	4786, 7	4473, 3	4384, 58,	4	2, 0	7582, 0	7335, 2	7079, 86,	6	3, 5	11243, 3	10213, 0	9875, 2	12, 2	3, 3
B-n67-k10	5853, 4	5424, 4	5201, 8	11, 1	4, 1	9525, 4	8772, 9	8431, 7	11, 53,	9	13397, 7	12284, 9	11837, 1	11, 6	3, 6
B-n68-k9	7063, 9	6312, 6	6202, 8	12, 2	1, 7	11084, 4	10400, 1	9749, 5	12, 06,	3	15566, 9	13968, 2	13664, 0	12, 2	2, 2
B-n78-k10	6591, 1	6032, 1	5930, 3	10, 0	1, 7	10613, 9	9807, 6	9515, 7	10, 3	3, 0	14829, 2	13728, 2	13219, 3	10, 93,	7
平均值	5179, 3	4830, 5	4708, 28,	52,	7	8448, 7	7910, 4	7590, 09,	3	4, 1	11851, 4	10940, 8	10600, 710,	33,	2

表 6

将我们的最佳解决方案与初始解决方案进行比较(方差= 0.75)

情况	周期:3 周期:5 周期:7														
	单 周	多 周	多 周	多 周	多 周	单 周	多 周	多 周	多 周	多 周	单 周	多 周	多 周	多 周	多 周
	期(1)	期(2)	期(3)	期(4)	期(5)	期(6)	期(7)	期(8)	期(9)	期(10)	期(11)	期(12)	期(13)	期(14)	期(15)
	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol	InitSol
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
A-n32-k5	4049, 3	3907, 3	3824, 35	6 2, 1	6648, 4	6352, 0	6174, 17	1 2, 8	9421, 6	8740, 5	8602, 7	8, 7	1, 6		
A-n33-k5	3478, 8	3278, 3	3096, 6	11, 0	5, 6	5811, 4	5320, 7	5149, 9	11, 4	3, 2	8229, 1	7427, 6	7179, 0	12, 8	3, 3
A-n33-k6	3385, 6	3416, 6	3231, 4	4, 65,	4 5773, 0	5537, 4	5360, 0	7, 23,	2 8331, 3	7920, 9	7657, 8	8, 1	3, 3		
A-n37-k5	3607, 2	3174, 2	3146, 4	12, 8	0, 9	5933, 0	5284, 2	5184, 4	12, 61,	9 8461, 4	7388, 1	7357, 0	13, 1	0, 4	
A-n38-k5	3994, 4	3658, 6	3580, 7	10, 4	2, 1	6538, 9	6140, 9	5859, 5	10, 44,	6 9321, 5	8444, 9	8296, 6	11, 0	1, 8	
A-n39-k6	4234, 1	3905, 3	3804, 1	10, 2	2, 6	6978, 9	6478, 2	6243, 1	10, 5	3, 6	9978, 5	8963, 8	8758, 4	12, 2	2, 3
A-n45-k6	4823, 4	4356, 4	4308, 5	10, 7	1, 1	8129, 2	7214, 7	7086, 3	12, 81,	8 11294, 6	10014, 3	9884, 7	12, 5	1, 3	
A-n45-k7	5868, 9	5556, 5	5408, 9	7, 8	2, 7	9653, 2	9191, 9	8831, 08,	53, 9	13654, 2	12721, 7	12228, 9	10, 4	3, 9	
A-n55-k9	5842, 7	5402, 6	5281, 0	9, 6	2, 3	9331, 5	8758, 3	8328, 9	10, 7	4, 9	13321, 2	12021, 3	11812, 5	11, 3	1, 7
A-n60-k9	7348, 7	6612, 8	6570, 7	10, 60,	6 12043, 3	10783, 1	10579, 3	12, 2	1, 9	16642, 7	15060, 4	14662, 7	11, 9	2, 6	
A-n61-k9	5621, 3	4994, 6	4921, 6	12, 4	1, 5	9174, 1	8228, 6	7981, 5	13, 0	3, 0	12921, 1	11458, 4	11147, 4	13, 7	2, 7
A-n63-k9	8891, 2	8277, 6	8209, 0	7, 7	0, 8	14632, 1	13613, 7	13342, 9	8, 82,	0 20627, 7	18948, 1	18495, 0	10, 32,	4	
A-n65-k9	6445, 6	5859, 0	5845, 6	9, 3	0, 2	10642, 5	9735, 8	9519, 1	10, 6	2, 2	14931, 6	13617, 0	13294, 8	11, 0	2, 4
a80-k10	10262, 9	9052, 6	8982, 3	-12, 5	-0, 8	16682, 3	14728, 2	14498, 9	-13, 1	-1, 6	23342, 1	20895, 4	19987, 5	-14, 4	-4, 3
B-n31-k5	3776, 9	3481, 0	3345, 0	11, 4	3, 9	6149, 5	5689, 5	5355, 8	12, 9	5, 9	8822, 3	7845, 1	7622, 9	13, 62,	8
B-n35-k5	5000, 2	4679, 3	4590, 3	8, 2	1, 9	8239, 4	7782, 1	7497, 6	9, 0	3, 7	11736, 4	11018, 1	10400, 6	11, 45,	6
B-n39-k5	3558, 3	3281, 0	3127, 0	12, 14,	7 5881, 3	5386, 1	5159, 1	12, 3	4, 2	8233, 0	7537, 1	7143, 6	13, 2	5, 2	
B-n41-k6	4270, 6	4174, 6	4017, 3	5, 93,	8 7067, 4	6826, 6	6516, 8	7, 8	4, 5	9825, 2	9493, 7	9012, 1	8, 3	5, 1	
B-n45-k5	4170, 6	3777, 3	3614, 0	13, 3	4, 3	6961, 4	6024, 9	5956, 414,	4 1, 1	9792, 8	8541, 8	8364, 614,	6 2, 1		
B-n50-k7	4038, 0	3845, 5	3752, 4	7, 1	2, 4	6627, 0	6283, 6	6058, 38,	6 3, 6	9497, 8	8722, 0	8497, 8	10, 52,	6	
B-n52-k7	4345, 3	3962, 5	3910, 4	10, 0	1, 3	7133, 1	6537, 4	6334, 4	11, 2	3, 1	9854, 8	9045, 1	8804, 2	10, 7	2, 7
B-n56-k7	3756, 0	3593, 0	3521, 9	6, 2	2, 0	6237, 1	5951, 1	5826, 6	6, 62,	1 8876, 6	8413, 0	8086, 88,	93, 9		
B-n57-k9	8721, 5	7799, 2	7646, 2	12, 3	2, 0	14217, 5	12782, 3	12337, 0	13, 23,	5 19837, 2	17874, 9	16957, 6	14, 5	5, 1	
B-n64-k9	5089, 9	4546, 4	4486, 5	11, 91,	3 8431, 3	7317, 5	7291, 3	13, 50,	4 11735, 9	10326, 3	10165, 3	13, 4	1, 6		
B-n67-k10	5924, 4	5524, 7	5426, 9	8, 4	1, 8	9678, 7	9013, 6	8688, 8	10, 2	3, 6	13516, 2	12700, 3	12084, 7	10, 6	4, 8
B-n68-k9	6813, 9	6560, 4	6286, 8	7, 7	4, 2	11481, 3	10484, 1	10175, 9	11, 4	2, 9	15912, 5	14891, 3	14012, 5	11, 9	5, 9
B-n78-k10	6905, 5	6226, 7	6163, 4	10, 7	1, 0	11326, 2	10141, 9	9890, 9	12, 72,	5 15725, 3	14229, 5	13605, 3	13, 5	4, 4	
平均值	5341, 7	4922, 4	4818, 5	9, 6	2, 3	8792, 7	8058, 8	7823, 2	10, 8	3, 0	12364, 6	11268, 9	10893, 4	11, 7	3, 2



图二。不同差异水平和计划范围的所有实例的预期总成本。

姓名。对于每个考虑的规划范围和需求差异水平，概述了单周期规划方法(即，一次规划一个周期)和本文讨论的多周期框架的结果。与我们的整体多周期框架相比，单周期方法在更新后续周期的初始库存水平之前，不会通过简单地最小化单个周期的总成本来考虑未来周期。虽然这通常会导致每个单个周期结束时的低库存水平，但它忽略了后续计划周期中不断增加的运输成本，从而导致与多周期计划方法相比总成本明显更高。在图2中可以看到整体多期规划框架的每个差异水平和规划范围的所有实例的平均总成本。描述了初始解决方案的累积路线和库存成本，在初始解决方案中，相同的补货策略应用于每个单独时期的所有 RC，以及我们的最佳解决方案(OBS)

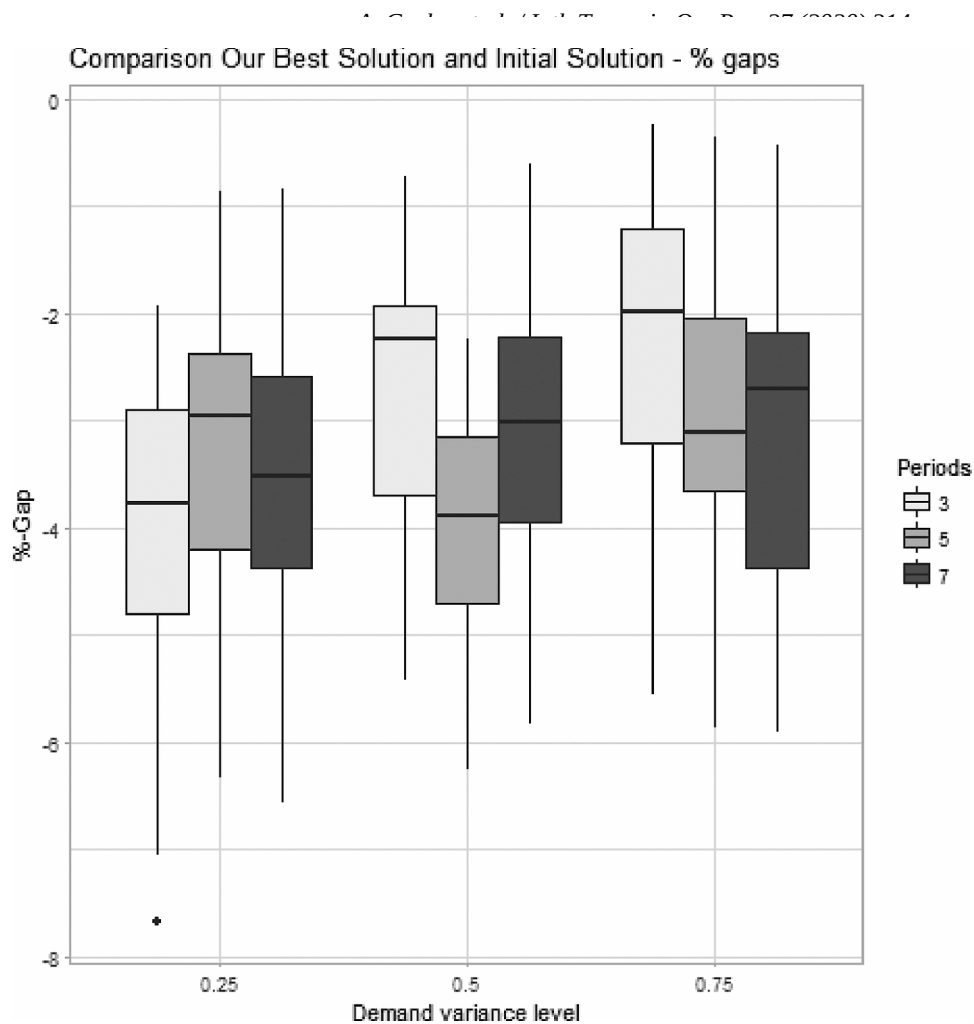


图3。不同规划范围和需求差异水平的初始解决方案和最佳解决方案之间的百分比差距箱线图。

多时期 IRP。在这两种方法中，随着需求不确定性水平的提高，可以观察到成本的增加，这可以用更高的库存(持有或缺货)成本来解释。

此外，可以看出，由我们的算法提供的改进的库存决策在所有情况下都降低了平均总成本。如图3所示，对于测试的基准集，初始解决方案的 OBS 的平均百分比改进的分布也是如此。每个驻地协调员在所有时间段的单个充资政策矩阵形式的产出平均提高了 3% 以上。最后，图4显示了不同补货政策和差异水平的预期路线和库存成本。对于每个差异水平，较高的库存补充水平导致较低预期库存(缺货和持有)成本。同时，在所有情况下，较高的补货水平导致运输成本比例增加。

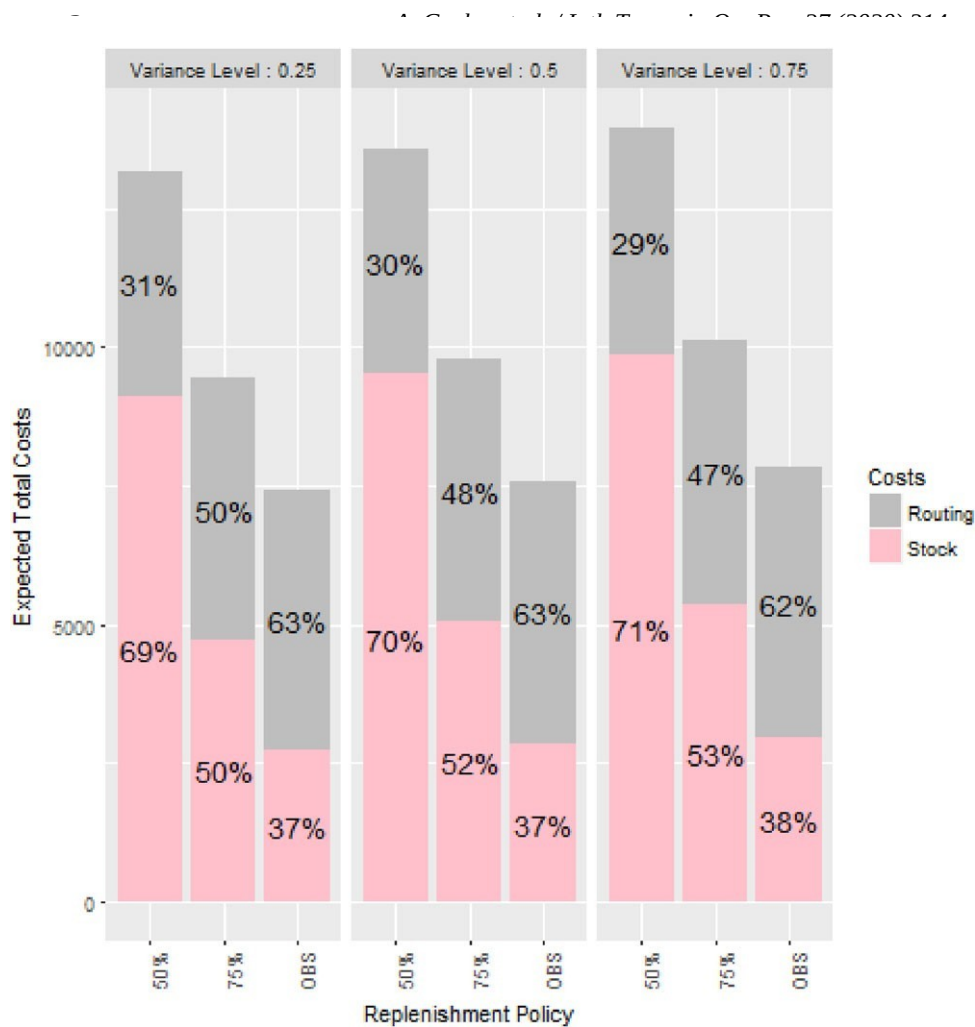


图4。不同补货政策和差异水平的预期路线和库存成本(五期计划展望期)。

6. 结论

本文提出了一种基于 VNS 的半启发式算法，用于求解具有随机需求的多周期 IRP。将 MCS 技术集成到元启发式求解框架中允许考虑不同的概率分布，以模拟各种规划范围内的随机聚合需求。我们的方法依赖于为每个 RC 和周期配置选择最佳的可能再填充策略。因此，一个建设性的程序使用模拟生成一个初始解决方案，这是迭代改进的 VNS 框架。这样，问题的复杂性——包括由于随机需求导致的连续周期之间的相互依赖性——就可以通过我们相对容易实现的方法得到有效解决。

几条研究路线是可能的。一方面，我们的算法可以适用于解决其他多周期路由问题。另一方面，本文中考虑的 IRP 变体可以扩展(例如，通过包括不同类型的车队、多个仓库等。)以便处理更真实的 IRP 设置。此外，模拟技术可用于考虑更多的随机输入变量，例如，行程时间或甚至配送成本。此外，为了与 VNS 进行比较，也可以采用其他的元启发式方法来解决这个问题。最后，一个小规模的问题可以使用精确的方法来解决，尽管可能需要对模拟客户需求的概率进行额外的假设。

感谢

这项工作得到了西班牙经济和竞争力部 FEDER (TRA2013-48180-C3-P, TRA2015-71883-REDT) 和 Erasmus 计划 (2016- 1-ES01-KA108-023465) 的部分支持。

+

参考

- 阿卜杜勒马吉德, T.F., 德索基, M.M., 奥尔多内兹, f., 2009 年。带延期交货的库存路径问题的启发式算法。计算机与工业工程 56, 4, 1519 - 1534。
- 阿德尔曼博士, 2004。随机库存/运输路线的价格导向方法。运筹学 52, 4, 499 - 514。
- aksen d., Kaya O., Salman f. s., Tu ncel O., 2014 年。选择性周期性库存路径问题的自适应大邻域搜索算法。欧洲运筹学杂志 239, 2, 413 - 426。
- Andersson, h., Hoff, a., Christiansen, m., Hasle, g., kketangen, a., 2010 年。工业方面和文献调查:组合库存管理和路线。计算机与运筹学 37, 9, 1515 - 1536。
- c. 阿切蒂, l. 伯塔齐, a. 赫兹, 斯佩兰萨, M.G., 2012。库存路径问题的混合启发式算法。计算杂志 24, 1, 101 - 116。
- 奥格拉特, p., 贝伦格尔, J.M., 贝纳文特, e., 科尔贝兰, a., 纳德夫, d., 里纳尔迪, g., 1995 年。带容量限制的车辆路径问题的分支-切割代码的计算结果。技术报告 949-M, 法国格勒诺布尔约瑟夫傅立叶大学。
- 2013 年, 博斯科州贝尔塔齐市、格雷罗州格雷罗市、拉加纳市。缺货情况下的随机库存路径问题。运输研究 C 部分:新兴技术 27, 89 - 107。
- 伯塔齐, 洛杉矶, 博斯科, 洛杉矶, 拉加纳, 2015 年。管理运输采购库存路径问题中的随机需求。欧米伽 56, 112 - 121。
- j. 卡塞雷斯-克鲁斯, p. 阿里亚斯, d. 吉马兰, d. 里埃拉, d. 胡安, A.A., 2014 年。富车辆路径问题:综述。美国计算机学会计算调查 47, 2, 32:1 - 32:28。
- 陈彦明, 林, 2009。随机库存路径问题中规避风险的协调方法。计算机与工业工程 56, 3, 1095 - 1112。
- 奇萨兹, m., 迪夫萨拉, a., 范斯廷威根, p., 2016。周期性库存路径问题的两阶段算法。欧洲运筹学杂志 254, 2, 410 - 426。
- 克拉克, g, 赖特, j, 1964。将车辆从中心仓库调度到多个交付点。运筹学 12568581。
- 科埃略, 洛杉矶, 科尔多, J.F., 拉波特, g., 2013。三十年的库存路线。运输科学 48, 1, 1 - 19。
- 科尔多, J.F., 拉加纳, d., 穆斯曼诺, r., Vocaturo, f., 2015。多产品库存路径问题的基于分解的启发式算法。计算机与运筹学 55, 153 - 166。
- 欧盟委员会, 2016 年。运输部门经济分析。可在 <https://ec.europa.eu/jrc/en/research-专题/交通-部门-经济-分析> (2017 年 9 月 1 日访问) 获得。

- 欧盟, 2012 年。欧盟运输 GHG:2050 年路线 II。基础设施建设、车辆制造和报废汽车的 GHG 排放在整个交通部门排放中的作用。在... 可用 <http://www.eutransportghg2050.eu/cms/assets/Uploads/Reports/EU-Transport-GHG-2050-II-Task-2-FINAL-30April2012.pdf> (2017 年 1 月 1 日访问)。
- Grasas, a ., Juan, A.A ., Lourenc o, H.R ., 2016。Simils:随机组合优化的迭代局部搜索元启发式算法的基于模拟的扩展。模拟杂志 10, 1, 69 - 77。
- 新罕布什尔州姆拉德诺维奇的汉森, 2014 年。可变邻域搜索。斯普林格美国, 波士顿, 马萨诸塞州, 第 313-337 页。
- 汉森, p ., 姆拉德诺维奇, n ., 莫雷诺-佩雷斯, J.A ., 2010。可变邻域搜索:方法与应用。运筹学年鉴 175, 367 - 407。
- 黄绍辉, 林, 中国, 2010。需求不确定的多品种库存路径问题的改进蚁群优化算法。运输研究 E 部分:物流与运输评论 46, 5, 598 - 611。
- Hvattum, 法律硕士, kketangen, a ., 2008 年。使用场景树和渐进对冲解决随机库存路径问题。启发式期刊 15, 6, 527 - 557。
- Hvattum, 法学硕士, kketangen, a ., Laporte, g ., 2009 年。随机库存路径问题的情景树启发式算法。通知计算杂志 21, 2, 268 - 285。
- 贾勒特, p .巴德, J.F ., 黄, l .德罗尔, m .滚动时域框架下库存路径问题的配送成本近似。交通科学 36, 3, 292 - 300。
- Juan, A.A ., Faulin, j ., Grasman, S.E ., Rabe, m ., Figueira, g ., 2015。模拟试探法述评:扩展元试探法处理随机组合优化问题。运筹学观点 2, 62 - 72。
- 胡安, A.A ., 格拉斯曼, S.E ., 卡塞雷斯-克鲁兹, j ., t .贝克斯塔斯, 2014。缺货单周期随机库存路径问题的半启发式算法。模拟建模实践与理论 46, 40 - 52。
- Kleywegt, A.J ., Nori, V.S ., Savelsbergh, M.W.P ., 2004 年。随机库存路径问题的动态规划近似法。运输科学 38, 1, 42 - 70。
- 伦斯特拉, J.K ., 坎, A.H.G.R ., 1981 年。车辆路径和调度问题的复杂性。网络 11、2、221 - 227。
- 李, k, 陈, b, Sivakumar, A.I ., 吴, y, 2014。以最小行程时间为目标的库存路径问题米化。欧洲运筹学杂志 236, 3936 - 945。
- 李, 男, 王, z, 陈, F.T ., 2016。库存不精确和补货提前期下的鲁棒库存路径策略。运输研究 E 部分:物流与运输评论 91, 290 - 305。
- 刘, 资深大律师, 李伟东, 2011。带时间窗的库存路径问题的启发式算法。应用专家系统 38, 10, 13223 - 13231。
- 明, 2014 年。供应链合作情况的类型。计算机与工业工程 67, 56 - 71。
- Mjirda, a ., Jarboui, b ., Macedo, r ., Hanafi, s ., Mladenovic, n ., 2014。多产品库存路径问题的两阶段可变邻域搜索。计算机与运筹学 52, 291 - 299。
- n .姆拉德诺维奇, 汉森, p . 1997。可变邻域搜索。计算机与运筹学 24, 11, 1097 - 1100。
- 北卡罗来纳州莫因, 南卡罗来纳州萨尔希, 北卡罗来纳州阿齐兹, 2011 年。多产品多周期库存路径问题的高效混合遗传算法。国际生产经济学杂志 133, 1, 334 - 343。
- Nambirajan, a . Mendoza, s . Paz Hani, t . Narendran, k . Ganesh, 2016 年。CARE:带补充的两阶段多产品库存路径问题的启发式算法。计算机与工业工程 97, 41 - 57。
- 尼阿坎, 女, 拉希米, 男, 2015。多目标卫生保健库存路径问题:模糊可能性方法。运输研究 E 部分:物流和运输评论 80, 74-94。
- Park, Y.B ., Yoo, J.S ., Park, H.S ., 2016。考虑销售损失的供应商管理库存路径问题的遗传算法。应用专家系统 53, 149 - 159。
- 2012 年, 波波维奇(d)、维多维奇(m)、拉迪沃耶维奇(g)。燃料配送库存路径问题的可变邻域搜索启发式算法。应用专家系统 39, 18, 13390 - 13398。
- Raa, b ., Dullaert, w ., 2017。周期性库存路线的路线和车队设计。欧洲运筹学杂志 256, 2, 404 - 411。
- Rahim, M.K.I.A ., 钟, y ., Aghezzaf, E.H ., t .阿乌阿姆, 2014 年。随机平稳需求率下多周期库存路径问题的建模与求解。国际生产研究杂志 52, 14, 4351 - 4363。
- 拉马纳森大学, Gunasekaran 大学, 2014 年。供应链合作:长期伙伴关系成功的影响。国际生产经济学杂志 147, 252 - 259。

- 罗尔达 n, R.F., 巴萨戈蒂, r., 科埃略, L.C., 2016。动态随机库存路径问题中库存补充和客户选择策略的鲁棒性。计算机与运筹学 74, 14 - 20。
- Shaabani, I. n. Kamalabadi, 2016 年。多产品多零售商易腐库存路径问题的高效种群模拟退火算法。计算机与工业工程 99, 189 - 201。
- Solyal, o., Cordeau, J.F., Laporte, g., 2012 年。需求不确定下的鲁棒库存路径。运输科学 46, 3, 327 - 340。
- Soysal, m., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Haijema, r., van der Vorst, J.G., 2015 年。考虑环境因素和需求不确定性的易腐产品库存路径问题建模。国际生产经济学杂志 164, 118 - 133。
- 托斯博士, 维哥博士, 2014 年。车辆路径——问题、方法和应用(第二版)。SIAM 离散数学及应用专论, 费城, 宾夕法尼亚州。
- 联合国, 2011 年。2011 年亚洲及太平洋统计年鉴。可从以下网址获得 http://www.unescap.org/stat/data/syb_2011/ESCAP-syb_2011.pdf (2017 年 1 月 15 日获取)。
- 美国环保局, 2013 年。1990 年至 2013 年的温室气体排放。可从以下网址获得 <http://www3.epa.gov/otaq/climate/documents/420f15032.pdf> (2017 年 1 月 15 日访问)。
- Vansteenkoven, p., Mateo, m., 2014。单车循环库存路径问题的迭代局部搜索算法。欧洲运筹学杂志 237, 3, 802 - 813。
- 于, 楚, 陈, 陈, 2012。具有分批交货和服务水平约束的大规模随机库存路径问题。运筹学学报 197, 1, 135 - 158。
- Zachariadis, E.E., Tarantilis, C.D., Kiranoudis, C.T., 2009 年。库存和路线决策的集成局部搜索方法。应用专家系统 36, 7, 10239 - 10248。