

绿色包装与循环经济

周期可变下考虑多车型的库存路径优化研究

肖青, 宁志敏, 王燕玲, 唐丽敏
(大连海事大学, 辽宁 大连 116026)

摘要: **目的** 研究基于供应商管理库存模式下, 由一个供应商和多个零售商组成的二级供应链配送系统的库存路径优化问题, 确定计划期内各配送周期的长度、数量, 对供应链中库存策略与配送方案问题进行协调优化, 使系统总成本最低。**方法** 考虑的成本包括库存持有成本、缺货成本和配送成本。为降低供应链系统的总成本, 提出全新的周期可变策略。**结果** 采用遗传算法求解得出最佳方案。将不同策略的算例结果进行对比分析, 结果表明周期可变策略与周期固定策略相比, 系统总成本最低节约比例为1.7%, 最高节约比例为42.3%。**结论** 通过对计划期内各配送周期的长度及数量进行划分调整可以有效地节约系统总成本, 同时, 采用多车型的配送方案明显优于采用同车型的配送方案。

关键词: 库存路径问题; 多车型; 周期可变

中图分类号: U492.2⁺.2; U125 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)17-0213-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.026

Inventory Routing Optimization Considering Multiple Vehicle Types under Variable Cycles

XIAO Qing, NING Zhi-min, WANG Yan-ling, TANG Li-min

(Dalian Maritime University, Liaoning Dalian 116026, China)

ABSTRACT: The work aims to study the inventory routing optimization of a two-level supply chain distribution system consisting of a supplier and multiple retailers based on the vendor-managed inventory model, determine the length and quantity of delivery cycle in the planning period, coordinate and optimize daily sales volume to inventory strategies and distribution plans in the supply chain, so as to minimize the total cost of the supply chain system. The costs considered included inventory holding cost, out of stock cost and distribution cost. In order to minimize the total cost of the supply chain system, a new strategy with variable cycle was proposed. The genetic algorithm was used to solve the optimal scheme. The results of different strategies were compared and analyzed. The results showed that, compared with the fixed cycle strategy, in the variable cycle strategy, the lowest saving ratio of the total system cost was 1.7% and the highest saving ratio was 42.3%. The total cost of the system can be effectively saved by dividing and adjusting the length and quantity of each distribution cycle in the planning period. Meanwhile, the distribution scheme with multiple vehicle types is obviously better than that with the same vehicle types.

KEY WORDS: inventory routing problem; multi vehicle type; variable cycle

有学者在对国家所发布的《全国物流运行情况》资料进行跟踪调查后, 发现库存成本和配送成本之间呈强的负相关关系。在 VMI 模式 (Vendor Managed

Inventory) 下, 协议由供应商负责库存管理和配送安排, 因此对供应商而言, 有必要在库存成本和配送成本之间找到平衡。所谓库存路径问题 (Inventory

Routing Problem, IRP) 指基于 VMI 模式, 在满足一定的约束条件下确定计划期内各配送周期的作业安排, 通过对库存策略与配送方案的协调优化进行探究, 以实现供应链整体成本最小。

目前, 学者们对 IRP 问题的研究已经取得了许多成果。Farias 等^[1]基于由一个供应商和多个零售商组成的经典 IRP 问题, 探究不同库存策略和配送方案之间的协调优化。Shaabani 等^[2]在回顾了过去 89 篇相关文献后对易逝品 IRP 问题进行分类。Felix 等^[3]研究了德国港口船舶对燃料需求供应的 IRP 问题。巫威眺等^[4]研究了允许缺货的 IRP 问题, 证明在短暂缺货时系统总成本最低。Hasni 等^[5]研究了确定需求下多车型 IRP 问题。林峰等^[6]采用同质车队对由一个供应商和多个零售商组成的二级供应链系统进行配送。Cheng 等^[7]在传统 IRP 问题的基础上考虑了环境影响和异质车队, 通过数据量化证明了采用异质车队优于采用同质车队进行配送。肖青等^[8]通过分割配送对配送方案进行调整, 采用第三方物流异质车队进行配送任务。Bertazzi 等^[9]研究了需求可分割的周期性 IRP 问题。Diabat 等^[10]采用固定分区策略对 IRP 问题进行研究, 结果表明不同订货周期策略与共同订货周期策略相比, 系统总费用明显降低。赵达等^[11]基于随机需求环境下提出了一种分区内按客户需求进行配送的修正固定分区策略。Raa 等^[12]研究了随机需求下允许缺货的循环 IRP 问题。李家斌等^[13]设计了带精英保留的改进遗传算法。Mahjoob 等^[14]开发了一种改进的自适应遗传算法来高效求解多产品多周期的 IRP 问题, 通过实例证明了该算法的优越性。

为了减少物流活动中, 库存成本与配送成本这两大主要成本, 对计划期的划分进行优化, 不再将配送周期长度固定, 而是根据实际情况适当地延长或者缩短配送周期长度。相较于周期固定策略无法根据需求的波动调整配送时间而导致系统总成本提高的问题, 本文将周期作为决策变量, 以库存持有成本、缺货成本和配送成本等因素建立 IRP 优化模型, 采用遗传算法求解, 最后通过算例验证模型的有效性和正确性。

1 问题描述

本文研究的供应链系统由一个供应商和多个零售商组成, 供应商在特定地点设置了一个配送中心, 将货物配送至零售商处。配送中心拥有多种车型, 不同车型对应不同的容量限制及单位行驶成本。每辆车在一个周期内最多只服务于一条配送路径, 但是可以服务多个零售商。各个零售商在计划期内的需求是已知确定的, 每一个配送周期内零售商的需求量不超过其最大库存能力, 且不同零售商之间互相独立不受其他影响, 允许零售商处缺货。每一个配送周期的期末,

运输车辆从供应商处出发, 按照规划的路线行驶, 对行驶路线上的目标客户进行服务, 并在第 2 周期开始之前完成配送, 送货结束后车辆需返回配送中心。一个计划期由多个连续的配送周期组成, 不考虑计划期内如交通管制、车辆故障等特殊情况等变化。通过对库存路径的联合优化, 确定计划期内配送周期的数量和长度、各零售商处的补货安排和配送策略。本文提出的周期划分方式见图 1。

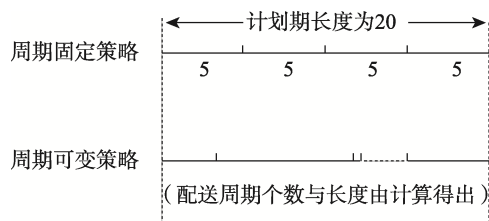


图1 周期可变策略与周期固定策略
Fig.1 Schematic diagram of variable cycle and fixed cycle strategies

为方便本文建立模型, 现做如下基本假设:

- 1) 配送中心拥有充足货源, 不考虑配送中心的库存成本。
- 2) 零售商在计划期内的需求已知确定。
- 3) 零售商允许缺货, 因缺货会产生缺货成本。
- 4) 配送中心采用 2 种车型进行配送, 不同车型对应不同的配送成本及最大载质量。
- 5) 车辆从配送中心出发, 依次访问需要进行配送的零售商, 完成配送后返回配送中心。
- 6) 每个配送周期内, 每个零售商只被一条配送路径服务一次。

2 模型建立

Z 表示计划期长度; T 表示计划期内所有配送周期的集合, $T=(1, 2, 3, \dots, n), t \in T$; O 表示配送中心, $O=\{0\}$; R 表示零售商, $R=(1, 2, 3, \dots, n)$; N 表示配送中心和零售商的集合; l 表示车辆行驶的路径弧集, $l=\{(i, j) | \forall i, j \in N, i \neq j\}$; J 表示配送中心可用车型集合, $J=(1, 2, 3, \dots, j)$; K 表示车型车辆的集合, $K=(K_1, K_2, K_3, \dots, K_j)$, K_j 表示 j 型车的集合; k_j 表示某一辆 j 型车, $k_j \in K_j$; V 表示配送中心所有车辆的总集合; v 表示其中某一辆车, $v \in V$; C_{hi} 表示零售商 i 的单位库存持有成本; C_{si} 表示零售商 i 的单位缺货成本; C_v 表示车辆 v 的固定启用成本; d_{ij} 表示路径 (i, j) 之间的距离; C_{vf} 表示车辆 v 的单位行驶成本; W_v 表示车辆 v 的最大装载量; $d_i(u)$ 表示零售商 i 在计划期内的需求函数, 在时刻 u 零售商 i 的商品需求量; d_{it} 表示零售商 i 在第 t 周期的商品消耗量; q_{it}^v 表示车辆 v 在第 t 周期配送给零售商 i 的商品数量; m_{itv} 表示车辆 v 第 t 周期为零售商 i 进行补货的载质量; b_{it} 表示零售商 i 在第 t 周期期初的

库存量; e_{it} 表示零售商 i 在第 t 周期期末的库存量; s_{it} 表示零售商 i 在第 t 周期的缺货量; r_i 表示零售商 i 的补货点; S_i 表示零售商 i 的最大库存量。

决策变量: t_b 表示周期 t 的开始时间; t_e 表示周期 t 的结束时间; X_{ijt}^v 表示 $0 \sim 1$ 变量, 第 t 周期车辆 v 经过弧 (i, j) 则取 1, 反之取 0; Y_{it}^v 表示 $0 \sim 1$ 变量, 零售商 i 在第 t 周期得到车辆 v 配送则取 1, 反之取 0。于是, 可建立周期可变下考虑多车型的 IRP 模型。

在计划期内, 货物的持有成本如式 (1) 所示。

$$C_1 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in R} \left[\frac{1}{2} \times C_{hi} \times (b_{it} + e_{it}) \times (t_e - t_b) \right] \quad (1)$$

缺货成本如式 (2) 所示。

$$C_2 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in R} (s_{it} \times C_{si}) \quad (2)$$

配送成本如式 (3) 所示。

$$C_3 = \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{i \in R} (x_{0it}^v \times C_v) + \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{i, j \in R} (x_{ijt}^v \times d_{ij} \times C_{vt}) \quad (3)$$

目标函数为总成本最小:

$$\begin{aligned} \min C = C_1 + C_2 + C_3 = & \sum_{t \in T} \sum_{i \in R} \left[\frac{1}{2} \times C_{hi} \times (b_{it} + e_{it}) \times (t_e - t_b) \right] + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{i \in R} (s_{it} \times C_{si}) + \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{i \in R} (x_{0it}^v \times C_v) + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{v \in V} \sum_{i, j \in R} (x_{ijt}^v \times d_{ij} \times C_{vt}) \end{aligned} \quad (4)$$

约束条件:

$$b_{i,t+1} = \begin{cases} b_{it} - d_{it} & e_{it} > r_i \\ S_i & e_{it} \leq r_i \end{cases}, \forall i \in R, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (5)$$

$$s_{it} = \begin{cases} 0 & b_{it} \geq d_{it} \\ d_{it} - b_{it} & b_{it} < d_{it} \end{cases}, \forall i \in R, \forall t \in T \quad (6)$$

$$q_{it}^v = \begin{cases} 0 & e_{it} > r_i \\ S_i - e_{it} & e_{it} \leq r_i \end{cases}, \forall i \in R, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (7)$$

$$e_{it} = \begin{cases} 0 & b_{it} \leq d_{it} \\ b_{it} - d_{it} & b_{it} > d_{it} \end{cases}, \forall i \in R, \forall t \in T \quad (8)$$

$$0 \leq r_i \leq S_i, \forall i \in R \quad (9)$$

$$S_i \geq d_{it} \geq 0, \forall i \in R, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i \in R} m_{itv} \leq W_v, \forall i \in R, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (11)$$

$$Y_{it}^v \times q_{it}^v \leq W_v, \forall i \in R, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ijt}^v = Y_{jt}^v, \forall i, j \in R, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (13)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ijt}^v = Y_{it}^v, \forall i, j \in R, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (14)$$

$$\sum_{v \in V} Y_{it}^v \leq 1, \forall i \in R, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (15)$$

$$\sum_{i \in R} X_{0it}^v = \sum_{j \in R} X_{j0t}^v, \forall i, j \in R, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (16)$$

$$\sum_{t \in T} (t_e - t_b) = Z, \forall t \in T \quad (17)$$

$$t_e = t_{b,t+1}, \forall t \in T \quad (18)$$

$$t_e > t_b, \forall t \in T \quad (19)$$

$$t_{b1} = 0 \quad (20)$$

$$d_{it} = \sum_{t_b}^{t_e} d_i(u), \forall i \in R, \forall t \in T \quad (21)$$

$$d_{it}, b_{it}, q_{it}^v, e_{it}, s_{it}, r_i, S_i, t_e, t_b \geq 0, \forall i \in R, \forall t \in T, \forall v \in V \quad (22)$$

$$X_{ijt}^v = \begin{cases} 0 & \text{否则} \\ 1 & \text{第 } t \text{ 周期车辆 } v \text{ 经过弧 } (i, j) \end{cases}, \forall i, j \in R, \quad (23)$$

$$\forall t \in T, \forall v \in V$$

$$Y_{it}^v = \begin{cases} 0 & \text{否则} \\ 1 & \text{零售商 } i \text{ 在第 } t \text{ 周期得到车辆 } v \text{ 配送} \end{cases}, \forall i \in R, \quad (24)$$

$$\forall t \in T, \forall v \in V$$

式 (5) 表示库存流量平衡方程; 式 (6) 表示零售商 i 在周期 t 内的缺货量; 式 (7) 表示零售商 i 在周期 t 内的补货量; 式 (8) 表示本周期期末的库存量; 式 (9) 表示各零售商的补货点取值范围; 式 (10) 表示零售商一个配送周期内的需求量不超过其最大库存量; 式 (11) 表示任意车辆的载质量不超过其最大装载能力; 式 (12) 表示单个零售商的需求不超过车辆最大装载能力; 式 (13)、式 (14) 表示车辆在 (i, j) 弧上行驶时, 零售商 i, j 都被该车辆服务且同一车辆最多只能对同一零售商服务一次; 式 (15) 表示同一周期内同一零售商最多只能被一辆车服务; 式 (16) 表示车辆由配送中心出发, 在完成所有配送服务后返回配送中心; 式 (17) 表示计划期内所有配送周期的长度之和与计划期长度相等; 式 (18) 表示下一周期的开始时间与本周期的结束时间相等, 保证周期的连续性; 式 (19) 表示配送周期长度不等于 0; 式 (20) 表示第 1 个周期的开始时间设定为 0; 式 (21) 表示零售商 i 在第 t 周期的商品消耗量。式 (22)、式 (23)、式 (24) 表示变量类型的定义。

3 算法实现

结合模型对本文的算法进行描述, 见图 2。对于多周期多车型的 IRP 问题, 首先根据问题的实际参数对周期进行划分, 每一个配送周期的长度最小不低于 0, 且最大不超过计划期长度。然后每次运算基于其中某一种划分方式进行遗传算法的运算, 通过遗传算法求解该周期划分方式下的最优补货安排及车辆规划。最后经过多次循环比较得出最优解, 即最优的周期划分方式及该划分方式下的库存策略及配送方案。

4 算例分析

4.1 算例数据

假设供应商在特定地点设置了一个配送中心将货物配送至多个零售商处。配送中心和零售商的地理位置是已知确定的, 节点 0 代表配送中心, 其余节点

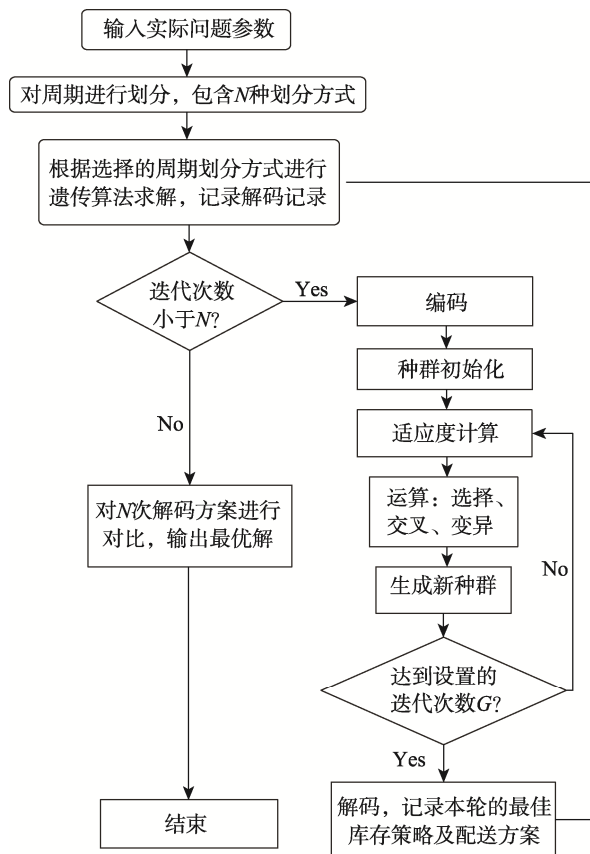


图2 算法流程

Fig.2 Algorithm flow chart

代表零售商。各节点间距离矩阵见表1。库存管理方式为供应商管理库存。配送中心拥有2种车型, 不同车型拥有不同的容量限制及单位行驶成本, 相关参数

参考文献[15], 小车型最大装载数量为550件、最大载质量为1100 kg、固定启用成本为100元/次、单位行驶成本为1.2元/t·km, 大车型最大装载数量为800件、最大载质量为2000 kg、固定启用成本为95元/次、单位行驶成本1.1元/t·km。整个计划期长度为20 d, 各零售商每日销售量见表2。零售商的库存持有成本假设为1元/(d·件), 零售商的缺货成本为10元/件, 每件货物质量为2 kg。假设各零售商最大库存量服从均值为300的泊松分布函数, 初始库存量为最大库存量的一半, 补货点为最大库存量的四分之一。

4.2 运算结果

通过遗传算法求解, 运行结果将计划期划分成9个配送周期, 计划期内各配送周期长度集合为[2, 6, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 5]。算例结果表明通过对配送周期长度进行调整有利于供应链整体获利。配送路径及车型选择见表3。对配送周期数量限制下不同策略的成本对比见表4。计算结果表明, 即使在限定配送周期数量的情况下, 仍可通过对配送周期的长度进行调整从而降低系统总成本, 且节约比例与周期数量有很大的关系。节约比例=(周期固定最优值-周期可变最优值)/周期固定最优值, 节约比例可以直观反馈周期可变策略相对于周期固定策略的优化效果。对参数进行调整分析, 将库存持有成本提升10倍, 周期划分方式从[2, 6, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 5]变为[3, 7, 2, 2, 6]; 将车辆使用成本提升10倍, 周期划分方式从[2, 6, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 5]变为[3, 7, 1, 1, 1, 2, 5], 发现当配送成本增加或单位库存持有成本增加时, 供应商都将减少配送次数。周期与车型调整后的成本对比见表5。其中可变表示周期

表1 各节点间的距离矩阵

Tab.1 Distance between nodes

km

节点	节点															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	99	50	81	78	191	91	64	138	45	179	105	69	103	149	50
1	99	0	49	59	25	127	19	44	85	65	96	35	86	39	143	89
2	50	49	0	47	28	152	41	21	101	24	133	58	57	57	134	50
3	81	59	47	0	38	110	40	27	57	35	101	36	31	31	89	43
4	78	25	28	38	0	128	13	19	80	41	105	32	62	33	127	64
5	191	127	152	110	128	0	117	132	53	146	45	96	129	95	97	148
6	91	19	41	40	13	117	0	29	71	51	93	21	68	24	125	73
7	64	44	21	27	19	132	29	0	80	22	115	41	45	39	116	45
8	138	85	101	57	80	53	71	80	0	93	56	51	77	48	73	96
9	45	65	24	35	41	146	51	22	93	0	134	61	34	58	114	26
10	179	96	133	101	105	45	93	115	56	134	0	74	128	76	124	144
11	105	35	58	36	32	96	21	41	51	61	74	0	67	6	110	77
12	69	86	57	31	62	129	68	45	77	34	128	67	0	62	81	20
13	103	39	57	31	33	95	24	39	48	58	76	6	62	0	105	73
14	149	143	134	89	127	97	125	116	73	114	124	110	81	105	0	99
15	50	89	50	43	64	148	73	45	96	26	144	77	20	73	99	0

表 2 各零售商每日销售量
Tab.2 Daily sales of each retailer

计划期	节点														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	42	28	40	25	30	37	25	44	28	41	36	44	36	39	29
2	86	71	84	79	87	94	58	73	80	87	92	83	84	81	92
3	38	66	56	58	50	69	47	59	53	69	38	61	41	69	41
4	40	73	32	71	44	67	42	66	44	76	47	64	46	58	43
5	45	20	39	25	24	28	42	21	48	16	46	27	53	33	52
6	15	26	22	26	12	21	17	27	18	23	15	22	17	30	20
7	14	24	13	27	16	35	20	17	18	32	24	26	12	33	12
8	38	50	34	45	31	39	35	54	28	41	30	43	39	47	45
9	43	37	31	33	42	36	27	37	30	56	38	39	40	39	44
10	28	33	26	45	26	41	43	45	35	56	37	48	28	52	39
11	110	133	131	150	122	94	116	125	118	114	121	118	129	121	136
12	124	131	131	149	142	158	112	150	120	154	143	128	128	147	123
13	85	152	97	146	87	157	98	153	96	155	104	172	118	159	92
14	64	63	51	74	42	69	49	87	47	77	71	97	53	65	59
15	45	94	64	77	59	79	49	77	48	80	50	83	59	73	36
16	48	49	65	52	57	72	38	58	53	44	59	58	61	40	58
17	28	61	24	47	26	49	26	66	28	54	24	54	18	65	29
18	28	48	21	39	32	31	18	34	23	30	26	31	20	45	25
19	7	13	5	10	5	8	10	8	4	10	2	5	7	12	8
20	6	6	5	13	3	12	3	5	7	5	5	15	5	10	5

表 3 各周期配送路径
Tab.3 Distribution path in each cycle

配送周期	配送路径
1	小型车：0—5—10—0—0；大型车：0—14—8—0—1；0—13—11—0—1；0—6—1—0—1；0—9—3—0—1； 0—12—15—0—1；0—2—4—7—0—1
2	小型车：0—14—0—0；大型车：0—2—6—4—0—1；0—10—8—12—0—1
3	小型车：0—5—0—0；大型车：0—9—15—0—1；0—13—11—0—1；0—7—1—3—0—1
4	小型车：0—10—0—0
5	小型车：0—6—1—0—0；0—4—7—0—0；0—14—0—0；大型车：0—8—5—0—1；0—9—2—0—1； 0—3—13—11—0—1；0—15—12—0—1
6	小型车：0—10—0—0
7	小型车：0—15—12—0—0；0—7—6—0—0；大型车：0—12—8—6—0—1
8	大型车：0—2—14—0—1；0—4—11—13—0—1
9	小型车：0—12—15—0—0；大型车：0—1—6—0—1；0—8—3—0—1；0—10—5—0—1；0—7—9—0—1

表 4 限制配送周期数量下不同策略的成本对比
Tab.4 Cost comparison under different strategies with limited number of delivery cycles

配送周期数量	周期可变最优策略	成本/元		节约比例/%
		固定策略最优值	周期可变策略最优值	
2	[12, 8]	132 740.72	130 466.45	1.70
4	[4, 7, 2, 7]	123 897.11	71 436.29	42.30
5	[3, 7, 2, 2, 6]	97 507.92	68 754.07	29.50

表 5 周期与车型调整后的成本对比
Tab.5 Comparison of cost after cycle and vehicle adjustment

计划期长度	配送周期长度	多车型成本最优值/元	同车型成本最优值/元	节约比例（周期）/%	节约比例（车型）/%
20	可变	63 015.33	64 289.93	0.00	2.00
	2	68 487.71	69 753.29	8.00	1.80
	4	97 507.92	99 186.03	35.40	1.70
	5	123 897.11	125 168.38	49.10	1.00
	10	132 740.72	134 003.38	52.50	0.90

可变策略；数字表示周期固定策略。计划期内每一个配送周期长度与计划期内各配送周期长度集合中对应顺序数字的数值大小相等。采用多车型周期可变策略总成本的最优值为 63 015.33 元，采用多车型周期长度固定为 10，总成本最优为 132 740.72 元，节约比例最高可达 52.5%。可以看出周期可变策略相比于周期固定策略，系统总成本明显下降，证明了模型和算法的有效性。对各周期策略下配送方案的车型进行考虑，结果表明采用多车型进行配送的方案明显优于采用同车型进行配送的方案，其原因是多车型相较于同车型可以为供应商提供更加灵活的配送方案。同时发现周期策略对总成本的影响程度大于车型对总成本的影响程度。

5 结语

在多周期多车型 IRP 问题中，库存管理、车型选择、路径安排等问题相互影响和制约，能否有效降低系统总成本是供应商提升自身竞争力的关键。本文基于周期可变策略对多车型 IRP 问题进行研究，发现周期可变策略比周期固定策略更具成本优势，多车型配送方案优于同车型配送方案。为供应商管理库存模式下协调供应商与零售商之间的库存优化和配送计划提供了一定的参考依据。主要结论如下：

1) 不仅考虑了车型对系统总成本的影响，而且考虑了周期数量及周期长度的可变性。本文的研究结果是对多周期多车型 IRP 问题及周期划分策略问题的进一步深化及拓展，具有理论意义和现实意义。

2) 提出的周期划分方式即使在限定配送周期数量的情况下，依旧可以通过对配送周期的长度进行调整，以降低系统总成本。

参考文献：

- [1] FARIAS K, HADJ-HAMOU K, YUGMA C. Model and Exact Solution for a Two-Echelon Inventory Routing Problem[J]. International Journal of Production Research, 2021, 59(10): 3109-3132.
- [2] SHAABANI H. A Literature Review of the Perishable Inventory Routing Problem[J]. The Asian Journal of Shipping and Logistics, 2022, 38(3): 143-161.
- [3] FELIX P, GUNNAR P. Inventory Routing Analysis for Maritime LNG Supply of German Ports[J]. Transport and Telecommunication Journal, 2021, 22(1): 67-86.
- [4] 巫威眺, 王殿雷, 马昌喜. 液化天然气库存路径问题建模与算法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 252-270. WU Wei-tiao, WANG Dian-lei, MA Chang-xi. Model and Algorithm for Inventory Routing Problem of Liquefied Natural Gas[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11): 252-270.
- [5] HASNI S, SAID T, JARBOUI B, et al. GVNS Based Heuristic for Solving the Multi-Product Multi-Vehicle Inventory Routing Problem[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2017, 58: 71-78.
- [6] 林峰, 贾涛, 高艳, 等. 考虑分割配送的易腐品一体

- 化库存路径问题[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(5): 45-53.
- LIN Feng, JIA Tao, GAO Yan, et al. Integrated Inventory Routing Problem with Split-Delivery for Deteriorating Items[J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(5): 45-53.
- [7] CHENG Chun, YANG Peng, QI Ming-yao, et al. Modeling a Green Inventory Routing Problem with a Heterogeneous Fleet[J]. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review, 2017, 97: 97-112.
- [8] 肖青, 郑凯君. 分割配送的生鲜产品库存-路径优化研究[J]. 包装工程, 2020, 41(19): 140-147.
- XIAO Qing, ZHENG Kai-jun. Inventory-Routing Optimization of Fresh Products by Split Delivery[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(19): 140-147.
- [9] BERTAZZI L, CHUA G A, LAGANÀ D, et al. Analysis of Effective Sets of Routes for the Split-Delivery Periodic Inventory Routing Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 298(2): 463-477.
- [10] DIABAT A, ARCHETTI C, NAJY W. The Fixed-Partition Policy Inventory Routing Problem[J]. Transportation Science, 2021, 55(2): 353-370.
- [11] 赵达, 周永务, 李军, 等. 修正固定分区策略下随机需求库存-路径问题的最优策略及其算法[J]. 系统管理学报, 2017, 26(6): 1158-1167.
- ZHAO Da, ZHOU Yong-wu, LI Jun, et al. Optimal Strategy of Stochastic Demand Inventory Routing Problem under Modified Fixed Partition Policy and Its Algorithm[J]. Journal of Systems & Management, 2017, 26(6): 1158-1167.
- [12] RAA B, AOUAM T. A Shortfall Modelling-Based Solution Approach for Stochastic Cyclic Inventory Routing[J]. European Journal of Operational Research, 2023, 305(2): 674-684.
- [13] 李家斌, 何世伟, 刁丹丹, 等. 物流包装租赁系统配送库存路径模型与算法[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(22): 263-272.
- LI Jia-bin, HE Shi-wei, DIAO Dan-dan, et al. Model and Algorithm of Distribution Inventory Routing Problem in Logistics Packaging Leasing System[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(22): 263-272.
- [14] MAHJOOB M, FAZELI S S, MILANLOUEI S, et al. A Modified Adaptive Genetic Algorithm for Multi-Product Multi-Period Inventory Routing Problem[J]. Sustainable Operations and Computers, 2022, 3(3): 1-9.
- [15] 陈妍, 单汨源, 王秋凤. 多车型集配货一体化车辆路径问题研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1938-1945.
- CHEN Yan, SHAN Mi-yuan, WANG Qiu-feng. Research on Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(5): 1938-1945.

责任编辑: 曾钰婵