文章编号:1006-2467(2019)10-1159-06 DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.10.003

面向汽车入厂物流系统的订单量协同模型及其算法

张 璇, 陈 峰
(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对汽车入厂物流中的订单协同问题,建立了混合整数规划模型,提出了启发式算法和分支定界法,并采用数值实验验证了模型和算法的可行性.结果表明:启发式算法和分支定界法的计算速度和结果均优于 CPLEX 求解数学模型;协同订单量可有效降低总成本.

关键词: 入厂物流; 订单量协同; 混合整数规划; 优化算法
中图分类号: C 935 **文献标志码**: A

Order Quantity Collaborative Model and Algorithm Research on Inbound Logistics

ZHANG Xuan, *CHEN Feng*
(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The order collaboration in automobile inbound logistics is studied. A mixed integer programming model is established. A heuristic algorithm and a branch and bound method are proposed. The numerical experiments are carried out to verify the feasibility of the model and algorithm. The results show that the proposed heuristic algorithm and branch and bound method are superior to CPLEX in computing speed and result. Collaboration of order quantity can effectively reduce the total cost.

Key words: inbound logistics; order quantity collaboration; mixed integer programming; optimization algorithm

汽车零部件入厂物流是汽车物流的重要组成部分,汽车制造商根据生产计划确定每段时间每种零部件的需求量,第三方物流公司根据需求从供应商处取货并配送到制造商仓库,该过程需要制造商、供应商和第三方物流的有效合作,方可避免不必要的费用支出.入厂物流对于减少库存和实现准时制生产都是至关重要的.

目前,有关物流协同模式的研究主要集中在库存路径的问题上.所采用的方法主要有以下几种.

(1) 基于分解的启发式算法. 该方法一般将原问题分解为多个子问题,如将库存路径问题分解为库存问题和路径问题,再分阶段进行求解.例如:Lei 等[1]提出两阶段算法,第一阶段得到直运问题的解,第二阶段对第一阶段的解进行改善;Raa[2]提出基于插入构造和局部搜索的启发式算法;Absi 等[3]提出两阶段迭代算法,基于批量大小和分配决策进行迭代.

(2) 搜索算法. 例如:Moin 等[4]提出的分散搜索算法;Belo-Filho 等[5]提出的改进的领域搜索法;Vansteenwegen 等[6]提出的迭代局部搜索算法.

收稿日期:2018-04-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目 (71672115)
作者简介:张 璇(1994-),女,宁夏回族自治区固原市人,硕士生,主要研究方向为算法设计与分析.
通信作者:陈 峰,男,副教授,博士生导师,电话(Tel.):13918071898;E-mail: fchen@sjtu.edu.cn.

(3) 元启发式算法. 例如:陈誉文等[7]提出的基于聚类算法构造初始解的禁忌搜索启发式算法;Mirzaei 等[8]提出的基于模拟退火以及禁忌搜索的启发式算法;Azadeh 等[9]提出的基于遗传算法的求解方法.

(4) 精确算法. 例如:Berman 等[10]提出基于非线性规划的 Lagrange 松弛启发式和分支定界法;Archetti 等[11]提出分支剪枝算法.

(5) 其他方法. 例如:Soysal 等[12]建立了问题的数学模型并用 CPLEX 进行求解;Zhong 等[13]提出结合 DC(Difference of Convex)规划和分支定界法的最速下降混合算法.

以上研究并未考虑订单配送量与需求量的差异可能会对成本产生的影响. 因此,本文研究基于订单量的入厂物流协同问题,建立数学模型并提出相应算法,以期降低生产系统的总成本.

1 问题描述与数学模型

1.1 问题描述

本文考虑订单配送量与需求量的差异可能带来的成本增加或减少. 对于每个订单,如果配送量小于需求量,会产生缺货带来的风险成本,但可降低其库存成本;如果配送量大于需求量,会产生多余货量的库存成本,但可降低缺货造成的风险成本. 此外,考虑到目前物流领域存在货车空载率较高的状况,通过调整订单的配送量,可降低货车的空载率,减少货车的非满载成本.

给定:

承运车的集合 $\{V_k \mid k=1,2,\cdots,K\}$,其中每辆车的属性包括最大可用容积、固定成本、单位运输成本和单位空载成本;

经销商的集合 $\{A_i \mid i=1,2,\cdots,S\}$,其中每个经销商可能有 1 个或多个入厂订单,经销商的属性包括经度和纬度;

入厂订单的集合 $\{O_n \mid n=1,2,\cdots,N\}$,其中每个订单属于 1 个经销商且仅由 1 辆承运车配送,订单属性包括所属供应商、需求量、单位缺货成本、单位库存成本和最低配送量;

1 个入厂物流仓库,所有订单最终配送到该仓库,其属性包括经度和纬度,订单和订单之间、订单和仓库之间的距离通过经纬度计算得到.

总成本包括承运车的固定成本、运输成本、空载成本和订单的缺货成本以及库存成本. 承运车的运输成本为承运车单位运输成本与总运输距离的乘积;空载成本为承运车单位空载成本与空载容积的乘积;订单的缺货成本为订单单位缺货成本与订单需求量超过实际配送量的部分的乘积;库存成本为订单单位库存成本与订单实际配送量超过需求量的部分的乘积.

1.2 数学模型

为了降低总成本(C),建立混合整数规划优化模型:

$$\min\left[\sum_{k=1}^{K} z_k f_k^1+\sum_{k=1}^{K} f_k^2\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N} s_{ij}x_{ijk}+\sum_{i=1}^{N} c_i^1 q_i^{\mathrm{s}}+\sum_{i=1}^{N} c_i^2 q_i^{\mathrm{e}}+\sum_{k=1}^{K} f_k^3\left(z_k\overline{V}_k-\sum_{i=1}^{N} q_{ik}^1\right)\right] \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\quad \sum_{k=1}^{K} y_{ik}=1 \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ijk}\leqslant y_{jk} \tag{3}$$

$$\sum_{j=0}^{N} x_{ijk}=y_{ik} \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{N} x_{i0k}=z_k \tag{5}$$

$$x_{0jk}=0 \tag{6}$$

$$q_{ik}^1\geqslant y_{ik} \tag{7}$$

$$q_{ik}^1\leqslant My_{ik} \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^{N} q_{ik}^1\leqslant\overline{V}_k \tag{9}$$

$$\sum_{k=1}^{K} q_{ik}^1\geqslant R_i \tag{10}$$

$$Nx_{ijk}+u_i-u_j\leqslant N-1 \tag{11}$$

式中:

$$x_{ijk}=\begin{cases}1, & V_k \text{ 装载 } O_i \text{ 后直接去装载}\\ & O_j(j\neq 0) \text{ 或去仓库}(j=0)\\ 0, & \text{否则}\end{cases}$$

$$y_{ik}=\begin{cases}1, & V_k \text{ 配送 } O_i\\ 0, & \text{否则}\end{cases}$$

$$z_k=\begin{cases}1, & V_k \text{ 参与运输}\\ 0, & \text{否则}\end{cases}$$

f_k^1 为 V_k 的固定成本;f_k^2 为 V_k 的单位运输成本;s_{ij} 为 O_i 到 O_j 的距离,$i,j=0,1,\cdots,N$;c_i^1 为 O_i 的单位缺货成本;q_i^{s} 为 O_i 的缺货成本,

$$q_i^{\mathrm{s}}=\max\left\{0,\ q_i^0-\sum_{k=1}^{K} q_{ik}^1\right\}$$

q_i^0 为 O_i 的需求量所占体积,q_{ik}^1 为 V_k 对 O_i 的配送量所占体积;c_i^2 为 O_i 的单位库存成本;q_i^{e} 为 O_i 的库存成本,

$$q_i^{\mathrm{e}}=\max\left\{0,\ \sum_{k=1}^{K} q_{ik}^1-q_i^0\right\}$$

f_k^3 为 V_k 的单位空载成本;$\overline{V}_k$ 为 V_k 的最大可用容

积；M 为 1 个较大的正常数；R_i 为订单的最低配送量；u_i，u_j 为辅助变量，以去掉闭环.

模型的目标函数包括 5 部分：承运车的固定成本，承运车的运输成本，所有订单的缺货成本，所有订单的空载成本以及所有订单的库存成本. 式(2)表示每个订单由且仅由 1 辆承运车配送. 式(3)～(6)为路径约束，式(3)表示当 V_k 配送 O_j 时，如果 O_j 是第 1 个被配送的订单，则没有从其他订单到 O_j 的路径，即“＜”成立，否则有且只有 1 条从其他订单到 O_j 的路径，即“＝”成立；式(4)表示如果 V_k 配送 O_i，有且只有 1 条从 O_i 到其他订单或者仓库的路径；式(5)表示如果有 1 辆承运车参与运输，则其终点是仓库；式(6)表示任意 1 辆承运车的起点不是仓库. 式(7)以及式(8)表示如果 V_k 配送 O_i，则其配送货量为 q_{ik}^1. 式(9)表示 V_k 配送的总货量不超过其最大的可用容积. 式(10)表示 O_i 的配送量不低于其最低的配送量.

2　优化算法

2.1　启发式算法

本文提出基于贪婪规则的启发式算法. 该算法的特点是计算速度快，占用系统资源少且可得到较好的计算结果，可为分支定界算法提供初始上界. 步骤如下.

(1) 将供应商按订单总量的大小进行降序排列，将每个供应商的订单按订单量多少进行降序排列，得到未装载订单序列(I)并初始化可用承运车序列(D)；

(2) 取出 I 的第 1 个订单 O_i，按其需求量装入 D 的第 1 辆车(V_k). 从 I 中删除 O_i，从 D 中删除 V_k. 将 I 中的剩余订单按照与 O_i 的距离升序排列得到临时的订单序列，按照需求量依次装入 V_k，装入的订单从 I 中删除，直到再装入 1 个订单 $O_{i'}$ 之后容积即会超出 $\overline{V}_k$；

(3) 尝试将与 $O_{i'}$ 同属 1 个供应商的其他未装载订单按照需求量装入 V_k；

(4) 比较以下 3 个方案：

① 装载 $O_{i'}$，装载量为 V_k 的剩余可用容积(v_k)，则

$$q_{i'}^{\mathrm{s}} = c_{i'}^1 (q_{i'}^0 - v_k)$$

② 选择 V_k 已经装载的某个订单 O_j，多装载一部分货量，则

$$q_j^{\mathrm{e}} = c_j^2 v_k$$

③ V_k 非满载，则 V_k 的非满载成本

$$q_k^{\mathrm{n}} = f_k^3 v_k$$

选择 $q_{i'}^{\mathrm{s}}$、q_j^{e} 和 q_k^{n} 最小的方案. 如果尚有未装载订单，转步骤(2)，否则转步骤(5)；

(5) 如果某辆车的装载量比较小，则可以将其换为成本比较低的小型车. 对于每辆车的运输路径，选择所有的可行路径中运输成本最小的路径，算法结束.

启发式算法流程如图 1 所示.

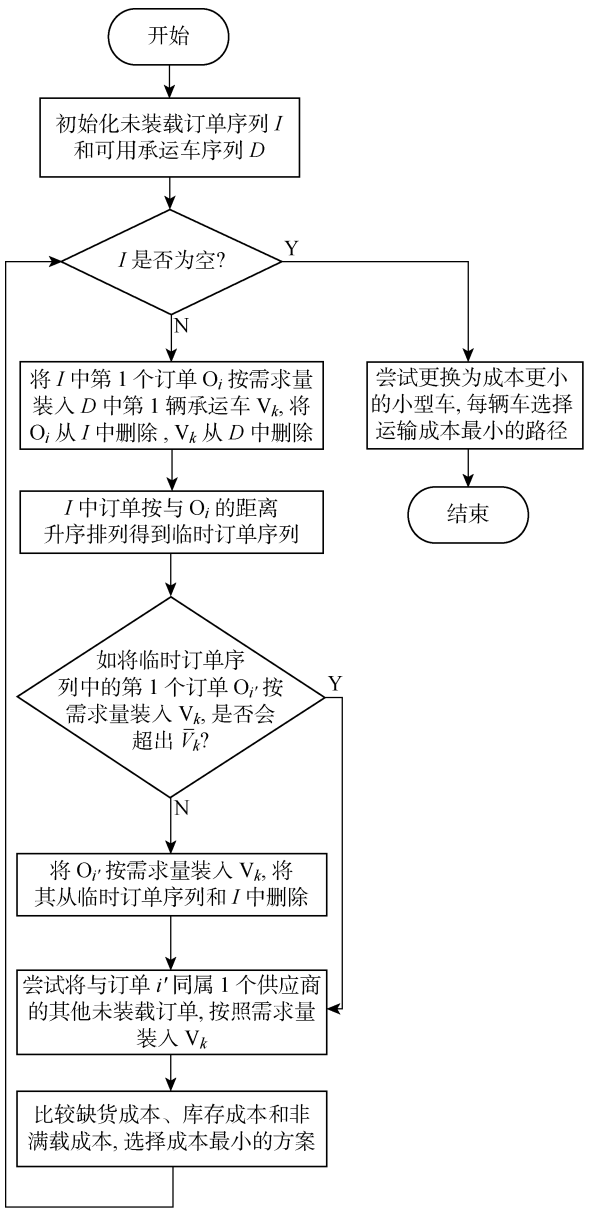

图 1　启发式算法流程图

Fig. 1　Heuristics flow chart

2.2　分支定界算法

分支定界算法是整数规划中一种常用的精确算法，主要包括分支策略、上下界设计以及搜索模式与支配规则 3 部分，其基本思想是基于分支策略，将原

问题分解成规模较小的子问题.

2.2.1 分支策略 分支策略是将问题分割成子问题的方法,即如何确定分支节点,每个节点对应 1 个子问题和相应的子空间. 本文将承运车配送订单视为 1 个装箱问题,每个订单的每种可能的配送量作为 1 个节点.

解的搜索从第 1 层开始,第 1 个订单选择 1 种可能配送量和可能装入的车,如果该订单有 Q_1 种可能的配送量,则第 1 层可能会有 Q_1K 个节点;如果第 2 个订单有 Q_2 种可能的配送量,对应 Q_2K 种选择方案,则第 2 层可能有 $Q_1Q_2K^2$ 个节点,依此类推. 如果 $Q_1=Q_2=\cdots=Q_N=Q$,则 N 个订单最终最多会产生 Q^NK^N 个节点. 实际中,部分节点不可行或者节点的下界大于全局上界(B_u),则该部分节点会被剪枝,所以实际节点数 $N_r<Q^NK^N$.

2.2.2 上下界设计 合理的上下界设计可以有效剪枝,缩小搜索空间,从而提高搜索效率. 本文模型的优化目标为总成本最小,当 1 个节点的局部下界大于 B_u 时,该分支将被剪除. 以启发式算法的解作为初始上界进行搜索,当寻找到比当前上界更小的解时,更新 B_u.

对于 1 个节点的下界,首先计算该节点全部尚未装载订单的最低配送量 q^L 和所有承运车的剩余可用容积 v_R. 如果 $q^L\leqslant v_R$,则节点的下界为当前已装载订单的缺货成本和库存成本,以及已经装载了订单的承运车的固定成本和最小运输成本. 如果节点的下界不小于 B_u,则该节点被剪除.

2.2.3 搜索模式与支配规则 分支定界的搜索模式包括深度优先模式以及广度优先模式. 深度优先模式优先搜索深层节点直到叶节点或者剪枝;广度优先模式则同时计算同一层的多个节点,将会占用更多的系统内存. 因此,本文选择深度优先模式进行搜索.

支配规则为优先选择排序较为靠前的订单进行分支.

2.2.4 算法流程

(1) 以启发式算法的解为初始上界,初始化 I.

(2) 如果存在未装载订单,选择 I 中的第 1 个订单 O_i,并将 O_i 从 I 中删除;否则转步骤(5).

(3) 如果已遍历 O_i 的所有可能配送量和选车方案,转步骤(2);否则选择一个方案作为一个分支节点.

(4) 如果选择的配送量不超过所选车的剩余可用容积且节点下界(B_l)小于 B_u,转步骤(2);否则转步骤(3).

(5) 以所有可能配送路径中运输成本最低的路径作为该节点的路径,计算该节点的总成本,如果 $C<B_u$,更新全局上界;如果尚未遍历所有节点,转步骤(3).

(6) B_u 为最优解,算法结束.

分支定界算法流程如图 2 所示.

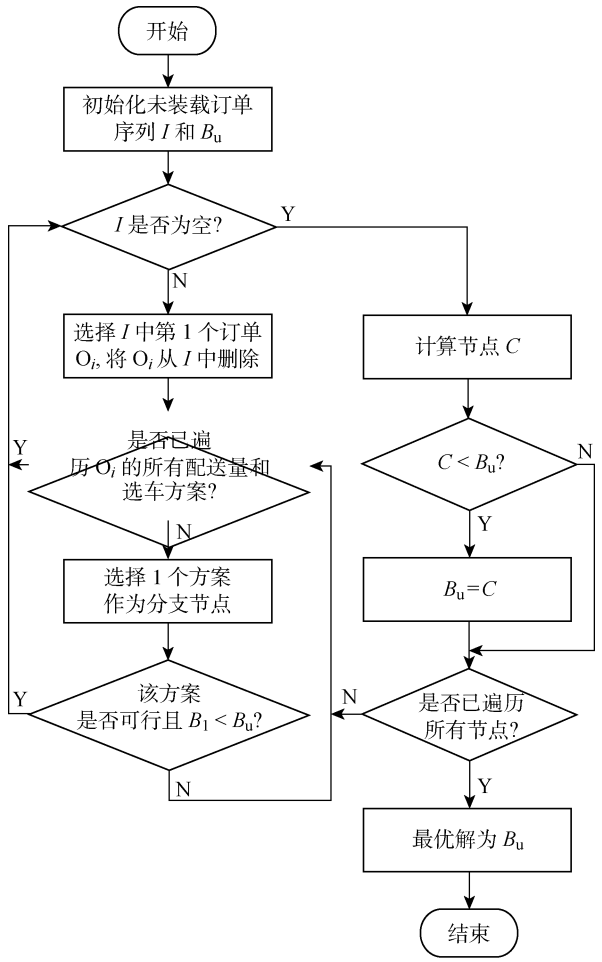

图 2 分支定界算法流程图

Fig. 2 Branch and Bound algorithm flow chart

3 数值实验与结果分析

用 C# 语言在 Visual Studio 平台开发测试程序,调用 ILOG CPLEX 求解混合整数规划模型进行数值实验.

3.1 算法对比

如不做特殊说明,数值实验中所有订单的 $c_i^1=5$ 元,$c_i^2=4$ 元,可选承运车的信息如表 1 所示. 设计 7 组实验,每组实验的订单数量和可选承运车的集合如表 2 所示. 每组实验数据分别采用 3 种方法求解,其中启发式算法求解时间均小于 5 ms,CPLEX 数学模型和分支定界算法的求解时间上限为 30 min. 在数据规模较小的情况下,实际得到最优解的

时间小于时间上限，实验结果见表 3. 可以看出，启发式算法计算出来的成本较高，但可为分支定界算法提供较好的初始上界，以提高剪枝效率；随着数据规模的增加，相同运行时间内，分支定界算法的解优于 CPLEX 数学模型的解.

表 1　承运车信息

Tab. 1　Information of carrier vehicle

车型	$\overline{V}_k$/m³	f_k^1/元	f_k^2/(元·km⁻¹)	f_k^3/(元·m⁻³)
C60	60	680	3	5
C40	40	530	2	4

表 2　实验设计

Tab. 2　Design of experiments

实验组	订单数量	可用承运车集合
1	5	{C60, C40}
2	10	{C60, C40}
3	15	{C60, C40, C40}
4	20	{C60, C40, C40}
5	20	{C60, C60, C40}
6	25	{C60, C60, C40, C40}
7	30	{C60, C60, C40, C40}

表 3　模型与算法总成本对比

Tab. 3　Comparation of model and algorithms total cost

实验组	C/元		
	CPLEX	分支定界	启发式
1	704	704	704
2	1 634	1 682	1 691
3	1 676	1 643	2 397
4	2 333	2 317	2 317
5	2 061	1 998	2 659
6	2 724	2 641	3 347
7	3 330	3 229	3 229

3.2　订单量协同效应

为分析订单量协同对总成本的影响，将式(9)替换为

$$\sum_{k=1}^{K} q_{ik}^1 = q_i^0 \tag{12}$$

上式表示每个订单的配送量等于需求量，即得到非订单量协同问题的数学模型.

利用表 2 中的数据以及 CPLEX 模型求解非订单量协同问题的数学模型，求解时间上限为 30 min. 将计算结果与订单量协同问题的总成本进行比较，结果如表 4 所示. 可以看出，订单量协同可以有效降低系统的总成本.

表 4　订单量协同与非订单量协同的总成本对比

Tab. 4　Comparation of collaborative and non-collaborative total cost

实验组	C/元	
	订单量协同	非订单量协同
1	704	704
2	1 634	1 661
3	1 643	2 381
4	2 317	2 333
5	1 998	2 650
6	2 641	3 353
7	3 229	3 391

3.3　订单总需求量对成本因素的影响

为了分析订单总需求量对固定成本、运输成本、库存成本、缺货成本、空载成本和总成本的影响，指定可用承运车的集合为{C60, C40, C40}，选择同一个供应商的 15 个订单，适当调整订单总需求量，分析总成本的变化趋势. 对于每组数据，分别用 CPLEX 数学模型以及分支定界算法进行求解，时间上限为 30 min，选择两者中总成本较低者进行对比，结果如表 5 所示.

表 5　订单总需求量对成本的影响

Tab. 5　Impact of total order quantity on costs

总货量/m³	车型	成本/元					
		固定	运输	空载	缺货	库存	合计
100	C60	680	231	0	0	0	911
	C40	530	154	0	0	0	684
	合计	1 210	385	0	0	0	1 595
105	C60	680	231	0	20	0	931
	C40	530	154	0	5	0	689
	合计	1 210	385	0	25	0	1 620
110	C60	680	231	0	40	0	951
	C40	530	154	0	10	0	694
	合计	1 210	385	0	50	0	1 645
115	C60	680	231	0	0	16	927
	C40	530	154	4	0	0	688
	C40	530	154	80	0	0	764
	合计	1 740	539	84	0	16	2 379
120	C60	680	231	0	0	36	947
	C40	530	154	32	0	0	716
	C40	530	154	12	0	0	696
	合计	1 740	539	44	0	36	2 359
125	C60	680	231	0	0	28	939
	C40	530	154	28	0	0	712
	C40	530	154	4	0	0	688
	合计	1 740	539	32	0	28	2 339

可以看出,当订单总需求量较小时,只使用 2 辆承运车运输所有订单.此时,有些订单配送量小于其需求量,即产生缺货成本,但缺货成本小于多使用 1 辆承运车对应的固定成本、运输成本和空载成本.随着订单总需求量的增加,缺货成本的增加量超过了多使用 1 辆承运车对应的固定成本、运输成本和空载成本,故使用 3 辆承运车.此时,固定成本和运输成本增加,缺货成本为 0 并产生库存成本和空载成本.可见,订单的总需求量对总成本的影响主要体现为权衡不同的成本因素,以使总成本最低.

4 结语

本文研究了基于订单量的入厂物流协同,建立了混合整数规划模型,提出了启发式算法和分支定界法.通过数值实验验证了模型和算法的有效性.结果表明,订单量协同可以有效降低系统的总成本;订单的总需求量对总成本的影响主要体现为权衡不同成本因素以使总成本最低.

参考文献:

[1] LEI L, LIU S, RUSZCZYNSKI A, *et al*. On the integrated production, inventory, and distribution routing problem[J]. **IIE Transactions**, 2006, 38(11): 955-970.

[2] RAA B. Fleet optimization for cyclic inventory routing problems[J]. **International Journal of Production Economics**, 2015, 160: 172-181.

[3] ABSI N, ARCHETTI C, DAUZÈRE-PÉRÈS S, *et al*. A two-phase iterative heuristic approach for the production routing problem[J]. **Transportation Science**, 2015, 49(4): 1-22.

[4] MOIN N H, YULIANA T. Three-phase methodology incorporating scatter search for integrated production, inventory, and distribution routing problem[J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2015, 2015(2): 1-11.

[5] BELO-FILHO M A F, AMORIM P, ALMADA-LOBO B. An adaptive large neighbourhood search for the operational integrated production and distribution problem of perishable products[J]. **International Journal of Production Research**, 2015, 53(20): 6040-6058.

[6] VANSTEENWEGEN P, MATEO M. An iterated local search algorithm for the single-vehicle cyclic inventory routing problem[J]. **European Journal of Operational Research**, 2014, 237(3): 802-813.

[7] 陈誉文,陆志强,奚立峰. 聚类/禁忌搜索的协同物流网络资源需求定制与成本分析[J]. **上海交通大学学报**, 2009(9): 1407-1411.
CHEN Yuwen, LU Zhiqiang, XI Lifeng. k-means clustering-tabu search algorithm for collaborative logistics network resource demands design and cost analysis[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2009(9): 1407-1411.

[8] MIRZAEI S, SEIFI A. Considering lost sale in inventory routing problems for perishable goods[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2015, 87: 213-227.

[9] AZADEH A, ELAHI S, FARAHANI M H, *et al*. A genetic algorithm-taguchi based approach to inventory routing problem of a single perishable product with transshipment[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2017, 104: 124-133.

[10] BERMAN O, WANG Q. Inbound logistic planning: minimizing transportation and inventory cost[J]. **Transportation Science**, 2006, 40(3): 287-299.

[11] ARCHETTI C, CHRISTIANSEN M, SPERANZA M G. Inventory routing with pickups and deliveries[J]. **European Journal of Operational Research**, 2018, 268(1): 314-324.

[12] SOYSAL M, BLOEMHOF-RUWAARD J M, HAIJEMA R, *et al*. Modeling an inventory routing problem for perishable products with environmental considerations and demand uncertainty[J]. **International Journal of Production Economics**, 2015, 164: 118-133.

[13] ZHONG Y, AGHEZZAF E H. Combining DC-programming and steepest-descent to solve the single-vehicle inventory routing problem[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2011, 61(2): 313-321.

(本文编辑:陈晓燕)