

DOI:10.13196/j.cims.2013.10.LIUQiong.20131026

需求可拆分的多周期订货—运输集成优化算法

刘琼, 许金辉, 张超勇⁺, 李俊

(华中科技大学机械科学与工程学院 数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 鉴于目前多周期订货—运输集成问题研究几乎都假设需求不可拆分、造成不能有效降低总成本, 或者将车辆数作为能力约束, 造成企业各计划期内需求变化较大时不便于合理设置车辆数等问题, 提出一个需求可拆分、动态车辆数的多周期订货—运输集成优化模型。鉴于目前该问题缺乏有效的求解算法, 提出一种遗传算法与2-OPT算法相结合的混合遗传算法, 针对问题的特点设计了一种二维编码方式来处理多周期订货时间和数量问题, 并通过算例验证了模型和算法的有效性。

关键词: 多周期订货—运输集成问题; 需求拆分; 动态车辆数; 混合遗传算法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Multi-cycle order-transportation integrated optimization algorithm for split delivery

LIU Qiong, XU Jin-hui, ZHANG Chao-yong⁺, LI Jun

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment & Technology, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Current researches on multi-cycle order-transportation integrated problems almost assume that delivery of demands could not be split, which directly leads the result that total cost could not be reduced effectively, and the reasonable number of vehicles could not set by companies if demands in different cycles change greatly when the number of vehicles is regarded as a capacity constraint. Therefore, an integrated optimization model of multi-cycle order-transportation with split delivery and dynamic vehicle number was proposed. Aiming at the problem of lacking effective solving algorithm for this problem, a hybrid genetic algorithm combining genetic algorithm with 2-OPT algorithm was presented. Based on the characteristics of the problem, a two-dimension coding method was designed to code order time and quantity in different cycle. The effectiveness of proposed model and algorithm were validated by computational experiments.

Key words: multi-cycle order-transportation integrated problem; split delivery; dynamic vehicle capacity; hybrid genetic algorithm

0 引言

订货—运输集成问题主要研究计划期内订货计划与车辆路径之间的协调, 并根据客户需求, 在满足一定约束条件(如车辆容量、时间限制等)的情况下, 确定向各供应商订货的数量、时间和车辆的行驶路径, 以使系统的运行总费用最小^[1]。多周期订货—运输集成问题研究的计划期包括有限个周期, 其研

究相对于单周期订货—运输集成问题来说, 还包括协调不同周期订货计划与运输策略, 以使整个计划期内的总费用最小化。

对于订货—运输集成问题的研究, 按照不同的需求处理方式, 可分为需求不可拆分和需求可拆分两种情况。目前, 关于订货—运输问题的研究大都假设在每个供应商处的订货量(一般假设其小于车辆最大运载能力)必须由1辆车在1次服务中完成,

收稿日期: 2012-07-03; 修订日期: 2012-10-07。Received 03 July 2012; accepted 07 Oct. 2012.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51035001); 国家自然科学基金资助项目(51275190)。Foundation items: Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 51035001, 51275190).

即不考虑需求拆分^[2-3]。所谓需求拆分^[4]是指客户的订货量小于或大于一辆车的运输能力时,在满足服务要求的前提下,通过拆分与合并,将从多个供应商处所订的货物(小于一辆车运输能力的货物)或拆分后小于一辆车运输量的货物共用一辆车运输。对于实际的运输问题,若客户在某个供应商处的订货量超过一辆车的承载能力时,就必须进行需求拆分。通过对供应商供应量的合理拆分和重新组合,可以提高车辆装载率,同时通过行驶路径的优化可以节省运输总里程,从而降低总成本。文献[5]证明了在车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)中对需求的拆分运输,无论是总运输距离还是用车数目都可以得到进一步优化,尤其在大部分需求点需求量略大于 $1/2$ 车辆运载能力的情况下,分割运输可以极大地优化结果^[6-7]。因此,在订货—运输问题中,对需求的合理拆分具有重要的现实意义。目前,关于需求可拆分的研究大多是基于单周期订货—运输问题^[5-7],只能解决单次的订货和路径优化。而实际运作中,往往涉及较长时间内的多次订货运输优化,属于多周期订货—运输集成优化问题。

为使理论研究更贴近实际,YU 等^[8]首次提出多周期需求可拆分的订货—运输集成优化模型,并指出多周期订货—运输集成问题研究的时间范围包括有限个周期,且不同周期的订货数量动态变化。相对于单周期订货—运输集成问题来说,多周期集成优化包括协调不同周期的订货计划与运输策略,以使整个计划期内的总费用最小。由于该问题涉及不同周期、不同拆分情况下订货计划和运输车辆的协调,是一个复杂的组合优化问题,目前对此类问题的研究还很少。只有文献[8]进行了需求拆分多周期订货—运输优化的研究,但其研究中假设运输能力为一个常数约束。将运输能力作为常数约束处理,在实际应用时存在不便于合理设置车辆数的问题,特别是当计划期内需求变化较大时,如果设置的运输能力约束常数太小,则不能满足运输计划车辆需求,造成模型问题无解,或者因运输能力不足,不能按计划需求期满足企业的需求,导致额外的惩罚费用。在本文所建立的模型中,将运输能力作为决策变量,将根据具体订货量计算出运输所需的最小车辆数作为模型的初始解,并根据路径优化和需求拆分的情况进行优化,因此问题实际所需的车辆数并不是一个固定的常数,最终所需车辆数应在满足需求的情况下根据路径优化结果得出,从而避免因

常数设置不当而造成的上述问题。因此,本文提出一种改进算法,以提高求解速度和解的质量。

求解需求可拆分的多周期订货—运输集成问题,不仅需要处理单周期订货—运输问题中库存费用和运输费用之间的平衡以及车辆行驶路径的优化问题,还要考虑不同周期订货数量和不同拆分情况对问题的影响,是一个复杂的组合优化问题。单周期订货—运输集成问题求解中普遍使用的遗传^[4,9]和禁忌搜索等元启发式算法^[10-11]均采用一维编码方式,该方式不能表达多周期问题中订货周期与订货数量之间的关系,因此不能用于求解本文提出的多周期需求可拆分的订货—运输集成优化模型。文献[8]研究需求可拆分的多周期订货—运输集成问题,采用拉格朗日松弛法,将该模型分解为一个采用启发式规则解决的订货问题和一个采用网络流方法解决的路径问题,该算法的主要问题是求解速度慢,特别是当问题规模增大时,求解时间急剧增加;而采用启发式规则也难以得到最优解。因此,本文提出一种改进算法^[12],以提高求解速度和解的质量。

1 问题描述与模型建立

考虑一个仓库和多个供应商组成的集货网络,计划期开始时车辆从停车场出发,经过某些供应商后将物料运送至仓库,最后从仓库返回停车场。考虑各供应商处的订货量允许拆分运输,将运输能力作为决策变量,解决前述现有研究中存在的不便于合理设置车辆数的问题,建立多周期需求可拆分的订货—运输集成优化模型,来协调优化订货时间、订货数量、车辆数和车辆路径,以使计划期内库存成本和运输成本的总成本最小。

1.1 基本假设

为了使研究问题具体、明确,作以下假设:

- (1)向多个供应商进行订货,每个供应商供应一种特定的物料且不具有替代性。
- (2)每种物料在每个周期内的需求确定,且某一周期和另一个周期对同一物料的需求可以不同。
- (3)供应商不允许缺货,集货车辆到达供应商处时供应商已做好供货准备。
- (4)在特定周期内,一辆或多辆货车可能会到同一供应商那里集货,即允许拆分运输。
- (5)每种特定物料的具体库存成本已知。
- (6)仓库的库存容量能满足库存要求。
- (7)计划期有限并已给出。

(8)所有车辆的容量和费用相同,车辆数为根据计划期内的需求量和运输计划确定的决策变量。

(9)每辆车在计划期内只进行一次运输,即车辆数等效于车次数。

1.2 模型建立

1.2.1 符号说明

为了表达清楚以便理解,文中所用符号说明如下:

(1)参数

S_i 表示供应商 $i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$, 只供应第 i 种物料;

D 表示停车场, P 表示仓库;

$\tau = \{1, 2, \dots, T\}$ 表示在研究时期内所包含的时间周期;

c 为车辆容量(件);

β 为计划期内租赁一辆车的固定费用(元/车辆数);

V 为单位运输距离的成本(元/km);

d_{it} 为在 t 时期对物料 i 的需求(件);

c_{ij} 为供应商 i 和供应商 j 之间的运输距离(km);

c_{PD} 为仓库和停车场之间的距离(km), 常数;

c_{iP} 为供应商和仓库之间的距离(km)。

(2)决策变量

R 为订货运输过程中车辆数的决策变量, 初始值设定为完成任务理论上最少需要的车辆数, $R = \sum_{t=1}^T \lceil \sum_{i=1}^N d_{it} / C \rceil$, 实际所需的车辆数则由最终求解的优化拆分方案和车辆路径优化结果得出, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整;

a_{it} 为企业在时刻 t 从供应商 i 处采购的物料总量(件);

I_{it} 为在时刻 t 结束时物料 i 的库存总量(件);

q_{ijt} 为在 t 时刻通过路径 (i, j) 的运输总量(件);

x_{ijt} 为在 t 时刻通过路径 (i, j) 的运输次数, 其下标为 P, D 时表示经过仓库和停车场的路径。

1.2.2 数学模型

主要费用包括库存成本、订货成本和运输成本, 其数学模型的优化目标和约束条件如下:

优化目标

$$Z = \min \left\{ \sum_{i \in S} h_i \left(\sum_{t \in \tau} I_{it} \right) + \beta R + F \sum_{t \in \tau} \sum_{i \in S} x_{iP} + V \left[\sum_{j \in S} \sum_{i \in S \cup D} c_{ij} \left(\sum_{t \in \tau} x_{ijt} \right) + \right. \right.$$

$$\left. \sum_{i \in S} c_{iP} \left(\sum_{t \in \tau} x_{iP} \right) + c_{PD} \left(\sum_{t \in \tau} x_{PD} \right) \right\}. \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad R = \sum_{t=1}^T \left\lceil \sum_{i=1}^N d_{it} / C \right\rceil; \quad (2)$$

$$I_{it} = I_{i,t-1} + a_{it} - d_{it}; \quad (3)$$

$$q_{ijt} \leq C x_{ijt}; \quad (4)$$

$$I_{it} \geq 0; \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S} q_{iP} = \sum_{i \in S} a_{it}; \quad (6)$$

$$x_{ijt} \in Z^+; \quad (7)$$

$$q_{ijt} \geq 0, a_{it} \geq 0, d_{it} \geq 0. \quad (8)$$

其中:式(1)第一项表示物料在仓库的库存成本,第二项表示车辆租赁成本,第三项表示固定运输成本,其余表示可变运输成本;式(2)表示计划期内集货决策使用的车辆数;式(3)表示 t 时期末物料 i 的库存量;式(4)表示车辆的运输能力满足要求,同时通过该约束保证实现拆分装运;式(6)表示从供应商到达仓库的物料总量等于企业从供应商采购的物料总量;式(7)表示 t 时期通过路径 (i, j) 的运输次数,为非负整数。

2 求解算法

如引言所述,因为需求可拆分的单周期订货—运输集成问题的优化算法采用的编码方式不能表达计划期内不同周期之间订货数量的关系,所以不能用于需求可拆分的多周期订货—运输集成问题。而目前对需求可拆分的多周期订货—运输集成问题的研究很少,仅有的一篇文章[8]中的算法还存在求解速度慢等问题。因此,本文提出一种遗传算法与 2-OPT 算法结合的混合遗传算法,设计了一种二维编码方式来处理多周期订货时间和数量问题,并在遗传算法中嵌入 2-OPT 算法来优化车辆行驶路径,提高了问题的求解速度,其原理如图 1 所示。

2.1 编码

针对多周期需求可拆分的订货—运输集成问题的特点,提出一种二维编码方式,用一个 $(N \times T)$ 的二维自然数矩阵进行染色体编码,表示多周期订货时间和数量信息。

因为不允许发生物料的缺货,所以某种物料某一时间集货的数量总是大于等于该物料该时间点和下一次集货时间点之间所需物料数量的总和。假设周期 j 是物料 i 的一次订货时间,周期 k 是该物料的下一次订货时间,则周期 j 从供应商 i 处订货的数量大于等于周期 $j, j+1, \dots, k-1$ 内企业对物料 i 的需

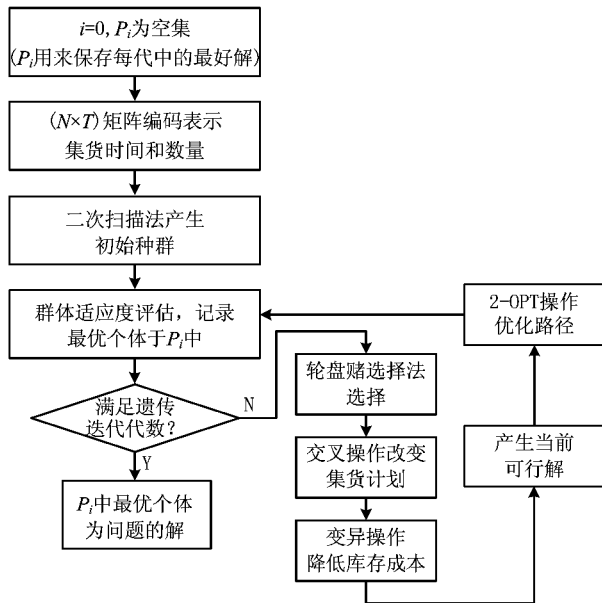


图1 混合遗传算法原理框图

求总量。为了协调库存费用和运输费用,同时方便求解,对某一计划期为 $\tau = \{1, 2, \dots, j, \dots, T\}$ 的订货数量编码产生步骤如下:对于计划期 τ 内的任意周期 t ,当 $t = 1$ 时, a_{it} 取 $[d_{it}, \sum_{l=1}^T d_{il}]$ 之间的一个随机整数;当 $t \geq 2$ 时,如果 $\sum_{l=1}^{t-1} a_{il} - \sum_{l=1}^{t-1} d_{il} < d_{it}$,则 a_{it} 取 $[\sum_{l=1}^t d_{il} - \sum_{l=1}^{t-1} a_{il}, \sum_{l=1}^T d_{il} - \sum_{l=1}^{t-1} a_{il}]$ 之间的一个随机整数,否则 $a_{it} = 0$ 。其中: d_{il} 表示周期 l 对物料 i 的需求量, a_{il} 表示周期 l 对物料 i 的集货量。

例如,某企业在一个计划期为 5 个周期的时间段内对各供应商物料的需求量如表 1 所示,一个可行的集货染色体编码如表 2 所示,对应周期末仓库剩余物料数量如表 3 所示。

表 1 需求矩阵

供应商	周期				
	1	2	3	4	5
1	4	2	4	4	4
2	2	2	2	2	2
3	2	1	2	2	2

表 2 集货时间和数量编码

供应商	周期				
	1	2	3	4	5
1	8	0	3	7	0

续表 2

2	4	0	3	3	0
3	2	7	0	0	0

表 3 期末仓库剩余物料矩阵

供应商	周期				
	1	2	3	4	5
1	4	2	1	4	0
2	2	0	1	2	0
3	0	6	4	2	0

2.2 遗传操作

2.2.1 选择操作

采用轮盘赌选择法进行个体选择,每个个体的选择概率与其适应度值成比例。设群体大小为 n ,个体 i 被选择的概率为 $P_i = f_i / \sum_{j=1}^n f_j$ 。

2.2.2 交叉操作

为了产生既可以减少车辆数又满足约束条件的可行解,设计 $(N \times 1)$ 二进制列向量进行交叉操作改变集货计划,步骤如下:

步骤 1 采用轮盘赌选择法选择需交叉的两个父代个体 $parent_1, parent_2$ 。

步骤 2 随机生成二进制列向量 $Mask = [x_1, \dots, x_i, \dots, x_N]^T$ ($x_i = 0, 1$ 且向量元素 x_i 不能全为 0 或 1),其中 N 表示供应商数量。

步骤 3 按照下述方法生成子代个体 $offspring_1$:

for($i=1; i \leq N; i++$)

if($x_i=1$) 将父代个体 $parent_1$ 的第 i 行复制给 $offspring_1$ 的第 i 行;

else 将父代个体 $parent_2$ 的第 i 行复制给 $offspring_1$ 的第 i 行。

步骤 4 按照下述方法生成子代个体 $offspring_2$:

for($i=1; i \leq N; i++$)

if($x_i=1$) 将父代个体 $parent_2$ 的第 i 行复制给 $offspring_2$ 的第 i 行;

else 将父代个体 $parent_1$ 的第 i 行复制给 $offspring_2$ 的第 i 行。

对上面编码例子中三个供应商集货过程的例子,首先随机生成一个 $(N \times 1)$ 的二进制列向量 $Mask = [1, 0, 1]^T$,对于两个如表 4 和表 5 所示编码的父代,按照上述交叉操作生成两个子代,如表 6 和

表 7 所示。

表 4 父代 1

	周期				
供应商	1	2	3	4	5
1	10	0	0	8	0
2	2	2	6	0	0
3	2	5	0	0	2

表 5 父代 2

	周期				
供应商	1	2	3	4	5
1	4	9	0	5	0
2	5	0	1	4	0
3	8	0	0	0	1

表 6 子代 1

	周期				
供应商	1	2	3	4	5
1	10	0	0	8	0
2	5	0	1	4	0
3	2	5	0	0	2

表 7 子代 2

	周期				
供应商	1	2	3	4	5
1	4	9	0	5	0
2	2	2	6	0	0
3	8	0	0	0	1

2.2.3 变异操作

为了降低库存费用,变异操作的设计思想是在满足企业物料需求的前提下,将订购量尽量后移,以降低库存费用,步骤如下:

步骤 1 随机选择发生变异的基因位 $gene(i, j)$, 其中 i 表示供应商, j 表示周期。

步骤 2 如果 $j \neq 1$, 则转步骤 3; 否则执行本步骤的操作, 定义周期变量 q , 初始化 $q = 1$; 如果 $gene(i, j+q) = 0$, 则令 $q = q + 1$ 。重复这一过程, 直至找到 $gene(i, j+1) \neq 0$ 。生成转移随机整数 $v \in (0, \sum_{k=1}^{j+q} a_{ik} - \sum_{k=1}^{j+q} d_{ik})$, 令 $gene(i, j) = gene(i, j) - v$, $gene(i, j+q) = gene(i, j+q) + v$ 。

步骤 3 定义周期变量 p , 初始化 $p = 1$, 如果

$gene(i, j-p) = 0$, 则令 $p = p + 1$ 。重复这一过程, 直至找到 $gene(i, j-p) \neq 0$ 。生成转移随机整数 $v \in (0, \sum_{k=j-p}^j a_{ik} - \sum_{k=j-p}^j d_{ik})$, 令 $gene(i, j-p) = gene(i, j-p) - v$, $gene(i, j) = gene(i, j) + v$ 。

由需求矩阵表 1 可知, 对供应商 1 的需求量, 对上例中的子代 2 (如表 7), 随机选择变异基因位 $gene(1, 4)$, 按上述变异操作步骤 3 的规则, 将订购量后移产生新子代, 步骤 3 中 $v \in (0, 4)$, 在 $(1, 4)$ 区间范围内随机选择一个整数, 如 3, 则变异过程如表 8 所示。

表 8 变异实例

	周期				
	1	2	3	4	5
供应商 1 需求量	4	2	4	4	4
供应商 1 集货量原子代	4	9	0	5	0
供应商 1 集货量新子代	4	6	0	8	0

2.2.4 初始种群生成

采用二次扫描法先集群后安排路径生成初始种群。所谓二次扫描法^[13]就是首先将供应商以 Y 坐标升序进行排序, 确定供应商集群, 然后以 X 坐标升序进行排序, 确定各个集群的路径。算法步骤如下:

步骤 1 对每个周期 $t, t \in \{1, 2, \dots, T\}$, 根据供应商的 Y 坐标值, 对供应商集合 $\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 进行升序排序, 得到供应商集合 $\{s_{(1)}, s_{(2)}, \dots, s_{(N)}\}$ 。

步骤 2 初始化各变量。令 $i = 1, k = 1$, 路径 $R_k = \{\}$, $Q_k = 0$ (Q_k 表示第 K 个集群的集货总数)。

步骤 3 如果 $Q_k + d_{i,t} \leq C$, 则将 $s_{(i)}$ 安排在路径 R_k 上, 令 $Q_k = Q_k + d_{i,t}, a_{ik} = d_{i,t}$; 否则, 令 $a_{ik} = C - Q_k, Q_k = C$ 。设 $k = k + 1$, 同时新建一个路径 $R_k = \{\}$, 将 $s_{(i)}$ 安排在路径 $R_k = \{\}$ 上, 令 $a_{ik} = d_{i,t} - a_{i,k-1}, Q_k = a_{ik}$ 。如果 $i > N$, 则 $k = 1$, 转步骤 4; 否则, 设 $i = i + 1$, 重复步骤 3。

步骤 4 $\{\text{路径}\}$ 对于每个集群, 根据供应商的 X 坐标值升序安排供应商在路径 R_k 上的供货顺序, 令 $s_{(i)}^k$ 表示集群后在路径 $R_k = \{\}$ 上的第 i 个供应商。形成一个从停车场开始, 依次访问 $s_{(1)}^k, s_{(2)}^k, \dots, s_{(R_k)}^k$ 和仓库, 最后回到停车场的集货路径。

2.3 2-OPT 算法改善解

为了进一步优化车辆路径以降低运输费用, 在遗传算法中嵌入 2-OPT 算法, 对可行解进行优化。

2-OPT 算法的原理示意图如图 2 所示。

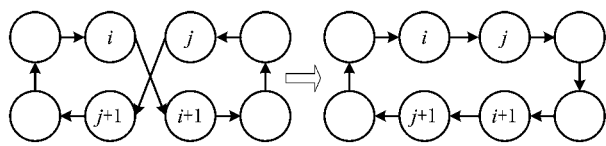


图2 2-OPT邻域搜索优化算法原理示意图

图 2 中,圆圈表示供应商,各个供应商之间的直接有向线段表示车辆行驶路径, (s_i, s_{i+1}) 表示供应商 i 和 $i+1$ 之间的车辆路径长度。如果 $(s_i, s_{i+1}) + (s_j, s_{j+1}) > (s_i, s_j) + (s_{i+1}, s_{j+1})$ 成立,则删除线段 (s_i, s_{i+1}) 和 (s_j, s_{j+1}) ,同时增加线段 (s_i, s_j) 和 (s_i, s_{i+1}) 并形成有向的封闭路径。

在通过遗传算法得到订货时间和订货数量,以及二次扫描法得到车辆路径初始解的基础上,以 2-OPT 算法对每一代中的当前最好解进行路径改善。当前解包括若干子路径,对其中的每一条子路径应用 2-OPT 算法。设当前解中的一条子路径为 $SRX: s_1, s_2, \dots, s_s$,各个供应商之间的直接有向路径称为边,从第一条边开始,以遍历方式对 (s_i, s_{i+1}) 和

(s_j, s_{j+1}) 进行 2-OPT 操作(其中 $j \geq i+2$)。在进行 2-OPT 操作时,如果新产生的路径满足约束且路径长度小于原来的长度,则将该路径作为当前路径长度,然后再进行其余遍历过程,直至该路径完成所有的 2-OPT 操作,此时对应当前路径长度的子路径将作为改善后的当前解的相应子路径。这样,在当前解中的所有子路径均实施了 2-OPT 操作后,即可得到一个路径长度不大于原路径长度的当前解。

3 算法测试与分析

因为考虑需求可拆分、动态车辆数情况的多周期、多供应商、单仓库的订货—运输集成问题缺乏 benchmark 实例,所以构建了 10 个供应商 5 个周期的算例。供应商的坐标信息及其所对应的单位物料 i 每周期的库存成本如表 9 所示,车辆容量为 10 件/辆,车辆固定订货成本为 20 元/辆,车辆租赁成本 50 元/辆,车辆运输成本为 1 元/km。表 10 给出了企业各周期对各种物料的需求信息, $t=1$ 和 $t=3$ 时的物料需求数量远大于其余周期,体现了企业计划期内不同周期需求变化较大的情况。

表 9 供应商坐标和物料库存成本

供应商	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	仓库	停车场
X 坐标/km	9	-9	-22	-4	-3	-40	-5	-15	-8	10	0	10
Y 坐标/km	50	10	22	35	44	12	-5	-15	-2	-10	0	0
库存成本/元	24	15	3	9	12	9	6	27	27	9	—	—

表 10 物料需求信息

周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	21	12	12	13	13	14	32	13	14	13
2	3	4	3	2	2	5	4	6	3	7
3	31	41	21	52	34	51	14	22	32	12
4	2	5	3	3	2	2	1	4	0	2
5	1	2	4	3	2	0	3	1	1	2

表 11 20 次试验平均结果

车辆数/辆	成本/元	成本标准差/元	计算时间/s
57	4 991.5	12.6	5.293

表 12 最优结果

车辆数/辆	成本/元	计算时间/s
55	4 865	4.87

表 13 最优结果集货数量矩阵

周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25	12	13	13	19	14	32	13	16	13
2	0	6	3	2	0	5	8	6	3	7
3	30	44	23	55	30	51	11	22	30	14
4	2	0	0	0	2	2	0	4	0	0
5	1	2	4	3	2	0	3	1	1	2

采用 C++ 语言在 VC 6.0 下编程,使用 2.62 GHz CPU,2 GB 内存的测试环境进行 20 次试验。计算过程中,种群大小、遗传代数、交叉率和变异率分别为 100,300,0.7 和 0.1。表 11 和表 12 分别给出了平均结果和最优结果,表 13 和表 14 分别给出了最优结果的订货时间、订货数量与最优结果的每个集群的车辆行驶路径。

表 14 最优结果路径

T	路径
$t=1$	$V_1:8(3)-6(4)-3(3); V_2:7(2)-9(6)-2(2); V_3:10(3)-4(3)-5(4); V_4:5(5)-1(5); V_5:1(10); V_6:1(10); V_7:2(10); V_8:3(10); V_9:4(10); V_{10}:5(10); V_{11}:6(10); V_{12}:7(10); V_{13}:7(10); V_{14}:7(10); V_{15}:8(10); V_{16}:9(10); V_{17}:10(10)$
$t=2$	$V_1:8(6)-2(4); V_2:2(2)-6(5)-3(3); V_3:10(7)-7(3); V_4:7(5)-9(3)-4(2)$
$t=3$	$V_1:8(2)-10(4)-2(4); V_2:6(1)-3(3)-7(1)-4(5); V_3:1(10); V_4:1(10); V_5:1(10); V_6:2(10); V_7:2(10); V_8:2(10); V_9:2(10); V_{10}:3(10); V_{11}:3(10); V_{12}:4(10); V_{13}:4(10); V_{14}:4(10); V_{15}:4(10); V_{16}:4(10); V_{17}:5(10); V_{18}:5(10); V_{19}:5(10); V_{20}:6(10); V_{21}:6(10); V_{22}:6(10); V_{23}:6(10); V_{24}:6(10); V_{25}:7(10); V_{26}:8(10); V_{27}:8(10); V_{28}:9(10); V_{29}:9(10); V_{30}:9(10); V_{31}:10(10);$
$t=4$	$V_{11}:8(4)-6(2)-5(2)-1(2)$
$t=5$	$V_{12}:8(1)-7(3)-2(2)-3(4); V_{13}:10(2)-9(1)-4(3)-5(2)-1(1)$

注:表中 V_i 表示第 i 辆车,括号外的数表示供应商编号,括号里的数表示集货数量

比较表 10 和表 13 可以看出,在满足需求的条件下,为了降低总成本,从部分供应商的订货时间比需求时间提前了。从表 14 可以看出,在订货时间和数量均满足物料需求的条件下,各订货周期分别需要 17, 4, 31, 1 和 2 辆车,共形成 55 条路径,由此可见,各周期需要的车辆数变化较大,因此采用动态车辆数决策可解决将运输能力作为常数约束处理时车辆数合理选取的问题。表 14 在 $t=1$ 时供应商 5 处和 $t=2$ 时供应商 2 和 7 处产生需求量小于车辆容量的可拆分集货运输;在 $t=1$ 和 $t=3$ 时,其余各供应商处产生需求量大于车辆容量的可拆分集货运输。如果需求不可拆分,则需 62 辆车,成本为 5 243 元,说明需求拆分可减少车辆使用数量,从而降低成本。由表 11 和表 12 可知,本算法计算获得的最好值和平均值之间的相对偏差在 5% 之内,说明算法在求解该模型时具有稳定性,并在 5 s 左右能求出解,而文献[8]的算例 6 规模与本文算例规模相当,而其求解时间约为 157 s,因此本文提出的算法在实际应用中具有计算速度快的优势。由于本文所建模型与文献[8]存在差异,两种算法的求解质量不具有可比性,但是将本文提出的算法用于求解文献[8]中的 10 个算例,其求解质量均有所改善。

4 结束语

为了使多周期需求可拆分的订货—运输集成问题模型更加易于实际应用,本文采用动态车辆数决策,解决了不便于合理设置车辆数的问题,提出一个考虑需求可拆分、动态车辆数决策的多周期、多供应商、单仓库的网络订货模型。针对该模型的特点,提出一种将遗传算法与 2-OPT 算法相结合的混合遗传算法,设计了一种二维编码方式,实现了多周期订

货数量与时间的编码,通过算例说明了本文所提算法在求解速度方面比现有算法有明显提高,验证了该模型和算法的有效性。尽管需求可拆分能够有效降低运输总成本,但此时供应商的货可能会分几次运走,从而增加诸如理货等运作上的复杂性,造成其他成本的增加,目前模型还未考虑这一情形,将来的研究可以进一步考虑。

参考文献:

- [1] MOIN N H, SALHI S. Inventory routing problems: a logistical overview[J]. Operational Research Society, 2007, 58(9): 1185-1194.
- [2] LIU Wangsheng, YANG Fan, LI Maoqing, et al. Clustering algorithm for split delivery vehicle routing problem[J]. Control and Decision, 2012, 27(4): 535-541 (in Chinese). [刘旺盛, 杨帆, 李茂青, 等. 需求可拆分车辆路径问题的聚类求解算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(4): 535-541.]
- [3] HENRIK A, ARILD H, MARIELLE C, et al. Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing[J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(9): 1515-1536.
- [4] LI J, CHU F, CHEN H. Coordination of split deliveries in one-warehouse multi-retailer distribution systems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60(2): 291-301.
- [5] WILCK J H IV, CAVALIER T M. Cavalier. A genetic algorithm for the split delivery vehicle routing problem[J]. American Journal of Operations Research, 2012, 2(2): 207-216.
- [6] LIU Wangsheng, HUANG Juan. Two-stage algorithm for split delivery vehicle routing problem[J]. Journal of Jimei University, 2011, 16(1): 38-44 (in Chinese). [刘旺盛, 黄娟. 需求可拆分的车辆路径问题的分段求解[J]. 集美大学学报, 2011, 16(1): 38-44.]
- [7] ARCHETTI C, SPERANZA M G, SAVELSBERGH M W P, et al. To split or not to split; that is the question[J]. Transportation Research-Part E: Logistics and Transportation Re-

- view, 2008, 44(1): 114-123.
- [8] YU Yugang, CHEN Haoxun, CHU Feng. A new model and hybrid approach for large scale inventory routing problems[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(3): 1022-1040.
- [9] ABDELMAGUID T F, DESSOUKY M M. A genetic algorithm approach to the integrated inventory-distribution problem [J]. International Journal of Production Research, 2006, 44(21): 4445-4464.
- [10] BRANDAO J. A deterministic tabu search algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 195(3): 716-728.
- [11] MENG Fanchao, LU Zhiqiang, SUN Xiaoming. Taboo search algorithm of split delivery vehicle routing problem [J]. Computer Aided Engineering, 2010, 19(1): 78-83(in Chinese). [孟凡超, 陆志强, 孙小明. 需求可拆分车辆路径问题的禁忌搜索算法[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(1): 78-83.]
- [12] LIN S. Computers solutions of the traveling salesman problem[J]. Bell System Technical Journal, 1965, 44(10): 2245-2269.
- [13] ZHANG Jun. Research on optimization algorithms for vehicle routing problem with weight-related cost and inventory-transportation problem in distribution system [D]. Shenyang, Northeastern University, 2010(in Chinese). [张 军. 分销系统中权重车辆路径与库存运输问题的优化算法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.]

作者简介:

刘 琼(1965—),女,重庆人,教授,研究方向:物流系统管理、制造系统集成优化,E-mail: Qiongliu@mail. hust. edu. cn;

许金辉(1988—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向:物流与供应链管理;

+张超勇(1972—),男,江苏海门人,副教授,博士,研究方向:智能调度算法、网络化制造、敏捷供应链等,通信作者,E-mail: zcyhust@sohu. com;

李 俊(1986—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,研究方向:物流与供应链管理。