

联合补货策略下的供应商选择和订货量分配协同优化

曾宇容^{1,2}, 万建超³, 吕盛祥^{2†}, 王思睿², 王 林²

(1. 湖北经济学院 信息与通信工程学院, 武汉 430205; 2. 华中科技大学
管理学院, 武汉 430074; 3. 普天信息技术有限公司, 北京 100080)

摘要: 分析基于联合补货策略的供应商选择与商品订货量分配协同决策问题, 设计一种有效的改进差分进化算法 (Improved differential evolution, IDE) 进行求解. 在考虑商品异质性带来的分组约束基础上, 构建一种拓展的供应商选择与订货量分配协同决策新模型. 对比算例分析表明, IDE 在求解此问题及其扩展问题时优于标准差分进化算法和模拟退火算法, 随机生成的大规模算例进一步验证了 IDE 求解此类复杂问题的优越性.

关键词: 供应商选择; 订货量分配; 联合补货; 分组约束; 差分进化算法; 模拟退火算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Collaborative optimization of suppliers selection and order quantity allocation using joint replenishment policy

ZENG Yu-rong^{1,2}, WAN Jian-chao³, LYU Sheng-xiang^{2†}, WANG Si-rui², WANG Lin²

(1. School of Communication and Information Engineering, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China;
2. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Potevio
Information Technology Co. Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: The problem of coordinated supplier selection and quantity allocation based on the joint replenishment policy is studied, and an effective and improved differential evolution (IDE) algorithm is proposed to solve the problem. Then a new coordinated supplier selection and order quantity allocation model considering grouping constraint caused by the heterogeneity of items is developed. Results of contrastive numeric examples show that the IDE algorithm outperforms the standard DE algorithm and the simulated annealing (SA) algorithm in solving this problem and its extension type. The effectiveness of the IDE algorithm is further verified by randomly generated large-scale numerical examples.

Keywords: supplier selection; order quantity allocation; joint replenishment; grouping constraint; differential evolution algorithm; simulated annealing

0 引言

联合补货问题 (joint replenishment problem, JRP) 是指通过对不同种类的采购物品科学分组、同组物品联合采购来分摊固定采购费用, 利用经济规模效应降低采购总成本的一种协同策略. 作为经济全球化和采购国际化背景下一种有效的采购策略, 联合补货策略正被许多国际大型企业使用. 2015年, 中国联通与西班牙电信达成智能手机的联合采购合作协议, 两家电信运营商能够以很高的性价比采购手机, 增强了他们在中国、欧洲和拉丁美洲的市场竞争力; 世界第二大零售商家乐福已在中国实施联合补货, 其位于天津武清开发区的华北物流中心整合华北地区超市的采购需求, 向上游供应商联合补货, 并向下游超市

进行统一配送, 家乐福籍此提高了与供应商的议价能力, 降低了采购成本. 相关研究表明^[1-2], 联合补货可帮助企业降低 5%~12% 的成本.

面对复杂的国内外采购环境, 大型企业通常倾向于优选供应商并合理分配采购量, 以保证物资供应的质量和可靠性. 以最具代表性的汽车行业为例, 上海通用汽车从新品立项时就对潜在供应商进行评审选择, 并在整个产品生命周期内对供应商进行严格的质量管理. 如“新君威”车型, 上海通用全球优选 92 家供应商并进行相关订单分配. Rezaei 等^[3]的研究指出, 供应商选择与订货量分配是相互依存的两个决策过程, 具有内在的紧密联系, 因此对供应商选择和订货量分配进行协同研究很有必要.

收稿日期: 2018-01-01; 修回日期: 2018-05-27.

基金项目: 湖北省教育厅重点科研项目 (D20152203).

责任编辑: 王凌.

†通讯作者. E-mail: shengxianglv@foxmail.com.

基于以上分析,结合联合补货策略的成本节约优势和采购过程中不可避免的因商品“异质性”导致的分组约束问题,本文研究基于联合补货策略的供应商选择与订货量分配协同优化问题.对比算例分析表明,IDE在求解此问题及其扩展问题时优于标准差分进化算法和模拟退火算法,随机生成的大规模算例进一步验证了IDE求解此类复杂问题的优越性.

1 相关研究评述

1.1 联合补货问题相关研究进展

JRP及其拓展问题一直受到众多学者的重视^[4-5].目前的JRP研究流派主要分为两类:第1类研究考虑JRP的直接现实应用,这类研究通常会在传统的JRP模型中考虑商品性质、供应条件、需求特性等现实因素,并在模型中增加相应的约束.如Paul等^[6]研究了有缺陷产品的JRP;Zhang等^[7]建立了考虑完全缺货和需求相关条件下的JRP模型;Ongkunaruk等^[8]同样研究了有缺陷产品的JRP,并在其模型中考虑了预算和运输能力约束等;Braglia等^[9]首次研究了结合缺货成本和可控提前期的随机JRP,该JRP基于定期检查策略.第2类研究主要聚焦于JRP在供应链上的纵向扩展,即将JRP与供应链上的其他环节进行集成研究,如上游供应商选择和下游运输配送.相关文献包括:Wang等^[10]研究了随机需求下的联合补货与配送协同决策问题;Qu等^[11]研究了基于联合补货策略的随机需求下选择-库存问题;Cui等^[12]研究了RFID投资决策对联合补货与配送协同策略的影响.目前来看,两种JRP的研究派别均在快速发展.学者们一方面试图通过在JRP中考虑贴近现实的管理情形,放松假设,将JRP从传统的偏理论模型转向更实用的可执行策略;另一方面通过将联合补货和协同决策的思想扩展至供应链管理的其他环节,以求在整个供应链的层面上降低成本.但是,这种扩展往往是向下游扩展,实际情形中,采购过程中需面对的供应商选择问题JRP研究却很少考虑到.

JRP及其扩展问题属于NP-hard问题^[1,7],因此启发式算法或通用的智能优化算法是求解此类问题最常用的手段.经典的求解JRP相关问题的算法包括RAND算法^[1]、遗传算法(genetic algorithm, GA)^[13]、差分进化算法(differential evolution algorithm, DE)^[10]、模拟退火(simulated annealing, SA)算法^[14]等.这些算法通常能在给定的时间内给出质量较好的解,并且在处理具体问题时,学者们通常会设计特殊的求解技巧以提升求解效率.

另外,实施联合补货策略时,由于商品间的“异

质性”导致的配送分组约束不可避免.在生鲜和化工等领域,经常会遇见一些种类的商品不允许共同配送的情形(如香蕉和梨不能一起运输,汽油和橡胶等化工原料不能一同储运等),若放置在一起则会由于化学反应降低商品品质甚至导致报废,称为商品间的“异质性”.因此,在实施联合补货时,应考虑商品异质性带来的分组约束:即一些商品禁止被分在同组采购,或者若某些商品被分在同组采购会带来采购交付过程中运输成本的上升.一些学者已在JRP的研究中考虑到了这种情形,如Olsen^[15]在JRP中考虑了商品间的“异质性”,并以惩罚费用的形式将商品异质性对采购成本的影响反映在目标函数中.Qu等^[16]在其联合补货与运输协同问题中同样考虑了商品的分组约束条件.然而,有关分组的约束的研究目前仅在JRP中有所涉及.

1.2 供应商选择与订货量分配相关研究进展

相关研究可分为供应商选择和订货量分配的两阶段决策和联合决策两个方向.两阶段决策指供应商选择和订货量分配独立决策,不考虑其协同管理,如Çebi等^[17]使用了一种两阶段模糊方法求解供应商选择和订货量分配问题.有关两阶段决策的研究较少,更多学者倾向于联合决策的研究,并认为供应商选择和订货量分配的联合决策能获得较独立决策更低的系统成本.Pazhani等^[18]指出当前供应链体系下,企业不仅需要决定最优的生产、分销和库存策略,还需要对上游供应商的选择和订货量的分配进行决策.Purohit等^[19]、Guo等^[20]在其研究中也考虑了供应商选择和订货量分配进行联合决策.相比两阶段独立决策,科学合理的供应商选择与联合决策能够避免产生系统局部最优的决策,因此得到了更多研究者的青睐.

在问题扩展方面,相关研究多集中在考虑使供应情景更具现实意义,如Meena等^[21]研究了具有价格折扣和因突发事件导致供应中断风险情况下的供应商选择和需求分配协同决策问题,并在模型中考虑了不同的供应中断概率分布.Rezaei等^[3]分别在允许缺货和不允许缺货情况下建立了多供应商下的多目标订货模型,在选择供应商时考虑成本、质量和服务水平;类似地,Azadnia等^[22]在供应商选择标准中考虑了社会效应、环境效应、经济效应,采用多目标规划建立相应的供应商选择和订货量分配模型.但这些研究没有考虑采取先进的库存和补货策略对整体决策的影响.

1.3 现有研究小结

现有的研究存在以下不足: 1) 很少有学者基于联合补货策略研究企业的供应商选择及订货量分配决策问题, 目前仅有 Mohammaditabar 等^[14]做了相关的工作. 有关 JRP 的研究很少考虑上游供应商的选择, 而有关供应商选择和订货量分配的研究很少考虑补货策略的影响. 2) 尚未有学者在基于联合补货策略的供应商选择及订货量分配问题中考虑商品“异质性”带来的分组约束的影响. 有关分组约束目前仅单独在 JRP 的研究中有所考虑, 作为在补货问题中普遍存在的现象, 分组约束尚未扩展到其他问题中去. 3) 针对此类问题缺乏稳定高效的求解算法. 确定性 JRP 属于 NP-hard 问题^[1,7], 若在 JRP 模型中考虑供应商选择、订货量分配以及相关的约束条件(供应能力约束、分组约束等), 则目标函数将变得更加复杂, 求解更加困难, 传统的枚举法、RAND 算法^[2]难以应对. GA 容易出现早熟的现象, 并且因其遗传操作复杂, 在求解大规模和复杂的 JRP 时 GA 的计算时间会大大增加; 而 SA 的全局搜索能力偏弱, 相邻解生成机制和相关参数设计困难, 很难保证收敛的精度和稳定性.

本文基于联合补货策略, 研究多产品和多供应商环境下, 考虑供应商供应能力约束的供应商选择和订货量分配协同决策问题模型与求解算法. 本文基本问题与文献[14]的研究相似, 但有两点重要改进: 1) 文献[14]未考虑商品间的“异质性”, 本文研究了更为实际的考虑商品间“异质性”的采购情形; 2) 文献[14]采用 SA 求解, 但精度不高且稳定性差. 作为一种随机并行搜索算法, 差分进化算法(Differential evolution, DE)同样采用基于种群的搜索策略, 但相比以 GA 为代表的进化算法, DE 具有更简单的遗传操作、较低的复杂度和强大的全局优化能力; 相比以 SA 为代表的一些局部搜索算法, DE 鲁棒性更高, 具有更加稳定的收敛性能. 由于 DE 在求解 JRP 及其扩展问题方面已有不俗表现^[10-11], 针对要求解的问题特点, 设计一种改进的 DE(Improved DE, IDE)算法求解所建模型, 较好地平衡了全局寻优能力和局部搜索能力, 求解结果更加稳定. 多个算例验证了 IDE 求解此类问题的优越性, 为解决此类复杂优化问题提供了一种新方法.

2 基于联合采购策略的供应商优选与订货量分配模型构建与分析

2.1 问题假设与模型

考虑需要采购多种商品的单一企业, 其上游有多个备选供应商, 每个备选供应商的各种商品有供应能

力上限(某种商品的供应能力上限为0表示不提供该商品)和相关的供应价格(包括各自的商品价格和主要、次要订货费用). 该企业按照联合补货的策略将商品进行分组, 同组商品的采购周期相同, 每组中的商品按照其需求向供应商发出订单. 商品的分组策略及订货周期(联合补货决策)、向哪些供应商发出订货(选择供应商)以及向各个供应商订多少货(订货量分配), 按照满足需求和成本最小的原则协同确定.

模型假设与其他相关研究^[1,13-14]一致, 具体如下: 1) 有多种商品, 并且商品间的需求是相互独立的, 库存商品的消耗速率是恒定的; 2) 有多个供应商, 并且对于每种商品, 供应商的供应能力总和大于该商品的需求量; 3) 对每个供应商的主要订货成本固定、相同且与订单中的商品种类数无关; 4) 所有参数是确定的, 没有数量折扣; 5) 同组中的商品一同采购, 但不一定从同一个供应商处采购, 每种商品也不一定从一个供应商处采购.

本文用到的符号如下所示:

N : 商品种类数;

K : 备选供应商数量;

G : 商品分组数;

L_{ik} : 供应商 k 对商品 i 的供货能力上限;

s_{ik} : 供应商 k 对商品 i 的单位售价;

A_k : 供应商 k 的主要订货费用;

a_i^k : 供应商 k 对商品 i 的次要订货费用;

D_i : 商品 i 的年需求量;

h_i : 单位数量商品 i 的年库存维持费用;

T_g : 组 g 中商品的补货间隔期;

y_{ik} : 商品 i 向供应商 k 的订货量占其需求的比值;

x_{ig} : 如果商品 i 在组 g 中, 则为1, 否则为0;

z_{gk} : 如果分组 g 中至少有一种商品是向供应商 k 订货, 则为1, 否则为0;

J_{ik} : 如果商品 i 向供应商 k 订货, 则为1, 否则为0.

采购相关的总成本包括年库存维持费用、商品本身的价值、主要订货费用和次要订货费用, 模型的目标函数是总成本最小, 如下所示:

$$\begin{aligned} \min TC = & \frac{1}{2} \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N T_g D_i h_i x_{ig} y_{ik} + \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K \frac{z_{gk} A_k}{T_g} + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N D_i y_{ik} s_{ik} + \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \frac{a_{ik} x_{ig} J_{ik}}{T_g}. \\ \text{s.t. } & \sum_{g=1}^G x_{ig} = 1, \forall i; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K y_{ik} &= 1, \forall i; \\ y_{ik} &\leq \frac{L_{ik}J_{ik}}{D_i}, \forall i, k; \\ x_{ig}, J_{ik}, z_{gk} &\in \{0, 1\}, T_g \geq 0, \forall i, k, g. \end{aligned} \quad (1)$$

模型的约束条件分别表示每种商品只能分在一个组中,所有商品的需求均需要得到满足,每种商品向供应商的订货量不超过该供应商的供货能力,变量本身的取值约束.

2.2 模型分析

文献 [14] 讨论了该模型的时间复杂度. 对任意商品而言, 最多有 2^{K-1} 种供应商组合可供选择. 因此, 若有 N 种类别的商品, 则所有可能的组合的计算时间复杂度为 $N \times 2^{K-1}$, 对物品种类数而言是多项式复杂度, 对供应商数目而言是指数复杂度.

该模型建立在联合补货数学模型之上^[2], 对模型进行分析, 总成本函数 **TC** 可以写为

$$TC = \frac{1}{2} \sum_{g=1}^G P_g T_g + \sum_{g=1}^G \frac{Q_g}{T_g} + C.$$

其中

$$\begin{aligned} P_g &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N D_i h_{ik} x_{ig} y_{ik}, \\ Q_g &= \sum_{k=1}^K z_{gk} A_k + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N a_{ik} x_{ig} J_{ik}, \\ C &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N D_i y_{ik} s_{ik}. \end{aligned}$$

因此当模型中的其他决策变量确定时, 令 **TC** 对 T_g 求偏导, 并令其一阶导数等于 0, 可得最优的 T_g , 有

$$T_g^* = \sqrt{\frac{2 \left(\sum_{k=1}^K A_k z_{gk} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N a_{ik} x_{ig} J_{ik} \right)}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N D_i y_{ik} h_{ik} x_{ig}}} = \sqrt{\frac{2Q_g}{P_g}}. \quad (2)$$

将式(2)代入 **TC** 的表达式, 可得其他决策变量给定时最优的 **TC***, 即

$$TC^*(J, X, Y, Z) = TC^* = \sum_{g=1}^G \sqrt{2P_g Q_g} + C. \quad (3)$$

其中: J 表示集合 $\{J_{ik} | i = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, K\}$, X 表示集合 $\{x_{ig} | i = 1, 2, \dots, N, g = 1, 2, \dots, G\}$, Y 表示集合 $\{y_{ik} | i = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, K\}$, Z 表示集合 $\{z_{gk} | g = 1, 2, \dots, G, k = 1, 2, \dots, K\}$.

3 基于IDE的求解算法设计

3.1 DE算法

DE算法的基本思路是随机生成一个种群, 通过变异和交叉策略产生新的实验种群; 通过“一对一”比较两代种群中对应个体的适应度值, 选择适应度值较高的个体进入下一代种群. 不断重复该过程直到达到终止条件, 输出最优解. 具体操作如下.

Step 1: 种群初始化.

利用一条维度为 d 的实数向量代表种群中的一个个体, 且初始生成规模为 **NP** 的种群, 种群中每个个体表示如下:

$$x_p^{\text{Gen}} = [x_{p,1}^{\text{Gen}}, x_{p,2}^{\text{Gen}}, \dots, x_{p,d}^{\text{Gen}}], p = 1, 2, \dots, \text{NP}.$$

其中: p 为种群中此向量个体的编号, **Gen** 为当前进化的代数. 设个体 x_p^{Gen} 中第 j 个元素 $x_{p,j}^{\text{Gen}}$ 的上下界分别是 U_j 和 L_j , 可依照下式生成随机的初始种群个体:

$$x_{p,j}^0 = U_j + \text{rand}[0, 1](U_j - L_j). \quad (4)$$

其中: $p = 1, 2, \dots, \text{NP}; j = 1, 2, \dots, d$.

Step 2: 变异操作.

对于每个目标个体 x_p^{Gen} , 通过下式产生变异向量 $v_p^{\text{Gen}+1}$:

$$v_p^{\text{Gen}+1} = x_{r_1}^{\text{Gen}+1} + F \times (x_{r_2}^{\text{Gen}+1} - x_{r_3}^{\text{Gen}+1}), \quad (5)$$

其中: $r_1, r_2, r_3 \in [1, \text{NP}]$, 随机生成, 3 个参数互不相等且都不等于 p ; F 为变异算子, 通常取值 $[0, 1]$ 之间, 决定了差分向量的缩放变异程度.

Step 3: 交叉操作.

通过下式将目标向量 x_p^{Gen} 和变异向量 $v_p^{\text{Gen}+1}$ 进行交叉操作, 产生实验向量 $u_p^{\text{Gen}+1}$:

$$u_{p,j}^{\text{Gen}+1} = \begin{cases} v_{p,j}^{\text{Gen}+1}, & \text{rand}(j) \leq \text{CR} \text{ or } j = r; \\ x_{p,j}^{\text{Gen}}, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

其中: **CR** 为交叉算子, 在 $[0, 1]$ 之间取值; r 为 $[1, d]$ 之间的一个随机整数, 保证实验向量中至少有一个元素来自变异向量.

Step 4: 选择操作.

算法将目标向量 x_p^{Gen} 和实验向量 $u_p^{\text{Gen}+1}$ 的适应度值进行比较, 选择适应度值较高的个体向量进入下一代种群. 这种比较是一对一的, 目标向量只与其对应的实验向量进行比较, 不涉及种群中其他个体.

3.2 改进的DE算法(IDE)

DE简单有效, 但存在进化后期局部搜索能力不足的问题, 因此其求解大规模复杂问题时的收敛速率和精度仍需提高. 针对本文的研究问题模型结构复杂、变量较多及属性复杂的特点, 提出一种交叉变异

搭配改进的IDE算法。

1) 概率连续二项交叉策略。

令实验向量 $u_i^{\text{Gen}+1}$ 等于目标向量 x_i^{Gen} , 在实验向量 $u_i^{\text{Gen}+1}$ 的一个随机位置开始, 开辟一段固定长度的区域, 实验向量 $u_i^{\text{Gen}+1}$ 在这段区域内的元素均被变异向量 $v_i^{\text{Gen}+1}$ 对应位置的元素取代, 从而完成交叉操作。由于交叉的元素位置是连续的, 称作连续二项交叉^[23]。为了提高算法在初期的全局搜索能力以及后期的局部搜索能力, IDE在初期以较大概率从变异向量 $v_i^{\text{Gen}+1}$ 继承较多元素, 而在后期以较大概率从目标向量 x_i^{Gen} 继承较多元素, 继承概率为

$$\text{pro} = \exp\left(\frac{1 - \text{Gen}}{\max \text{Gen} - \text{Gen} + 1}\right). \quad (7)$$

其中: $\max \text{Gen}$ 为最高进化次数, pro 随进化次数的增加而减小。

2) DE/best/1 变异策略。

该策略通过下式进行变异操作, 产生变异向量:

$$v_p^{\text{Gen}+1} = x_{\text{best}}^{\text{Gen}} + F \times (x_{r_1}^{\text{Gen}} - x_{r_2}^{\text{Gen}}), \quad (8)$$

其中 $x_{\text{best}}^{\text{Gen}}$ 是第 Gen 代种群中适应度值最高的个体。DE/Best/1 变异策略通过跟踪每代种群中的最优个体使得进化向着最优的方向进行。通过在当前最优解周围空间进行变异展开, 有利于快速找到更优的解, 提高收敛速度。

3.3 基于IDE的智能求解算法

3.3.1 解的结构

一般情况下, 种群中每一个体向量均代表问题的一个解, 向量中每个元素的值反映商品分组信息或采购周期信息。但基于联合补货的供应商选择和订货量分配问题解的结构相比一般情况要复杂许多。

向多供应商联合补货的情形下, 首先确定一条长度为 $2 \times N$ 的向量, 其中 N 为商品种类数。向量前 N 个元素代表商品的供应商选择信息, 即每种商品先选择哪个供应商, 后 N 个元素代表商品的分组信息, 显示哪些种类的商品分在一组。如图1所示, 有5种商品, 其中: 前5个元素表示商品1和商品2向供应商1订货, 商品3、4和5向供应商2订货; 后5个元素表示商品1、2和3分在第一组, 一同补货, 商品4和5分在第4组, 一同补货, 5种商品分为2组。

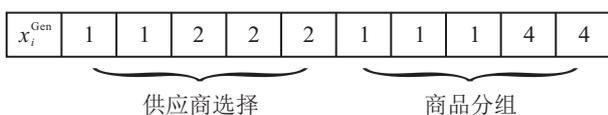


图1 解的结构示例

这里规定一种分组规则: 每种商品所在组的编号不能大于该商品的编号。如, 1号商品只能在第1组

里, 2号商品只能在第1组或第2组里, 6号商品只能在第1组到第6组其中的一个组里。这样分组可以避免不同的解却代表相同的分组策略这样的情况出现, 从而缩小求解空间, 加快求解速度, 使算法可以更精确地向最优的方向迭代。

由于有些商品可能向多个供应商订货, 上面的向量还不能完全反映整个采购策略。再定义一个 N 行 K 列的矩阵 Y_{NK} , 以反映每种商品的供应商选择信息和订货量分配信息。矩阵 Y_{NK} 第 i 行第 k 列元素 y_{ik} 的值表示商品 i 向供应商 k 的订货量占商品 i 总需求的比重(小数表示), y_{ik} 的值为0表示第 i 种商品不向供应商 k 订货, 值不为0表示订货。

3.3.2 适应度函数值计算

种群个体的适应度函数即是式(1)或(3)中的目标函数。

1) y_{ik} 的计算。在多供应商情况下, 设定每个供应商的供货量等于商品的剩余需求与该供应商供货能力之间的较小值。

举例具体说明 y_{ik} 如何计算。假设算法中解向量前 N 个元素中第 i 个元素的值为2, 即表示商品 i 一定要向供应商2订货。下面要确认商品 i 是否还要向其他供应商订货, 商品 i 的供应商选择有 2^{K-1} 种组合, 在这些组合中, 选择除去供应商2, 商品 i 选择的其他供应商总的供货能力在 $D_i - L_{i2}$ 到 D_i 的那些供应商组合, 再在这些组合中随机选择一个组合作为商品在这个解向量中最终的供应商选择组合。

假设商品 i 最终选择供应商1、供应商2、供应商4供货, 则供应商1和供应商4向商品 i 的供货量等于其各自的供货能力, 即

$$y_{i1} = \frac{L_{i1}}{D_i}, \quad y_{i4} = \frac{L_{i4}}{D_i}.$$

剩余的需求则由供应商2来满足, 有 $y_{i2} = 1 - y_{i1} - y_{i4}$ 。

2) 其他参数计算。根据参数的定义, x_{ig} , J_{ik} 和 z_{gk} 均可根据解向量的值和 Y_{NK} 的值直接计算得到。

3.3.3 求解算法流程

Step 1: 初始化。设置IDE的最大迭代次数、种群规模、变异概率和交叉概率, 随机产生初始种群。

Step 2: 判断是否达到最大迭代次数, 若是则停止迭代并输出结果, 否则转至 Step 3。

Step 3: 变异和交叉操作。采用DE/best/1变异策略和概率连续二项交叉策略, 得到由实验向量组成的种群。

Step 4: 选择操作。根据3.3.2节的方法计算原始种群和试验种群中每个个体的适应度值, 采用DE算法的选择策略选出进入下一代进化的种群个体。

Step 5: Gen = Gen + 1, 返回Step 2.

Step 6: 输出最优的各决策变量数值, 以及相应的总成本.

4 算例与分析

4.1 对比算例

本节通过对比算例验证所提出IDE算法的有效性. 文献[14]研究了一种典型的多产品、多供应商背景下考虑联合补货的供应商选择案例, 具有很好的代表性, 因此本节选择文献[14]中的算例进行对比研究.

共有10种商品, 4个备选供应商, 其他相关参数如表1所示^[14]. 本文采用DE、IDE和SA求解所建模型, 并将结果与文献[14]结果进行对比, 原因在于: 1) 基于DE的改进算法已经在求解JRP及扩展问题中显示了优越性, 因此DE也可在解决本文问题的研究中显示出有效性, DE算法可以用来检验IDE算法解决这个问题. 2) 文献[14]利用SA求解类似问题, 并与GA算法进行对比, 证明了SA在求解该问题时要优于GA, 而众多学者研究发现GA是一种解决类似JRP的有效算法^[10-11].

表1 主要参数设置

商品	供应能力				次要订货费用				价格				库存费用	需求
	供应商1	供应商2	供应商3	供应商4	供应商1	供应商2	供应商3	供应商4	供应商1	供应商2	供应商3	供应商4		
商品1	1000	0	1000	650	5	5	5.2	5.1	2.5	2.5	2.6	2.5	0.5	600
商品2	1000	700	800	960	19.4	19.2	19.4	19.4	9.7	9.6	9.7	9.7	1.94	900
商品3	3000	3000	1000	2500	9.5	9	8.4	8.4	4.75	4.5	4.75	4.2	0.95	2400
商品4	6000	5000	1000	15000	8.5	9.2	9.2	8.5	4.25	4.6	4.6	4.25	0.85	12000
商品5	0	15000	15000	19000	2.2	2	2.4	2.2	1.1	1	1.2	1.1	0.22	18000
商品6	3200	3100	3150	3500	8.2	8	7.8	7.8	4.1	4	3.9	3.9	0.82	3000
商品7	5000	5000	2000	3000	10.6	10.4	11.2	10.6	5.3	5.2	5.6	5.3	1.06	2500
商品8	200	200	200	200	4	4.2	4.25	4.25	2	2.1	2.1	2.1	0.4	180
商品9	150	0	30	70	20	24	24	24	10	12	12	12	2	50
商品10	150	50	150	150	16	15	18	16	8	7.5	9	8	1.6	146

首先设定每个供应商的主要订货费用 A_k ($k = 1, 2, 3, 4$) 均等于10, 然后分别用3种算法求解模型. 在运用算法对模型进行求解之前, 需要对相关参数进行设置. Qu等^[11]建议种群规模在 $[4N_d, 10N_d]$ 之间, N_d 表示问题维度, 最大进化次数应就问题规模而定. 本文设置DE和IDE的种群规模NP为50, 最大进化代数max Gen为100. 其他参数设置如下: DE和IDE的变异概率 F 为0.6^[10], 为了保证概率连续二项策略的有效性, 需要一个较大的交叉概率, 因此设定交叉概率CR为0.7; SA的参数设置与文献[14]相同. 3种算法从同一个初始结果开始计算, 计算结果如表2所示, 最终的订货分配方案如表3所示, 3种算法收敛过程如图2所示.

由表2和图2可以看出:

1) 利用IDE计算得到的成本要优于利用DE和

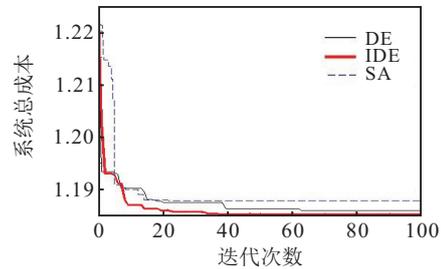


图2 DE、IDE和SA收敛曲线

SA求得的成本, 其中SA对应结果与文献[14]的结果相同.

2) 相比DE和SA, IDE具有更高的收敛精度和收敛速度, 而SA较早陷入了局部最优, 收敛停滞.

3) IDE比DE收敛速度快, 得到的解也较优. 考虑到模型的求解效率, 下面将不再采用DE进行研究.

4.2 大规模随机算例结果与分析

为了进一步讨论IDE求解大规模问题的能力, 验证其有效性, 这一节将问题的规模扩大, 在更大的参数范围内将IDE与SA进行对比. 每种商品的需求取值服从均匀分布, 次要订货费用取值服从 $[0.2, 3.0]$ 的均匀分布, 库存维持费用取值服从 $[0.5, 5.0]$ 的均匀分布. 商品种类数 N 的取值有3种, 供应商数量 K 的取值有2种, 主要订货费用 A 的取值有3种, 共有18种取值组合. 其他参数如表4所示.

表2 3种算法的求解结果

算法	解向量	总成本	
DE	供应商选择	4 4 4 4 2 4 2 1 1 2	118 610
	采购分组	1 1 3 3 1 1 1 4 4 8	
IDE	供应商选择	4 4 4 4 2 4 2 1 1 1	118 510
	采购分组	1 1 3 3 3 3 3 6 6 6	
SA	供应商选择	4 4 4 4 4 4 2 1 1 1	120 120
	采购分组	1 1 3 4 3 3 3 8 9 8	

表3 3种算法求出的订货分配量数据

算法	商品	供应商1	供应商2	供应商3	供应商4
DE	商品1	0	0	0	600
	商品2	0	0	0	900
	商品3	0	0	0	2400
	商品4	0	0	0	12000
	商品5	0	15000	0	3000
	商品6	0	0	0	3000
	商品7	0	2500	0	0
	商品8	180	0	0	0
	商品9	50	0	0	0
	商品10	0	146	0	0
IDE	商品1	0	0	0	600
	商品2	0	0	0	900
	商品3	0	0	0	2400
	商品4	0	0	0	12000
	商品5	0	15000	0	3000
	商品6	0	0	0	3000
	商品7	0	2500	0	0
	商品8	180	0	0	0
	商品9	50	0	0	0
	商品10	146	0	0	0
SA	商品1	0	0	0	600
	商品2	0	0	0	900
	商品3	0	0	0	2400
	商品4	0	0	0	12000
	商品5	0	15000	0	3000
	商品6	0	0	0	3000
	商品7	0	2500	0	0
	商品8	180	0	0	0
	商品9	50	0	0	0
	商品10	146	0	0	0

表4 大规模随机算例参数设置

参数	取值		
<i>N</i>	10	20	30
<i>K</i>	3	5	
<i>A</i>	5	10	15

每种组合分别运行IDE和SA各100次,得到每种组合下IDE求得较优成本的次数,SA求得较优成本的次数,两种算法求得的成本均值,IDE求得的最优成本相对SA求得的最优成本的改进百分比,IDE求得的最差成本相对SA求得的最差成本的改进百分比,IDE求得的平均成本相对SA求得的平均成本的改进百分比,以及衡量算法稳定性的变异系数(剔除均值的影响),结果如表5所示.

由表5可见,在程序求得较优成本成功次数方面,每种组合下IDE都要优于SA,特别是当问题规模很大时,几乎每次IDE都要优于SA.在成本改善方面,IDE的平均改进在0.01%~1.17%之间,而且随着问题规模的增大改进也在增大,考虑到成本基数较大,这种改进对成本的节约是很可观的.在算法的求解稳定性方面,通过表5中的变异系数可知,IDE要明显优于SA.

表5 IDE和SA大规模随机算例实验结果

<i>N</i>	<i>A</i>	<i>K</i>	IDE成功次数	SA成功次数	平均成本(IDE)	平均成本(SA)	最好改进/%	最差改进/%	平均改进/%	变异系数(IDE)	变异系数(SA)
5	3	64	36	3.62e+06	3.62e+06	0	-0.01	0.01	0.02%	0.02%	
		75	25	3.59e+06	3.60e+06	0.03	0.45	0.12	0.05%	0.15%	
10	3	64	36	3.62e+06	3.62e+06	0	0.05	0.02	0.03%	0.05%	
		90	10	3.60e+06	3.60e+06	0.02	0.6	0.19	0.05%	0.16%	
15	3	66	34	3.62e+06	3.62e+06	0.01	0.17	0.03	0.04%	0.06%	
		75	25	3.60e+06	3.61e+06	-0.03	-0.11	0.17	0.09%	0.18%	
5	3	94	6	9.09e+06	9.11e+06	0.05	0.49	0.2	0.05%	0.14%	
		100	0	8.98e+06	9.09e+06	0.32	3.3	1.14	0.14%	0.67%	
20	3	96	4	9.10e+06	9.12e+06	0.09	0.41	0.2	0.04%	0.14%	
		100	0	8.99e+06	9.09e+06	0.39	3.94	1.05	0.15%	0.68%	
15	3	95	5	9.11e+06	9.13e+06	0.04	0.7	0.2	0.04%	0.14%	
		97	3	9.00e+06	9.09e+06	0.41	2.14	1.01	0.16%	0.55%	
5	3	100	0	1.32e+07	1.33e+07	0.17	1.13	0.5	0.06%	0.26%	
		99	1	1.31e+07	1.33e+07	0.55	3.76	1.77	0.18%	0.88%	
30	3	100	0	1.32e+07	1.33e+07	0.16	1.41	0.5	0.06%	0.28%	
		100	0	1.31e+07	1.33e+07	0.62	3.84	1.73	0.17%	0.90%	
15	3	97	3	1.32e+07	1.33e+07	0.11	1.16	0.49	0.08%	0.29%	
		100	0	1.31e+07	1.34e+07	0.81	3.41	1.72	0.19%	0.74%	

5 考虑配送分组约束的供应商选择与订货量分配模型

5.1 模型建立

该扩展模型的假设与第3节模型相同,在此基础上增加几条关于商品惩罚成本的假设:1)商品的惩罚费用与供应商无关;2)商品的惩罚成本与商品的

订货量无关;3)同组商品只有向同一供应商订货的商品间才有可能产生惩罚成本;4)一台运输车辆在某个供应商处取货后,不会到其他供应商处再取货.

某些商品的异质性导致这些商品在一同补货和运输时会产生额外的成本,这可以体现在商品次要订货成本的增加上.定义当商品*i*和商品*j*一同补货时,

会对商品 i 产生一个惩罚成本 q_{ij} , 同时也会对商品 j 产生一个惩罚成本 q_{ji} .

结合第3节内容, 建立分组约束下供应商选择与订货量分配模型的目标函数为

$$\begin{aligned} \min TC = & \frac{1}{2} \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N T_g D_i h_{ik} x_{ig} y_{ik} + \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K \frac{z_{gk} A_k}{T_g} + \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N D_i y_{ik} s_{ik} + \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \frac{a_{ik} x_{ig} J_{ik}}{T_g} + \\ & \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K \sum_{i,j \in g} \frac{q_{ij} x_{ig} x_{jg} J_{ik} J_{jk}}{T_g}. \end{aligned} \quad (9)$$

模型的约束条件与第3节相同.

5.2 算例分析

Olsen^[15] 建议惩罚费用是次要订货费用的2~3倍, 本节据此设立惩罚费用, 如表6所示. 表6中的数值表示每种商品的惩罚费用与次要订货费用的比值. 如, 当商品2和商品3一同补货时, 会对商品2产生一个相当于商品2次要订货费用2倍的惩罚费用, 并且同时对商品3产生一个相当于商品3次要订货费用3倍的惩罚费用, *表示相关的两种商品禁止一同补货, 因此可以用一个很大的数(如1 000 000)来表示*, 以使程序在向着总成本最小化的迭代过程中淘汰这样的解, 除惩罚费用外的其他参数设置与4.1节相同. 为了验证本文提出的IDE算法求解此扩展问题的能力, 对于每种主要订货费用 A 的取值, 分别利用IDE和SA求解扩展问题30次, 得到系统总成本的最小值、最大值、平均值和变异系数, 求解结果如表7所示. 由表7可见, 在求解考虑分组约束的扩展模型时, 多数情况下运用IDE能得到比SA更好的解, IDE算法计算出的平均成本比SA低, 而且从变异系数来看, IDE比SA更加稳定, 可以认为IDE比SA更加适合求解此类问题.

表6 惩罚费用表

商品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
2	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0
3	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0
4	3	0	0	0	0	3	0	0	3	0
5	0	0	0	3	0	0	*	0	0	0
6	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0
7	0	0	3	0	*	0	0	0	0	0
8	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0
9	3	0	0	2	0	0	0	0	0	3
10	0	0	0	0	2	0	0	0	3	0

表7 IDE与SA求解拓展模型结果对比表

A	算法	最小值	最大值	平均值	变异系数
0	IDE	118 050	118 110	118 060	0.01 %
	SA	118 050	120 610	118 340	0.62 %
10	IDE	118 680	118 880	118 720	0.04 %
	SA	118 680	119 030	118 780	0.08 %
50	IDE	120 040	120 430	120 110	0.09 %
	SA	120 040	121 720	120 460	0.37 %
100	IDE	121 140	121 550	121 260	0.12 %
	SA	121 140	122 420	121 660	0.22 %
150	IDE	122 030	122 690	122 220	0.14 %
	SA	122 050	123 710	122 700	0.37 %
200	IDE	122 800	123 490	122 980	0.13 %
	SA	122 910	125 470	123 390	0.52 %
300	IDE	124 100	124 820	124 250	0.16 %
	SA	124 320	126 900	124 980	0.45 %
500	IDE	126 210	127 250	126 420	0.26 %
	SA	126 090	129 140	127 230	0.69 %
1 000	IDE	129 820	131 180	130 300	0.29 %
	SA	129 650	134 430	131 530	0.94 %

6 管理启示

供应商选择与订货量分配是大型企业上游供应链管理的重要环节, 而联合补货是降低企业采购成本的重要途径. 本文提出的基于联合补货策略的供应商选择和订货量分配协同优化模型可以帮助企业决策者以集成的视角看待上游供应链的运营优化问题, 协同决策供应商的选择问题、订货量的分配问题和商品的采购周期问题, 提升决策效率, 降低决策成本. 从实际的仿真结果发现, 由于订货成本的存在, 企业倾向于集中采购物品, 并且相同的物品倾向于向较少的供应商订货, 不仅验证了采购管理中规模效应的存在, 而且可以给出较满意的采购决策参数.

7 结论

联合补货、供应商选择和订货量的分配是企业运营决策的重要组成部分, 本文研究考虑联合补货与供应商选择和订货量分配的协同优化决策问题. 研究了基于联合补货策略的供应商选择和订货量分配问题模型, 结合现实情景, 首次考虑了采购商品异质性带来的分组约束问题, 对JRP和供应商选择问题进行了有益扩展. 提出了一种IDE来求解基于联合补货策略的供应商选择和订货量分配模型及其扩展模型, 利用IDE得到了比目前最好策略(文献[14])更低的采购成本, 各项数值实验表明相比SA和DE, IDE是求解此类问题的更加有效且稳定的方法. 针对主要订货费用进行参数敏感性分析, 研究了在不考虑商品异质性和考虑商品异质性情况下的供应商选择和订货策略的变化规律.

未来研究中可以放松此问题的假设,比如考虑随机需求、数量折扣条件、供应中断风险的情形,或者将采购与物流运输进行集成,在模型中加入配送部分,当模型更加复杂时,考虑设计寻优能力更强、更加稳定的算法,以应对复杂问题的挑战。

参考文献(References)

- [1] Khouja M, Goyal S. A review of the joint replenishment problem literature: 1989-2005[J]. *European J of Operational Research*, 2008, 186(1): 1-16.
- [2] Adelman D, Klabjan D. Computing near-optimal policies in generalized joint replenishment[J]. *Inform J on Computing*, 2012, 24(1): 148-164.
- [3] Rezaei J, Davoodi M. Multi-objective models for lot-sizing with supplier selection[J]. *Int J of Production Economics*, 2011, 130(1): 77-86.
- [4] Büyükkaramikli N C, Gürler Ü, Alp O. Coordinated logistics: Joint replenishment with capacitated transportation for a supply chain[J]. *Production & Operations Management*, 2014, 23(1): 110-126.
- [5] Abouee-Mehrzi H, Berman O, Sharma S. Optimal joint replenishment and transshipment policies in a multi-period inventory system with lost sales[J]. *Operations Research*, 2015, 63(2): 342-350.
- [6] Paul S, Wahab M I M, Ongkunaruk P. Joint replenishment with imperfect items and price discount[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 74: 179-185.
- [7] Zhang R, Kaku I, Xiao Y. Model and heuristic algorithm of the joint replenishment problem with complete backordering and correlated demand[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 139(1): 33-41.
- [8] Ongkunaruk P, Wahab M I M, Chen Y. A genetic algorithm for a joint replenishment problem with resource and shipment constraints and defective items[J]. *Int J of Production Economics*, 2016, 175: 142-152.
- [9] Braglia M, Castellano D, Gallo M. An extension of the stochastic joint-replenishment problem under the class of cyclic policies[J]. *Operations Research Letters*, 2016, 44(2): 278-284.
- [10] Wang L, Dun C X, Bi W J, et al. An effective and efficient differential evolution algorithm for the integrated stochastic joint replenishment and delivery model[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2012, 36: 104-114.
- [11] Qu H, Wang L, Liu R. A contrastive study of the stochastic location-inventory problem with joint replenishment and independent replenishment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(4): 2061-2072.
- [12] Cui L, Wang L, Deng J. RFID technology investment evaluation model for the stochastic joint replenishment and delivery problem[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(4): 1792-1805.
- [13] Chen Y, Wahab M I M, Ongkunaruk P. A joint replenishment problem considering multiple trucks with shipment and resource constraints[J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 74: 53-63.
- [14] Mohammaditabar D, Ghodsypour S H. A supplier-selection model with classification and joint replenishment of inventory items[J]. *Int J of Systems Science*, 2016, 47(8): 1745-1754.
- [15] Olsen A L. Inventory replenishment with interdependent ordering costs: An evolutionary algorithm solution[J]. *Int J of Production Economics*, 2008, 113(1): 359-369.
- [16] Qu H, Wang L, Zeng Y R. Modeling and optimization for the joint replenishment and delivery problem with heterogeneous items[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2013, 54: 207-215.
- [17] Çebi F, Otay I. A two-stage fuzzy approach for supplier evaluation and order allocation problem with quantity discounts and lead time[J]. *Information Sciences*, 2016, 339: 143-157.
- [18] Pazhani S, Ventura J A, Mendoza A. A serial inventory system with supplier selection and order quantity allocation considering transportation costs[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(1): 612-634.
- [19] Purohit A K, Choudhary D, Shankar R. Inventory lot-sizing with supplier selection under non-stationary stochastic demand[J]. *Int J of Production Research*, 2015: 54(8): 1-11.
- [20] Guo C, Li X. A multi-echelon inventory system with supplier selection and order allocation under stochastic demand[J]. *Int J of Production Economics*, 2014, 151: 37-47.
- [21] Meena P L, Sarmah S P. Supplier selection and demand allocation under supply disruption risks[J]. *Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(1): 265-274.
- [22] Azadnia A H, Saman M Z M, Wong K Y. Sustainable supplier selection and order lot-sizing: An integrated multi-objective decision-making process[J]. *Int J of Production Research*, 2015, 53(2): 383-408.
- [23] Lin C, Qing A, Feng Q. A comparative study of crossover in differential evolution[J]. *J of Heuristics*, 2011, 17(6): 675-703.

作者简介

曾宇容(1976—),女,博士生,从事商务智能的研究, E-mail: zyrhbue@gmail.com;

万建超(1974—),男,高级工程师,从事人工智能等研究, E-mail: wanjianchao@potevio.com;

吕盛祥(1992—),男,博士生,从事智能优化算法的研究, E-mail: shengxianglv@foxmail.com;

王思睿(1994—),男,硕士生,从事智能优化算法的研究, E-mail: ruisiwang@foxmail.com;

王林(1974—),男,教授,博士生导师,从事计算智能等研究, E-mail: wanglin@hust.edu.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)