DOI 编码：10.3969/j.issn.1672-884x.2014.10.013

基于差分进化算法的运输容量约束下有数量折扣的模糊联合补货模型研究

王 林 瞿 慧 陈晓溪 蒋 洁
（华中科技大学管理学院）

摘要：针对采购管理中广泛存在的不确定性，将单位库存成本和可变订货成本视为模糊变量，构建了运输容量约束下有数量折扣的模糊联合补货模型，此模型属于 NP-hard 问题，目前缺乏可靠的全局优化求解算法。在选取梯级平均综合表示法对总成本去模糊的基础上，设计了基于自适应混合差分进化算法的求解方法，并通过算例验证了此模糊联合补货模型的有效性和求解算法的全局优化能力。

关键词：联合补货；梯级平均综合表示法；数量折扣；自适应混合差分进化算法
中图法分类号：C93;F270 **文献标志码**：A **文章编号**：1672-884X(2014)10-1507-07

Fuzzy Joint Replenishment Model considering Transportation Capacity Constraints and Quantity Discounts Based on Differential Evolution Algorithm

WANG Lin QU Hui CHEN Xiaoxi JIANG Jie
(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China)

Abstract: Considering the uncertainty existing in procurement management, the inventory holding cost and variable ordering cost are treated as fuzzy variables. A fuzzy joint replenishment problem (FJRP) model with transportation capacity constraint and quantity discount is firstly proposed. There is no stable and effective global optimization algorithm to solve this model which is a typical NP-hard problem. Then, the fuzzy total cost is defuzzified by the graded mean integration representation and an adaptive hybrid differential evolution algorithm (AHDE) is designed. Further, numerical studies show the effectiveness of the proposed FJRP and the global optimality capability of the proposed AHDE.

Key words: joint replenishment; graded mean integration representation; quantity discount; AHDE

1 问题的提出

联合补货问题（joint replenishment problem，JRP）是指对所需的物品按组从供应商处进行采购，其优势在于多个产品同时订货可以分摊固定准备费用；另一方面，多个产品同时向同一供应商订货，在订货数量和订货金额上有明显的优势，进而更可能诱使供应商提供价格折扣。可见联合补货策略在生产和库存系统中，是一种降低成本的有效采购方式。JRP 作为库存领域的一个关键问题，其学术价值和实用价值一直受到学术界的关注[1]，相关研究又可分为间接分组和直接分组策略[2]。经典的 JRP 模型中，总采购费用主要包括主要采购费用、可变采购费用和库存持有费用，并且假定需求确定，主要准备费用、各物品的可变准备费以及单位库存费用均为已知的常数。

经典的 JRP 模型多假设物品的单价与订购数量相互独立，然而现实生活中，供应商为了获得规模效应，经常提供数量折扣诱使顾客采购更大数量的物品，一些学者对此问题进行了研究。PIRKUL 等[3]讨论了每种物品有独立价格折扣的多物品经济订货批量问题；BENTON 等[4]将有数量折扣的批量问题根据不同的折扣策略进行分类；CHA 等[5]利用一个简单的启发式算法和改进的 RAND 算法解决了有数量折

收稿日期：2012-10-16
基金项目：国家自然科学基金资助项目(70801030;71131004; 71371080)；教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(11YJC630275)；中央高校基本科研业务费资助项目(HUST:2014QN201)

扣的 JRP。另外，采购管理过程中都不可避免的存在着一些约束，如仓库空间限制、运输容量限制、资金约束、最小订货批量等，学者对此进行了研究。如 BENTON[6] 提出了一种高效的启发式算法来解决有资金、存储空间约束和数量折扣的多物品多供应商模型；MOON 等[7] 首先构建了有供应商数量折扣 JRP 的模型，在此基础上进一步分析了有运输容量约束的问题，并利用遗传算法（GA）对 2 种模型进行求解。上述模型均是在确定性环境下探讨 JRP，但是企业采购管理活动中常常面临诸多不确定因素，如通常很难准确确定可变订货费用、单位库存持有费用等信息。

模糊理论对于难以精确化的过程描述有良好的适应性，对复杂事物进行模糊度量，所构建的模型将更接近客观事物的真实反映[8]，模糊理论在库存管理中得到广泛的关注。如 HANDFIELD 等[9] 构建了一个需求、提前期和惩罚费用均为模糊参数的 (Q,r) 模型，并用去模糊化方法得到最优解；王林等[10] 研究了有最小订货量约束下，固定订货费用为三角模糊数的 JRP，使用重心法和符号法对总成本进行去模糊化，并给出了求解算法；WANG 等[11] 构建了模糊环境下的（Q，r）模型并给出了求解算法。可见，采用模糊理论描述处理以上不确定变量，是一种科学合理的方法。

针对企业采购管理中经常面临的不确定决策环境，对文献[7]进行了拓展，在有运输容量限制的情况下，考虑供应商的折扣因素，并在可变订货费用和存储费用同时为梯形模糊数的情况下，构建了一种新的模糊 JRP 模型，此模型具有一定科学意义和较高的实用价值。

本研究所构建的模型的一个瓶颈就是高效稳定求解算法的设计。经典的 JRP 模型已经是 NP－hard 问题，如果考虑到数量折扣，总成本函数性质更复杂，若再考虑到模糊因素，新建模型的求解难度高。而传统方法又存在自身较难克服的缺陷：①枚举法，当枚举空间比较大时，算法效率较低；②启发式算法，对每个问题必须找出特有的启发式规则，难度高且无通用性；③GA[12]，结果证实 GA 整体上讲也是一种高效可行的方法，但 GA 搜索后期容易出现停滞现象，且其计算时间随着问题规模的扩大和复杂度的提高呈指数级增长。因此，迫切需要寻求一种能够以有限代价来解决更具实用价值的有资源约束和数量折扣的 JRP 优化难题的稳定高效的通用方法。差分进化（DE）算法保留了基于种群的全局搜索策略，采用实数编码、基于差分的简单变异操作和一对一的竞争生存策略[10,11]，降低了遗传操作的复杂性，具有较强的全局收敛能力和鲁棒性，并在众多领域得到应用，如 WANG 等[2] 考虑了异质物品的次要订货费用互相影响的 JRP 问题，设计了 DE 来解决此类问题。本研究同样基于 DE，设计了更有效的自适应混合 DE 算法对所建模型进行求解，进而用多个实例验证了设计算法的全局寻优能力，以期为解决此类复杂优化问题提供一种新方法。

2 模型构建与分析

2.1 模糊联合补货模型

考虑多个供应商提供多个物品，物品价格由每次的订货量决定，在有运输容量限制的情况下，对库存持有成本和物品的可变订货成本进行模糊 JRP。目标是找到物品的最优补货周期从最优供应商处补货，使总成本最小。模型假设条件如下：每种物品的需求是常数，所有周期保持不变；补货提前期已知；不允许缺货；各种物品的价格取决于该物品从供应商处采购的数量的大小；从各供应商处采购的各种物品的库存持有成本已知；每种物品每次只能从其中一个供应商处采购。

模型参数：m 为物品数量；n 为供应商数量；i 为产品类别标识，$i=1,2,\cdots,m$；j 为供应商类别标识，$j=1,2,\cdots,n$；y 为价格断点标识；D_i 为物品 i 的需求；b_i 为物品 i 的单位体积；B 为满载时的最大容量；S 为发出一个订单时产生的主要订货成本；$\tilde{s}_{ij}=[s_{ij1},s_{ij2},s_{ij3},s_{ij4}]$为从供应商 j 处采购产品 i 的可变订货成本 s_{ij} 的梯形模糊数；$\tilde{h}_i=[h_{i1},h_{i2},h_{i3},h_{i4}]$为单位库存持有成本 h_i 的梯形模糊数；p_{ijy} 为在 y 价格断点处物品 i 从供应商 j 处采购的价格；q_{ijy} 为在 y 价格断点处从供应商 j 处采购物品 i 的数量；X_{ij} 为二元变量，如果物品 i 从供应商 j 处采购，$X_{ij}=1$，否则 $X_{ij}=0$（决策变量）；T 为基本采购周期（决策变量）；k_i 为整数变量，物品 i 的周期乘子（决策变量）。

总成本主要包括主要订货成本、可变订货成本、库存持有成本和物品价值，模糊环境下的年总平均成本为：

$$T_C(X'_{ij}s,T,k'_is)=\frac{S+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(\tilde{s}_{ij}X_{ij}/k_i)}{T}+\sum_{i=1}^{m}\frac{D_ik_iT\tilde{h}_i}{2}+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}C_{ij}(T,k_i)D_iX_{ij},\quad(1)$$

$$\text{s.t.}\quad \begin{cases} \sum_{j=1}^{n} X_{ij} = 1, i = 1,2,\cdots,m\ ; & (2)\\ \sum_{i=1}^{m} D_i k_i T b_i \leqslant B, & (3)\end{cases}$$

式中，C_{ij} 是物品 i 从供应商 j 处采购的单位价格函数，其值取决于 T 和 k_i：

$$C_{ij}(T,k_i) = p_{ijy},\qquad \text{当 } q_{ijy} \leqslant D_i k_i T < q_{ij(y+1)} \text{ 时。}$$

式(2)保证物品 i 只能从一个供应商处采购；式(3)保证所有采购物品的总体积不超过满载的运输容量。

2.2　去模糊化后的总成本

(1) ***去模糊化方法选择***　由于梯级平均综合表示法(GMIR)表示方法简单、运算方便，实用性强，在去模糊化操作中得到广泛的应用[13]，本研究将使用 GMIR 进行去模糊化。设梯形模糊数 $\widetilde{A}=[a_1,a_2,a_3,a_4]$，则该模糊数左边端点函数为 $L(x)=\dfrac{x-a_1}{a_2-a_1}, x\in[a_1,a_2]$；右边端点函数为 $R(x)=\dfrac{a_4-x}{a_4-a_3}, x\in[a_3,a_4]$，则 $\widetilde{A}$ 的解模糊值

$$P(\widetilde{A}) = \int_0^1 h\left(\frac{L^{-1}(h)+R^{-1}(h)}{2}\right)\mathrm{d}h \Big/ \int_0^1 h\mathrm{d}h\ , \tag{4}$$

式中 $L^{-1}(x)$、$R^{-1}(x)$ 分别为 $L(x)$、$R(x)$ 的反函数。若采用梯形模糊数，则根据式(4)可得到去模糊值

$$P(\widetilde{A}) = \int_0^1 h\left(\frac{a_1+a_4+(a_2-a_1-a_4+a_3)h}{2}\right)\mathrm{d}h \Big/ \int_0^1 h\mathrm{d}h = \frac{a_1+2a_2+2a_3+a_4}{6}\ 。\tag{5}$$

(2) ***基于 GMIR 的去模糊化后总成本***　将模糊数 $\widetilde{s}_{ij}=[s_{ij1},s_{ij2},s_{ij3},s_{ij4}]$，$\widetilde{h}_i=[h_{i1},h_{i2},h_{i3},h_{i4}]$ 代入式(1)，得到年总平均成本的模糊数

$$\begin{aligned}\widetilde{T_C} = \Big[&\frac{S+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(s_{ij1}X_{ij}/k_i)}{T} + \sum_{i=1}^{m}\frac{D_ik_iTh_{i1}}{2} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}C_{ij}(T,k_i)D_iX_{ij},\\ &\frac{S+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(s_{ij2}X_{ij}/k_i)}{T} + \sum_{i=1}^{m}\frac{D_ik_iTh_{i2}}{2} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}C_{ij}(T,k_i)D_iX_{ij},\\ &\frac{S+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(s_{ij3}X_{ij}/k_i)}{T} + \sum_{i=1}^{m}\frac{D_ik_iTh_{i3}}{2} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}C_{ij}(T,k_i)D_iX_{ij},\\ &\frac{S+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(s_{ij4}X_{ij}/k_i)}{T} + \sum_{i=1}^{m}\frac{D_ik_iTh_{i4}}{2} + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}C_{ij}(T,k_i)D_iX_{ij}\Big] = [T_{C_1},T_{C_2},T_{C_3},T_{C_4}]。\end{aligned}$$

用 GMIR 对总成本进行去模糊化，根据式(5)，得到与该模糊年总平均成本最接近的确切值为

$$\begin{aligned}P(\widetilde{T_C}) = \frac{1}{6}\Big[&6\left(\frac{S}{T}+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}C_{ij}(T,k_i)D_iX_{ij}\right) + \\ &\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(s_{ij1}+2s_{ij2}+2s_{ij3}+s_{ij4})\left(\frac{X_{ij}}{k_iT}\right) + \\ &\sum_{i=1}^{m}(h_{i1}+2h_{i2}+2h_{i3}+h_{i4})\frac{D_ik_iT}{2}\Big]\ 。\end{aligned}\tag{6}$$

2.3　最优基本周期 T 的性质

为了方便对函数的性质进行分析，将解模糊后的年总平均成本函数拆成两个部分考虑。

$$\begin{aligned}P(\widetilde{T_C}) = \frac{1}{6}\Big[&6\left(\frac{S}{T}\right) + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(s_{ij1}+2s_{ij2}+2s_{ij3}+ \\ &s_{ij4})\left(\frac{X_{ij}}{k_iT}\right) + \sum_{i=1}^{m}(h_{i1}+2h_{i2}+2h_{i3}+h_{i4})\frac{D_ik_iT}{2}\Big] + \\ &\frac{1}{6}\left\{6\left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}C_{ij}(T,k_i)D_iX_{ij}\right]\right\} = P_1+P_2\ 。\end{aligned}\tag{7}$$

(1) ***函数 P_1 及 P_2 的性质***　MOON 等[7]指出，在确定性环境下对于给定的一组 $X'_{ij}s$ 和 k'_is，年总成本函数中，物品的价值函数 C_{ij} 是变量 T 的递减阶梯函数，而剩余部分是变量 T 的凸函数。在模糊环境下，P_1 部分实际上是 4 种确定性情况(确定的 s_{ij} 和 h_i)的线性叠加。根据凸函数的性质：凸函数的线性叠加函数，仍然是凸函数。因此，P_1 仍然是变量 T 的凸函数。对于给定的一组 $X'_{ij}s$ 和 k'_is，对 P_1 求 T 的一阶偏导，令求导结果为 0，可得到令 P_1 最优的基本周期：

$$T_0 = \left\{\frac{2\left[6S+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(s_{ij1}+2s_{ij2}+2s_{ij3}+s_{ij4})\left(\frac{X_{ij}}{k_i}\right)\right]}{\sum_{i=1}^{m}(h_{i1}+2h_{i2}+2h_{i3}+h_{i4})D_ik_i}\right\}^{\frac{1}{2}}\ 。$$

当 $T\leqslant T_0$ 时，P_1 是变量 T 的单调递减函数；当 $T>T_0$ 时，P_1 是变量 T 的单调递增函数。而 P_2 则是变量 T 的递减阶梯函数，阶梯函数的转折点为价格断点 T_{ijy}，$T_{ijy}=q_{ijy}/(D_ik_i)$。

(2) ***满足运输容量约束的最大基本周期***

$$T_1 = B\Big/\left(\sum_{i=1}^{m}D_ik_ib_i\right)。$$

(3) ***运输容量约束下模糊 JRP 的最优基本周期 T^****　综合(1)、(2)的分析，可得模糊环境下最优基本周期 T 的性质：对于给定的一组 $X'_{ij}s$ 和 k'_is，如果 $T_1\leqslant T_0$，最优基本周期 $T^*=T_1$；如果 $T_1>T_0$，最优基本周期 $T^*=\arg\min_{T_y}\{T_C(T_y)\}$。其中，$T_y$ 包括 T_0 和所有的 T_{ijy}，且 T_{ijy} 满足条件：$T_1\geqslant T_{ijy}>T_0$。$T^*=\arg\min T_y\{T_C(T_y)\}$ 表示 T_y 中，使总成本函数 T_C 最小的 T。

3　模型求解算法设计

3.1　自适应混合 DE (AHDE) 算法

标准 DE 算法中，变异算子控制偏差向量

的缩放比例，变异算子过小，无法保证种群的多样性，容易出现早熟现象；变异算子过大，算法搜索效率低，求得的全局最优解精度低。鉴于此考虑，AHDE 算法更改标准 DE 中固定的变异算子 F 为随进化代数自动调整的变动变异算子。此外，AHDE 算法同时对标准 *DE* 的选择策略进行了改进。具体描述如下：

（1）**变异算子的改进** 在进化算法中，要想取得较好的效果，应该先执行粗搜索，随着进化代数的增加，逐步精细搜索。因此，取值应随着进化代数的增加逐步减小的自适应的变异算子，一方面可以保证进化初期种群的多样性；另一方面后期较小的变异算子可以保留优良个体。具体设计如下：

$$F = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min})\mathrm{e}^{1-\frac{\mathrm{Gen}M}{\mathrm{Gen}M-G+1}}, \tag{8}$$

式中，$F_{\min}$ 表示变异因子 F 的最小值；$F_{\max}$ 表示变异因子 F 的最大值；Gen$M$ 表示最大进化代数；G 表示当前进化代数。

（2）**选择策略的改进** 标准 DE 算法的选择策略是"贪婪策略"，即在进行选择操作时，每次试验向量仅与其对应位置的目标个体比较，当 u_t^{G+1} 的适应度较 x_t^G 更优时才被选作子代，否则，直接将 x_t^G 作为子代。以最小化优化问题为例，选择操作按如下式子执行：

$$x_t^{G+1} = \begin{cases} u_t^{G+1} & \text{if } f(u_t^{G+1}) < f(x_t^G)\ ; \\ x_t^G & \text{otherwise,} \end{cases}$$

式中，$t \in [1,2,\cdots,N_p]$，N_p 为种群规模。此选择策略的弊端是，每次比较的都是对应位置的两个个体，没有与非对应位置的个体进行比较，可能会淘汰其他组中比当前组保留个体适应度更好的个体。为了避免这种情况，考虑采用如下方法来选择新种群。

首先将实验种群与初始种群 $\{u_t^{G+1}\}$，$\{x_t^G\}$ 合并为一个种群 $\{u_t^{G+1}, x_t^G\}$，然后计算种群 $\{u_t^{G+1}, x_t^G\}$ 中每个个体的适应度值，对适应度值进行排序，选取前 50% 的个体作为下一代的新种群 $\{x_t^{G+1}\}$。

3.2 基于 AHDE 的模糊 JRP 求解流程

步骤 1 初始化。对任何算法，设计合理可行的编码映射机制，用合适的表达式表示染色体十分重要。与求解标准 JRP 不同，本问题中供应商的选择变量 $X'_{ij}s$，基本周期 T 和周期乘子 $k'_i s$ 应该根据多供应商提供的数量折扣确定。在 AHDE 中，可考虑先编码染色体，求出可行的 $X'_{ij}s$ 和 $k'_i s$，然后通过最优基本周期的性质，利用已知的 $X'_{ij}s$ 和 $k'_i s$，求出最优的基本周期 T。

染色体编码形式由两部分组成：供应商的选择因子和采购周期乘子。用 m 表示物品数，那么染色体长度为 $2m$。例如，如果从 3 个供应商处采购 10 种物品，则染色体长度为 20（见图 1）。第 1 部分的第 i 个基因是供应商 j 的标志，表示物品 i 从供应商 j 处采购；染色体第 2 部分的第 i 个基因是物品 i 的周期乘子 k_i。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	1	2	3	3	3	3	1	1	1	12	6	3	1	1	3	4	6	11	37
供应商选择										周期乘子									

图 1 染色体结构（m=10）

染色体第 1 部分的编码为 $j = \mathrm{round}(1 + \mathrm{rand}^*(n-1))$，且 $X_{ij} = 1$ 且 $X_{ij'} = 0$，当 $j \neq j'$。

染色体第二部分的编码为 $k_i = \mathrm{round}(k_i^{\mathrm{LB}} + \mathrm{rand}^*(k_i^{\mathrm{UB}} - k_i^{\mathrm{LB}}))$。

式中，round(G) 表示取离 G 最近的整数。k_i^{LB} 表示 k_i 的下界，k_i^{UB} 表示 k_i 的上界。由于 k_i 为整数解，因此可直接设置下界为 $k_i^{\mathrm{LB}}=1$；而根据历史文献和现实数据分析，k_i 的值一般不超过 100，因此可给一个较高的上界值，令 $k_i^{\mathrm{UB}} = 100$。

步骤 2 计算种群中个体的适应度值。利用式（6）的函数值即模糊的年总平均成本来评价个体。当个体 t 确定后，可根据最优基本周期的性质求出 T^*，进而代入式（6）计算出个体的适应度值 $f(t)$。

步骤 3 变异操作。首先根据当前迭代次数，利用式（8），求出自适应 F 值，然后根据式（9）执行变异，得到变异向量

$$\boldsymbol{v}_t^{G+1} = x_{r_1}^G + F \times (x_{r_2}^G - x_{r_3}^G), \tag{9}$$

式中，$r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq t$；$r_1, r_2, r_3 \in [1, 2, \cdots, N_p]$。变异完成后，对所有 $\boldsymbol{v}_t^{G+1}$ 进行约束检验，如果 $\boldsymbol{v}_t^{G+1}$ 不满足约束检验，则生成 0～1 间的随机数，保证所有的 $\boldsymbol{v}_t^{G+1}$ 都满足约束要求。

步骤 4 交叉操作。利用式（10）执行交叉操作，得到实验种群

$$\boldsymbol{u}_{tl}^{G+1} = \begin{cases} \boldsymbol{v}_{tl}^{G+1}, & \text{if rand}\ (l) \leqslant CR \text{ or } l = \text{rand}\ n(t)\ ; \\ \boldsymbol{x}_{tl}^G, & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{10}$$

式中，rand(l) ∈ [0,1]，生成 0～1 之间的随机数；rand$n(t) \in [1,2,\cdots,N_d]$，为随机生成集合中的整数，$N_d$ 为染色体长度。

步骤 5 选择操作。利用改进的选择策略

执行选择操作。

步骤6　收敛判断。当迭代次数达到指定次数 Gen$M$ 时,迭代停止;否则转步骤3。

4　算例及结果分析

采用模糊理论描述不确定因素是一种更科学的方法。另一方面,从数学的角度看,模糊JRP在经过去模糊化处理后,可转化为通常意义的JRP,也是NP-hard问题,AHDE同样适用于此类问题。由于本研究是首次构建有约束的模糊JRP,没有可对比的算例。因此,首先采用AHDE来求解资源约束下有数量折扣的确定性JRP,通过已发表文章的算例,将AHDE的结果与目前最优结果进行对比,来验证AHDE的性能;然后通过模糊JRP模型进一步验证AHDE的求解精度和适用性。

(1)资源约束下有数量折扣的确定性JRP——验证AHDE的有效性　算例来自文献[7],算例中的数据见表1和表2,假设主要订货成本 $S=10$,物品的单位体积 $b_i=1$,运输容量 B 逐步由松约束过渡到紧约束,取值分别为5 000、4 000、3 000和2 000。

表1　参数设置

物品 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_i	600	900	2 400	12 000	18 000	3 000	2 500	180	50	146
s_{i1}	5.0	19.4	9.5	8.5	2.2	8.2	10.6	4.0	20.0	16.0
s_{i2}	5.0	19.2	9.0	9.2	2.0	8.0	10.4	4.2	24.0	15.0
s_{i3}	5.2	19.4	8.4	9.2	2.4	7.8	11.2	4.2	24.0	18.0
h_i	0.50	1.94	0.95	0.85	0.22	0.82	1.06	0.40	2.00	1.60

表2　不同供应商单位折扣表(*代表不提供任何折扣)

供应商 j	q_{ijy}	C_{1j}	C_{2j}	C_{3j}	C_{4j}	C_{5j}	C_{6j}	C_{7j}	C_{8j}	C_{9j}	C_{10j}
1	[0,150)	2.50	9.70	4.75	4.25*	1.10	4.10	5.30	2.00*	10.00*	8.00
	[150,300)	2.20	9.60	4.40	—	1.05	3.90	5.10	—	—	7.00
	[300, +∞)	2.10	9.40	4.10	—	0.95	3.70	4.80	—	—	6.00
2	[0,200)	2.50	9.60*	4.50	4.60	1.00*	4.00	5.20*	2.10	12.00	7.50*
	[200,400)	2.20	—	4.20	4.25	—	3.80	—	2.05	8.00	—
	[400, +∞)	1.90	—	4.00	4.10	—	3.50	—	1.95	6.00	—
3	[0,300)	2.60	9.70	4.20*	4.60	1.20	3.90	5.60	2.10	12.00	9.00
	[300,500)	2.30	9.50	—	4.30	1.10	3.80	5.00	1.95	9.00	6.00
	[500, +∞)	2.00	9.30	—	4.00	0.90	3.40	4.60	1.90	5.00	5.00

根据DE算法发明人的建议[14]和类似文献研究中的经验[2,10,11,15],确定AHDE的参数设置为:种群大小 $M_{\mathrm{size}}=100$,迭代次数 Gen$M=50$,交叉因子 $CR=0.7$,变异因子 $F_{\min}=0.2$,$F_{\max}=0.8$。将算例数据和算法参数代入Matlab编写的程序,AHDE计算结果与MOON等[7]中的基于GA求解的最优结果对比见表3。

表3数据显示,本研究使用的算法无论在松约束还是紧约束情况下,所得到的结果均比MOON等[7]采用的GA的结果优。因为GA是目前最好的基于进化计算原理的求解方法,故2种算法计算结果差异不大,但是AHDE得到的结果稍微优于GA,说明AHDE是一种新的有效算法,可用于求解资源约束下有供应商折扣的JRP问题。

表3　AHDE与GA结果对比表

B		选择的供应商 j	周期乘子 k_i	T_0	T_1	T^*	T_C
5 000	GA	(2,1,2,3,3,3,3,1,1,1)	(12,6,3,1,1,3,4,6,11,37)	0.034 0	0.065 9	0.055 6	109 251
	AHDE	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(4,3,2,1,1,2,2,7,14,8)	0.049 5	0.092 5	0.050 0	108 268
4 000	GA	(2,1,2,3,3,3,3,1,1,1)	(16,8,4,1,1,4,5,8,15,50)	0.028 9	0.044 3	0.041 7	109 270
	AHDE	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(4,3,2,1,1,2,2,7,14,8)	0.049 5	0.074 0	0.050 0	108 268
3 000	GA	(1,2,1,3,3,2,1,1,1,2)	(6,4,3,1,1,4,5,5,15,9)	0.036 8	0.041 7	0.041 7	109 760
	AHDE	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(5,4,2,1,1,3,2,8,17,10)	0.044 4	0.050 7	0.044 4	108 308
2 000	GA	(2,2,3,3,3,2,2,1,1,2)	(4,4,1,2,1,5,1,7,18,10)	0.041 4	0.028 0	0.028 0	112 303
	AHDE	(2,2,3,3,3,2,1,1,1,2)	(9,12,6,6,4,19,17,14,52,28)	0.012 8	0.007 1	0.007 1	112 189

(2)资源约束下有数量折扣的模糊JRP——基于AHDE算法　模糊集的取值范围,考虑2种情况:①模糊环境Ⅰ,模糊集为 $[0.9X, 0.95X, 1.05X, 1.1X]$;②模糊环境Ⅱ:模糊集为 $[0.9X, 0.95X, 1.5X, 1.8X]$,其中 X 为确定型情况下的值。把模糊环境下得到的最优解与确定性JRP的进行比较,结果见表4。

表4 模糊环境与确定性环境下的JRP结果对比

B	环境类型	选择的供应商	周期乘子 k_i	T_0	T_1	T^*	T_C	%对比
	确定环境	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(4,3,2,1,1,2,2,7,14,8)	0.049 5	0.092 5	0.050 0	108 268	
5 000	模糊环境Ⅰ	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(4,3,2,1,1,2,2,7,14,8)	0.049 5	0.092 5	0.050 0	108 268	0.000
	模糊环境Ⅱ	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(4,3,2,1,1,2,2,7,14,8)	0.049 5	0.092 5	0.050 0	108 731	0.428
	确定环境	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(4,3,2,1,1,2,2,7,14,8)	0.049 5	0.074 0	0.050 0	108 268	
4 000	模糊环境Ⅰ	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(4,3,2,1,1,2,2,7,14,8)	0.049 5	0.074 0	0.050 0	108 268	0.000
	模糊环境Ⅱ	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(4,3,2,1,1,2,2,7,14,8)	0.049 5	0.074 0	0.050 0	108 731	0.428
	确定环境	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(5,4,2,1,1,3,2,8,17,10)	0.044 4	0.050 7	0.044 4	108 308	
3 000	模糊环境Ⅰ	(2,3,2,3,3,3,3,3,3,3)	(6,5,3,2,1,3,3,10,21,12)	0.033 0	0.038 3	0.033 3	108 400	0.085
	模糊环境Ⅱ	(1,2,2,3,3,3,3,1,1,2)	(22,12,15,4,3,15,18,26,54,31)	0.012 9	0.011 4	0.011 4	110 688	2.197
	确定环境	(2,2,3,3,3,2,1,1,1,2)	(9,12,6,6,4,19,17,14,52,28)	0.012 8	0.007 1	0.007 1	112 189	
2 000	模糊环境Ⅰ	(2,2,3,3,3,2,1,1,1,2)	(9,12,6,6,4,19,17,12,53,30)	0.012 8	0.007 1	0.007 1	112 191	0.001
	模糊环境Ⅱ	(2,2,3,3,3,2,1,1,1,2)	(10,13,5,6,4,19,17,16,57,30)	0.012 0	0.007 1	0.007 1	112 698	0.454

注："%对比"指的是与确定环境相比，模糊环境下 T_C 增加的百分比。

从表4可看出：①运输容量约束由松到紧过渡时，会影响决策和总成本值。当运输容量 B 为4 000、5 000时，模糊环境Ⅰ与确定环境所得结果并无差别；而当运输容量 B 缩小到3 000时，尽管供应商选择的策略不变，但是每种物品的采购周期乘子与总成本值与确定环境所得结果均出现差异；②在模糊环境Ⅱ下（即扩大模糊集后），得出的总成本 T_C 高于确定性JRP的成本，也高于模糊环境Ⅰ的成本。说明模糊参数的模糊集范围会影响问题的决策，模糊集范围越大，得到的结果偏离程度越大；③尽管在模糊环境下得到的结果与确定环境有差异，但是即使在模糊环境Ⅱ下，增加的 T_C 值最高也只有2.197%；而在模糊环境Ⅰ，最高只有0.085%。这说明在无法确定一些参数（例如 s_{ij}，h_i）准确值，或者需要花费很高的成本才能获得各参数准确值的情况下，利用模糊理论进行决策是合理可行的。因为在实际操作中，通过历史数据确定各参数的大致范围却容易很多，这证实了采用模糊理论处理不确定因素的灵活性和较高的实用价值。

5 结语

本研究针对采购管理系统中参数的不确定性，研究了模糊环境下有资源约束的多供应商提供数量折扣的JRP问题。主要工作和贡献如下：① 将模糊理论应用到有数量折扣的JRP问题中，首次构建了资源约束下有数量折扣的模糊JRP模型；② 设计了一种高效稳定的AHDE算法来求解所构建的FJRP模型（NP-hard），AHDE同样可以用于去模糊化处理的JRP模型求解，且结果优于目前最好的算法；③比较了不同的资源约束程度和模糊集的范围对JRP模型优化结果的影响，证实了采用模糊理论处理JRP建模中的不确定因素之实用价值。本文在研究有数量折扣的模糊JRP时候，仅考虑运输容量约束，未考虑资金约束和最小订货量约束等，另外供应商提供数量折扣有时考虑的是总采购金额而非采购数量，这些也是有待继续深入研究的方向。

参 考 文 献

[1] KHOUJA M, GOYAL S. A Review of the Joint Replenishment Problem Literature: 1989～2005 [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186(1): 1～16

[2] WANG L, HE J, WU D S, et al. A Novel Differential Evolution Algorithm for Joint Replenishment Problem Under Interdependence and Its Application [J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(1):190～198

[3] PIRKUL H, ARAS O. Capacitated Multiple Items Ordering Problem with Quantity Discounts [J]. IIE Transactions, 1985, 17(3): 206～211

[4] BENTON W, PARK S. A Classification of Literature on Determining the Lot Size Under Quantity Discounts [J]. European Journal of Operational Research, 1996, 92(2): 219～238

[5] CHA B C, MOON I K. The Joint Replenishment Problem with Quantity Discounts Under Constant Demand [J]. OR Spectrum, 2005, 27(4): 569～581

[6] BENTON W. Quantity Discounts Under Conditions of Multiple Items, Multiple Suppliers and Resource Limitations [J]. International Journal of Production Research, 1991, 29(10): 1953～1961

[7] MOON I K, GOYAL S K, CHA B C. The Joint Replenishment Problem Involving Multiple Suppliers Offering Quantity Discounts [J]. International Journal of Systems Science, 2008, 39(6):629～637

[8] YAO J S, LEE H M. Economic Production Quantity

for Fuzzy Demand Quantity and Fuzzy Production Quantity [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 109(1): 203～211
[9] HANDFIELD R, WARSING D, WU X M. (Q, r) Inventory Policies in a Fuzzy Uncertain Supply Chain Environment [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(2): 609～619
[10] 王林，陈晓溪，曾宇容. 模糊订货费用下基于差分进化算法的联合补货模型[J]. 计算机集成制造系统，2011,17(12): 2 675～2 682
[11] WANG L, FU Q L, ZENG Y R. Continuous Review Inventory Models with a Mixture of Backorders and Lost Sales Under Fuzzy Demand and Different Decision Situations [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(4): 4 181～4 189
[12] OLSEN A L. Inventory Replenishment with Interdependent Ordering Costs: An Evolutionary Algorithm Solution [J]. International Journal of Production Economics, 2008,113(1): 359～369
[13] CHEN S H, HSIEH C H. Graded Mean Integration Representation of Generalized Fuzzy Number [J]. Journal of Chinese Fuzzy System, 1999, 5(2): 1～7
[14] STORN R, PRICE K. Differential Evolution: A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341～359
[15] 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

（编辑　刘继宁）

通讯作者：王林(1974～)，男，湖北枣阳人。华中科技大学（武汉市　430074）管理学院教授，博士。研究方向为物流工程。E-mail: wanglin982@gmail.com

（上接第 1459 页）

[11] FARH J L, ZHONG C B, ORGAN D W. Organizational Citizenship Behavior in the People's Republic of China[J]. Organization Science, 2004, 15(2): 241～245
[12] XINK R, TSUI A S, WANG H. Corporate Culture in State-Owned Enterprises: An Inductive Analysis of Dimensions and Influences [M]// TSUI A S, LAU C M. Management of Enterprises in People's Republic of China. Boston: Kluwer Academic Publishing, 2001:46～59
[13] 吴继霞，黄希庭. 诚信结构初探[J]. 心理学报，2012，44(3): 354～368
[14] PODSAKOFF P M, MACKENZIE S B, PAINEP J B. Organizational Citizenship Behaviors: A Critical Review of the Theoretical and Empirical Literature and Suggestions for Future Research [J]. Journal of Management, 2000, 26(3):513～563
[15] VAN SCOTTER J, MOTOWIDLO S. Interpersonal Facilitation and Job Dedication as Separate Facets of Contextual Performance [J]. Journal of Applied Psychology, 1996, 81(5):525～531
[16] LEE K, ALLEN N J. Organizational Citizenship Behavior and Workplace Deviance: The Role of Affect and Cognitions [J]. Journal of Applied Psychology, 2002, 87(1):131～142
[17] TSUI A S, EGAN T D. Being Different: Relational Demography and Organizational Attachment [J]. Administrative Science Quarterly, 1992, 37(4): 549～579
[18] LIANG K G. Fairness in Chinese Organizations [D]. NORFOLK: Business School of Old Dominion University, 1999
[19] BOLLEN K A. Structural Equations with Latent Variables [M]. New York: Wiley, 1989
[20] JORESKOG K G, SORBOM D. Lisrel 8: User's Reference Guide [M]. Chicago: Scientific Software International, 1993
[21] MEDSKER G J, WILLIAMS L J, HOLAHAN P J. A Review of Current Practices for Evaluating Causal Models of Organizational Behavior and Human Resources Management Research [J]. Journal of Management, 1994, 20(6):429～464
[22] KARINA N, KEVIN D. Does Shared and Differentiated Transformational Leadership Predict Followers' Working Conditions and Well-being? [J]. Leadership Quarterly, 2012, 23(3):383～397
[23] 薛薇. 统计分析与 SPSS 的应用[M]. 北京：中国人民大学出版社，2011
[24] AMYL K B, RYAND Z, ERIN C J. Consequences of Individuals' Fit at Work: A Meta-Analysis of Person-Job, Person-Organization, Person-Group, and Person-Supervisor Fit [J]. Personnel Psychology, 2005, 58(2):281～342

（编辑　郭恺）

通讯作者：陈文晶(1978～)，女，福建福州人。北京邮电大学(北京市　100876)经济管理学院副教授。研究方向为领导学、组织行为学和消费者行为学。E-mail: cwjbupt@163.com