费用与资源约束双重模糊下的联合采购模型——基于差分进化算法的研究*

曾宇容[1]，王　林[2]，冯云涛[2]
(1. 湖北经济学院 信息管理学院，武汉 430205；2. 华中科技大学 管理学院，武汉 430074)

摘　要：针对复杂不确定环境下的联合采购决策难题，用三角模糊数表示不确定的次要订货费用、库存持有费用和资金约束条件，用梯形模糊数表示不确定的存储空间约束，构建了模糊联合采购模型，并采用两种方法对模糊总成本进行去模糊化处理。进而在对差分进化(DE)算法改进并借助典型函数测试性能的基础上，给出了基于改进 DE 的模糊联合采购模型求解流程，算例证明所设计的 DE 算法能较好地解决模糊联合采购问题。

关键词：联合采购；三角模糊数；梯形模糊数；去模糊化；差分进化算法
中图分类号：TP391　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2012)03-0880-05
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.03.022

Joint replenishment model under fuzzy costs and resource constraints—differential evolution algorithm approach

ZENG Yu-rong[1], WANG Lin[2], FENG Yun-tao[2]
(1. *School of Information Management, Hubei University of Economics, Wuhan* 430205, *China*; 2. *School of Management, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: Aiming at making hard decision of joint replenishment problem (JRP) under high uncertainty, this paper proposed a fuzzy JRP model using triangular fuzzy number to represent the minor setup cost and holding cost and fuzzy capital constraints, and trapezoid fuzzy number to represent the fuzzy storage capacities constraints. Then, it proposed the detailed steps to solve the fuzzy JRP using two kinds of defuzziness approaches and the improved differential evolution (DE) algorithm based on the tests of the performance by typical functions. Numerical examples illustrate the proposed DE algorithm can be a suitable approach to solve the fuzzy JRP model.
Key words: joint replenishment; triangular fuzzy number; trapezoid fuzzy number; defuzziness; differential evolution algorithm

0　引言

联合采购问题(JRP)是指从一个供应商处对多种产品进行分组采购，从而达到分摊主要准备费用、节省采购总费用之目的，是库存控制实践中非常有实用价值的课题，其学术意义和实用价值被广泛认可[1,2]。确定性 JRP 模型是在固定订货成本、变动订货成本、年需求速度和单位库存成本均为已知的情况下，确定最优的补货策略，受到了广泛的关注，相关研究又可分为间接成组和直接成组策略[3]。一些学者根据库存管理实践中的约束条件进行了拓展研究，如 Hoque[4] 构建了资金、运输和存储能力受限的联合补货模型及其求解算法；Porras 等人[5]设计了每种物品有最小订货数限制的联合采购模型，并设计了相应的获取最优解的算法；王林等人[6]分析了有资金约束的联合采购决策模型，设计了一种高效的差分进化求解算法，发现差分进化(DE)算法不仅稳定可靠、全局收敛能力强，而且可获得总成本更低的采购策略。

现实中如运输能力、资金到位情况等资源约束通常并不确定，可用模糊变量表示不确定的资源约束来拓展 JRP 研究，模糊约束条件对最优基本联合补货周期有影响，模糊资源约束下 JRP 通过模糊运算可转换为确定性 JRP。例如李成严等人[7]研究了模糊资金约束下的联合补充问题，用三角模糊数表示不确定的资源约束，并基于遗传算法(genetic algorithm, GA)进行了求解。实际上除了资金约束，还有更多贴近管理实践的资源约束(如存储空间和运输能力等)尚待进行深入研究。另外，库存保管费用包括多种费用(仓库空间占用费、为存货所支出的保险费、保管过程中的自然损耗和技术进步导致的报废、库存资金占用所支付的利息)，往往也难以精确确定，用模糊理论处理不确定的费用参数是一种科学有效的途径。获得联合采购的模糊总成本后，需要采用合适的方法进行去模糊化，然后找到成本最低的管理决策方案。常用的方法有梯级平均综合表示法(graded mean integration representation, GMIR)、重心法、符号距离法等。本文采用后两种被广泛采用的方法将模糊总成本进行去模糊化，转换为常规的 JRP 模型，是典型的 NP-hard 问题[8]，然后设计高效可靠的求解新方法。

收稿日期：2011-08-21；**修回日期**：2011-09-29　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(70801030)；湖北省教育厅科研重点资助项目(D20112201)；国家教育部人文社会科学研究青年基金项目(11YJC630275)

作者简介：曾宇容(1976-)，女，湖北武汉人，副教授，主要研究方向为进化算法；王林(1974-)，男，湖北枣阳人，副教授，博士，主要研究方向为物流工程(wanglin982@gmail.com)；冯云涛(1985-)，男，河北邢台人，硕士研究生，主要研究方向为物流工程.

Khouja等人[9]指出,对资金、库存容量、最小订货量、运输能力等限制情形下的JRP模型研究相对较少,原因之一是高效的求解算法难以设计。现有方法包括迭代法、RAND算法、PoT方法和GA等,可针对特定的问题找到可行解。Wang等人[10]利用RAND算法从持有成本和需求率角度对确定性联合补货问题进行了敏感性分析,并发现RAND算法对多资源约束的联合补货模型无能无力。现有的JRP求解算法存在各自的缺陷:a)枚举法,当枚举空间比较大时,就是采用高性能的计算机也无法在满意的时间内找到最优解,无法支持实时决策;b)启发式算法,针对特定问题需要找出适合自身的启发式规则,难度高且无通用性。c)以GA为代表的传统智能优化算法,复杂的进化操作使其计算费用随着问题规模的扩大和复杂度的提高呈指数级增长,并且算法搜索后期容易出现收敛停滞现象。

因此,迫切需要寻求一种能够以有限代价来解决优化的稳定高效的通用方法,从而突破费用与资源约束双重模糊下JRP优化难题。而DE算法通过群体内个体间的合作与竞争产生的群体智能指导优化搜索,具有以下优点:原理简单,容易实现;不依赖于问题信息,所需调节的参数较少,算法通用性高;群体搜索与协同搜索相结合,具有记忆个体最优解的能力,并利用个体局部信息和群体全局信息指导搜索。目前,DE已在众多领域取得成功[11,12],但是在采购管理中的应用却较少。

本文在模糊采购和库存持有费用情况下,针对企业管理实践中最常用的模糊资金和存储能力限制,构建了复杂不确定环境下的JRP模糊规划决策模型,并设计出一种简单、性能稳定可靠的混合DE算法对模糊JRP模型进行求解,为解决此问题提供了一种可行的方法。

1　费用与资源约束双重模糊的联合采购模型分析

考虑到研究的循序渐进,为更好地理解模型,首先讨论费用确定与资源约束模糊环境下的联合采购模型,然后分析更复杂环境下(费用也为模糊变量)的联合采购模型。

1.1　费用确定与资源约束模糊的联合采购模型——JRP1

模型基本假设条件如下:a)补充每种物品的需求率是确定的;b)补货提前期为零、无数量折扣;c)不允许缺货;d)运输时间可忽略;e)各物品的补充周期是联合补货基本周期的整数倍。相关参数定义如下:

n 为联合采购产品种类数;
j 为产品类别的标志,$j=1,2,\cdots,n$;
c_j 为单位产品 j 的单价;
S 为每次补货主要准备费用;
s_j 为每次补货产品 j 次要准备费用;
D_j 为产品 j 的年需求;
h_j 为产品 j 单位年持有成本系数;
T 为基本补货间隔期(年);
T_j 为产品 j 的补货间隔期(年);
t 为满载运输工具的运输费用;
w_j 为单位产品 j 的重量;
W 为运输设备的最大承载重量;
$\tilde{C}$ 为投资资金的模糊值;
$\tilde{g}$ 为存储空间的模糊值;
TC 为年总成本,包括订货成本、库存持有成本和运输成本。

产品 j 的补货周期为 $T_j=k_jT$,则模糊多资源限制的JRP模型为

$$\min TC=(S+\sum_{j=1}^{n}(s_j/k_j))/T+\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{2}D_jk_jh_jT+\sum_{j=1}^{n}\frac{w_jD_jt}{W} \quad (1)$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{j=1}^{n}D_jk_jT\leqslant\tilde{g} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n}D_jk_jc_jT\leqslant\tilde{C} \quad (3)$$

式(2)和(3)为模糊资源约束,分别表示为在单位时间内所订物品的存储空间不超过最大存储空间和所订物品的资金不超过最大资金。其中“~”号表示模糊,即约束是有一定弹性的不确定约束。

实际计划决策中,由于未来不确定因素的存在,资源约束一般都在一定的范围,如$[b-e,\ b+e]$,其中 b 为可用资源的最可能值,e 为一弹性因子(不确定的波动范围)。借鉴模糊思想,可将这种不确定资金约束和存储约束分别用三角模糊数和梯形模糊数表示。式(4)为存储约束的模糊隶属度函数 $p(x)$,式(5)为资金约束的模糊隶属度函数 $q(x)$。

$$p(x)=\begin{cases}\dfrac{2(x-b+e)}{e} & b-e\leqslant x<b-e/2\\ 1 & b-e/2\leqslant x<b+e/2\\ \dfrac{2(b+e-x)}{e} & b+e/2\leqslant x\leqslant b+e\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \quad (4)$$

$$q(x)=\begin{cases}\dfrac{x+e-b}{e} & b-e<x\leqslant b\\ \dfrac{e+b-x}{e} & b<x\leqslant b+e\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \quad (5)$$

1.2　费用与资源约束均为模糊变量的联合采购模型——JRP2

1.2.1　两种去模糊化方法简介

1)符号距离法　如果$\tilde{A}=(a,b,c)\in F_N$,$F_N=\{(a,b,c)\mid\forall a<b<c,a,b,c\in R\}$为 R 上的所有三角模糊数的集合。定义$\tilde{A}$与$\tilde{0}$之间的符号距离为

$$d(\tilde{A},\tilde{0})=\int_0^1 d([A_L(\alpha)_\alpha,A_R(\alpha)_\alpha],\tilde{0})\,\mathrm{d}\alpha=$$
$$\frac{1}{2}\int_0^1(a+c+(2b-a-c)\alpha)\,\mathrm{d}\alpha=\frac{1}{4}(2b+a+c)$$

2)重心法　对三角模糊集$\tilde{A}=(a,b,c)$,通过重心法去模糊化得$C(\tilde{A})=\dfrac{1}{3}(a+b+c)$。

1.2.2　次要订购费用 s_j 和库存持有费用 h_j 的模糊化处理

设次要订购费用 s_j 在区间$[s_j-\Delta_1,s_j+\Delta_2]$内,根据以上知识可得 s_j 的模糊集为

$$\tilde{s_j}=(s_j-\Delta_1,s_j,s_j+\Delta_2)\quad 0<\Delta_1<s_j,0<\Delta_2 \quad (6)$$

在式(6)模糊集$\tilde{s_j}$中 s_j 的隶属度为1,在区间$[s_j-\Delta_1,s_j+\Delta_2]$内的其他点,离 s_j 越远的点,其隶属度越低。在 $s_j-\Delta_1$ 和 $s_j+\Delta_2$ 两点的隶属度为0。

1)利用重心法计算$\tilde{s_j}$的模糊函数值

$$C(\tilde{s_j})=s_j+\frac{1}{3}(\Delta_2-\Delta_1)=$$
$$\frac{2}{3}s_j+\frac{1}{3}\Delta_2+\frac{1}{3}(s_j-\Delta_1)>0 \quad (7)$$

其中:$C(\tilde{s_j})$表示用重心法求得的模糊费用。

2)利用符号法计算$\tilde{s_j}$模糊函数值

$$d(\tilde{s_j},\tilde{0})=s_j+\frac{1}{4}(\Delta_2-\Delta_1)=$$

$$\frac{3}{4}s_j+\frac{1}{4}\Delta_2+\frac{1}{4}(s_j-\Delta_1)>0 \tag{8}$$

其中：$d(\tilde{s_j},\tilde{0})$表示用符号距离法求得的模糊费用。

同理，将库存持有费用 h_j 也模糊化。假设 h_j 在区间$[h_j-\Delta_3,h_j+\Delta_4]$内，同样可得到 h_j 的模糊集$\tilde{h_j}$为

$$\tilde{h_j}=(h_j-\Delta_3,h_j,h_j+\Delta_4) \quad 0<\Delta_3<h_j,0<\Delta_4 \tag{9}$$

同理可得

$$C(\tilde{h_j})=h_j+\frac{1}{3}(\Delta_4-\Delta_3)=\frac{2}{3}h_j+\frac{1}{3}\Delta_4+\frac{1}{3}(h_j-\Delta_3)>0 \tag{10}$$

$$d(\tilde{h_j},\tilde{0})=h_j+\frac{1}{4}(\Delta_4-\Delta_3)=\frac{3}{4}h_j+\frac{1}{4}\Delta_4+\frac{1}{4}(h_j-\Delta_3)>0 \tag{11}$$

其中：$C(\tilde{h_j})$和 $d(\tilde{h_j},\tilde{0})$分别是使用重心法和符号距离法求得的模糊费用。

1.2.3 去模糊化后的总成本

确定环境下的总成本如式(1)所示，采用 1.2.2 节得到的模糊订货费用和模糊库存持有费用，可得到模糊后的总成本：

$$TC(\tilde{s_j},\tilde{h_j})=(TC_1,TC_2,TC_3)$$

其中：

$$TC_1=(S+\sum_{j=1}^{n}(s_j-\Delta_1/k_j))/T+\frac{1}{2}T\sum_{j=1}^{n}D_jk_j(h_j-\Delta_3)+\sum_{j=1}^{n}\frac{w_jD_jt}{W}=$$

$$TC-\sum_{j=1}^{n}\frac{\Delta_1}{k_jT}-\frac{1}{2}T\sum_{j=1}^{n}D_jh_j\Delta_3 \tag{12}$$

$$TC_2=(S+\sum_{j=1}^{n}(s_j/k_j))/T+\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{2}D_jk_jh_jT+\sum_{j=1}^{n}\frac{w_jD_jt}{W} \tag{13}$$

$$TC_3=(S+\sum_{j=1}^{n}(s_j+\Delta_2/k_j))/T+\frac{1}{2}T\sum_{j=1}^{n}D_jk_j(h_j+\Delta_4)+\sum_{j=1}^{n}\frac{w_jD_jt}{W}=$$

$$TC+\sum_{j=1}^{n}\frac{\Delta_2}{k_jT}+\frac{1}{2}T\sum_{j=1}^{n}D_jh_j\Delta_4 \tag{14}$$

再次利用 1.2.1 节的去模糊化方法，可得到不同方法计算得到的总成本。

1)重心法

$$TC_C=TC+\frac{1}{3}(\sum_{j=1}^{n}\frac{\Delta_2-\Delta_1}{Tk_j}+\frac{1}{2}T(\Delta_4-\Delta_3)\sum_{j=1}^{n}k_jD_j) \tag{15}$$

2)符号距离法

$$TC_d=TC+\frac{1}{4}(\sum_{j=1}^{n}\frac{\Delta_2-\Delta_1}{Tk_j}+\frac{1}{2}T(\Delta_4-\Delta_3)\sum_{j=1}^{n}k_jD_j) \tag{16}$$

2 DE 算法改进及其性能测试

2.1 DE 基本流程

1)初始化。建立优化搜索的初始点，首先需对种群初始化。DE 利用 N_P 个维数为 M 的实数值参数向量作为每一代的种群，初始种群$\{x_{lm,0}|x_m^{(L)}\leqslant x_{lm,0}\leqslant x_m^{(U)};l=1,2,\cdots,N_P;m=1,2,\cdots,W\}$随机产生，$x_{lm,0}=\text{rand}[0,1]\times(x_m^{(U)}-x_m^{(L)})+x_m^{(L)}$。其中：$x_{lm,0}$表示初始种群中第 l 个个体的第 m 维分量($l=1,2,\cdots,N_P$; $m=1,2,\cdots,M$)，rand[0,1]表示取(0,1)之间均匀分布的随机数。

2)变异。对每个目标个体 $\boldsymbol{x}_{l,G}$，变异向量如下：

$$\boldsymbol{v}_{l,G+1}=x_{r_1,G}+F\times(x_{r_2,G}-x_{r_3,G}) \quad l\neq r_1\neq r_2\neq r_3$$

其中：下标 r_1、r_2 和 r_3 是随机选择的不相同的数，且与目标向量 $\boldsymbol{x}_{l,G}$的下标 l 也不相同；变异算子 $F\in[0,2]$为常数，可用来控制偏差变量的放大程度。

3)交叉。将目标向量 $\boldsymbol{x}_{l,G}$和变异向量 $\boldsymbol{v}_{l,G}$进行交叉操作，则可得到实验向量 $\boldsymbol{u}_{i,G+1}$。

$$u_{lm,G+1}=\begin{cases}v_{lm,G+1} & \text{if}(\text{rand}\leqslant CR) \quad \text{or} \quad m=q\\ x_{lm,G} & \text{if}(\text{rand}>CR) \quad \text{and} \quad m\neq q\end{cases}$$

其中：$CR\in[0,1]$是一个交叉算子；rand 是产生[0,1]之间的随机数；$q\in\{1,2,\cdots,M\}$是一个随机产生的参数，用来确保实验向量 $\boldsymbol{u}_{l,G+1}$至少能从变异向量 $\boldsymbol{v}_{l,G}$获得一个参数。

4)选择。在选择操作中，基于贪婪准则，通过比较实验向量的适应度值和目标向量的适应度值来决定谁进入下一代。实验向量只与相应的目标个体进行比较，而不是种群所有的个体。

$$\boldsymbol{x}_{l,G+1}=\begin{cases}\boldsymbol{u}_{l,G+1} & \text{if} \quad f(\boldsymbol{u}_{l,G+1})\geqslant f(\boldsymbol{x}_{l,G})\\ \boldsymbol{x}_{l,G} & \text{otherwise}\end{cases}$$

2.2 改进的自适应 DE 算法

1)自适应缩放因子

通常 DE 的控制参数设置为：N_P 取 $5M-10M$，$CR\in[0,1]$，$F\in[0,2]$。每个参数都对 DE 寻优能力有影响。其中，缩放因子 F 用于控制差异向量的缩放程度，它的取值在很大程度上影响着演化过程的收敛性及收敛速度。F 取值较小时，收敛速度较快但种群多样性不够；F 取较大值时，如果其他参数取值合理，虽能保证收敛到问题的最优解，但收敛速度较慢。Yuan 等人[11]通过测试函数对大量数值进行模拟研究，发现一般情况下 F 的最佳取值范围可设为[0.2,0.9]。DE 常采用固定的缩放因子 F。为保证 DE 在搜索初期有较大的种群多样性，而到后期又能够快速收敛找到最优解，要对缩放因子 F 进行改进，让它有自我调整的能力，使之在初期较大，保证种群多样性，在后期较小，能快速收敛，找到最优解。自适应缩放因子 F 设计如下：

$$F=F_{\min}+(F_{\max}-F_{\min})\times e^{1-\frac{GenM}{GenM-G+1}} \tag{17}$$

其中：$F_{\min}$表示自适应缩放因子的最小值；$F_{\max}$表示自适应缩放因子的最大值；$GenM$ 表示最大的进化代数；G 则表示当前进化的代数。

2)选择操作

为了保证把每一组适应度值最好的个体留下，在选择操作中，首先分别对初始种群和经过差分进化后所得的种群进行适应度值排序，然后分别取各自适应度值最优的 50% 组合成新的种群。通过这一选择操作，能避免 DE 中简单的一对一地进行比较的弊端，能保留下大部分优良个体。

2.3 MADE 性能测试

为了对比 MADE(modified adaptive DE, MADE)、DE 和 GA 的性能，特选择三个多变量函数进行测试。

1) Rosenbrock 函数。该函数是单极值的非二次函数，在 $x_2=x_1^2$ 有一狭长深谷，极难极小化，全局最优解为 0。

$$\min f_1=100(x_1^2-x_2)^2+(1-x_1)^2$$

$$x_1,x_2\in[-2.048,2.048]$$

2) Sphere 函数。它有很多个局部最优解，大约为 $2^{10}-1$ 个。有一个全局最优解为 −0.999 3。

$$\min f_2(x)=-1/(\frac{1}{10}\sum_{j=1}^{10}(x_j^4-16x_j^2+5x_j)+79.333)$$

$$x_j\in[-10,100]$$

3) General test 函数。在可行域内有 2^{10} 个局部最优解，1

个全局最优解为 −78.332 3。

$$\min f_3(x) = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(x_j^4 - 16x_j^2 + 5x_j)$$

$$x_j \in [-100, 100], n = 10$$

用 MADE、DE 和 GA 对这三个函数进行求解，参数设置为：$N_P = 100$；MADE 中，$F_{\min} = 0.3$，$F_{\max} = 0.7$，$CR = 0.6$；DE 中，$F = 0.6$，$CR = 0.6$；GA 中，交叉概率 $Pc = 0.7$，变异概率 $Pm = 0.2$。进化代数：f_1 设为 200，f_2 设为 250，f_3 设为 150。三种算法各运行 50 次，结果如表 1 所示。

表 1　三种算法运行结果一览表

比较项		函数 f_1	函数 f_2	函数 f_3
已知最优值		0	−0.999 3	−78.332 3
所得最优值	MADE	0	−0.999 3	−78.332 3
	DE	2.983 6e−023	−0.997 7	−78.332 3
	GA	0.034 3	−0.875 2	−75.340 9
最优值次数	MADE	50	50	50
	DE	0	0	23
	GA	0	0	0
最差结果	MADE	0	−0.999 3	−78.332 3
	DE	7.751 6e−023	−0.824 2	−73.335 1
	GA	0.070 3	−0.728 2	−74.791 6
最优平均值	MADE	0	−0.999 3	−78.332 3
	DE	4.586 3e−023	−0.895 6	−76.386 1
	GA	0.054 7	−0.805 1	−75.065 9

3　基于 MADE 的 JRP2 模型求解流程

1）初始化。根据算例测试实验和其他文献的建议，设定种群规模 $N = 56$，变异算子 $F_{\min} = 0.3$，$F_{\max} = 0.7$，交叉算子 $CR = 0.1$ 与最大迭代次数 $GenM = 100$，置当前迭代次数为 $G = 1$。产生初始种群 $\boldsymbol{x}_{l,G}(l = 1, 2, \cdots, N)$。由于 $K = (k_1, k_2, \cdots, k_n)$ 为正整数值，而 T 值又与 K 值相关，最后优化的总成本是与 T 和 K 相关的。其中，$T_{\max} = \sqrt{2(S + \sum_{j=1}^{n} s_j)/\sum_{j=1}^{n} D_j h_j}$，$T_{\min} = \min\sqrt{s_j/D_j h_j}$。

K 值的下界不会小于 1，根据文献[1,4,5,13]，K 值的上界 k_j^{UB} 不会超过 10，这里设上界为 20，确保能够得到理想的优化结果。这样可在初始化时置种群值为 k_j^{UB} 与 k_j^{LB} 之间的值，并进行取整操作。

2）根据最大迭代次数进行算法终止判断，若到达最大迭代次数 $GenM = 100$，则停止运算并输出最优结果；否则，执行下一步。

3）计算目标函数值。在给定的 K 值下，在成本最小时，可得到最优的 $T^* = \min(T_1, T_2, T_3)$，进而计算出总成本。其中模糊多资源约束下：

$$T_1 = \sqrt{(S + \sum_{j=1}^{n} S_j/k_j)/(\sum_{j=1}^{n}\frac{1}{2}D_j k_j h_j)},$$

$$T_2 = (b - e/3)/R, T_3 = (b - 3/5)/A$$

4）变异算子自适应过程，根据式（17）计算出每一次的 F 值。

5）根据得到的最新 F 进行变异和交叉操作，得到种群大小为 $2N$ 的新一代种群和父代相混合的种群。

6）把父代种群和新一代种群根据适应度排序，选择前 50% 组成种群大小为 N 的新种群。

7）$G = G + 1$，返回 2）。

4　数值实例

4.1　算例 1——MADE 与 GA 求解 JRP1 结果对比

采用文献[13]中算例的数据，将 MADE 与另外一种流行 GA 进行效果对比，从而验证 MADE 在解决确定资源约束 JRP 的科学合理性。算例数据如表 2 所示（$C = 2500$，$t = 50$，$S = 2$，$W = 500$，$g = 7200$）。

表 2　算例基础数据

j	S_j	c_j	h_j	D_j	w_j
1	2.1	0.35	0.35	4 570	0.30
2	5.5	0.40	0.40	10 350	0.40
3	6.2	0.60	0.20	10 000	0.35
4	7.6	0.25	0.25	8 800	0.25
5	1.4	0.15	0.15	2 660	0.22
6	4.9	0.30	0.30	4 000	0.32
7	12.8	0.32	0.32	9 800	0.35

确定性资源约束下，当资金约束为 C 和存储约束为 g 时，用 MADE 算法进行求解 20 次，每次都得到最优总成本为 2 759.7，基本补货周期为 0.047，$K = \{1,1,2,2,2,2,2\}$。同时采用 GA 进行了求解，得到了相同的总成本结果，证实了 MADE 算法的适用性。

下面考虑费用确定、资源约束模糊的 JRP1（去模糊化后可转换为经典的 JRP）。当资金约束为三角模糊数和存储空间约束为梯形模糊数时，设 $b = C$ 和 $r = g$，弹性因子分别为 $0.1b$ 和 $0.1r$，其可能范围分别为 $[0.9b, 1.1b]$ 和 $[0.9r, 1.1r]$。经 20 次运算，MADE 和 GA 都得到基本补货周期为 0.079 2，对应的物品 1～7 的补货周期分别为 T 的{1,1,2,2,2,2,2}倍，最优总成本为 2 914.6，MADE 和 GA 的平均收敛迭代次数分别 15 和 352 次。

4.2　算例 2——两种去模糊化方法的 JRP2 求解结果对比

由于费用和资源约束双重模糊的 JRP2 经过去模糊化可转换为 JRP1，在已通过算例 1 证实 MADE 科学适用的基础上，将 MADE 应用于 JRP2 的求解。这里在模糊资源约束不变的情况下，选择不同的 Δ_1、Δ_2、Δ_3、Δ_4 的值来求解 JRP2 模型，希望得到有益的管理启示，结果如表 3 所示（GA 也得到相同的总成本，尽管 MADE 的收敛迭代次数比 GA 小得多，但是整体运算时间都是很短的。数据说明针对此算例，GA 也是一种可行的方法）。

借助于 MADE，通过 Δ_1、Δ_2、Δ_3、Δ_4 选择不同的值得到了总体差异不大的 TC_c 和 TC_d，有的大于仅存在模糊资源环境下的总成本 2 914.6，有的小于仅存在模糊资源环境下的总成本。可以发现订购费用和库存持有费用的不确定有可能增加总成本，也有可能减少总成本。因此，企业在具体作出订购决策时，可根据不确定的资源和实际的次要订购费用及平均库存持有费用的波动情况进行选择，运用模糊规划和去模糊化的方法来预测这次订购的总成本，从而保证决策的正确性。

表 3 费用与资源约束双重模糊情形下的总成本求解结果

Case	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	TC_c	TC_d
1	0.1	0.15	0.01	0.015	2 921.2	2 919.5
2	0.1	0.2	0.01	0.02	2 927.7	2 924.5
3	0.1	0.25	0.01	0.025	2 934.3	2 929.4
4	0.2	0.1	0.01	0.02	2 924	2 921.6
5	0.2	0.15	0.015	0.02	2 919.3	2 918.1
6	0.3	0.25	0.025	0.03	2 919.3	2 918.1
7	0.1	0.15	0.015	0.01	2 909.9	2 911.1
8	0.1	0.2	0.02	0.01	2 905.2	2 907.5
9	0.1	0.25	0.025	0.01	2 900.5	2 904
10	0.2	0.3	0.015	0.015	2 916.5	2 916
11	0.3	0.3	0.025	0.03	2 920.2	2 918.8
12	0.3	0.3	0.03	0.025	2 908.9	2 910.3
13	0.2	0.5	0.02	0.015	2 914.6	2 914.6
14	0.2	0.6	0.025	0.015	2 910.9	2 911.8
15	0.15	0.1	0.015	0.01	2 908.0	2 909.6
16	0.25	0.1	0.025	0.01	2 894.8	2 899.8

5 结束语

本文主要工作和贡献如下：a) 在次要订货费用和库存持用费用均为模糊变量的情况下，考虑到更接近现实的一些不确定资源限制，构建了有多种模糊资源约束的 JRP 模型；b) 在采用符号距离法和重心法对模糊总成本去模糊化后，设计了一种基于改进 DE 的模糊 JRP 求解新算法（在变异算子与选择操作上进行了改进），通过算例证明了改进 DE 的有效性，为解决此 NP-hard 问题提供一种新途径。相对于确定型模型，本文模型考虑了企业实际运作中的多种不确定因素，更具实用价值。

本研究理论上丰富了复杂不确定情况的联合采购决策理论，也扩大了 DE 的应用领域。未来将在模糊运输费用和配送资源约束情形下研究联合采购与配送调度的集成优化模型。此模型涉及更多的决策参数，需要融合其他智能算法优点设计更具针对性的混合求解算法。

参考文献：

[1] GOYAL S K. Determination of economic packaging frequency for items jointly replenished [J]. Management Science, 1973, 20(2): 233-235.

[2] 欧阳强国，王林，王道平，等. 资金和存储能力约束下基于改进差分进化算法的联合采购模型研究[J]. 管理学报，2010，7(6)：879-884.

[3] OLSEN A L. An evolutionary algorithm to solve the joint replenishment problem using direct grouping[J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(2): 223-235.

[4] HOQUE M A. An optimal solution technique for the joint replenishment problem with storage and transportation capacities and budget constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175(2): 1033-1042.

[5] PORRAS E, DEKKER R. An efficient optimal solution method for the joint replenishment problem with minimum order quantities[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 174(3): 1595-1615.

[6] 王林，贺靖，陈璨，等. 资金约束下基于自适应差分进化算法的联合采购模型及其应用[J]. 系统工程，2010，28(9)：63-68.

[7] 李成严，徐晓飞，战德臣. 模糊资源约束的联合补充问题[J]. 计算机集成制造系统，2008，14(1)：113-117.

[8] ARKIN E, JONEJA D, ROUND Y R. Computational complexity of uncapacitated multi-echelon production planning problems [J]. Operations Research Letters, 1989, 8(2): 61-66.

[9] 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.

[10] WANG Yi-chi, CHENG Wei-ting. A sensitivity analysis of solving joint replenishment problems using the RAND method under inaccurate holding cost estimates and demand forecasts[J]. Computes & Industrial Engineering, 2008, 55(1): 243-252.

[11] YUAN Jun-gang, SUN Zhi-guo, QU Guang-ji. Simulation study of differential evolution[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(20): 4646-4648.

[12] 王林，陈璨. 一种基于差分进化算法和 NSGA-Ⅱ的多目标混合进化算法[J]. 运筹与管理，2010，19(6)：58-64.

[13] MOON I K, CHA B C. The joint replenishment problem with resource restriction [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 173(1): 190-198.

（上接第 879 页）产业园区一体化生产装置的实际应用验证了所提出的方法和计算步骤的正确性及有效性，这种综合故障诊断与可靠性规划于一体的方法能够应用到任何含公共备件的系统可靠性规划中。

参考文献：

[1] BARLOW R E, HUNTER L C. Optimum preventive maintenance policies[J]. Operations Research, 1960, 8(1): 90-100.

[2] 曾谊晖，鄂加强，朱浩，等. 基于贝叶斯网络分类器的船舶柴油机冷却系统故障诊断[J]. 中南大学学报：自然科学版，2010，41(4)：1379-1384.

[3] 张建军，张利，穆海芳，等. 基于改进粒子群优化 BP 网络的发动机故障诊断方法[J]. 农业机械学报，2011，42(1)：198-203.

[4] 吕弘，袁海文，张莉，等. 基于模式重要度的航空电源系统可靠性估计[J]. 航空学报，2010，31(3)：608-613.

[5] 尹晓伟，钱文学，谢里阳. 基于贝叶斯网络的多状态系统可靠性建模与评估[J]. 机械工程学报，2009，45(2)：206-212.

[6] 付桂翠，上官云，史兴宽，等. 基于产品可靠性的工艺系统可靠性模型[J]. 北京航空航天大学学报，2009，35(1)：9-12.

[7] AKHILESH S, XING Liu-dong, DAI Yuan-shun. Reliability analysis of multi-state phased-mission systems [C]//Proc of Reliability and Maintainability Symposium. 2010: 151-156.

[8] 王维兴，蒋里强，张振友，等. 武器系统可靠性分配的动态规划方法[J]. 火炮发射与控制学报，2006(1)：54-57.

[9] 周晓军，奚立峰，李杰. 一种基于可靠性的设备顺序预防性维护模型[J]. 上海交通大学学报，2005，39(12)：2044-2047.

[10] 冯长有，王锡凡，别朝红，等. 基于系统可靠性评估的机组检修规划模型[J]. 西安交通大学学报，2009，43(8)：80-84.

[11] FLEETWOOD D M, RODGERS M P, TSETSERIS L, *et al*. Effects of device aging on microelectronics radiation response and reliability [C]//Proc of the 25th International Conference on Microelectronics. 2006: 84-91.

[12] WANG Xiao-guang, HUANG You-fang, XIE Ya-li, *et al*. Uncertain risks control in the industrial chain based on the complex network [C]//Proc of the 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2009: 1317-1320.