区间不确定性需求下的D-LFLP模型及算法

李利华[1,2],符 卓[1],周和平[2]
LI Lihua[1,2], FU Zhuo[1], ZHOU Heping[2]
1.中南大学 交通运输工程学院,长沙 410075
2.长沙理工大学 交通运输工程学院,长沙 410004
1.School of Traffic and Transport Engineering, Central South University, Changsha 410075, China
2.School of Traffic and Transport Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China

LI Lihua, FU Zhuo, ZHOU Heping. Model and algorithm for discrete logistics facility location problem under interval uncertainty demand. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(8):12-15.

Abstract: In this paper, the uncertainty of logistics demand network is considered. The interval analysis idea is applied to measure uncertain variables and parameters with interval numbers. The mixed integer programming model for logistics network design under interval demand mode is built. The risk coefficient and the maximum constraint deviation are defined to transform the objective function and constraints into certainty. A interval hierarchical optimization genetic algorithm is designed to solve the problem, and to calculate interval optimal solution and node decision-making scheme for objective function under different scenario states. It is shown by a tested example that the operability of the algorithm is more stronger and the solution result has superiority of interval optimal solution and scenario decision.

Key words: logistics network design; uncertainty; mixed integer programming; interval variable; genetic algorithm

摘 要:考虑物流网络需求的不确定性,运用区间分析理念以区间数度量不确定性变量与参数,建立区间需求模式下的物流网络设计的混合整数规划模型,定义风险系数与最大约束偏差,对模型进行目标函数与约束条件的确定性转化,设计问题求解的区间递阶优化遗传算法,对不同情景状态下目标函数的区间最优解与节点决策方案进行运算。算例测试表明该算法可操作性更强,求解结果具有区间最优解与情景决策的优越性。

关键词:物流网络设计;不确定性;混合整数规划;区间变量;遗传算法
DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2012.08.004 **文章编号:**1002-8331(2012)08-0012-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**U116

物流网络设计[1-3](Logistics Network Design Problem,LNDP)是当前行业及学术界研究的热点问题之一,其主要目的是求解一定范围内物流网络上物流节点与运输线路的优化配置与布局,以期保证物流系统运行的整体效率与效益。因此,LNDP也经常被称作设施选址问题[1](Facility Location Problem,FLP)。理论上已提出了大量LFLP问题的模型与方法,其中离散型的物流设施选址问题(D-LFLP)受网络的多样性、求解的复杂性等多因素的影响关注性最强,也被证明是一个NP-C或NP-H问题。针对D-LFLP类问题,国内外研究人员提出了多种求解算法,如:模拟退火算法(SA)、禁忌搜索法(TS)、遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)、蚁群算法(ACO)等,研究成果与焦点主要集中于特定的物流网络结构下,约束条件改变时的算法改进。近年来,随着不确定理论的快速发展,考虑需求不确定性的物流网络设计越来越受重视。如文献[4-7]均从模糊与随机规划的角度设计不确定性优化算法对该类问题求解,其求解过程依赖于某一随机或模糊选择,结果是单一的最优精确解。

1959年Moore[8]提出区间算法[9-10]及规划理论以来,区间规划及运算已成为解决不确定性系统优化的一种主要手段;Csallner[11]在1996年研究了区间分析用于全局优化的收敛性;Kasperski[12]对一类带区间数的Minmax后悔优化问题进行了探讨,并提出一种近似算法;Jiang[13]对目标函数与约束条件均带区间参数的优化问题进行了研究,将其转化为两个确定性优化问题分别求解;王建忠[14]等讨论了区间线性双层规划模型的求解;刘兴旺[15]等对目标系数与约束系数均为区间数的线性规划方程,并应用于运输问题求解;郑咏凌[16]等采用区间约束形式将不确定性的非线性单目标问题多目标化以减少解的不满意程度;蒋峥[17]等对不同情况下非线性规划目标函数与约束条件中不确定性参数出现的不同情况,以区间参数标定并利用遗传算法具体求解;Wang[18]等运用区间线性双层规划模型对分散供应链管理规划问题求解;赵晓煜[19]等探讨了供应链中分销中心布局问题的区间规划模型及解法;曹洪医[20]研究了动态联盟中伙伴选择问题的区间规划模型及其求解。

区间规划能够解决物流网络设计中的不确定性影响,当前研究主要集中于:(1)实践中主要应用与工程结构优化、机床结构系统、地震危险区预测等领域,在交通规划、物流系统设计中并不多见;(2)以模糊与随机规划是研究不确定性物流网络设计的普遍手段,单一最优解不能完全反应需求的变化模式以及决策情景状态;(3)区间线性及连续性问题理论研究较为成熟,如文献[11-17],对离散型区间问题讨论较少;(4)文

基金项目:国家自然科学基金(No.70671108);湖南省科技计划项目(No.2010FJ6016)。
作者简介:李利华(1979—),男,博士研究生,讲师,主要研究方向:物流工程;符卓(1960—),男,教授,博士生导师;周和平(1971—),男,博士,副教授。E-mail:hbxiaoli98@163.com
收稿日期:2011-07-29;**修回日期:**2011-11-16;CNKI**出版:**2012-01-05;http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20120105.1706.035.html

献[18-20]对物流系统的区间设计进行研究，但模型对区间变量定义不完全，且求解模式以数学规划为主，难度较大。本文以区间数的形式来度量整数规划模型中全部不确定性变量及参数，运用区间运算法则，实现物流网络设计模型的确定性转化，并设计区间优化算法求解。

1　区间需求模式下的D-LFLP模型

1.1　区间问题的描述

解决不确定性问题区间分析的理念是以区间数的形式来度量不确定性变量，运用区间运算法则，实现模型的确定性转化，结合区间优化算法求解。区间数的表达形式为：

$$X^I=[\underline{x},\bar{x}]=\{x\in\mathbf{R}|\underline{x}\le x\le\bar{x}\} \tag{1}$$

式中，X^I 为区间变量或参数 x 所在区间；$\underline{x}$ 为区间下界；$\bar{x}$ 为区间上界；x 为区间变量或参数。

1.2　区间需求模型

1.2.1　一般模型约束形式

一般D-LFLP问题的定义为：给定一个初定的物流需求网络，存在一系列的可能备选方案集，需要构建系统费用最优模型求解。区间需求模式下，考虑各变量的不确定性，以区间数对各变量度量后的一般形式表达为：

$$\begin{aligned}&\min Z=f(x^I,y,\theta^I)\\&\text{s.t. } g(x^I,\theta^I)\ge 0\\&\quad h(x^I,\theta^I)=0\\&\quad k(x^I,y,\theta^I)\ge 0\\&\quad x^I\ge 0,\theta^I\ge 0\\&\quad y\in(0,1)\text{且}y\in I\end{aligned} \tag{2}$$

式中，x^I 为物流网络中各节点间的区间分配决策变量；y 为物流节点选择决策变量，为0-1变量，即 $y=1$ 表示该节点被选择，在整个物流网络中产生相应的费用，若 $y=0$ 则表示节点未被选择，对系统的整体费用无影响；θ^I 为模型中的区间参数变量集。

上述模型中，系统总费用 Z 由 x^I,y,θ^I 三个因素决定，第一个区间不等式约束为需求的总量控制或节点的容量限制，区间等式约束为系统的总量平衡约束，第二个区间不等式约束条件表示需求分配决策变量 x^I 与节点选择决策变量 y 之间的松弛约束。

1.2.2　D-LFLP的区间混合整数规划模型

离散型物流设施选址问题实质上就是一个混合整数规划模型（Mixed Integer Programming，MIP），即对问题的求解存在部分变量为整数约束，通常对选址问题的整数规划定义为0-1规划问题。定义一个整体物流供需平衡系统，$A=\{i:i=1,2,\cdots,m\}$ 为物流网络供应点集，$B=\{j:j=1,2,\cdots,n\}$ 为需求客户集，$D=\{k:k=1,2,\cdots,q\}$ 为所有物流备选节点集。

考虑不确定性因素的影响，则该问题可能发生变化的参数及变量有：节点间的运输费率、待决策节点的建设成本、货物在待决策节点的中转费率、系统总的供应量与需求量。则在区间需求约束下可以建立如下规划求解模型：

$$\begin{aligned}\min F=&\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q}C_{ik}^I X_{ik}^I+\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q}C_{kj}^I Y_{kj}^I+\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q}C_{ij}^I Z_{ij}^I+\\&\sum_{k=1}^{q}(F_k^I W_k+C_k^I\sum_{i=1}^{m}X_{ik}^I)\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}\text{s.t. }&\sum_{k=1}^{q}X_{ik}^I+\sum_{j=1}^{n}Z_{ij}^I\le a_i^I,\ i=1,2,\cdots,m\\&\sum_{k=1}^{q}Y_{kj}^I+\sum_{i=1}^{m}Z_{ij}^I\le b_j^I,\ j=1,2,\cdots,n\\&\sum_{i=1}^{m}X_{ik}^I=\sum_{j=1}^{n}Y_{kj}^I,\ k=1,2,\cdots,q\\&\sum_{i=1}^{m}X_{ik}^I-MW_k\le 0\\&X_{ik}^I,\ Y_{kj}^I,\ Z_{ij}^I\ge 0\end{aligned} \tag{4}$$

式中，$X_{ik}^I,Y_{kj}^I,Z_{ij}^I$ 分别表示产生点集、需求点集、决策点集间的物流区间配量；$C_{ik}^I,C_{kj}^I,C_{ij}^I$ 分别表示产生点集、需求点集、决策点集间的区间费用阻抗；F_k^I 为决策点的区间投资成本函数；C_k^I 为决策点的区间节点运行费用函数；W_k 为0-1决策变量，不做区间表达模式；a_i^I,b_j^I 分别表示网络整体区间物流产生与需求量；M 辅助决策变量，为一无穷大正数。

2　模型求解转化及算法设计

2.1　问题的确定性转化

2.1.1　目标函数的转化

上述模型中，系统决策变量有4个，分别为 $X_{ik}^I,Y_{kj}^I,Z_{ij}^I,W_k$，由于 W_k 采用0-1形式标度，故不做区间标度。区间约束下决策变量 $X_{ik}^I,Y_{kj}^I,Z_{ij}^I$ 分别可以表示为：

$$X_{ik}^I=[\underline{X_{ik}},\overline{X_{ik}}],\ Y_{kj}^I=[\underline{Y_{kj}},\overline{Y_{kj}}],\ Z_{ij}^I=[\underline{Z_{ij}},\overline{Z_{ij}}] \tag{5}$$

运用区间运算法则，则目标函数可以转化为：

$$\begin{aligned}\min\underline{F}=&\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q}\underline{C_{ik}}\bullet\underline{X_{ik}}+\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q}\underline{C_{kj}}\bullet\underline{Y_{kj}}+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\underline{C_{ij}}\bullet\underline{Z_{ij}}+\\&\sum_{k=1}^{q}(\underline{F_k}\bullet W_k+\underline{C_k}\sum_{i=1}^{m}\underline{X_{ik}})\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\min\bar{F}=&\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q}\overline{C_{ik}}\bullet\overline{X_{ik}}+\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{q}\overline{C_{kj}}\bullet\overline{Y_{kj}}+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\overline{C_{ij}}\bullet\overline{Z_{ij}}+\\&\sum_{k=1}^{q}(\overline{F_k}\bullet W_k+\overline{C_k}\sum_{i=1}^{m}\overline{X_{ik}})\end{aligned} \tag{7}$$

$$F^I=[\underline{F},\bar{F}] \tag{8}$$

对于 F^I 中的任意值 $\eta(\eta\in[\underline{F},\bar{F}])$，定义风险系数 ξ 为：

$$\xi=\frac{\eta-\underline{F}}{\bar{F}-\underline{F}} \tag{9}$$

风险系数 ξ 表示因区间变量 $X_{ik}^I,Y_{kj}^I,Z_{ij}^I$ 的不确定而使得目标函数求解值大于或等于 η 的风险因子，显然 $0\le\xi\le 1$。

等式变化后：

$$\eta=\xi\bar{F}+(1-\xi)\underline{F} \tag{10}$$

表明原有的目标函数可以确定性转化为：

$$\min F=\xi\bar{F}+(1-\xi)\underline{F} \tag{11}$$

此外考虑到模型中决策变量外还有区间参数 C^I,F^I 会给决策变量的求解造成偏差，给出相应的误差约束：

$$d(F)=\bar{F}-\underline{F}\le d_{\max} \tag{12}$$

$d_{\max}$ 由决策者事先给定误差控制范围。

2.1.2　约束条件的转化

由于物流网络设计是一个实际应用型问题，MIPM中所有变量与参数都为非负约束，故在区间运算中满足 $x\in[\underline{x},\bar{x}]$，如在模型中仅存在区间数的乘法运算规则，则有：

$$C^I x^I \in [\underline{C} \bullet \underline{x}, \bar{C} \bullet \bar{x}] \tag{13}$$

区间标定的MIPM模型中，对其约束条件式做确定性约束转化，则可变为如下模式：

$$\begin{aligned}
&\underline{a_i} \le \sum_{k=1}^{q} \underline{X_{ik}} + \sum_{j=1}^{n} \underline{Z_{ij}} \le \sum_{k=1}^{q} \overline{X_{ik}} + \sum_{j=1}^{n} \overline{Z_{ij}} \le \overline{a_i} \\
&\underline{b_j} \le \sum_{k=1}^{q} \underline{Y_{kj}} + \sum_{i=1}^{m} \underline{Z_{ij}} \le \sum_{k=1}^{q} \overline{Y_{kj}} + \sum_{i=1}^{m} \overline{Z_{ij}} \le \overline{b_j} \\
&\sum_{i=1}^{m} \underline{X_{ik}} = \sum_{j=1}^{n} \underline{Y_{kj}} \\
&\sum_{i=1}^{m} \overline{X_{ik}} = \sum_{j=1}^{n} \overline{Y_{kj}} \\
&\sum_{i=1}^{m} \underline{X_{ik}} \le \sum_{i=1}^{m} \overline{X_{ik}} \le MW_k \\
&\underline{X_{ik}}, \overline{X_{ik}}, \underline{Y_{kj}}, \overline{Y_{kj}}, \underline{Z_{ij}}, \overline{Z_{ij}} \ge 0
\end{aligned} \tag{14}$$

2.2　优化算法设计

通过上述转化，可以得到目标函数与约束条件均为确定性优化问题。对于此类命题，由于问题中既存在随机优化搜集的求解策略，同时还包含 $\underline{F}, \bar{F}$ 等非线性子优化问题，故可采用递阶优化遗传算法模式设计求解，将问题描述为双层优化决策问题，上层代表决策变量，下层定义为优化子目标问题。

2.2.1　上层算法设计

（1）基本参数及变量编码，采用区间编号模式，即每个编码对应一个区间值集。

（2）标定决策变量的初始种群 $F^t = (X_{ik}^w, Y_{kj}^s, Z_{ij}^r, W_k)$。其中：

$$\begin{aligned}
&X_{ik}^w \in [\underline{X_{ik}}, \overline{X_{ik}}] \\
&Y_{kj}^s \in [\underline{Y_{kj}}, \overline{Y_{kj}}] \\
&Z_{ij}^r \in [\underline{Z_{ij}}, \overline{Z_{ij}}] \\
&W_k \in [0, 1], W_k \in I
\end{aligned} \tag{15}$$

$F^t = (X_{ik}^w, Y_{kj}^s, Z_{ij}^r, W_k)$ 为种群中的第 t 个候选解，设定群体进化代数。

（3）给定风险因子 ξ、惩罚因子 $N \ge 0$，，以及允许的最大约束偏差 $d_{\max} > 0$。

（4）设置适应度函数，物流网络设计的目标函数定义。

（5）候选解 F^t 在收到下层计算结果：

$$\begin{aligned}
&\underline{F^t(X_{ik}^w, Z_{ij}^r)} = \sum_{k=1}^{q} \underline{X_{ik}^w} + \sum_{j=1}^{n} \underline{Z_{ij}^r} \\
&\overline{F^t(X_{ik}^w, Z_{ij}^r)} = \sum_{k=1}^{q} \overline{X_{ik}^w} + \sum_{j=1}^{n} \overline{Z_{ij}^r} \\
&\underline{F^t(Y_{kj}^s, Z_{ij}^r)} = \sum_{k=1}^{q} \underline{Y_{kj}^s} + \sum_{j=1}^{n} \underline{Z_{ij}^r} \\
&\overline{F^t(Y_{kj}^s, Z_{ij}^r)} = \sum_{k=1}^{q} \overline{Y_{kj}^s} + \sum_{j=1}^{n} \overline{Z_{ij}^r}
\end{aligned} \tag{16}$$

后，计算综合目标函数：

$$\begin{aligned}
\min F^t(X_{ik}^w, Y_{kj}^s, Z_{ij}^r) = {} & \xi \overline{F^t(X_{ik}^w, Y_{kj}^s, Z_{ij}^r)} + \\
& (1-\xi) \underline{F^t(X_{ik}^w, Y_{kj}^s, X_{ij}^r)} - N \max(0, d(F^t) - d_{\max})
\end{aligned} \tag{17}$$

（6）保存至解为最优解为止。

（7）若已完成进化代数，则转（9），否则继续。

（8）当代优化解的交叉变异遗传操作，产生新的种群。

（9）最优解 $(F^t)^*$ 输出。

2.2.2　下层算法设计

（1）等待上层计算任务 $F^t = (X_{ik}^w, Y_{kj}^s, Z_{ij}^r, W_k)$ 的发出。

（2）计算：

$$\begin{aligned}
&\overline{F^t(X_{ik}^w, Y_{kj}^s, Z_{ij}^r, W_k)} = \max F(X_{ik}^w, Y_{kj}^s, Z_{ij}^r, \bar{C}, \bar{F}) \\
&\underline{F^t(X_{ik}^w, Y_{kj}^s, Z_{ij}^r, W_k)} = \min F(X_{ik}^w, Y_{kj}^s, Z_{ij}^r, \underline{C}, \underline{F})
\end{aligned} \tag{18}$$

（3）计算结果向上层传输。

（4）转步骤（1）。

3　算例分析

存在一个不确定性的物流需求系统，共有5个物流供应点集 $A = \{A1, A2, A3, A4, A5\}$，4个需求点集 $B = \{B1, B2, B3, B4\}$，3个备选物流节点集 $D = \{D1, D2, D3\}$。且满足如下条件：

$$C_{ik}^I = \begin{bmatrix} [1,2] & [1,3] & [1,5] & [1,3] & [3,4] \\ [2,3] & [1,4] & [2,5] & [2,4] & [2,3] \\ [2,4] & [3,4] & [2,4] & [3,4] & [3,5] \end{bmatrix}$$

$$C_{kj}^I = \begin{bmatrix} [3,4] & [1,2] & [3,5] \\ [2,5] & [3,4] & [1,3] \\ [1,4] & [2,4] & [1,5] \\ [2,4] & [3,5] & [1,3] \end{bmatrix}$$

$$C_{ij}^I = \begin{bmatrix} [1,6] & [1,7] & [2,7] & [2,5] & [2,8] \\ [3,8] & [3,9] & [1,5] & [2,7] & [3,9] \\ [1,5] & [2,8] & [2,6] & [3,8] & [2,5] \\ [2,7] & [1,6] & [3,8] & [2,9] & [1,7] \end{bmatrix}$$

$$a_i^I = \{[15,23],[15,25],[13,21],[18,26],[18,30]\}$$

$$b_j^I = \{[20,32],[16,29],[24,34],[19,30]\}$$

$$F_k^I = \{[160,171],[170,180],[240,250]\}$$

$$C_k^I = [[3,8]\ [1,8]\ [2,7]]$$

$C_{ik}^I, C_{kj}^I, C_{ij}^I$ 表示物流网络中各节点对间的区间费率函数；a_i, b_j 表示供应点 A 和需求点 B 容量限制，有 $(\sum a_i)_{\min} = (\sum b_j)_{\min} = 79$，$(\sum a_i)_{\max} = (\sum b_j)_{\max} = 125$，满足系统平衡配流条件；$F_k^I, C_k^I$ 分别表示备选点的投资成本控制与区间中转费率函数。

假定 $1 \le w, s, r \le 5$，则随机产生的初始种群 $1 \le t \le 125$，群体进化代数 $l = 200$，惩罚因子 $N = 100$，利用计算机仿真可得出如下计算结果。

表1对不同约束情况下的运算结果比较可以看出，随着风险系数 ξ、最大约束误差 $d_{\max}$ 的变化，不仅目标函数的区间解发生变动，节点选择的决策结果也会相应发生变化，如在相同的 $\xi = 0.2$ 约束下，$d_{\max} = 75$ 与 $d_{\max} = 200$ 对应的决策节点分别为 $D1$ 与 $D2$；而在相同 $d_{\max} = 75$ 约束下，$\xi = 0.2$ 与 $\xi = 0.8$ 对应的决策节点也分别为 $D1$ 与 $D2$，决策结果存在差异性。

表1　不同约束下的仿真计算结果表

$d_{\max}(\xi=0.2)$	min F	决策点	$\xi(d_{\max}=75)$	min F	决策点
<62.3	无解	—	0.1	[1 421.5, 1 478.3]	$D1$
75	[1 432.5, 1 489.6]	$D1$	0.2	[1 432.5, 1 489.6]	$D1$
100	[1 424.6, 1 501.9]	$D1$	0.3	[1 445.7, 1 501.2]	$D1$
125	[1 410.2, 1 521.3]	$D1$	0.4	[1 458.6, 1 522.3]	$D1$
150	[1 401.3, 1 532.7]	$D1$	0.5	[1 469.8, 1 536.9]	$D1$
175	[1 387.6, 1 543.9]	$D1$	0.6	[1 478.1, 1 542.0]	$D1$
200	[1 365.3, 1 548.7]	$D2$	0.7	[1 486.6, 1 554.2]	$D1$
225	[1 342.4, 1 553.6]	$D2$	0.8	[1 495.2, 1 568.3]	$D2$
>238.2	[1 335.4, 1 558.6]	$D2$	0.9	[1 521.4, 1 583.5]	$D2$

图1表示在风险系数固定（$\xi=0.2$）的约束状态下，系统总费用 F 的区间变化形势，随着 d_{max} 的不断增大，F 的区间上界不断增大，同时其区间下界减小，且区间宽度在扩大，表明决策的风险程度在不断提升。如当约束 $d_{max}=75$ 时，其系统总费用区间为[1 432.5，1 489.6]，而当约束 $d_{max}=200$ 时，F 的区间则变为[1 365.3，1 548.7]，很显然，后者的区间宽度远远大于前者。同时图中出现三个特殊点 A，B，C，对应 d_{max} 的区间限度为[62.3，238.2]，表明在 $d_{max}<62.3$（即 A 点左侧），算例无解；$d_{max}>238.2$（即 B，C 两点右侧），目标函数的区间最优解不再变化。该现象同时也表明，在进行初始求解约束时，若最大约束误差定义偏小，区间规划问题是不能得到最优区间解的。

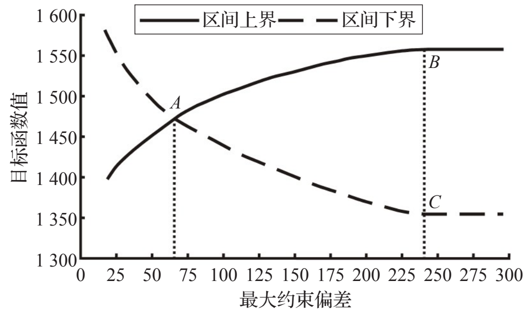

图1　最大偏差约束与目标值变化关系图（$\xi=0.2$）

图2表示在最大约束误差固定（$d_{max}=75$）的状态下，系统总费用 F 随风险系数 ξ 的增加，其区间上下界相应增大，由于已作出区间最大误差的约束，故其运算区间宽度变化情况不大，围绕在 $d_{max}=75$ 上下波动。图中结果同时也能反应风险系数 ξ 对系统决策的影响，ξ 越大，计算的最终结果距最优决策区间偏离越远。如以 $\xi=0.2$ 与 $\xi=0.8$ 状态下计算结果比较，[1 432.5，1 489.6]明显优于[1 495.2，1 568.3]所求得的区间解。

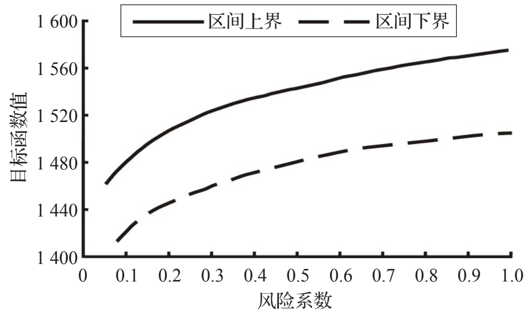

图2　风险约束与目标值变化关系图（$d_{max}=75$）

表2为不同算法的比较分析，在相同的约束条件下（$\xi=0.2$，$d_{max}=75$），以随机规划或模糊规划对该不确定性物流网络设计问题求解，能够得出一个唯一的精确最优解，但不能完全反应不确定性对求解结果的影响变化程度。本文考虑全部区间变量与参数约束的D-LFLP模型，在递阶区间优化遗传算法求解的模式下，能够提供不同情景状态下的区间最优解，既能够以“区间”形式完全反应不确定性的影响程度，求解算法利用优化技术（遗传算法）与区间算法相结合，同时还能为决策者提供情景选择方案，如 $\xi=0.2$，$d_{max}=75$ 与 $\xi=0.8$，$d_{max}=30$ 两种情景下决策方案与目标区间值都是不同的，而 ξ，d_{max} 本身都是由决策者事先的决策态度决定的。由此可见，该方法具有算法可操作性强、区间最优解与情景决策的优越性。

表2　不同算法仿真结果比较表（$\xi=0.2$，$d_{max}=75$）

算法	min F	决策点
模糊优化算法（模糊数）	1 456.7	$D1$
随机优化算法（随机数）	1 465.8	$D1$
本文算法（区间数）	[1 432.5，1 489.6]	$D1$

以上结果充分表明，区间规划带有很强的不确定性，其原因是由不确定性的变量与参数引起的。而对于区间约束下物流网络设计的0-1混合整数规划模型，设计的算法与求解模式中存在事先标定的辅助参数 ξ 与 d_{max}，二者对决策结果产生不同的影响。但区间模式的求解能够起到很好的决策作用，表现为：

（1）区间规划求解的结果是确定的，能够得出系统总费用的最优区间与决策方案，特别是总费用的区间最优解，能够使得决策者了解在需求及网络结构变动的情况下的系统总费用变化情况。

（2）不同 ξ 与 d_{max} 情况下可能会得出不同的决策方案，给决策者提供更好的决策选择空间。一般在最终选择决策方案前，决策者都会对决策问题有一个明确的决策限制，如决策者期望的系统总费用不要超过多大的区间范围，可以通过 d_{max} 进行约束；决策者期望的风险程度可以通过 ξ 进行约束。例如：上述算例中，决策者期望总费用的变动区间不要超过100，且网络中的风险约束不要太多，则可以取 $d_{max}<100$，$\xi<0.3$ 状态下的计算结果值进行比较分析，选择最优方案。相对传统方法的求解，该模式下的运算既能充分考虑不确定性因素的影响，同时也能很好地满足决策者事先的决策约束。

4　结语

物流需求网络具有很大的不确定性，以区间变量约束形式对D-LFLP问题求解，能够更现实地考虑需求状态和网络结构，给决策者提供理性的决策空间。本文构建区间需求下的MIP模型，设计递阶优化遗传算法求解过程，计算测试表明，该方法可用于实际问题求解。

参考文献：

[1] 秦进，史峰.多级物流配送网络设计的优化模型及算法[J].武汉理工大学学报，2007，31（5）：819-822.

[2] 李尔涛，唐孝飞，胡思继.一个物流网络的双层规划模型[J].系统工程学报，2004，19（1）：8-13.

[3] Jovanovic D M.Planning of optimal location and sizes of distribution transformers using integer programming[J].Electrical Power and Energy Systems，2003（25）：717-723.

[4] 陆华，杨家其.模糊排序及启发式算法在物流中心选址中的应用[J].武汉理工大学学报，2002，26（3）：389-392.

[5] 王保华，何世伟.不确定环境下物流中心选址鲁棒优化模型及其算法[J].交通运输系统工程与信息，2009，9（2）：69-74.

[6] 刘琼，叶晶晶，邵新宇.不确定信息条件下制造/再制造物流网络优化设计[J].华中科技大学学报，2007，35（10）：80-83.

[7] 张勇，蒋琦.不确定环境下的物流配送中心选址方法研究[J].兰州交通大学学报，2007，26（1）：135-137.

[8] Moore R.Yang C.Interval analysis，LMSD-285875[R].Lockheed Missiles and Space Division，1959.

[9] 吴江，黄登仕.区间数排序方法研究综述[J].系统工程，2004，22（8）：1-4.

（下转72页）

（1）“按面自动布线”综合了“迷宫法”和“线探索法”的算法思想，首先根据三维布线模型的表面法矢通过预留适当距离的方式确定过渡点，进而自动生成布线路径。该方法简化了布线过程中的交互操作，提高了布线的效率，并保证了所生成布线路径的工艺可行性。

（2）“贴壁干涉自动调整”实现了对布线过程中线缆之间以及线缆和布线对象间的干涉信息的自动检查，并可以根据干涉量的大小自动调整发生干涉的路径，从而在“按面自动布线”基础上进一步简化了布线设计人员的人工交互操作，提高了布线的自动化程度。

将来要进行的工作包括：

（1）“按面自动布线”方法中，关于处理复杂的曲面的RCP的生成算法和路径生成方法，还有待进一步研究。此外，“按面自动布线”方法采用了预留线面距离的方式防止干涉。但是，由于布线路径半径不固定、路径空间交汇等，目前“按面自动布线”的结果仍可能存在干涉，这有待于通过适当的优化算法来解决。

（2）“贴壁干涉自动调整”在处理复杂模型的路径干涉问题时，由于布线路径多、几何模型结构复杂等原因，算法时耗高。这有待于设计高效的干涉检查算法，或是通过干涉检查前引入适当人工预处理的方法来解决。

参考文献：

[1] 周德俭，吴兆华.电气互联技术及其发展动态[J].电子工艺技术，2002(1)：1-4.

[2] 苗振腾，方沂，路红杨.基于UG二次开发的自动电气布线系统的设计[J].现代制造技术，2009(4)：59-61.

[3] 袁国强，王美娥，张述欣，等.基于Pro/ENGINEER的电子设备自动布线技术应用研究[J].航天控制，2009(2)：76-80.

[4] 权建洲，韩明晶，李智，等.基于改进A*算法的电子制造装备布线方法研究[J].中国论文在线，2009(8)：555-559.

[5] 王兆勇，胡子阳，郑杨，等.自动布局布线及验证研究[J].微处理机，2008(1)：31-35.

[6] Szczerba R J，Galkowski P，Glicktein I S，et al.Robust algorithm for real-time route planning[J].IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems，2000，36(3)：869-878.

[7] Stout B.Smart moves：intelligent path-finding[J].Game Developer Magazine，1996，10：28-35.

[8] Park H，Lee S H，Cutkosky M R.Computational support for concurrent engineering of cable harnesses[J].Concurrent Engineering，1998，6(1)：43-52.

[9] Sandukar S，Chen W.GAPRUS-genetic algorithms based pipe routing using tessellated object[J].Computer in Industry，1999，38(3)：209-223.

[10] 阮春红，冯磊，曹树平，等.李氏迷宫算法在液压阀块CAD中的应用研究[J].机械科学与技术，2001(4)：590-591.

[11] 於敏峰.基于PCNN的自动布线算法设计与实现[D].武汉：华中科技大学计算机系，2008.

[12] Hu Y，Jing T，Hong X，et al.An-OARSMan：obstacle-avoiding routing tree construction with good length performance[C]//Proc of IEEE/ACM ASP-DAC，2005：7-12.

[13] Feng Z，Hu Y，Jing T，et al.An $O(n\log n)$ algorithm for obstacle-avoiding routing tree construction in the lambda-geometry plane[C]//Proc ISPD，2006：48-55.

[14] 杨瑞元.无网格线探索布线算法[J].计算机辅助设计与图形学学报，1998(3)：200-207.

[15] 王晓东.算法设计与分析[M].北京：清华大学出版社，2003：26-27.

（上接15页）

[10] 胡承毅，徐山鹰，杨晓光.区间算法简介[J].系统工程理论与实践，2003(4)：59-62.

[11] Csallner A E，Csendes T.The convergence speed of interval methods for global optimization[J].Computers & Mathematics with Applications，1996，31(4/5)：173-178.

[12] Kasperski A，Zielinski P.An approximation algorithm for interval data minmax regret combinatorial optimization problems[J].Information Processing Letters，2006，97(5)：177-180.

[13] Jiang C，Han X，Liu G R，et al.A nonlinear interval number programming method for uncertain optimization problems[J].European Journal of Operational Research，2008，188(1)：1-13.

[14] 王建忠，杜纲.区间线性双层规划的最好最优解[J].系统工程，2009，27(4)：100-103.

[15] 刘兴旺，达庆利，韩世莲.区间数运输问题模型及其模糊目标规划求解方法[J].管理工程学报，1999，13(4)：6-9.

[16] 郑泳凌，马龙华，钱积新.一类参数不确定规划的三目标规划解集方法[J].系统工程理论与实践，2003(5)：59-64.

[17] 蒋峥，戴连奎，吴铁军.区间非线性规划问题的确定化描述及其递阶求解[J].系统工程理论与实践，2005(1)：100-116.

[18] Wang J Z，Du G.A solution to interval linear bi-level programming and its application in decentralized supply chain planning[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conferencei on Service Operations and Logistics，and Informatics，2008(2)：2035-2038.

[19] 赵晓煜，汪定伟.供应链中分销中心布局问题的区间规划模型及解法[J].系统工程，2004，22(8)：28-32.

[20] 曹洪医.动态联盟中伙伴选择问题的区间规划模型及其求解[J].中国管理科学，2006，14(6)：86-91.

（上接54页）

协同进化算法是一个非常复杂的组合问题，物种之间存在着复杂的相互作用关系。因此，如何合理而准确地描述物种间的这些作用关系是协同进化算法的关键问题。此外，协同进化算法与其他算法的融合也是一种非常好的提高算法效率的途径。

参考文献：

[1] Farmer J D，Packard N H，Perelson A S.The immune system，adaptation，and machine learning[J].Physica D，1986，22：187-204.

[2] 曹先彬，王煦法.基于生态竞争模型的遗传强化学习[J].软件学报，1996，10(6)：658-662.

[3] Ehrilich P R，Raven P H.Butterflies and plants：a study in coevolution[J].Evolution，1965，18：586-608.

[4] Clearwater S H，Hogg T，Huberman B A.Cooperative problem solving[M]//Computation：the micro and macro view.Singapore：World Scientific，1992：33-70.

[5] Jazen D H.When is it coevolution[J].Evolution，1980，34：611-612.

[6] 戴朝华，朱云芳.云遗传算法及其应用[J].电子学报，2007，35(7)：1419-1420.

[7] 刘希玉，王文平.动态小生镜微粒群优化技术在概念设计中的应用[J].计算机科学，2006，33(10)：163-165.