

考虑区间约束的物流网络双层规划模型及算法

李利华^{1,2*}, 符卓¹, 胡正东^{1,3}

(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;

3. 南华大学 政治与公共管理学院, 湖南 衡阳 421001)

(* 通信作者电子邮箱 hbxiaoli98@163.com)

摘要:考虑物流网络需求的不确定性,利用区间参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双层规划模型,设计了一种含区间参数与变量的递阶优化遗传算法,通过定义问题求解的风险系数与最大决策偏差,给出适合物流网络结构的区间运算准则,实现模型的确定性转化。以区间松弛变量与0-1决策变量定义初始种群,通过两阶遗传操作运算,求解不同情景下双层规划目标的区间最优解与节点决策方案。算例测试表明算法求解的可操作性更强,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;区间参数;双层规划模型;遗传算法

中图分类号: TP181 **文献标志码:** A

Bilevel programming model and algorithm for logistics network with interval constraints

LI Li-hua^{1,2*}, FU Zhuo¹, HU Zheng-dong^{1,3}

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410004, China;

3. School of Political Science and Public Administration, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: Considering the uncertainty of logistics demand network, the interval number was used to measure uncertain variables and parameters. The bilevel programming model of logistics network under interval demand mode was established and a hierarchical interval optimization genetic algorithm with interval variables and parameters was designed. The risk coefficient and the maximum decision-making deviation were defined to solve the problem, and the rules for logistics network structure were given to transform the model with certainty. The initial population was defined by interval slack variables and 0-1 decision variable, with two-stage genetic operation to solve interval optimal solution and node decision-making scheme of bilevel programming objects under different scenarios. The results of tested example show that the operability of the algorithm is much stronger and the solution result has superiority in interval optimal solution and scenario decision.

Key words: logistics network design; uncertainty; interval parameter; bilevel programming model; Genetic Algorithm (GA)

0 引言

双层规划模型是解决物流网络设计问题的一类较好方法。其基本思想是以上下两层规划模型分别解决物流系统的总成本最小与用户费用最低问题,通过上下两层的有序决策以及相互影响,寻求整体系统的平衡与最优解。文献[1-5]分别研究了不同情景确定状态下物流网络的双层规划模型,并给出相应的算法。而在实际应用中,物流系统复杂多变,受费用约束、需求变动、发展环境等诸多因素的影响,使得该类问题的求解带有很大的不确定性。近年来,针对不确定性的物流网络设计及其设施选址问题的研究广受关注:陆华等^[6]研究了模糊状态下的物流中心选址问题;王保华等^[7]对遗憾和差异模型下的物流中心选址的双层模型进行鲁棒优化,并给出求解的遗传算法;刘琼等^[8]、张勇等^[9]对随机不确定性问题物流网络设计问题进行研究。不确定性物流规划是当前行业的重点研究领域之一,研究方法主要集中于应用随机数与模糊数解决不确定性问题,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。而在现实中,不确定性

的直接影响是求解结果是可变的,同时单一的最优解也不能体现决策者对方案的选择行为。

1 区间物流规划

区间算法由 Moore 等^[10]于 1959 年提出,是解决不确定性问题的重要手段之一。文献[11]比较了区间算法相对传统算法的优越性;文献[12-14]分别对带区间参数的优化规划问题进行讨论;文献[15]讨论了区间线性双层规划模型的求解;文献[16]对目标系数与约束系数均为区间参数的线性规划方程进行研究,并应用于运输问题求解。

近年来,随着区间规划研究的不断深入以及人们对不确定性问题认识的不断加强,区间不确定性物流系统规划与设计问题开始出现一些研究成果。文献[17]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;文献[18]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;文献[19]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。这些研究的求解结果是区间最优解,决策者能够获知不确定性影响求解结果的变动区间,相比单一的模糊或随机

收稿日期:2011-08-08;修回日期:2011-09-30。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70671108);湖南省科技计划项目(2010FJ6016)。

作者简介:李利华(1979-),男,湖北红安人,讲师,博士研究生,主要研究方向:物流工程;符卓(1960-),男,海南琼海人,教授,博士生导师,主要研究方向:物流工程;胡正东(1975-),男,湖南衡阳人,副教授,博士研究生,主要研究方向:物流工程。

最优解更能了解不确定性的影响程度。但其模型中定义的是部分区间变量或参数,不确定性考虑不全,且求解方法以数学规划求解为主,实现难度较大。

本文定义的区间物流规划是以区间参数的形式来度量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,结合区间优化算法求解。区间参数的表达形式如下:

$$X^I = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x \in \mathbf{R} \mid \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\} = [x_{\min}, x_{\max}] \quad (1)$$

其中: X^I 表示区间变量 x 所在区间; \underline{x}, x_{\min} 表示区间下界; \bar{x}, x_{\max} 表示区间上界; x 表示区间变量。

如在物流需求网络中,节点对间的费率函数 C 通常被看成是一个不固定的变量,可以用区间的形式来标度该变量取值的上界和下界。

2 区间约束下的物流网络双层规划模型

物流网络双层规划模型中,包含多个基本参数与决策变量,考虑不确定性因素的影响,模型中仅节点的选择变量为0-1型变量,其他如费率参数、节点间配量、节点投资变量、节点容量等全部都有可能发生变化,因此以区间变量或参数形式定义。

2.1 上层规划

定义物流需求网络结构有: $A = \{i \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ 为物流网络供应点集, $B = \{j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$ 为需求客户集, $D_1 = \{q \mid q = 1, 2, \dots, s\}$ 为已有物流网络节点集, $D_2 = \{q \mid q = s+1, s+2, \dots, s+k\}$ 为新增候选节点集,则 $D = D_1 \cup D_2$ 为所有备选节点集。

区间参数约束下的上层规划模型表达如下:

$$\min Z = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} \sum_{q \in D} C_{ijq}^I x_{ijq}^I + \sum_{q \in D_2} f_q^I Y_q \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t.} \quad & F_{\min} \leq \sum_{q \in D_2} (f_q)_{\min} Y_q \leq \sum_{q \in D_2} (f_q)_{\max} Y_q \leq F_{\max} \\ & (a_i)_{\min} \leq \sum_{q \in D} (x_{iq})_{\min} \leq \sum_{q \in D} (x_{iq})_{\max} \leq (a_i)_{\max} \\ & (b_j)_{\min} \leq \sum_{q \in D} (x_{jq})_{\min} \leq \sum_{q \in D} (x_{jq})_{\max} \leq (b_j)_{\max} \\ & \sum_{i \in A} (x_{iq})_{\min} = \sum_{j \in B} (x_{iq})_{\min} \\ & \sum_{i \in A} (x_{jq})_{\max} = \sum_{j \in B} (x_{jq})_{\max} \end{aligned}$$

其中: C_{ijq}^I, x_{ijq}^I 分别表示各节点间的区间费用函数与物流区间配量; f_q^I 表示备选节点的区间投资成本; Y_q 为0-1决策变量,表示该节点是否作为最终决策节点,若 $Y_q = 1$ 表示节点被选取,否则为0,0-1变量的 Y_q 不做区间模式约束; F 为系统总的建设投资约束, F_{\min}, F_{\max} 分别为投资区间约束的上下界; a_i, b_j 分别表示网络整体区间物流产生与需求量。

该模型采用广义费用函数约束,以系统总成本最小为目标函数,考虑节点及系统的建设投资成本,并对总的产生量与需求量做总量控制约束。

2.2 下层规划

双层规划中下层模型描述的是用户需求量在不同备选节点间的分配模式,要解决的问题是使得各用户费用最低。因此,构建的区间模式下的模型结构如下:

$$\min T = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} \sum_{q \in D} \int_0^{x_{ijq}^I} D(u) du \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \quad (a_i)_{\min} \leq \sum_{q \in D} (x_{iq})_{\min} \leq \sum_{q \in D} (x_{iq})_{\max} \leq (a_i)_{\max}$$

$$(b_j)_{\min} \leq \sum_{q \in D} (x_{jq})_{\min} \leq \sum_{q \in D} (x_{jq})_{\max} \leq (b_j)_{\max}$$

$$(v_q)_{\min} \leq \sum_{i \in A} (x_{iq})_{\min} \leq \sum_{i \in A} (x_{iq})_{\max} \leq (v_q)_{\max}$$

$$(w_q)_{\min} \leq \sum_{j \in B} (x_{jq})_{\min} \leq \sum_{j \in B} (x_{jq})_{\max} \leq (w_q)_{\max}$$

$$x_{ijq}^I \leq M \cdot Y_q$$

其中: $D(u)$ 表示节点间最小费用函数; v_q, w_q 分别为备选节点 q 物流量接受与发送能力,存在区间上下界; M 为辅助决策变量,任意大正数。

3 求解算法

3.1 问题的转化

由于物流网络设计是一个实际应用型问题,双层规划模型中所有变量与参数都为非负约束,故在区间运算中满足 $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$,如在模型中仅存在区间参数的乘法运算与微积分规则,则有

$$\begin{cases} C^I x^I \in [C_{\min} x_{\min}, C_{\max} x_{\max}] \\ \int_0^{x_{ijq}^I} D(u) du \in \left[\int_0^{(x_{ijq})_{\min}} D(u) du, \int_0^{(x_{ijq})_{\max}} D(u) du \right] \end{cases} \quad (4)$$

因此,上下层目标函数的变化区间可以确定如下:

$$\text{上层: } Q = [Z_{\min}(x), Z_{\max}(x)] \quad (5)$$

$$\text{下层: } E = [T_{\min}(x), T_{\max}(x)] \quad (6)$$

对应的上下层目标函数可以转化如下:

$$\begin{aligned} \text{上层: } & \begin{cases} Z_{\min} = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} \sum_{q \in D} C_{ijq}^I (x_{ijq})_{\min} + \sum_{q \in D_2} f_q^I Y_q \\ Z_{\max} = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} \sum_{q \in D} C_{ijq}^I (x_{ijq})_{\max} + \sum_{q \in D_2} f_q^I Y_q \end{cases} \quad (7) \\ & Z^I = [Z_{\min}(x), Z_{\max}(x)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{下层: } & \begin{cases} T_{\min} = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} \sum_{q \in D} \int_0^{(x_{ijq})_{\min}} D(u) du \\ T_{\max} = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} \sum_{q \in D} \int_0^{(x_{ijq})_{\max}} D(u) du \end{cases} \quad (8) \\ & T^I = [T_{\min}(x), T_{\max}(x)] \end{aligned}$$

由于双层模型求解的一般程序为自下而上,故对下层问题定义如下:

对于区间 E 中任意值 $\eta (\eta \in [T_{\min}(x), T_{\max}(x)])$, 定义风险系数 ξ 如下:

$$\xi = \frac{\eta - T_{\min}(x)}{T_{\max}(x) - T_{\min}(x)} \quad (9)$$

风险系数 ξ 表示因区间决策变量 x_{ijq}^I, f_q^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 $0 \leq \xi \leq 1$ 。

等式变化后:

$$\eta = \xi T_{\max}(x) + (1 - \xi) T_{\min}(x) \quad (10)$$

表明下层目标函数可以确定性转化为

$$\min T = \xi T_{\max}(x) + (1 - \xi) T_{\min}(x) \quad (11)$$

此外考虑到上层模型中决策变量外还有参数区间 C_{ijq}^I 会给决策变量的求解造成偏差,给出相应的最大决策偏差约束:

$$d(Z) = Z_{\max}(x) - Z_{\min}(x) \leq d_{\max} \quad (12)$$

d_{\max} 由决策者事先给定误差控制范围。由于物流网络系统中的不确定性影响以区间形式度量,模型中各参数及变量都是在其对应的区间中发生变化,决策者的态度决定风险系数及最大决策偏差的取值,不同的决策取向对应不同的 ξ 和 d_{\max} ,反映出不同的决策情景,其最终的求解结果也是不相同的;同时决策方案也可能存在差异。

3.2 算法设计

由于模型中含有0-1变量 Y_q ,且在下层规划中满足 $x_{ijq}^l \leq M \cdot Y_q$,故定义一区间松弛变量 s_{ijq}^l ,满足

$$x_{ijq}^l = M \cdot Y_q - s_{ijq}^l \quad (13)$$

考虑求解全局优化性能和稳健性,本文采用递阶区间优化遗传算法求解。其基本思路为:定义两阶段的优化决策过程,首先给出满足首阶问题的初始解,次阶决策在该初始解环境下,根据自身偏好在可能范围内优化自己的目标,然后反馈到首阶问题,在首次两阶最佳反映的基础上,寻求整体问题的最优解。采用遗传算法的递阶区间优化求解过程如下。

1) 首阶实现步骤。

a) 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;

b) 定义 Y_q^s, x_{ijq}^w 为初始种群集,其中

$$x_{ijq}^w \in [(x_{ijq}^w)_{\min}, (x_{ijq}^w)_{\max}]; 1 \leq w \leq n \times m \times (s+k) \quad (14)$$

设定群体进化代数;

c) 给定下层规划的风险因子 ξ ,惩罚因子 $N \geq 0$,以及允许的最大偏差 $d_{\max} > 0$;

d) 构建适应度函数评价解集,由于物流网络设计的目标是使得总体成本最小,故适应度函数以决策区间变量 $(x_{ijq}^w)^l$ 为确定区间情况下的成本最优函数,即为式(16);

e) 在 Y_q^s, x_{ijq}^w 收到从机(次阶)计算结果

$$\begin{cases} T(Y_q^s, x_{ijq}^w)_{\min} = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} \sum_{q \in D} (x_{ijq}^w)_{\min} \\ T(Y_q^s, x_{ijq}^w)_{\max} = \sum_{i \in A} \sum_{j \in B} \sum_{q \in D} (x_{ijq}^w)_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

后,计算下层问题的综合目标函数:

$$\min T(X) = \xi T_{\max}(x_{ijq}^w) + (1 - \xi) T_{\max}(x_{ijq}^w) - N_{\max}(0, d(T^w) - d_{\max}) \quad (16)$$

f) 保存至解为最优解为止;

g) 若已完成进化代数,则转i),否则继续;

h) 当代优化解的交叉变异遗传操作,产生新的种群;

i) 下层问题区间解 (x_{ijq}^w) 输出;

j) 计算 $(s_{ijq}^l)^l$,将式(15)代入上层问题,得到一组新的 Y_q^{s+1} 值;

k) 误差检验,若 $d(Z) = Z_{\max}(x) - Z_{\min}(x) \leq d_{\max}$,则终止运算,否则令 $t = t + 1, w = w + 1$,转e);

2) 次阶实现步骤。

a) 等待首阶计算任务 Y_q^s, x_{ijq}^w 的发出;

b) 计算 $T_{\max}(x_{ijq}^w, Y_q^s) = \max T(x_{ijq}^w, Y_q^s), T_{\min}(x_{ijq}^w, Y_q^s) = \min T(x_{ijq}^w, Y_q^s)$;

c) 计算结果向首阶传输;

d) 转步骤b)。

4 算例分析

一个物流网络,共有3个供应点 $A = \{A1, A2, A3\}$,3个需求点 $B = \{B1, B2, B3\}$,1个已有物流节点 $D1 = \{D1\}$,3个新增备选物流节点 $D2 = \{D2, D3, D4\}$ 。网络中各节点间的区间费率见表1、表2。同时各节点的容量限制与备选点投资控制满足如下条件:

$$\begin{aligned} a_i^l &= \{[82, 95], [78, 89], [83, 98]\} \\ b_j^l &= \{[78, 96], [86, 96], [79, 90]\} \\ v_q^l &= \{[56, 60], [48, 55], [52, 60], [59, 66]\} \\ w_q^l &= \{[48, 56], [40, 49], [50, 59], [52, 68]\} \\ f_q^l &= \{[245, 248], [358, 362], [382, 388], [402, 411]\} \end{aligned}$$

其中 a_i, b_j 表示供应点 A 和需求点 B 的容量限制,满足

$$\left(\sum a_i \right)_{\min} = \left(\sum b_j \right)_{\min} = 243$$

$$\left(\sum a_i \right)_{\max} = \left(\sum b_j \right)_{\max} = 282$$

条件; v_q, w_q 为备选点的接受与发送能力限制,计算可知:

$$\left(\sum v_q \right)_{\min} = 295 > 282$$

$$\left(\sum w_q \right)_{\min} = 286 > 282$$

满足系统配流条件; f_q^l 为备选点投资成本控制。

表1 供应点 A 至其他节点的区间费率

节点	A1	A2	A3
D1	[1.5, 3.0]	[0.8, 1.6]	[2.2, 3.5]
D2	[0.8, 1.9]	[1.5, 2.9]	[0.8, 1.6]
D3	[1.6, 2.9]	[1.5, 2.7]	[1.4, 2.8]
D4	[1.9, 3.4]	[1.7, 3.5]	[1.2, 2.3]
B1	[1.7, 4.2]	[1.4, 3.5]	[1.1, 2.3]
B2	[1.1, 2.5]	[1.1, 2.0]	[1.3, 2.5]
B3	[2.2, 4.1]	[2.1, 3.3]	[1.5, 3.2]

表2 备选点 D 至需求点 B 的区间费率

节点	D1	D2	D3	D4
B1	[1.6, 3.1]	[1.4, 2.5]	[1.1, 2.5]	[1.1, 2.6]
B2	[2.2, 3.4]	[1.7, 3.3]	[1.5, 2.9]	[1.3, 2.7]
B3	[1.8, 3.6]	[1.1, 2.3]	[1.8, 3.2]	[1.7, 2.9]

通过计算 $n \times m \times (s+k) = 3 \times 3 \times (1+3) = 36$,以 Y_q^s 与 x_{ijq}^w 相结合的初始种群集为 $36 \times 4 = 144$ 个,定义进化代数 $l = 100$,惩罚因子 $N = 100$,利用计算机仿真可得计算结果如表3。

表3 不同约束下的仿真计算结果表

$d_{\max}(\xi = 0.2)$	$\min Z$	$\min T$	决策点	$\xi(d_{\max} = 30)$	$\min Z$	$\min T$	决策点
<25.9	—	—	—	0.1	[1248.1, 1272.9]	[646.2, 652.0]	D1, D2
30	[1256.4, 1282.3]	[647.3, 653.4]	D1, D2	0.2	[1256.4, 1282.3]	[647.3, 653.4]	D1, D2
40	[1251.1, 1286.8]	[642.5, 660.8]	D1, D2	0.3	[1264.6, 1290.6]	[648.8, 663.2]	D1, D2
50	[1248.9, 1289.2]	[640.2, 663.7]	D1, D2	0.4	[1274.9, 1301.0]	[649.2, 664.4]	D1, D2
60	[1245.0, 1293.7]	[638.1, 668.3]	D1, D2	0.5	[1283.6, 1309.8]	[649.6, 665.4]	D1, D3
70	[1242.8, 1305.1]	[635.7, 671.5]	D1, D2	0.6	[1285.7, 1313.5]	[652.7, 669.6]	D1, D3
80	[1235.3, 1312.5]	[632.3, 677.5]	D1, D2	0.7	[1290.2, 1318.2]	[653.8, 671.9]	D1, D3
>86.7	[1226.7, 1313.4]	[627.4, 680.7]	D1, D2	0.8	[1293.5, 1321.6]	[654.3, 673.9]	D1, D3
				0.9	[1295.7, 1324.0]	[656.6, 676.9]	D1, D3

表3为不同约束条件下算例仿真结果,随着风险因子 ξ 与允许的最大偏差 d_{\max} 的变化,上下层模型的 $\min Z$ 与 $\min T$ 的求解区间也在不断变化,同时还能导致决策节点选取的变化,如: $\xi = 0.2, d_{\max} = 30$ 时,案例的最终选择节点为 $D1$ 和 $D2$;而当 $\xi = 0.5, d_{\max} = 30$ 时,决策结果为 $D1$ 和 $D3$ 。图1反映当 d_{\max} 固定时,上下层目标区间最优解的变动情况,随着 ξ 的增大, $\min Z$ 与 $\min T$ 求解区间相应增大,且 $\min Z$ 变化区间大于 $\min T$,表明下层目标受不确定性影响程度明显小于上层目标。图2反映当 ξ 固定时,上下层目标区间最优解的变动情况,随着 d_{\max} 的增大, $\min Z$ 与 $\min T$ 求解区间也在不断增大, $\min Z$ 的变动大于 $\min T$,且在 d_{\max} 的区间限度为 $[25.9, 86.7]$,即在 $d_{\max} < 25.9$ 的情况下,模型无解; $d_{\max} \geq 86.7$ 时模型的最优解维持一固定不变区间。

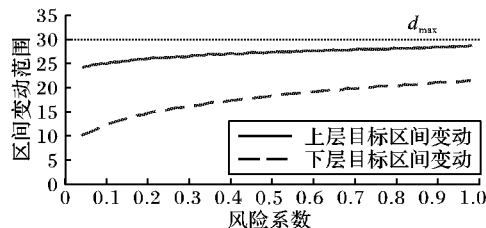


图1 $\min Z, \min T$ 区间变动范围 ($d_{\max} = 30$)

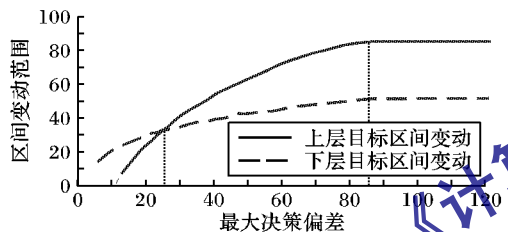


图2 $\min Z, \min T$ 区间变动范围 ($\xi = 0.2$)

表4为不同算法的比较分析,在相同情况下($\xi = 0.5, d_{\max} = 30$),采用随机数或模糊数对该不确定性物流网络设计问题求解,所能得到的仅仅是唯一的精确最优解,不能够完全反映不确定性对求解结果的影响变化程度;而部分区间变量约束下的数学规划方法求解忽视了其他不确定性变量,如表4中仅考虑节点区间投资约束情况下,其目标函数的区间计算结果存在较大差异,决策点的结果也不相同,不仅忽视其他不确定性因素的影响,其求解的难度性相对较大。考虑全部区间变量与参数约束的双层规划模型,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”形式完全反映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 $\xi = 0.5, d_{\max} = 30$ 与 $\xi = 0.2, d_{\max} = 30$ 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,该方法具有强的算法可操作性及区间最优解与情景决策的优越性。

表4 不同算法仿真结果比较表 ($\xi = 0.5, d_{\max} = 30$)

算法	$\min Z$	$\min T$	决策点
模糊算法	1 287.5	653.2	$D1, D3$
随机算法	1 285.3	651.4	$D1, D3$
仅考虑节点区间投资的区间算法	[1 024.5, 1 031.5]	[538.7, 545.7]	$D1, D2$
本文算法	[1 283.6, 1 309.8]	[649.6, 665.4]	$D1, D3$

5 结语

针对物流网络需求的不确定性,本文建立区间约束下的双层规划模型,并设计了一种含区间变量的递阶优化遗传算法。通过定义风险系数、最大决策偏差、区间松弛变量以及区间模式下的初始种群集等,在两阶段遗传操作运算下,能够求解不同情景状态下物流网络双层规划模型的区间最优解与节点决策方案。实验证明该方法能够求解不确定性物流网络设计问题,具有一定的实用性和可操作性。

参考文献:

- [1] 庞明宝,魏连雨. 区域物流线路网络双层规划研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 158-162.
- [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] 管小俊,王喜富,王翠华,等. 基于竞争的物流中心选址双层规划模型及算法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 33(5): 956-959.
- [4] 孙会君,高自友. 考虑路线安排的物流配送中心选址双层规划模型及求解算法[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 115-119.
- [5] 胡显军,肖剑. 物流中心选址的双层规划模型及遗传算法求解[J]. 重庆教育学院学报, 2007, 20(3): 54-56.
- [6] 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, 2003, 26(3): 389-392.
- [7] 王华,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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] MOORE R E, YANG C T. Interval analysis, LMSD-285875 [R/OL]. California: Missiles and Space Division, Lockheed Aircraft Corporation, 1959 [2011-06-12]. http://interval.louisiana.edu/Moores_early_papers/Moore_Yang.pdf.
- [11] 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, 23(4): 59-62.
- [12] CSALLNER A E, CSENDES T. The convergence speed of interval methods for global optimization[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1996, 31(4): 173-178.
- [13] KASPERSKI A, ZIELINSKI P. An approximation algorithm for interval data minmax regret combinatorial optimization problems[J]. Information Processing Letters, 2006, 97(5): 177-180.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] WANG JIANZHONG, DU GANG. A solution to interval linear bi-level programming and its application in decentralized supply chain planning [C]// SOLI 2008: Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. Piscataway: IEEE, 2008, 2: 2035-2038.
- [18] 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.
- [19] 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.