

# 基于区间迭代遗传算法的物流节点决策\*

李利华<sup>1,2</sup>, 符卓<sup>2</sup>, 胡正东<sup>3</sup>, 周和平<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410004; 2. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 3. 南华大学 政治与公共关系管理学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 研究了连续型不确定性物流网络节点选址及算法问题。针对物流网络需求的不确定性,以区间的形式度量各种变量,建立基于重心法的物流网络区间节点决策模型。考虑物流网络实践应用性特征,对区间解的性质判定及关系比较进行标定,实现求解模型的确定性转换。将区间运算与遗传算法相结合,设计问题求解的区间迭代遗传算法。算例测试比较分析表明,该算法具有区间决策的优越性,实践可操作性更强。

**关键词:** 物流节点; 不确定性; 决策; 重心法; 区间迭代; 遗传算法

**中图分类号:** TP301.6      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2012)10-3713-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.028

## Logistics nodes decision based on interval iterative genetic algorithm

LI Li-hua<sup>1,2</sup>, FU Zhuo<sup>2</sup>, HU Zheng-dong<sup>3</sup>, ZHOU He-ping<sup>1</sup>

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 3. School of Political Science & Public Administration, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

**Abstract:** This paper researched the problem about nodes location and algorithm of continuous uncertain logistics network. For the uncertain demand of logistics network, it measured each variables by the type of interval, established an interval nodes decision model for logistics network based on gravity method. It considered the practiced and applied characteristics of logistics network, then calibrated the property and interrelation of interval solution to realize the certain transformation of the solving model. It integrated interval operation and genetic algorithm, designed an interval interactive genetic algorithm to solve this problem. The result of a tested example shows that the algorithm has superiority of interval decision and more stronger practicing operability.

**Key words:** logistics nodes; uncertainty; decision; gravity method; interval iteratives; genetic algorithm

## 0 引言

物流节点决策是现代物流科学、合理、持续发展的关键,一直以来都得到学术界与实际应用的广泛重视。其主要包括连续型与离散型两类问题。连续型问题主要解决的是在一个连续的平面区域中对物流节点的选择与决策,其基本求解模型为重心法。文献[1~5]围绕该方法作出改进,并在实践中得到大量应用。然而,随着物流行业的快速发展,物流节点决策问题求解的复杂性越来越强,不确定性日益突出,文献[6,7]分别对不同状态下不确定性物流中心选址问题展开研究,以模糊决策与随机规划度量不确定性变化,反映在求解结果上为唯一最终解或最优解,而在实际规划中,不确定性的需求、变量以及参数可能是在某一可度量的区间范围中变动,仅仅采用模糊或随机选择是很难代表全部的区间需求变动的。

区间规划由 Moore<sup>[8]</sup>在 20 世纪 60 年代初提出,其基本理念是用区间数度量不确定性变量,后来随着研究的深入,发展为一门学科领域,即区间数学,并产生问题求解的区间算

法<sup>[9]</sup>。文献[10~15]将数学及运筹学领域中的一些经典问题设计成区间规划模型,并提出遗传算法与区间算法相结合的求解模式。在物流网络设计及节点决策中,遗传算法被作为一种较好的求解方法,如文献[16,17]分别采用不同的理念改进遗传算法进行物流节点决策问题求解。然而物流节点决策是一类实践应用性问题,单纯的数学规划理念及求解模式很难反映问题的全面性与实践性。

综述表明,区间不确定性的连续型物流节点决策问题当前研究主要集中于:a) 不确定性的物流节点决策问题在目前受到广泛的研究重视,但主要以模糊与随机决策解决问题,求解结果局限于某一随机解或模糊解;b) 遗传算法普遍应用于决策模型的求解,但将区间算法与其相结合解决问题的研究主要集中于数学及运筹规划,实践应用性问题研究较少;c) 重心法是解决连续型物流节点决策的主要方法,对于事先划定的求解区域,在求解中极少考虑区域中的障碍,而整体区域的连续型往往与实际情况是不相符的,对于该方面的考虑目前的研究较为忽视,如文献[18]。本文在重心法的基础上,考虑物流网络需求的不确定性以及区域内部的不连续性,构建不确定性物流网络的区间决

收稿日期: 2012-03-17; 修回日期: 2012-04-27      基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178061); 湖南省科技计划项目(2010FJ6016); 湖南省教育厅科研项目(12JC0015)

作者简介: 李利华(1979-),男,湖北红安人,讲师,博士,主要研究方向为物流工程(hbxiaoli98@163.com); 符卓(1960-),男,海南琼海人,教授,博导,主要研究方向为物流系统工程; 胡正东(1975-),男,湖南衡阳人,副教授,博士研究生,主要研究方向为物流工程; 周和平(1971-),男,湖北监利人,副教授,博士,主要研究方向为交通规划。

策模型,并设计区间迭代遗传算法对该类问题求解。

## 1 区间约束的物流节点决策模型

### 1.1 区间数的度量及运算

给定实数 $\bar{x}$ 与 $\underline{x}$ ,且有 $\underline{x} \leq \bar{x}$  ( $\underline{x}, \bar{x} \in \mathbb{R}$ ),则称 $X^I = [\underline{x}, \bar{x}]$ 为有界闭区间,具体可表达为

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

其中: $X^I$ 为区间变量 $x$ 所在区间,也称做区间数。

在物流节点决策中,考虑整个物流网络需求的不确定性,可以认为,所有的不确定性变量和参数是在某一区间范围中变动,因此将其以区间数的形式进行约束。

区间数满足实数运算的一般规则,考虑到物流网络为实际应用性问题,不同于一般数学规划问题,其不确定性参数及变量均为非负约束,而本文仅涉及到加、减、乘、开方等运算,故可定义如下:

存在区间数 $X^I = [\underline{x}, \bar{x}]$ 与 $Y^I = [\underline{y}, \bar{y}]$ ,一个实数 $R$ ,则:

a) 加法规则

$$\begin{aligned} X^I + Y^I &= [\underline{x}, \bar{x}] + [\underline{y}, \bar{y}] = [\underline{x} + \underline{y}, \bar{x} + \bar{y}] \\ X^I + R &= [\underline{x}, \bar{x}] + R = [\underline{x} + R, \bar{x} + R] \end{aligned} \quad (2)$$

b) 减法规则

$$\begin{aligned} X^I - Y^I &= [\underline{x}, \bar{x}] - [\underline{y}, \bar{y}] = [\underline{x} - \bar{y}, \bar{x} - \underline{y}] \\ X^I - R &= [\underline{x}, \bar{x}] - R = [\underline{x} - R, \bar{x} - R] \end{aligned} \quad (3)$$

c) 乘法规则

$$\begin{aligned} X^I \times Y^I &= [\underline{x}, \bar{x}] \times [\underline{y}, \bar{y}] = [\underline{x} \times \underline{y}, \bar{x} \times \bar{y}] \\ X^I \times R &= [\underline{x}, \bar{x}] \times R = [\underline{x} \times R, \bar{x} \times R] \end{aligned} \quad (4)$$

d) 开方规则

$$\sqrt{X^I} = [\sqrt{\underline{x}}, \sqrt{\bar{x}}] \quad (5)$$

### 1.2 模型的构建

连续型物流节点决策问题以重心法为基础,其基本理念是在某一事先给定的区域范围中,标定各已知需求节点的坐标,将节点间的物流需求量看做节点的重量,通过求物体的平面几何重心得出决策节点的坐标。在不确定性的需求状态下,问题标定为:a)事先标定的区域内容可能存在某些小的区域或范围是不可取的,应该在求解范围中剔除,例如在某一区域中,存在某些固定的建筑物、水域等,若最终求解结果在这些区域,是毫无意义的;b)为了反映整体需求的不确定性,以区间数度量重心法中所有的不确定性参数及变量。因此其网络结构可以描述为:

标定一个平面坐标体系,设定区域 $D$ 范畴,通常为方便计算,将 $D$ 以矩形的形式设置在第一象限,其起点为 $(0,0)$ ,定义其终点坐标为 $(a,b)$ 已知。区域 $D$ 中一共有 $m$ 个区域是不能进行节点选择的,对应为 $D_i (1 \leq i \leq m)$ ,同时按要求决策节点的数目,将整体平面分为 $n$ 个小的片区 $D_j (1 \leq j \leq n)$ ,表示一共要选择 $n$ 个物流节点,一个片区对应一个待选择物流节点,并且各片区规定其各自的坐标区域范围。网络中需求网点为 $Q_k (1 \leq k \leq q)$ ,每一网点对应的坐标为 $(X_k, Y_k) (1 \leq k \leq q)$ ,待决策节点坐标为 $((x_j)^I, (y_j)^I)$ ,已知需求节点至决策节点的区间费率标定为 $(C_{kj})^I$ ,节点间的区间需求量为 $(Q_{kj})^I$ ,则可构建如下区间规划模型:

$$\min Z =$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^n (C_{kj})^I \sqrt{((x_j)^I - X_k)^2 + ((y_j)^I - Y_k)^2} (Q_{kj})^I W_{kj} \quad (6) \\ \text{s. t. } 0 \leq X_k \leq a \\ 0 \leq Y_k \leq b \\ (x_j)^I \notin D_j, 1 \leq j \leq n \\ (x_j)^I \notin D_i, 1 \leq i \leq m \\ W_{kj} \in (0,1), W_{kj} \in I, 1 \leq k \leq q \end{aligned} \quad (7)$$

上述模型中, $\sqrt{((x_j)^I - X_k)^2 + ((y_j)^I - Y_k)^2}$ 表示已知需求点与决策点的区间欧式距离, $W_{kj}$ 为0-1变量,若 $W_{kj} = 1$ ,则表示已知需求点 $k$ 的物流流向由节点 $j$ 负责;若 $W_{kj} = 0$ ,则反之。由此可知,目标函数应该是一个区间值,即系统的总体运行具有最小区间费用,约束条件中表明 $((x_j)^I, (y_j)^I)$ 都在其对应的区域 $D_j$ 中选择,且不与 $D_i$ 发生关系。

## 2 模型的求解

### 2.1 区间解的判定

决策模型中,所有不确定性变量都以区间数的形式标定,按照重心法求解的初衷,费率、配量以及需求点的坐标都是已知的,故可以通过给出区间约束标定 $(C_{kj})^I$ 与 $(Q_{kj})^I$ ,则只剩下 $(x_j)^I$ 和 $(y_j)^I$ 区间决策变量以及区间目标函数值 $Z^I$ 。

由于本文设计区间迭代遗传算法求解,则存在初始解的标定与优化迭代过程。而区间数的比较本身又存在三种关系,即区间不相交、相交与包含,则:

假定 $(Z_0)^I = [Z_0, \bar{Z}_0]$ 与 $(Z_1)^I = [Z_1, \bar{Z}_1]$ 为求解过程中的两个目标函数区间解。

a) 若 $Z_0 \geq \bar{Z}_1$ ,则表现为区间不相交形式,对应 $(Z_0)^I \geq (Z_1)^I$ 与 $(Z_1)^I$ 为相对最优区间解;

b) 若 $Z_0 \leq Z_1 \leq \bar{Z}_1 \leq \bar{Z}_0$ ,则表现为区间包含关系, $(Z_1)^I \subseteq (Z_0)^I$ 与 $(Z_1)^I$ 为相对最优区间解;

c) 若 $Z_0 \geq Z_1$ ,则表现为区间相交关系,定义区间可能度函数为

$$P((Z_1)^I \leq (Z_0)^I) = \max \left\{ 0, 1 - \max \left[ 0, \frac{\bar{Z}_0 - Z_1}{(\bar{Z}_0 - Z_0) + (Z_1 - \bar{Z}_1)} \right] \right\} \quad (8)$$

如果 $P \geq 0.5$ ,则 $(Z_0)^I \geq (Z_1)^I$ ;反之, $(Z_0)^I < (Z_1)^I$ 。

同时求解中 $((x_j)^I, (y_j)^I)$ 同时受到 $D, D_i, D_j$ 三个区域的约束,由于该三个区域的范围是事先标定的,则:a)若 $((x_j)^I, (y_j)^I) \in D_j$ 且 $\notin D_i$ ,运算继续;b)若 $((x_j)^I, (y_j)^I) \notin D_j$ ,则运算停止;c)若 $((x_j)^I, (y_j)^I)$ 与 $D_j$ 相交,则取包含在区间 $D_j$ 中的部分 $((x_j)^I)^* \cap ((y_j)^I)^*$ 替代 $((x_j)^I, (y_j)^I)$ ,运算继续;d)若 $((x_j)^I, (y_j)^I)$ 与 $D_j$ 和 $D_i$ 三者相交,则取 $D_j$ 中剔除 $D_i$ 后与 $((x_j)^I, (y_j)^I)$ 相交的区间解。

### 2.2 运算的确定性转换

对于模型式(6)及其式(7),在预先设定的坐标体系下,各区间变量为非负约束,按照区间运算的乘法法则,定义:

$$(d_{kj})^I = \sqrt{((x_j)^I - X_k)^2 + ((y_j)^I - Y_k)^2} \quad (9)$$

则有

$$\begin{aligned} d_{kj} &= \min \left( \sqrt{(\underline{x}_j - X_k)^2 + (\underline{y}_j - Y_k)^2}, \sqrt{(\bar{x}_j - X_k)^2 + (\bar{y}_j - Y_k)^2} \right) \\ &\quad \sqrt{(\bar{x}_j - X_k)^2 + (\underline{y}_j - Y_k)^2}, \sqrt{(\underline{x}_j - X_k)^2 + (\bar{y}_j - Y_k)^2} \quad (10) \\ \bar{d}_{kj} &= \min \left( \sqrt{(\underline{x}_j - X_k)^2 + (\underline{y}_j - Y_k)^2}, \sqrt{(\underline{x}_j - X_k)^2 + (\bar{y}_j - Y_k)^2} \right) \end{aligned}$$

$$\sqrt{(\bar{x}_j - X_k)^2 + (\bar{y}_j - Y_k)^2}, \sqrt{(\underline{x}_j - X_k)^2 + (\underline{y}_j - Y_k)^2} \quad (11)$$

在区间迭代计算中  $\underline{d}_{kj}$  与  $\bar{d}_{kj}$  都是在四个确定值中选择,很容易标定其结果值。

因此可以将式(6)确定性转换为

$$\begin{cases} \min \underline{Z} = \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^n C_{kj} \times \underline{d}_{kj} \times \underline{Q}_{kj} \times W_{kj} \\ \min \bar{Z} = \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^n \bar{C}_{kj} \times \bar{d}_{kj} \times \bar{Q}_{kj} \times W_{kj} \end{cases} \quad (12)$$

则可得

$$\begin{cases} \underline{x}_j = \frac{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (C_{ki} \times \underline{d}_{ki} \times \underline{Q}_{ki} \times X_k \times W_{ki})}{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (C_{ki} \times \underline{d}_{ki} \times \underline{Q}_{ki} \times W_{ki})} \\ \bar{x}_j = \frac{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{ki} \times \bar{d}_{ki} \times \bar{Q}_{ki} \times X_k \times W_{ki})}{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{ki} \times \bar{d}_{ki} \times \bar{Q}_{ki} \times W_{ki})} \\ \underline{y}_j = \frac{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (C_{ki} \times \underline{d}_{ki} \times \underline{Q}_{ki} \times Y_k \times W_{ki})}{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (C_{ki} \times \underline{d}_{ki} \times \underline{Q}_{ki} \times W_{ki})} \\ \bar{y}_j = \frac{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{ki} \times \bar{d}_{ki} \times \bar{Q}_{ki} \times Y_k \times W_{ki})}{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{ki} \times \bar{d}_{ki} \times \bar{Q}_{ki} \times W_{ki})} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \underline{x}_j = \frac{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (C_{ki} \times \underline{d}_{ki} \times \underline{Q}_{ki} \times X_k \times W_{ki})}{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (C_{ki} \times \underline{d}_{ki} \times \underline{Q}_{ki} \times W_{ki})} \\ \bar{x}_j = \frac{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{ki} \times \bar{d}_{ki} \times \bar{Q}_{ki} \times X_k \times W_{ki})}{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{ki} \times \bar{d}_{ki} \times \bar{Q}_{ki} \times W_{ki})} \\ \underline{y}_j = \frac{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (C_{ki} \times \underline{d}_{ki} \times \underline{Q}_{ki} \times Y_k \times W_{ki})}{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (C_{ki} \times \underline{d}_{ki} \times \underline{Q}_{ki} \times W_{ki})} \\ \bar{y}_j = \frac{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{ki} \times \bar{d}_{ki} \times \bar{Q}_{ki} \times Y_k \times W_{ki})}{\sum_{k=1}^q \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{ki} \times \bar{d}_{ki} \times \bar{Q}_{ki} \times W_{ki})} \end{cases} \quad (14)$$

### 3 算法设计

式(13)(14)为区间规划下的节点最终区间坐标值,可以看出坐标  $[\underline{x}_j, \bar{x}_j], [\underline{y}_j, \bar{y}_j]$  是关于  $\underline{d}_{kj}$  与  $\bar{d}_{kj}$  的表达式,表现为  $\underline{x}_j, \bar{x}_j, \underline{y}_j, \bar{y}_j$  自身的一种相互嵌套关系,因此需要一个迭代的过程。本文提出区间迭代遗传算法的求解模式,其步骤如下:

#### a) 平面区间的标定

问题求解中涉及到三个平面区域  $D, D_i, D_j$ , 其相互关系为  $\sum_{j=1}^n D_j = D$ 。由于  $D_i$  和  $D_j$  关系不明确,因此首先按 2.1 节中区间解判定方式对  $D_i$  和  $D_j$  进行比较,形成新的平面区域  $(D_j)'$ , 即  $(D_j)' = D_j - D_i$ , 并通过坐标形式对  $(D_j)'$  进行约束。

#### b) 区间变量编码

在每个  $(D_j)'$  存在一个待决策节点  $((x_j)^t, (y_j)^t)$ , 采用计算机随机编码,在  $(D_j)'$  中分别进行决策变量的初始区间编码,如式(15)所示。

$$\begin{aligned} ((x_1)^t, (y_1)^t)^0 &= (([x_1]^0, \bar{[x_1]}^0], [(y_1)^0, \bar{(y_1)}^0]) \in (D_1)' \\ ((x_2)^t, (y_2)^t)^0 &= (([x_2]^0, \bar{[x_2]}^0], [(y_2)^0, \bar{(y_2)}^0]) \in (D_2)' \\ &\vdots \\ ((x_j)^t, (y_j)^t)^0 &= (([x_j]^0, \bar{[x_j]}^0], [(y_j)^0, \bar{(y_j)}^0]) \in (D_j)' \\ &\vdots \\ ((x_n)^t, (y_n)^t)^0 &= (([x_n]^0, \bar{[x_n]}^0], [(y_n)^0, \bar{(y_n)}^0]) \in (D_n)' \end{aligned} \quad (15)$$

令:  $g^0 = (((x_1)^t, (y_1)^t)^0, ((x_2)^t, (y_2)^t)^0, \dots, ((x_n)^t, (y_n)^t)^0)$  为决策问题的区间初始解,则对应一个  $\min((Z^0)^t)^0$  的目标函数初始解。

#### c) 生成区间初始种群

在  $(D_j)'$  随机产生一系列区间节点集  $((x_j)^t, (y_j)^t)^t$ , 表示形成  $t$  个初始种群集,对应为  $G = (g^1, g^2, \dots, g^t)$ , 设定  $g^0$  状态下  $\text{gen} = 0$ , 总的进化代数  $N$  以及每轮迭代次数  $M_N$ 。

#### d) 区间适应度函数的构建

重心法理念下的物流网络节点决策是一个系统性的网络

问题,追求系统总成本最低,因此可定义适应度函数:

$$\text{fit}(Z((x_j)^t, (y_j)^t)) = \frac{1}{Z((x_j)^t, (y_j)^t)} \quad (16)$$

由于目标函数运算结果为区间值,则可转换为

$$\text{fit}(Z((x_j)^t, (y_j)^t)) = \left[ \frac{1}{\min Z}, \frac{1}{\max Z} \right] \quad (17)$$

#### e) 初始区间迭代

在  $g^0$  状态下,对应各待决策区域  $(D_j)'$  中的一系列初始解以及目标函数的初始区间解  $\min((Z^1)^t)^0$ 。将结果代入式(14)中,迭代后得到新一轮的节点及目标函数决策结果:

$$(((x_1^1)^t, (y_1^1)^t)^0, ((x_2^1)^t, (y_2^1)^t)^0, \dots, ((x_n^1)^t, (y_n^1)^t)^0) \min((Z^1)^t)^0$$

#### f) 运算结果检验

新的运算结果区域归属检验,将  $((x_j^1)^t, (y_j^1)^t)^0$  与其所对应的区域  $(D_j)'$  进行区间比较,若  $((x_j^1)^t, (y_j^1)^t)^0 \subseteq (D_j)'$ , 则运算继续;若  $((x_j^1)^t, (y_j^1)^t)^0 \cap (D_j)' = \emptyset$ , 则取  $g^t \in G$  (转 c); 若两者表现为相交关系,则按 2.1 节中取交集,得到新的区间坐标  $((x_j^1)^t, (y_j^1)^t)^0 \cap (D_j)' = ((x_j^1)^t, (y_j^1)^t)^0 \cap (D_j)'$ , 运算继续。

#### g) 区间解的比较及判定

比较两区间解  $\min((Z^0)^t)^0$  与  $\min((Z^1)^t)^0$ , 按 2.1 节中区间数的三种关系进行比较,若  $\min((Z^0)^t)^0 < \min((Z^1)^t)^0$ , 则表示原始解为最优区间解,第一代进化结束(转 c); 反之,转入下一轮迭代,直至完成  $M_1$  (代表进化第一代中要求的迭代次数)次要求(转 c)继续。

#### h) 区间遗传复制与选择

按适应度函数从大到小的顺序比较排序,使得重排后的  $g^1$  性能最优,根据排序的结果定义区间遗传选择概率  $(p_s)^t \in [0, 1]$  进入到下一代  $\text{gen} = \text{gen} + 1$ 。

#### i) 区间遗传交叉重组

采用启发式区间遗传交叉,在概率区间  $[0, 1]$  中选择小于  $(p_s)^t$  对应的区间随机数  $s^t$  进行两两配对,产生新的随机数  $(p_w)^t$ 。配对操作如下:

$$\begin{aligned} (g^1)' &= (p_w)^t g^1 + (1 - (p_w)^t) g^2 \\ (g^2)' &= (1 - (p_w)^t) g^1 + (p_w)^t g^2 \end{aligned} \quad (18)$$

其中:  $g^1, g^2$  为当前两个个体,而  $(g^1)', (g^2)'$  为交叉操作后产生的两个新的个体,则可知  $(p_w)^t$  为  $[0, 0.5]$  间的区间概率数。

#### j) 区间遗传变异操作

定义一个区间遗传变异概率值  $(p_u)^t \in [0, 1]$  在区间随机  $s^t$  中选择小于  $(p_u)^t$  的随机数对应的个体,随机产生一个方向  $\lambda$  进行如下变异:

$$(g^2)'' = (g^1)' + L\lambda \quad (19)$$

其中:  $(g^2)''$  为变异后的新个体  $L$  为一正数。

#### k) 自然选择与删除

将新的个体  $(g^2)''$  代入适应度函数式(17)进行重新排序,排在最后的染色体性能最差,将其用上一代最优染色体代替。检查群体中是否存在相同的染色体,若存在,则保留其中一个,删除其他染色体(转 b)。

#### l) 结果输出

令  $\text{gen} = \text{gen} + 1$  进行进化操作,当  $\text{gen} = N$  时,运算停止,确定当前群体中的第一个染色体  $g$  中对应的求解结果为最终解,且其适应值  $\text{fit}$  的倒数  $1/\text{fit}$  为目标函数的最优区间解;若  $\text{gen} < N$ , 则转 d) 继续。

## 4 算例仿真

某物流企业要在一个区域范围中构建自己物流网络体系,通过事先的市场调查以及需求分析,可以掌握各需求网点具体位置与物流量的需求区间,期望在运行费用最小情况下对配送中心进行选址。已知资料为:需求网点数目  $q=12$ ,待决策的配送中心数目  $n=2$  且其所属区域范围已知,其他参数标定如下:

按照求解模式,首先设定一个平面坐标体系,如图1所示,整体区域  $D$  的范围标定为  $(0,0) \sim (100,100)$ ,待决策节点分属两个片区,图中以虚线分隔,同时还存在九个小区域,是不能进行节点选择的区域,图中以灰色填充表明,且该九个小区域的区域范畴可以用平面曲线模型表达,是已知的,则通过区间交叉比较,可得到两个新的决策区域  $(D_1)'$  与  $(D_2)'$ 。按照区间迭代遗传算法对问题求解,决策点1对应的坐标区间为  $((x_1)', (y_1)') = ([40.2, 46.3], [24.5, 28.7])$ ,决策点2在不考虑区域障碍情况下的求解区间为  $([38.5, 42.7], [78.4, 81.1])$ ,但由于该区间有一部分与已存在的障碍区间重合,如图1中黑色阴影区域,则在区间交叉与重合模式下,对该部分进行剔除,得到决策点2的最终坐标区间为

$$((x_2)', (y_2)') = ([38.5, 40.4], [78.4, 81.1]) \cup ([40.4, 42.7], [78.4, 79.7])$$

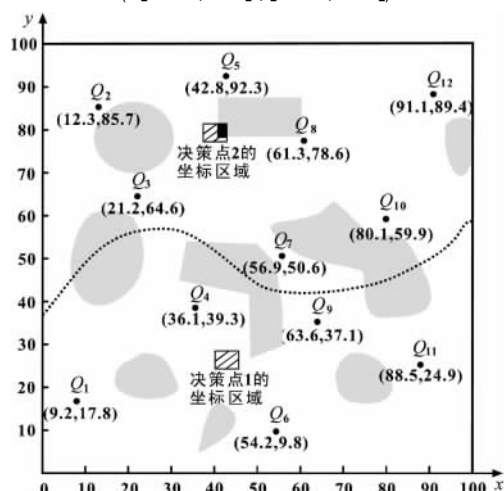


图1 算例求解结果

各决策节点与需求网点关系如表1所示。

表1 各决策节点与需求网点关系

节点	决策节点1		决策节点2		对应坐标
	区间费率	区间需求	区间费率	区间需求	
网点 $Q_1$	[1.7, 2.0]	[56, 65]	[2.3, 2.7]	[15, 19]	[9.2, 17.8]
网点 $Q_2$	[2.3, 2.6]	[14, 20]	[1.3, 1.6]	[54, 62]	[12.3, 85.7]
网点 $Q_3$	[1.4, 1.6]	[38, 45]	[1.0, 1.3]	[47, 53]	[21.2, 64.8]
网点 $Q_4$	[0.9, 1.1]	[80, 93]	[1.6, 1.8]	[21, 27]	[36.1, 39.3]
网点 $Q_5$	[2.5, 2.8]	[10, 17]	[0.7, 1.0]	[72, 80]	[42.8, 92.3]
网点 $Q_6$	[1.6, 1.9]	[70, 79]	[2.0, 2.4]	[8, 13]	[54.2, 9.8]
网点 $Q_7$	[1.1, 1.4]	[48, 56]	[1.3, 1.5]	[32, 38]	[56.9, 50.6]
网点 $Q_8$	[2.0, 2.5]	[23, 30]	[0.8, 1.1]	[59, 67]	[61.3, 78.6]
网点 $Q_9$	[1.3, 1.8]	[50, 61]	[1.4, 1.7]	[32, 38]	[63.6, 37.1]
网点 $Q_{10}$	[1.6, 2.1]	[34, 45]	[1.2, 1.4]	[47, 56]	[80.1, 59.9]
网点 $Q_{11}$	[1.3, 1.9]	[29, 37]	[2.8, 3.0]	[20, 25]	[88.5, 24.9]
网点 $Q_{12}$	[2.8, 3.4]	[14, 19]	[1.5, 1.7]	[49, 58]	[91.1, 89.4]

图2为目标函数求解区间值与进化代数关系,阴影带为  $Z'$  最小值的区间变动范围。结果显示,在遗传进化策略下,最终目标函数的区间值稳定在区间  $[2487.3, 2785.4]$  中,表明在区间不确定性需求下,决策节点坐标相应一定的区间范围中变动,同时能够求得目标函数的最小值。表2为各种不同算法对本文算例的测试比较。在不考虑不确定性的情况下,以

表1给出的区间需求中选择某一确定值,采用直接迭代法<sup>[1,4]</sup>以及遗传算法<sup>[5]</sup>求解,得到的结果为确定性的目标函数最小值与决策节点坐标;而通过随机<sup>[6]</sup>与模糊<sup>[7]</sup>策略的求解,尽管能够考虑到不确定性影响,但其结果同样也是唯一精确解。因此,通过比较分析,可知本文采用的区间迭代遗传算法对不确定物流节点决策求解具有区间最优解的优势,既能充分考虑物流网络需求的不确定性变化,同时能够为决策者提供一定的决策选择空间,避免精确坐标选址不可替代性的弊端。

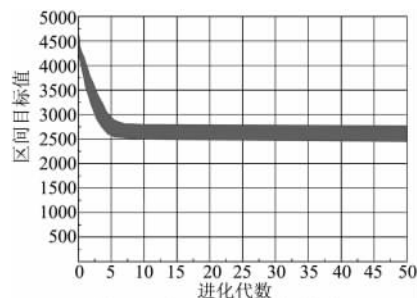


图2 区间目标值进化关系

表2 算法比较结果

算法	min Z	决策点1坐标	决策点2坐标
直接迭代法	2 654.9	(43.8, 26.7)	(39.6, 79.5)
遗传算法	2 587.4	(43.2, 26.2)	(39.8, 80.1)
随机规划	2 612.5	(42.9, 25.8)	(38.7, 80.2)
模糊规划	2 638.4	(42.5, 26.4)	(38.9, 79.8)

## 5 结束语

本文设计区间迭代遗传算法,对不确定性物流节点决策问题进行研究,研究成果主要有:

- 以区间形式约束物流网络需求的不确定性变量,构建基于重心法的连续型物流网络区间节点决策模型;
- 设计区间迭代遗传算法的求解模式,在算例测试中,与其他算法进行比较分析,体现其优越性。

参考文献:

- [1] 鲁晓春,詹荷生.关于配送中心重心法选址的研究[J].北方交通大学学报,2002,24(6):108-110.
- [2] 邹辉霞,高伟.单配送中心的离散选址模型[J].科技进步与对策,2004,21(1):77-78.
- [3] 王伟,封学军.基于加权 Voronoi 图的连续型物流节点布局优化[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2011,35(6):1103-1107.
- [4] 王宙,魏娜,吴耀华.一种新的连续型多配送中心选址算法[J].物流科技,2011,34(6):71-73.
- [5] 姜大立,杨西龙.易腐物品配送中心连续选址模型及其遗传算法[J].系统工程理论与实践,2003,23(2):62-67.
- [6] SANTOSO T, AHMED S, GOETSCHALCKX M, et al. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 167(1):96-115.
- [7] 王保华,何世伟.不确定环境下物流中心选址鲁棒优化[J].交通运输系统工程与信息,2009,9(2):69-74.
- [8] MOORE R E. Interval arithmetic and automatic error analysis in digital computing[D]. Stanford: Stanford University, 1962.
- [9] 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.
- [10] YOKOTA T, GEN M, LI Yin-xiu, et al. A genetic algorithm for interval nonlinear integer programming problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 1996, 31(3-4):913-917.
- [11] TAKEAKI T, KENICHI I, MITSEO G. Method for solving nonlinear goal programming with interval coefficients using genetic algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 1997, 33(3-4):597-600.

(下转第3732页)

迭代次数下使系统稳定收敛,对于移动机器人的跟踪控制来说,算法收敛的快慢影响其跟踪的效率和精度,所以这对移动机器人的跟踪控制是很不利的。通过比较,改进以后的迭代学习控制算法更具有工程实践意义,推动了移动机器人实时跟踪控制的发展。

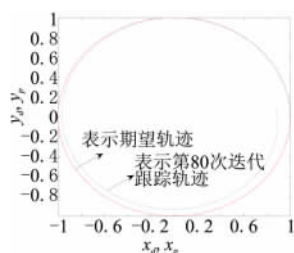


图8 改进前第80次的位置跟踪

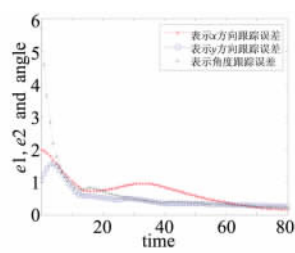


图9 改进前位置和角度跟踪误差随迭代次数的收敛过程

针对离散系统式(7)和(8),为了说明应用 Kalman 滤波方法的迭代学习控制器在轮式移动机器人轨迹跟踪中的效果,在考虑噪声和干扰的情况下,采用迭代学习控制律式(13),取控制器的增益矩阵为  $L_1(k) = L_2(k) = 0.10 \begin{bmatrix} \cos \theta(k) & \sin \theta(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $L_3(k) = [B^T(x_d(t)) \quad I] B(x_d(t))^{-1} B^T(x_d(t))$ , 采样时间为  $\Delta T = 0.001$  s, 迭代次数为 25 次, 每次迭代时间为 2 000 个采样时间。仿真结果如图 10~12 所示。

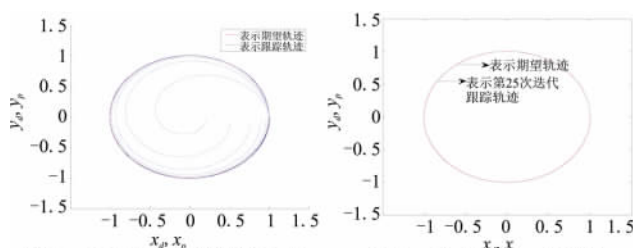


图10 基于Kalman滤波的迭代学习运动轨迹的跟踪过程

图11 基于Kalman滤波的第25次的位置跟踪

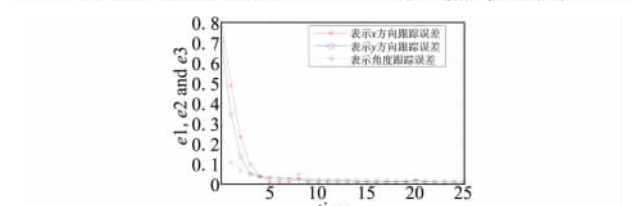


图12 基于Kalman滤波的位置和角度跟踪误差随迭代次数的变化

从图 12 仿真的结果可以看出,虽然存在噪声和干扰,即  $\beta_i(k)$ 、 $\gamma_i(k)$  均不为零,但是通过滤波以后,移动机器人还是能够在有限的时间内有效地跟踪期望的轨迹,而且收敛以后的误差也是很小的。现实当中外界存在各种各样噪声干扰,通过设计一个 Kalman 滤波器,从而对提高移动机器人跟踪控制的抗干扰能力是很有指导意义的。

## 5 结束语

本文利用迭代学习控制方法对轮式移动机器人的轨迹跟踪问题进行了研究,针对机器人系统的重复性动作,在不存在噪声和干扰的情况下,对增益矩阵进行了改进,从而提出了一种新的迭代学习控制律。通过改进前后的比较,可以很容易看出改进以后的迭代学习过程能更快地收敛于期望值,更有利于移动机器人的实时控制,而且误差也很小。在这个基础上,本文又对存在噪声和干扰的轮式移动机器人轨迹跟踪进行了研究,通过把 Kalman 滤波应用于迭代学习控制算法,使移动机器人的轨迹跟踪具有了一定的鲁棒性和适应性,但是算法的优化问题还有待于进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 于少娟,齐向东,吴聚华. 迭代学习控制理论及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 孙明轩,黄宝健. 迭代学习控制[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [3] LEE F S, CHIEN C J, WANG J C. Trajectory tracking of piezoelectric actuators using statecompensated iterative learning control[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 23(8): 555-567.
- [4] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [5] NORRLOF M. An adaptive iterative learning control algorithm with experiments on an industrial robot[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2002, 18(2): 245-251.
- [6] SHAO Hua, CHEN Yi-mei. A modified trajectory tracking algorithm based on ILC for mobile robots[C] // Proc of International Conference on Intelligent Computing and Cognitive Informatics. 2010: 312-315.
- [7] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [8] BUTCHER M, KARIMI A. Iterative learning control using stochastic approximation theory with application to a mechatronic system[C] // Lecture Notes in Control and Information Sciences. 2010: 49-64.
- [9] 阎世梁,张华,王银玲,等. 极坐标下基于迭代学习的移机器人轨迹跟踪控制[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 2017-2020.
- [10] 郝晓弘,胡振邦,朱洁,等. 迭代学习控制的研究现状[J]. 微型机与应用, 2010, 29(11): 1-4.
- [11] 王晔,刘山. 基于逆系统的变轨迹迭代学习控制[J]. 科技通报, 2010, 26(1): 120-124.
- [12] FREEMAN C T, LEWIN P L, ROGERS E, et al. Iterative learning control applied to a gantry robot and conveyor system[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2010, 32(3): 251-264.

(上接第3716页)

- [12] TAKEAKI T, TAKAO Y. Optimal design problem of system reliability with interval coefficient using improved genetic algorithms[J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 37(1-2): 145-149.
- [13] BHUNIA A K, SAHOO L, ROY D. Reliability stochastic optimization for a series system with interval component reliability via genetic algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation, 2010, 216(3): 929-939.
- [14] JIRI R. An algorithm for computing the hull of the solution set of interval linear equations[J]. Linear Algebra and Its Applications, 2011, 435(2): 193-201.

- [15] LAXMINARAYAN S, ASOKE K B, PARMAD K K. Genetic algorithm based multi-objective reliability optimization in interval environment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62(1): 152-160.
- [16] 孟祥海,苗鑫. 连续与离散相结合的单一物流中心选址方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1055-1058.
- [17] 李昌兵,杜茂康,曹慧英. 基于层次遗传算法的物流配送中心选址策略[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(1): 57-59, 78.
- [18] 李利华,符卓,胡正东. 连续型物流设施选址的区间决策模型及算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(6): 107-113.