

文章编号:1006-2106(2015)07-0100-06

基于 PSO 的城市轨道交通应急救援站选址研究^{*}

聂鑫路¹ 魏庆朝^{2**}

(1. 重庆市轨道交通建设办公室, 重庆 400014; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要:研究目的:目前我国越来越多的城市迈入了城市轨道交通网络化运营阶段,这对城市轨道交通网络的应急救援体系提出了更高要求,其中,应急救援站是救援体系的关键。为此,本文提出以滚动式多步求解的方法建立粒子维度自适应模型,求解城市轨道交通网络应急救援站多目标选址问题,并采用 Matlab 与数字地图相结合的方式,计算覆盖北京地铁全网的应急救援站最少数量及最佳位置分布。

研究结论:(1)本文提出以滚动式多步求解方式来改进传统的粒子群聚类算法,改进后的算法能够自适应地求解聚类簇数;(2)应用改进后的粒子群算法能自动求解不同轨道交通线网中的应急救援站最少数量,且求解结果优于已有相关研究;(3)本文在适应度函数中增设影响权重,可解决选址过程中的多目标约束问题;(4)本文提出的粒子维度自适应方法同样可以用在解决聚类条件相同、类群边界明确的其他类似问题上。

关键词:自适应粒子群;多目标选址;数字地图;城市轨道交通网络;应急救援站

中图分类号:U231 文献标识码:A

Research on the Location of Emergency Rescue Stations for Urban Rail Transit Based on the PSO

NIE Xin-lu¹, WEI Qing-chao²

(1. Chongqing Urban Rail Transit Construction Management Office, Chongqing 400014, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Research purposes: At present, China has entered a period with a growing number of urban rail transit network operation phases, which puts on a higher demand the emergency rescue system of urban rail transit network, in which the rescue station emergency is key to the rescue system. Therefore, we propose a multi-step approach with rolling solving particle dimension to build adaptive model for solving urban rail transit network multi-objective emergency rescue station location problem, and we also use Matlab with a combination of digital map, to cover the whole of Beijing subway with calculated net minimum number of emergency rescue station and the best location distribution.

Research conclusions: (1) This paper presents improved method for solving multi-step rolling particle swarm optimization clustering algorithm, the improved algorithm can adaptively determine cluster number. (2) The application of the improved particle swarm optimization algorithm, automatic solving different rail transit network in emergency rescue station for a minimum number is better than the existing related research. (3) Adaptive particle swarm optimization proposed in this paper, can also be used to solve the same condition clustering, clustering boundaries clear of similar problems. (4) The impact of this article additional weights in the fitness function solve the selection process of the multi-objective constraint problem.

Key words: adaptive particle swarm optimization; multi objective location; digital map; urban rail transit network;

^{*} 收稿日期:2015-04-15

基金项目:铁道部科技研究开发计划项目(2010G009-F)

^{**} 作者简介:聂鑫路,1982 年出生,男,高级工程师;魏庆朝,1957 年出生,男,教授,博士生导师。

emergency rescue stations

1 研究背景

目前,我国越来越多的城市迈入了轨道交通网络化运营阶段。城市轨道交通多为地下工程,具有封闭、客流量巨大、系统复杂等特点,其抗风险能力较低、安全管理难度大、安全事故影响范围广。当发生灾害事故时,现场缺少大型排危救援设备、救援光线不足、毒气弥漫、温度高等问题较为突出。

北京地铁将车站作为应急救援站,难以存放大型救援设备和物资,并且地铁隧道内没有设置输送应急救援物资和人员的专用通道,救援物资和人员难以利用轨道线路在规定时间内运抵灾害事故现场,因此,有必要为城市轨道交通网络规划或增设基于道路交通运输方式,且不仅限于设置在轨道车站内的应急救援站,以提高城市轨道交通网络的应急救援能力和效率。

城市轨道交通网络中,车站是客流密集区域,也是极其复杂的单位工程之一,其发生事故伤亡的机率最大,在研究中以车站作为应急救援主要需求点是合理的。因此,用最少的应急救援站有效覆盖所有车站,同时,满足及时救援要求是城市轨道交通应急救援站选址的基本原则。既有的针对城市轨道交通应急救援站选址问题的研究仅以轨道车站作为应急救援站的备选点,在实际救援中仍然存在上述问题。已有的求解铁路救援基地的研究以铁路线上的站点作为应急救援站备选点,是基于铁路发车频率低,应急救援列车利用铁路线及时到达救援需求点的方式,但该方式并不适用于发车频率很高的城市轨道交通。因此,本文提出一种基于自适应模型的粒子群算法,用于解决城市轨道交通网络应急救援站多目标选址问题。

2 自适应模型

根据城市轨道交通应急救援站选址的基本原则,救援物资和人员必须在规定时间内到达救援需求点。对一个应急救援站而言,其辐射范围就是应急救援运输工具在规定时间内从救援站到达救援需求点的距离,其辐射区域内包含的救援需求点(轨道车站)数量越多,则该应急救援站的服务对象越多、配置越高、能力越强。因此,可采用粒子群聚类算法求解覆盖全网络需求点的应急救援站最少数量。

传统的粒子群聚类算法均需要事先确定聚类中心数量,这导致粒子以固定维度进行迭代,难以保证聚类效果最佳。对于聚类条件相同、类群边界明确的情况,如城市轨道交通应急救援站选址问题,本文采用滚动

式聚类方法求解多个最优聚类结果,以提高传统粒子群聚类算法在求解城市轨道交通网络应急救援站最少数量时的抗干扰能力和鲁棒性。

2.1 基本原理

基本原理是:初始化粒子群,在搜索空间内搜寻符合既定条件的数据点,并以数据点密度作为适应值。当粒子群迭代收敛后,将数据点密度最高区域内的所有对象存储在外部集中,同时,在搜索空间中删除;重复上述步骤,直至搜索空间为空,以此求得簇的数量,即最佳粒子维度。

2.2 滚动式求解步骤

本文研究的前提是:应急救援物资和人员只通过道路运达轨道交通车站(需求点),运输平均速度与距离主城核心区的远近成正比,即速度越大,相同时间内运输距离越远。搜索空间的数据点密度函数作为搜索粒子的适应度函数,密度适应度函数如式(1)所示:

$$fitness = \frac{N}{\pi d^2} \quad (1)$$

式中 N ——满足搜索条件的数据点数量;

d ——运输距离(km)。

城市轨道交通应急救援站最少数量(粒子维度)滚动求解具体步骤如下:

步骤1:获取城市轨道交通车站的经纬度坐标,构建搜索空间 S 。 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$, 其中, $s_i = (x_i, y_i)$ 为第 i 个车站的位置。

步骤2:将 S 空间按一定长度 L 划分为 $m \times n$ 个子空间,在每个子空间中随机生成粒子经纬度坐标 $p_{ij} = (x_{ij}, y_{ij})$, 以得到搜索空间内较均匀的粒子群初始分布,如式(2)、式(3):

$$x_{ij} = x_{\min} + L(m + rand) \quad (2)$$

$$y_{ij} = y_{\min} + L(n + rand) \quad (3)$$

式中 x_{\min} ——搜索空间经度坐标最小值;

y_{\min} ——搜索空间纬度坐标最小值;

L ——长度近似于 d 对应的经纬度坐标变化量;

m ——搜索空间的经度范围被等分的数量;

n ——搜索空间的纬度范围被等分的数量;

$rand$ ——(0,1)的随机数。

将随机生成的粒子合成初始粒子群 P , 如式(4):

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

同时,初始化速度 V , 如式(5)、式(6):

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \cdots & v_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$v_{ij} = 0.5 \times \text{rands} \quad (6)$$

式中 rands —— $(-1, 1)$ 的随机数。

步骤 3: 迭代更新粒子 p_{ij} 位置、速度 v_{ij} 。

步骤 4: 将本轮迭代结束后的密度最大区域内所有车站位置 $station_n$ 存储在外部集 $station$ 中, 并在搜索空间 S 中删除。

步骤 5: 当搜索空间 S 为空时停止搜寻, 输出外部集 $station$ 。

3 多目标选址模型

3.1 选址影响因素

由于城市轨道交通车站发生事故灾害的概率与车站客流量密切相关, 如客流量大的车站发生事故伤亡的机率大, 则应急救援需求的概率高, 应尽量将应急救援站设置在离客流量大的车站相对较近的位置, 以提高应急救援效率和能力。因此, 城市轨道交通的应急救援站设置不仅要考虑救援时间, 还需将应急救援需求概率作为选址的影响因素之一。根据国家相关标准, 本文将轨道交通车站划分为 4 个等级, 如表 1 所示。

表 1 城市轨道交通车站等级表

车站等级	单日客流量(万人次/d)
特大型站	> 100
大型站	20 ~ 100
中型站	5 ~ 20
小型站	< 5

在算法求解过程中, 可根据车站等级设置不同的影响权重引导粒子搜索方向, 使计算结果更接近实际需求。

3.2 惯性权值自适应

为避免多维度粒子迭代搜寻中容易陷入局部占优的问题, 本文引入占优粒子与其他粒子之间的欧式距离作为调节惯性权值的因子, 动态调整粒子群的全局和局部搜索性能, 得到如下惯性权值自适应公式:

$$w = (w_{\max} - w_{\min}) \times \frac{1 - e^{-od}}{1 + e^{-od}} + w_{\min} \quad (7)$$

式中 od ——占优粒子与其他粒子之间欧式距离(km);

w_{\min} ——惯性权值初始值;

w_{\max} ——惯性权值最终值。

3.3 改进加速因子

为保证粒子群算法初期能够在局部范围内进行比较细致的搜索, 不必直接向全局最优位置快速收敛, 而

在算法后期则尽量加快算法收敛速度, 本文引用了文献[8]提出的加速因子调整方法, 如式(8)、(9):

$$c_1 = (c_{1e} - c_{1s}) \frac{\text{CurIter}}{\text{MaxIter}} + c_{1s} \quad (8)$$

$$c_2 = (c_{2e} - c_{2s}) \frac{\text{CurIter}}{\text{MaxIter}} + c_{2s} \quad (9)$$

式中 MaxIter ——最大迭代次数;

CurIter ——当前迭代次数;

c_{1s} ——初始值;

c_{1e} ——最终值;

c_{2s} ——初始值;

c_{2e} ——最终值。

3.4 适应度函数

本文计算实例依据的是北京地铁网络, 据统计, 北京地铁网络中目前还没有日客流量超过 100 万的特大型车站。因此, 为计算实例设置了以下影响权重参数, 如表 2 所示。

表 2 轨道交通等级影响权重表

车站等级	单日客流量(万人次/d)	影响权重
大型站	> 20	0.6
中型站	5 ~ 20	0.3
小型站	< 5	0.1

其中, 各影响权重数值和为 1。据此, 在适应度函数中增设影响权重形成式(10):

$$f_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w \times t_{ij} \quad w \in \{0.6, 0.3, 0.1\} \quad (10)$$

式中 k ——粒子种群大小;

w ——影响权重;

n ——粒子维度;

m ——粒子到各数据点(车站位置)的时间 t 小于既定时间的个数。

3.5 算法描述

设粒子种群规模为 k , 则 $p_k = \{p_{k1}, p_{k2} \cdots p_{kn}\}$, 其中, n 为求得的粒子维度, $p_{kn} = (x, y)$ 为单个粒子经纬度坐标。初始化粒子群, 如式(11)所示:

$$P = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_k \end{pmatrix} \quad (11)$$

鉴于外部集中存储的每个簇均表示一个应急救援站所在区域, 为提高算法效率, 粒子群初始化可借鉴前一步粒子维度求解相关结果, 以簇的边界作为粒子初始化边界, 先在簇内随机生成 n 个经纬度坐标, 如式(12)、(13), 然后将 k 个簇生成的 $k \times n$ 个经纬度坐标合为 P 。

$$x_{kn} = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) \times rand \quad x \in station_n \quad (12)$$

$$y_{kn} = y_{\min} + (y_{\max} - y_{\min}) \times rand \quad y \in station_n \quad (13)$$

式中 x_{\min}, x_{\max} ——每个簇经度坐标最小值、最大值;

y_{\min}, y_{\max} ——每个簇纬度坐标最小值、最大值;

$rand$ ——(0,1)的随机数。

初始化速度 V ,如式(14)所示:

$$V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_k \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中 v_k ——第 k 个粒子的速度。

计算初始粒子群适应度值 $ibestfitness$,提取个体最优适应度值和全局最优适应度值 $gbestfitness$ 。

利用速度更新公式和约束条件更新粒子速度,如果 $v_k > v_{\max}$,则 $v_k = v_{\max}$;如果 $v_k < v_{\min}$,则 $v_k = v_{\min}$ 。为避免粒子在迭代过程中飞出搜索空间,以全网区域边界作为粒子位置限制条件。

计算 p_k 适应度值,并与 $ibestfitness$ 或 $gbestfitness$ 分别比较,若占优,则用当前 p_k 的适应度值替换 $ibestfitness$ 或 $gbestfitness$;否则,保持 $ibestfitness$ 或 $gbestfitness$ 不变。

当群体适应度值方差 σ^2 判断粒子群趋向收敛或达到最大迭代次数,结束迭代;否则,返回第2步继续迭代求解。

4 算例

目前,北京运营线路18条(如图1所示),全网车站总数为337座(换乘站重复计数),全网单日平均客流量近千万人次。本文以北京城市轨道交通网络为例,借助 Matlab 进行了实例计算。

4.1 获取数字地图数据

利用百度数字地图提供的坐标拾取器,获取北京地铁网络所有车站的经纬度坐标存储在 excel 文档中,并用 Matlab 程序获取车站坐标数据生成地铁网络图(换乘站重复计数),图1为截止2014年年底的北京地铁网络图,其中,圆圈表示车站。

为使计算结果与实际情况契合度较高,采用 Matlab 与 Java 混合编程的方式来调用百度数字地图 API,在计算过程中获取数字地图上粒子位置到救援需求点的最短时间,程序关键代码如下:

```
//设置连接百度地图距离计算 API 的地址
```

```
URL = java.net.URL( http://api.map.baidu.com/
direction/v1/routematrix? output = json&origins =
origin&destinations = destination );
```

```
//打开地址
```

```
Is = open Stream ( URL );
```

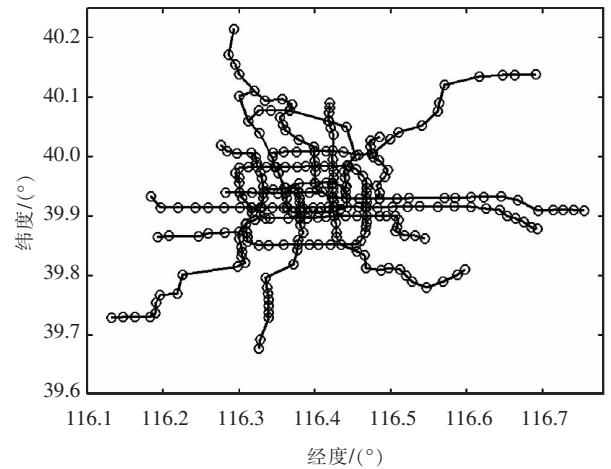


图1 Matlab 模拟的北京地铁线网图

```
//创建输入流
```

```
Readis = java.io. InputStreamReader ( Is );
```

```
//创建读取缓冲
```

```
Time = java.io. BufferedReader ( Readis );
```

```
//读取返回值赋给时间变量
```

```
T = readLine( Time );
```

4.2 基本参数设置

设应急救援站到需求点时间小于10 min,粒子群规模为 $k=20$ 。

惯性权值参数 $w_{\min}=0.4, w_{\max}=0.9$ 。

设加速因子参数 $c_{1s}=2.75, c_{1e}=1.25, c_{2s}=0.5, c_{2e}=2.25$ 。

设粒子速度边界为 $(-0.005, 0.005)$ 。

设求解粒子维度的单次最大迭代次数为50次;多目标选址计算的迭代次数为3000次。

4.3 粒子维度求解结果

采用本文提出的滚动式多步求解方式建立粒子群优化模型。经计算,求得覆盖北京地铁全网337座车站(需求点)至少需要22个应急救援站,其对应的22个簇分布情况如图2所示,其中,多边形表示簇的区域边界。

已有的研究结果以当时北京地铁网络的189座车站为计算依据,采用P中心模型、响应机制模型等求得应急救援站数量为25个。由此可见,本文通过粒子群算法滚动求解的效果明显优于已有研究,有利于以更少的资金投入实现轨道网络应急救援需求点的全覆盖。

4.4 多目标选址结果

以外部集中的簇的个数作为应急救援站的最少个数,即粒子维度为22,进行应急救援站的多目标选址计算。图3为选址计算迭代过程中适应值的变化情

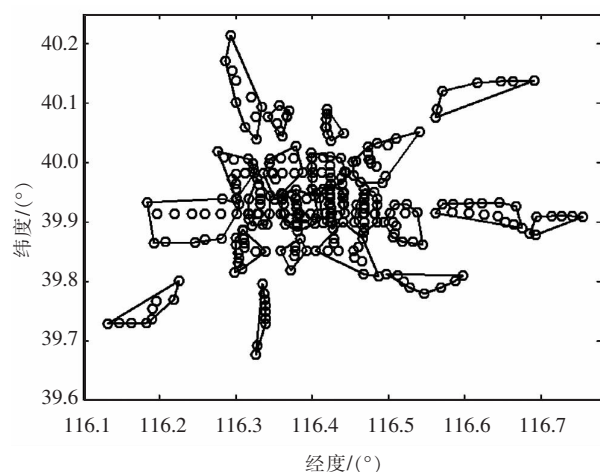


图2 滚动式求解的22个簇分布图

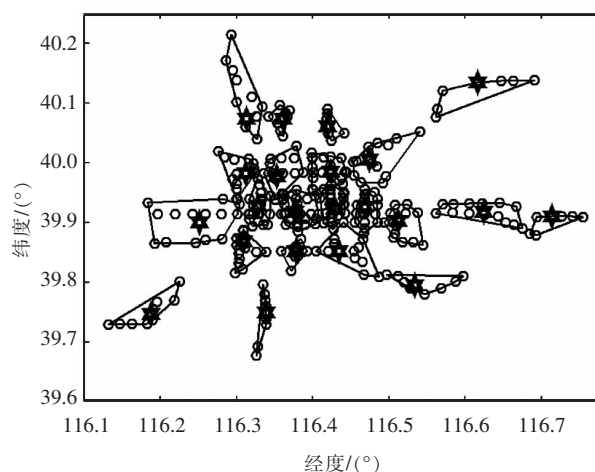


图4 22个应急救援站最佳位置图

况,即适应值在迭代次数大于2 000次后趋于收敛。22个应急救援站最佳位置的计算结果如图4中的六角星所示,其中,部分应急救援站位置正好位于线网中的车站位置,这说明需要扩大车站建设用地,增设应急救援站,以存放救援运输工具、大型救援设备和救援物资。

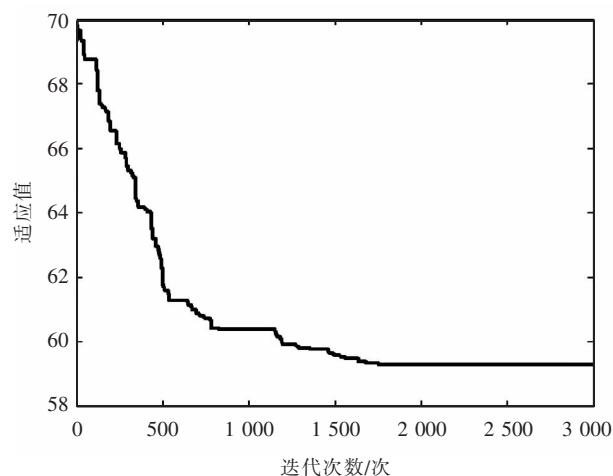


图3 迭代过程中适应值的变化情况

本文将22个簇的中心粒子位置与计算的应急救援站最佳位置放在同一张图中进行了比较分析,如图5所示,圆为车站(2个圆紧挨重叠时为换乘车站),菱形为簇中心位置,六角星为应急救援站最佳位置。

根据相关资料,建国门站日客流量约21万人次,东单站日客流量约15万人次,雍和宫站日客流量约12万人次,东直门和崇文门站日客流量约10万人次。通过设置影响权重计算后,图5中的应急救援站最佳位置距离客流量较大(需求概率较大)的东单站、建国

门站较近,更符合实际需求情况。

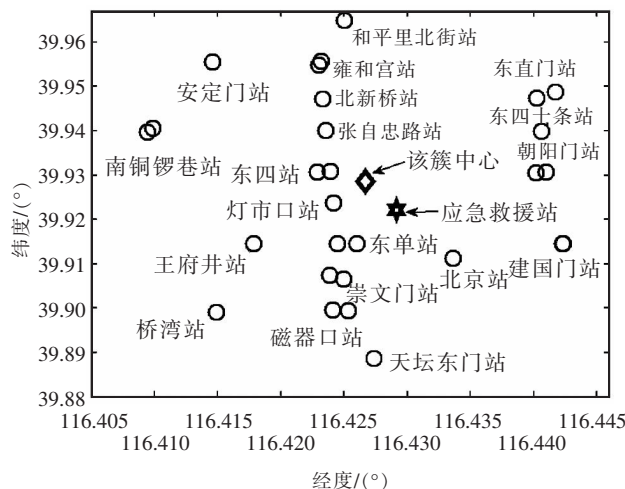


图5 应急救援站最佳位置计算前后对比图

5 结论

(1)城市轨道交通应急救援站选址属于大规模、多目标求解问题。本文采用的滚动式多步求解粒子群聚类算法能自适应地求解聚类簇数。

(2)自适应粒子群算法能自动求解不同轨道交通线网中的应急救援站最少数量,且求解结果优于已有相关研究。

(3)从算例的效果来看,本文提出的自适应粒子群算法同样可以用在解决聚类条件相同、类群边界明确的其他类似问题上。

(4)通过在粒子群算法的适应度函数中设置影响权重参数,有效解决了计算过程中的多目标约束问题,使计算结果更契合实际需求。

参考文献:

- [1] 孙晓临. 城市轨道交通网络应急救援站设置与资源配备优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
Sun Xiaolin. Optimization Research on Emergency Rescue Stations Siting and Resources Settings of Urban Rail Transit Network [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [2] 易蕉,高岩. 城市轨道交通网路化应急资源配置[J]. 中国集体经济,2013(13):31-33.
Yi Jiao, Gao Yan. Emergency Rescue Stations Resources Settings of Urban Rail Transit Network [J]. China Collective Economy, 2013(13):31-33.
- [3] 柴干,冉旭,张晓春. 基于地点成本的交通应急救援设施优化选址方法[J]. 中国矿业大学学报,2014(5):944-949.
Chai Gan, Ran Xu, Zhang Xiaochun. Location Cost Based Method for Traffic Rescue Facility Location Determination and Optimization[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014(5):944-949.
- [4] 吴艳华. 铁路救援基地选址模型与应用研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2012.
Wu Yanhua. Research on Model and Application of Railway Rescue Center Location [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2012.
- [5] 樊博. 基于空间聚类挖掘的城市应急救援机构选址研究[J]. 管理科学学报,2008(3):16-28.
Fan Bo. Spatial Clustering Mining Method for Site Selection Problem of Emergency Response Center [J]. Journal of Management Sciences in China, 2008(3):16-28.
- [6] 龚彦峰. 向莆铁路青云山隧道紧急救援站设计研究[J]. 铁道工程学报,2014(2):83-87.
Gong Yanfeng. Research on Design of the Emergency Rescue Station of Qingyunshan Tunnel in Xiangtang-putian Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(2):83-87.
- [7] 瞿斌,陆柳丝. 种群规模自适应粒子群在配送中心连续型选址中的应用[J]. 运筹与管理,2013(3):102-108.
Qu Bin, Lu Liusi. Application of Swarm Size Adaptive Particle Swarm Optimization to Continuous Location of Distribution Center [J]. Operations Research and Management Science, 2013(3):102-108.
- [8] Ratnaweera A, Halgamuge SK, Watson HC. Selforganizing Hierarchical Particle Swarm Optimizer with Time-varying Acceleration Coefficients. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004(3):240-255.
- [9] 张长胜,孙吉贵,欧阳丹彤. 一种自适应离散粒子群算法及其应用研究[J]. 电子学报,2009(2):299-304.
Zhang Changsheng, Sun Jigui, Ouyang Dantong. A Self-Adaptive Discrete Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2009(2):299-304.
- [10] 陈曦. 离散粒子算法的改进及其应用研究[D]. 合肥:安徽大学,2014.
Chen Xi. Improvement of Binary Particle Swarm Optimization and its Application [D]. Hefei: Anhui University, 2014.
- [11] 郑友莲,樊俊青. 基于密集距离的多目标粒子群优化算法[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2008(6):141-144.
Zheng Youlian, Fan Junqing. Crowding Measure Based Multi-objective Particle Swarm Optimization [J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2008(6):141-144.
- [12] 章恩泽,吴益飞,陈庆伟. 一类区间多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策,2014(12):2171-2176.
Zhang Enze, Wu Yifei, Chen Qingwei. Particle Swarm Optimization Algorithms for Interval Multi-objective Optimization Problems [J]. Control and Decision, 2014(12):2171-2176.
- [13] 盖文妹,蒋仲安,邓云峰,等. 应急救援物资车辆运输路线多目标优化[J]. 北京科技大学学报,2014(10):1384-1393.
Gai Wenmei, Jiang Zhongan, Deng Yunfeng, etc. Multi-objective Route Optimization of Transporting Emergency Goods and Materials for Rescue [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014(10):1384-1393.
- [14] 陆秋琴,和涛. 基于粒子群算法城市救援设施地址选择[J]. 科技管理研究,2011(7):213-216.
Lu Qiuqin, He Tao. Select the Address of Rescue Facilities in Cities Based on POS [J]. Science and Technology Management Research, 2011(7):213-216.
- [15] 柴干,冉旭,张晓春. 基于地点成本的交通应急救援设施优化选址方法[J]. 中国矿业大学学报,2014(9):944-949.
Chai Gan, Ran Xu, Zhang Xiaochun. Location Cost Based Method for Traffic Rescue Facility Location Determination and Optimization [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014(9):944-949.
- [16] 李刚. 基于网络中心性的城市轨道交通应急救援站选址研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
Li Gang. Research on Location of Urban Rail Transit Emergency Rescue Stations Based on Network Centrality [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.