

# 充电中断情景下电动汽车充电站两阶段 多目标区间选址优化决策

孙秉珍<sup>1†</sup>, 杨佳楠<sup>1</sup>, 白军成<sup>1</sup>, 楚晓丽<sup>1,2</sup>, 王 婷<sup>1</sup>, 陈香堂<sup>3</sup>

(1. 西安电子科技大学 经济与管理学院, 西安 710126; 2. 广州中医药大学第二附属医院 中医药大数据研究团队, 广州 510260; 3. 温州大学 瓯江学院经济与管理学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 考虑到充电站选址用户需求量的不确定性和突发状况的复杂性特点,以充电站选址服务效益最好、充电站风险最小以及“预选址-增建选址”两阶段经济成本最低为目标,基于传统  $p$ -median 模型和多目标应急选址模型,构建两阶段多目标区间  $p$ -median 模型. 第1阶段在需求和设施损坏存在不确定因素的情况下,基于不确定需求模型模拟充电站遭遇突发情景下的不同需求量,构建出基于  $p$ -median 的“预选址”模型;第2阶段针对瘫痪情景发生后的信息,建立一种反应式修复调整策略的“增建选址”模型. 引入区间模糊集理论对模型进行转换,利用免疫优化算法对模型进行求解分析,得到充电中断情景下的充电站选址最优方案. 最后,以西安市某区域为例,验证模型的可行性与有效性,为充电中断情境下电动汽车充电站科学选址提供了必要的决策参考和支持.

**关键词:** 电动汽车; 充电站选址; 多目标区间  $p$ -median 模型; 免疫优化算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1269

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 孙秉珍, 杨佳楠, 白军成, 等. 充电中断情景下电动汽车充电站两阶段多目标区间选址优化决策[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 1005-1014.

## A two-stage multi-objective interval location optimization decision of electric vehicle charging station under charging interruption scenario

SUN Bing-zhen<sup>1†</sup>, YANG Jia-nan<sup>1</sup>, BAI Jun-cheng<sup>1</sup>, CHU Xiao-li<sup>1,2</sup>, WANG Ting<sup>1</sup>, CHEN Xiang-tang<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, Xidian University, Xi'an 710126, China; 2. Traditional Chinese Medicine Big Data Research Team, The Second Affiliated Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510260, China; 3. School of Economics and Management, Wenzhou University Oujiang College, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** This paper combines the location decision-making problem of charging station, considering the uncertainty of user demand and the complexity of emergency situation, by regarding the best charging station location service efficiency, charging station risk minimum and "pre location and additional location" two-stage economic cost minimum as the goal. Based on the traditional  $p$ -median model and the multi-objective emergency location model, a two-stage multi-objective interval  $p$ -median model is constructed. In the first stage, there are uncertain factors in demand and facility damage, a "pre location" model based on  $p$ -median is constructed depends on the uncertain demand model to simulate the different demand of charging station in the emergency situation; in the second stage, a "additional location" model of the reactive repair adjustment strategy is established according to the information after the paralysis scenario. The interval fuzzy set theory is introduced to transform the model, and the immune optimization algorithm is used to solve and analyze the model, so as to get the charging station optimal location scheme under the charging interruption situation. Finally, taking a certain area of Xi'an as an example, the paper verifies the feasibility and effectiveness of the model, so as to provide necessary decision-making reference and support for the scientific location of electric vehicle charging station under the situation of charging interruption.

**Keywords:** electric vehicles; location of charging pile; multi-objective interval  $p$ -median model; immune optimization algorithm

收稿日期: 2020-09-11; 录用日期: 2021-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071152, 71571090, 81774218); 西安市科技计划软科学研究项目(XA2020-RKXYJ-0086); 陕西省高校青年创新团队项目(2019); 广东省教育厅基金项目(2018GWQNCX050); 浙江省自然科学基金项目(LY20G010007).

责任编辑: 郭戈.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: bzsun@xidian.edu.cn.

## 0 引言

在国家大力倡导节能环保、追求绿色发展的背景下,大力发展具有零污染、低噪声等特点的电动汽车已是必然趋势. 据统计,2017年全球电动汽车总销量突破333万辆,与2016年相比,增幅达26%. 截至2019年6月底,中国新能源汽车保有量达344万辆,同比增长72.9%,其中纯电动汽车保有量达281万辆,占新能源汽车总量的81.7%. 而充电站作为新能源电动汽车配置的关键环节,科学的选址布局对降低电动汽车运营成本至关重要. 以往关于电动汽车充电桩选址侧重于考虑地价成本、电动车用户需求量以及电价成本等;事实上,现实中可能存在由于未知因素导致充电中断而引发充电桩瘫痪,导致事故充电站选址附近电动汽车运营受到严重影响. 本文考虑到电动汽车行驶安全距离以及充电中断前后电动汽车需求和成本的变动,给出充电中断情景下充电站选址优化决策模型与方法.

现如今,电已成为人们生活中密不可分的一部分. 突发的大面积停电事故将给人民生活和工业生产带来灾难性影响,也会造成供水、交通、通信、金融、商业服务等相关行业和领域的运行瘫痪. 2019年8月9日,英国电网发生大规模停电事故,事故造成英国包括伦敦在内的部分重要城市出现停电现象,对大约100万人口的用电问题产生影响<sup>[1]</sup>. 深圳供电局在2018年5月19日采取了错峰用电的措施,这次的错峰用电影响到了深圳共465个充电站的供电,影响将近1500台纯电动出租车的正常充电运行. 由此可见,科学的选址方案不仅能提升突发灾难性事故的应急效率、减少突发情况下的损失,还能合理分配城市配电资源,降低应急成本,实现城市电力资源高效集约利用. 因此,本文结合传统应急决策选址方法,对城市电动汽车充电站选址问题进行划区域研究,具有重要的现实意义.

国内外学者针对应急设施选址可靠性问题进行了大量研究,结合普通选址问题可将应急选址问题分为3种模型:即最大覆盖模型、 $p$ -center模型、 $p$ -median模型. 其中,覆盖模型的特点是以最少的设施覆盖所有需求点或者是寻找覆盖最大比例的需求点; $p$ -center模型体现了公平的思想,其目标函数是以优化需求点与设施之间的最大距离为目标; $p$ -median模型主要是寻找消费者出行总成本最小化目标下的设施最佳选址地点. 不同的目标使这3类模型可适用于不同类型的突发事件<sup>[2]</sup>,这些问题最早于20世纪六七十年代被系统提出. 而覆盖模型中的最大覆盖模型

被证明为最有用的选址模型之一. 最初的最大覆盖模型是由Church等<sup>[3]</sup>提出的,他们将服务站最优选址点限制在网络节点上. 王宁等<sup>[4]</sup>在此基础上,利用覆盖率和消防响应损失成本结合覆盖模型,构建消防站选址的多目标选址覆盖模型,提升城市消防应急能力、降低消防响应成本. 葛春景等<sup>[5]</sup>根据覆盖模型的特点,引入最大临界距离和最小临界距离,建立了多重数量和质量覆盖模型. 朱建明等<sup>[6]</sup>在覆盖模型的基础上,构建以时效性、均衡性和鲁棒性为核心的评价体系,进而建立了应急设施的多目标优化模型. 上述覆盖模型是典型的点覆盖模型,而以公平性为特点的 $p$ -center模型以及该模型的鲁棒性优化问题也受到了学者的关注,例如:杜博等<sup>[7]</sup>在传统 $p$ -center模型的基础上,提出了一种两阶段鲁棒 $p$ -center优化模型进一步修复和调整应急设施布局. 刘慧等<sup>[8]</sup>在设施选址与多阶段生产问题中提出一种新的鲁棒性方法,通过调节不确定预算来权衡解的鲁棒性与系统成本之间的关系. Lu等<sup>[9]</sup>基于经典的鲁棒优化模型,加入区间数和不确定性集合,提出了一个新型鲁棒 $p$ -center区间模型,并根据遗传算法对模型进行求解.

现实中充电站突发情况的选址问题总是伴随着成本最小、风险最低和服务效益最大化等不确定因素,而成本最小原则同样是 $p$ -median模型的研究重点.  $p$ -median模型最早由Hakimi<sup>[10]</sup>在1964年提出,宋正娜等<sup>[11]</sup>在此基础上,纳入“临近就医”最大出行成本因子,保障设施规模效率和服务质量公平,为相关竞争型公共设施布局规划提供决策依据. 张彩庆等<sup>[12]</sup>通过传统 $p$ -median模型的静态选址方案提出了一套 $p$ -median模型动态选址方案,并分别运用贪婪算法和枚举法进行实例分析,为集约化检修模式下检修公司分部的选址提供了一种有效的分析方法和决策依据. An等<sup>[13]</sup>基于经典鲁棒优化模型提出了一个两阶段鲁棒 $p$ -median选址混合整数规划模型,在第1阶段得到了具有鲁棒性的选址方案,在第2阶段提出情景发生时的调整方案,并设计了一种精确算法来求解这一问题. 卢媛媛等<sup>[14]</sup>将灰色系统理论、优劣解距离法和矢量投影方法相结合,利用 $p$ -median模型关联理想灰色投影决策过程,通过实际算例进行详细的阐述,证明了趋近理想灰关联多约束中值模型的可行性.

已有研究工作侧重选址决策问题的不同目标,然而充电站的选址与应急选址有着本质的不同,其中最重要的一点就是政府对于充电站建设工程的首要目标是确保电动汽车产业可以顺利平稳地推行. 因此,

在考虑服务效益方面政府会投入更多的精力. 其次, 以前的文献较少考虑充电站的安全因素, 大部分文献都是将研究重点放在对充电站选址成本的优化上面. 本文根据各种大规模停电事故所造成损失情况, 将侧重点集中在充电稳定性方面, 讨论了充电站因突发情况而产生瘫痪的情况. 在模型建立方面, 本文与文献[7]中的两阶段  $p$ -center 模型相比, 采用  $p$ -median 模型选址. 在运营成本上, 更符合城市规划建设中电动汽车运营成本最低原则. 在前面学者的研究基础上, 本文在“预选址”模型中不仅考虑选址过程初始用户的需求, 同时考虑到充电站因突发情况瘫痪时需求量突变情况; 本文的第2阶段“增建选址”模型是在“预选址”策略的基础上, 针对电网系统以及事故发生后的需求信息, 增建充电站保证整个电动汽车充电运营系统的稳定性. 最后通过算例仿真分析验证了本文的两阶段多目标区间  $p$ -median (two-stage multi-objective interval  $p$ -median, 2smoip-median) 模型的可行性, 并通过具体算例与传统  $p$ -median 模型以及传统  $p$ -center 模型相比较, 体现了本文模型的优势与合理性.

## 1 充电桩选址问题两阶段可靠性优化模型

传统  $p$ -median 模型是指在已知需求点集合位置、需求数量和设施备选点集合位置的情况下, 分别为  $p$  个设施点找到合适的位置并为各个设施点指定需求点, 使得相互连接的需求点到设施点的总加权成本(距离、时间、费用等)最低<sup>[10]</sup>. 本文在传统  $p$ -median 模型基础上, 考虑公共充电站的服务效益主导性原则, 即政府主导建设下的公共充电站服务以满足广大用户需求为主, 其次考虑风险成本最低原则, 以保证整个充电站的稳定运行. 因此, 本文有必要设置两阶段选址模型, 保证充电站运营的可靠性. 其中, 第1阶段的预选址中, 考虑用户需求根据充电站瘫痪情况产生的变化, 得到具有可靠性的预选址模型; 增建选址是在考虑预选址的基础上, 通过事故后需求以及成本改变信息, 以优化总运营成本为目标, 规划出科学可靠的充电站新增选址点.

### 1.1 问题描述

参数及决策变量定义如下.

1) 参数.

$I$ : 电动汽车需求点集合;

$J$ : 可选充电站集合;

$K$ : 情景点集合,  $k = \{k_j | j \in J\} \in K$  为情景, 若充电站  $j$  损毁, 则  $k_j = 1$ ; 否则  $k_j = 0$ ;

$c_{ij}$ :  $i, j$  两点间正常情况下电动汽车的安全行驶

距离(电动车安全行驶距离定义为当前电动车充满电后距下一次充电可行驶的距离);

$d_i$ :  $i$  点电动汽车的总需求量(单位: 辆);

$p$ : 充电站数量上限(单位: 个);

$c_{ij}(k)$ : 情景  $k$  发生时,  $i$  和  $j$  两点间电动汽车的安全距离行驶成本(单位: 元/100 m);

$d_i(k)$ : 区间变量, 当情景  $k$  发生时, 增建充电站前,  $i$  点的需求(单位: 辆);

$C$ : 增建一个充电站的运营成本(单位: 元/天);

$L_{\max}$ : 增建充电站后, 需求点集合电动汽车安全行驶距离时成本最高预算(单位: 元/天);

$\alpha_1, \alpha_2$ : 停电前后的权重;

$\gamma$ : 需求调度成本(单位: 元/个);

$\lambda_j$ : 设备点最大容量(单位: 辆);

$Q(c_{ij})$ : 服务质量函数, 定义了服务质量函数与安全距离的关系.

2) 决策变量.

$y_j$ : 当点  $j$  被选择为充电站时为1, 否则为0;

$x_{ij}$ : 需求点  $i$  被分配至充电站  $j$  时为1, 否则为0;

$\omega_{ij}$ : 停电事故发生时, 需求点  $i$  的需求由设施点  $j$  满足时为1, 否则为0;

$u_j$ : 在点  $j$  处新建充电站为1, 否则为0;

$v_{ij}$ : 新建充电站前, 需求点  $i$  被分配至充电站  $j$  时为1, 否则为0.

### 1.2 两阶段多目标区间 $p$ -median 模型

针对上述问题, 本文拟定两种集合, 分别为充电站设备建设集合和用户需求集合. 假设在充电站可满足所有指定需求点的前提下, 已知: 1) 充电汽车用户在未发生突发情况时的需求; 2) 一个充电汽车需求点只能选择一个充电站进行充电; 3) 任意两点间正常运行时的距离(欧氏距离); 4) 充电站由于突发情况瘫痪后, 充电站破坏情况的情景集合(假设每个情境下充电站瘫痪后不能立即修复); 5) 每个情景下, 充电站数量上限为  $p$ .

$$\max Z_1 = \frac{\sum_i^I \sum_j^J Q(c_{ij}) x_{ij}}{\sum_i^I \sum_j^J x_{ij}}, \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_j r_j y_j, \quad (2)$$

$$\min Z_3 = \alpha_1 \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} d_i x_{ij} + \alpha_2 \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}(k) d_i(k) \omega_{ij}, \quad (3)$$

$$\min Z_4 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}(k) d_i(k) v_{ij} + C \sum_{j \in J} u_j + \gamma \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} |x_{ij} - v_{ij}|. \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in J} u_j + \sum_{j \in J} y_j + \sum_{j \in J} k_j y_j \leq p, \quad \forall j; \quad (5)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \quad \forall i, j; \quad (6)$$

$$\omega_{ij} \leq y_j, \quad \forall i, j; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i x_{ij} \leq \lambda_j, \quad \forall i, j; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i(k) x_{ij} \leq \lambda_j, \quad \forall i, j; \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \quad \forall i; \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} \omega_{ij} = 1, \quad \forall i; \quad (11)$$

$$v_{ij} \leq y_j + u_j, \quad \forall i, j; \quad (12)$$

$$y_j + u_j \leq 1, \quad \forall j; \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}(k) d_i(k) v_{ij} \leq L_{\max}, \quad \forall i; \quad (14)$$

$$x_{ij}, \omega_{ij}, y_j, u_j, v_{ij} = 0, 1. \quad (15)$$

式(1)为服务效益目标函数,考虑公共充电站的服务主导性原则,故应满足服务效益最大化;式(2)为选址建设风险最低目标函数;式(3)为最小化预选址成本目标函数,由两个部分组成, $\alpha_1$ 对应充电站未发生突发情况瘫痪前的运营成本, $\alpha_2$ 对应充电站突发情况瘫痪后的运营成本;式(4)为增建选址成本最小化目标函数,其由3个部分的成本组成:总运输成本、增建公共充电站成本和充电汽车需求点重分配产生的运营调整成本;式(5)表示无论是否发生突发状况,公共充电站建设数量都小于原定设施选址个数;式(6)和(7)表示当设备点 $j$ 被选择为充电站时,充电汽车才可以去充电;式(8)和(9)表示无论情景 $k$ 是否发生,分配到充电站的总需求量不能超过充电站的最大容量;式(10)和(11)表示无论突发事件是否发生,每个需求点都只能由一个充电站服务;式(12)表示只有当 $j$ 点未发生瘫痪时,才能服务突发停电时的需求点;式(13)表示只有当未修建且未发生故障的设施点才能增建充电站;式(14)表示每个需求点设置了运营成本最高预算,保证了一定的公平性;式(15)代表决策变量的取值。

由于充电站选址与充电站需求点的距离远近不同,充电站所能提供的服务质量是参差不齐.一般情况下,距离越近到达充电站的时间越早,充电站的服

务质量越好.因此,本文借鉴文献[7]中的渐近覆盖思想,得到了以选址距离为自变量,服务质量为因变量的岭型函数关系式如下所示:

$$Q(c_{ij}) = \begin{cases} 1, & c_{ij} < D^-; \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{D^+ - D^-} \left(c_{ij} - \frac{D^+ + D^-}{2}\right) + \frac{\pi}{2}\right), & c_{ij} \in [D^-, D^+]; \\ 0, & c_{ij} > D^+. \end{cases} \quad (16)$$

其中: $c_{ij}$ 为充电汽车需求点的安全行驶距离成本(元/100m), $D_+$ 和 $D_-$ 分别表示在固定时间段内充电站能提供较优服务质量的最近和最远临界距离(100m).其临界距离表达式为 $D^\pm = vt^\pm$ .其中: $v$ 表示充电汽车的行驶速度(100m/h), $t^+$ 和 $t^-$ 分别表示充电汽车到达充电站的最理想和最长限制时间(h),服务质量为 $Q(c_{ij})$ , $0 < Q(c_{ij}) < 1$ .

本文关于停电状态下多目标区间规划选址模型与已有文献中多目标选址模型有以下3点不同:1)本文多目标选址需求量会因停电而发生变化,因此,本文是一个区间多目标规划模型,且目标函数和约束条件都存在区间参数;2)区间多目标规划的目标函数值是一个区间值,并非一个精确值,因此,本文对两阶段多目标区间 $p$ -median规划模型进行求解时,采用了区间理论<sup>[15-17]</sup>对其进行转化;3)本文的多目标求解涉及到了两个阶段,分别是“预选址”阶段和“增建选址”阶段,与传统的选址模型相比,本文也着重考虑到保证整个系统稳定情况下的增建选址分布问题,因此目标函数同时包括了性能指标与鲁棒性指标<sup>[7]</sup>.

### 1.3 不确定需求模型

在预选址的模型中,只有需求是不确定的,其他参数都可以给定.假定 $k$ 情景下的需求取值与初始的需求取值都在有界区间上,可定义为一种“盒子”<sup>[8]</sup>,其中 $d_i(k) \in [d_i - \hat{d}_i, d_i + \hat{d}_i]$ ,已知 $d_i(k)$ 表示 $k$ 情景发生前后的需求量, $d_i$ 表示初始需求量, $\hat{d}_i$ 表示需求量的最大偏离值.此时需求模型中每一个需求点的需求量扰动为 $(T_i - [T_i])\hat{d}_i$ ,其余需求点都取均值时,可靠解仍为可行解, $T_i$ 称为不确定需求.

上述模型中,可以生成约束条件(8)和(9)中的需求量,其为0-1变量,且取值为整数,可将式(9)转化为

$$\sum_{i=1}^n d_i x_{ij} + g(x, T_i) \leq \lambda_j, \quad \forall j. \quad (17)$$

其中

$$g(x, T_i) = \max \left\{ \sum_{i=1}^n \hat{d}_i x_{ij} \right\}. \quad (18)$$

当  $T_i = 0$  时, 最多有 0 个需求点的需求量同时偏离, 即所有需求点的需求量都取初始值; 当  $T_i = n$  时, 最多有  $n$  个需求点的需求量同时偏离初始值  $d_i$ , 即所有需求点的需求值取最大值. 对于  $\forall j$ , 有  $g(x, T_i) = \sum_{i=1}^n \hat{d}_i x_{ij}$ , 此时约束 (9) 变为

$$\sum_{i=1}^n (d_i + \hat{d}_i) x_{ij} \leq \lambda_j, \quad \forall j. \quad (19)$$

当  $T_i = n$  时, 该方法转化为 Ben-Tal 等<sup>[18]</sup> 提出的鲁棒方法, 即考虑需求最大情景. 综上, 本文模型可以使决策者通过  $[T_i]$  的变化值, 调节解的可靠性来避免对目标函数值造成较大的影响.

### 1.4 两阶段多目标区间 $p$ -median 模型的转换

#### 1) 转换目标函数.

由目标函数 (2) 和 (3) 可知, 目标函数中  $d_i(k) \in [d_i - \hat{d}_i, d_i + \hat{d}_i]$ , 记  $d^- = d_i - \hat{d}_i, d^+ = d_i + \hat{d}_i$ , 定义区间计算有如下性质:

$$d^\pm [d_j^-, d_j^+] = d^\pm + g_i (d_j^+ - d_j^-), \quad 0 \leq g_i \leq 1. \quad (20)$$

目标函数 (2) 和 (3) 可转化为

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \alpha_1 \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} d_i x_{ij} + \alpha_2 \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}(k) d_i^- \omega_{ij} + \right. \\ & \left. \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}(k) g_i (d_i^+ - d_i^-) \omega_{ij} \right), \\ \min Z_3 = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}(k) d_i v_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}(k) g_i (d_i^+ - d_i^-) v_{ij} + \\ & C \sum_{j \in J} u_j + \gamma \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} |x_{ij} - v_{ij}|. \end{aligned}$$

令  $l_i = g_i c_{ij}(k), 0 \leq l_i \leq c_{ij}(k)$ , 则有

$$\begin{aligned} \min Z_2 = & \alpha_1 \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} d_i x_{ij} + \alpha_2 \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}(k) d_i^- \omega_{ij} + \right. \\ & \left. \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} l_i (d_i^+ - d_i^-) \omega_{ij} \right), \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min Z_3 = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij}(k) d_i^- v_{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} l_i (d_i^+ - d_i^-) v_{ij} + \\ & C \sum_{j \in J} u_j + \gamma \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} |x_{ij} - v_{ij}|. \quad (22) \end{aligned}$$

#### 2) 转化约束条件.

相较于目标函数而言, 根据同样的性质可以转换约束条件为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n d_i(k) x_{ij} &= \sum_{i=1}^n [d_i^-, d_i^+] x_{ij} = \\ \sum_{i=1}^n d_i^- x_{ij} &+ \sum_{i=1}^n \delta_i [d_i^+ - d_i^-] x_{ij} \leq \lambda_j, \quad 0 \leq \delta_i \leq 1. \quad (23) \end{aligned}$$

事实上, 当  $\alpha_2 = 0$ , 且  $d_i(k) = d_i$  时, 本文的  $p$ -median 预选址模型退化为传统  $p$ -median 模型. 本文的预选址-增建选址模型与传统  $p$ -median 模型相比, 充分考虑了断电时需求量变化的情况, 但是因突发情况导致需求量的变化无法实时测量. 例如: 部分需求点可能会出现因突发事故而造成的部分恐慌导致需求量的激增, 又或者部分需求点的用户可能会因为突发情况而选择其他交通出行方式, 从而导致需求量减少. 相比于传统  $p$ -median, 本文重点考虑断电后需求量变化的情况.

## 2 模型求解

### 2.1 基于免疫算法的模型求解

在生物学中, 免疫机制指的是淋巴细胞对外部病原体或有害抗原的消除和识别, 其过程主要包括免疫识别和免疫应答两部分. 根据生物免疫特性, 人们将免疫概念及其理论应用于遗传算法中, 在保留遗传算法优良特性的前提下, 尝试有选择、有目的地利用待求问题的某些特征信息或知识来抑制优化过程中的退化现象, 这种算法称为免疫算法<sup>[19]</sup>. 该算法通过重新划分目标函数区域, 提高了算法的收敛速度, 增强了算法的实时性. 下面给出免疫优化算法求解 2smoip-median 模型的具体流程<sup>[20]</sup> (如图 1 所示).

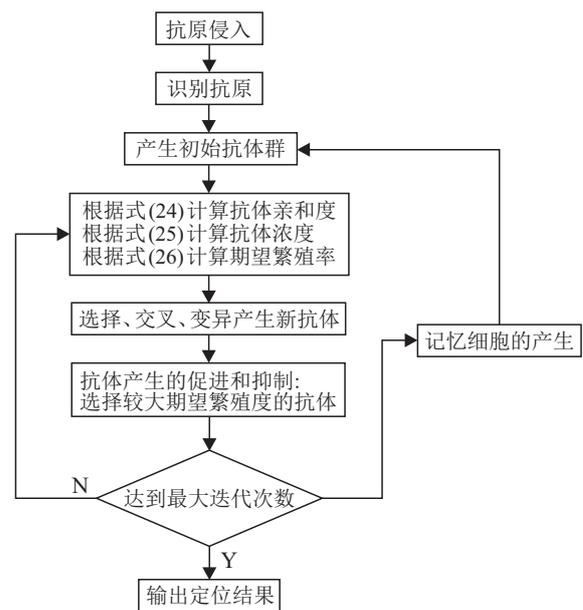


图 1 免疫算法流程

step 1: 产生初始抗体群. 抗体群规模  $N_0$  使用

popinit 函数产生, 当存在记忆库的情况时, 记忆细胞数目为  $N_m$ .

step 2: 对上述群体中所有抗体进行评测. 首先计算抗体与抗原之间亲和力

$$B_v = \frac{1}{Z_v} = \frac{1}{\sum_{i=t} \sum_{j_0 J} d_i c_{ij} x_{ij} - c \sum \min \left\{ \sum (x_{ij}) - 1, 0 \right\}} \quad (24)$$

其中:  $Z_v$  为设计的目标函数形式, 分母第2项为惩治系数,  $c$  为一个比较大的常数. 然后计算抗体在抗体群中的浓度

$$C_v = \frac{1}{N} \sum_{j \in J} Q_{v,s} \quad (25)$$

其中:  $N$  为抗体的总和;  $Q_{v,s}$  为一个 0-1 变量, 当  $Q_{v,s} > T$  时, 有  $Q_{v,s} = 1$ , 否则  $Q_{v,s} = 0$ ,  $T$  为相似度设定的阈值. 最后计算抗体期望繁殖率

$$E_v = \beta \frac{B_v}{\sum_{\alpha=1} B_{\alpha}} + (1 - \beta) \frac{C_v}{\sum_{\alpha=1} C_{\alpha}} \quad (26)$$

其中  $\beta$  为常数调节因子. 免疫操作形式为选择、交叉和变异 3 种, 个体被选择的激励度用式 (26) 计算. 交叉采用单点交叉, 变异采用随机选择方式.

step 3: 分化记忆细胞. 选择与抗原亲和度最高的  $N_m$  个抗体与原记忆细胞中的抗体作对比, 找出最优亲和度的抗体, 更新记忆细胞中的抗体.

step 4: 形成父代群体. 对 step 3 中求得的期望繁殖概率进行降序排序, 提取前  $N_0$  个个体, 即为父代群体, 并将其存放于生物系统的数据库中.

step 5: 判断是否满足循环结束条件, 若符合则终止所有的迭代过程.

step 6: 新群体的产生. 基于 step 5 的计算结果对抗体进行选择、交叉和变异操作, 从而获得所有可能的新群体, 加上记忆库里面的样本, 构成新一代样本, 然后继续循环运算.

### 2.2 最佳方案的选取

多目标选址模型计算中, 各个目标函数之间都会相互制约, 使得模型求解结果达不到最优解, 甚至存在无解的情况. 本文根据文献 [21] 选择模糊集理论计算为多目标问题求解提供决策支持. 模糊策略对应的最小化与最大化优化目标具有不同的求解方法, 其计算步骤如下.

step 1: 计算 Pareto 最优解集中所有非支配解对应各个目标函数的最大与最小值, 分别为  $Z_n^+$  和  $Z_n^-$ .

step 2: 计算 Pareto 最优解集中各目标函数对应的优选指标  $u_N$ , 即

$$u_{N_u} = \begin{cases} 1, & Z_n \geq Z_n^+; \\ \frac{Z_n - Z_n^-}{Z_n^+ - Z_n^-}, & Z_n^- < Z_n < Z_n^+; \\ 0, & Z_n \leq Z_n^-; \end{cases} \quad (27)$$

$$u_{N_l} = \begin{cases} 1, & Z_n \geq Z_n^+; \\ \frac{Z_n^+ - Z_n}{Z_n^+ - Z_n^-}, & Z_n^- < Z_n < Z_n^+; \\ 0, & Z_n \leq Z_n^-; \end{cases} \quad (28)$$

其中:  $Z_n^+$  是函数  $N_u$  的最理想目标值和  $N_l$  的最不理想目标值;  $Z_n^-$  是函数  $N_u$  的最不理想目标值和  $N_l$  的最理想目标值.

step 3: 最后利用式 (24) 和 (25) 计算 Pareto 最优解集中对应的综合优选指标

$$\begin{aligned} \max f &= \sum_{Z_n} w_{Z_n} \eta_{Z_n} \\ w_{Z_n} &\leq \frac{Z_n - Z_n^-}{Z_n^+ - Z_n^-}, \quad n = 1; \\ \eta_{Z_n} &\leq \frac{Z_n^+ - Z_n}{Z_n^+ - Z_n^-}, \quad n = 2, 3, 4; \\ \sum_{Z_n} w_{Z_n} &= 1; \\ Ax &\begin{cases} \leq \\ \geq \end{cases} B. \end{aligned} \quad (29)$$

## 3 应用算例仿真分析

### 3.1 算例计算

本文选取西安市人口密度最大区域作为研究对象. 首先根据西安市人口密度表利用 ArcGIS 软件 Clip 工具对西安市行政区域进行划分, 绘制图 2 所示西安市各行政区县人口分布图 (数据来源: 2019 年西安市统计年鉴), 再选取该区域核心街区 (图 3 所示, 假设该选中区域为核心需求区域) 绘制一个  $100 \times 100$  的平面, 并随机生成 12 个抽象化的充电汽车需求点、6 个公共汽车充电站备选点及其相应的初始需求.

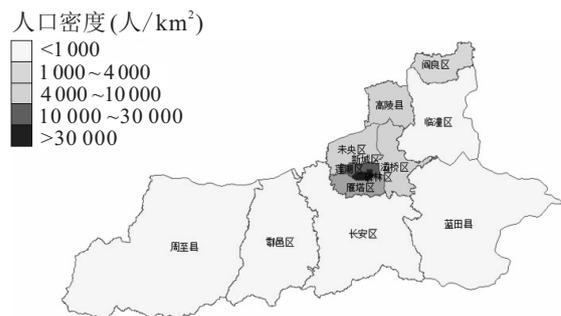


图 2 西安市各区县人口密度分布

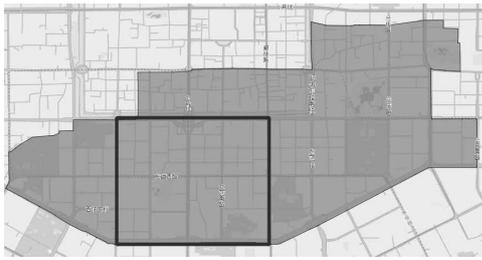


图3 碑林区核心需求

假定情景模式为:随机生成公共充电站瘫痪情况,每个情景下损坏的充电站数量不超过2个,且在第2阶段增建1个充电站.其他参数设置如下:取 $p = 3$ 个, $L_{max} = 50\,000$ 元/天,本文预选址模型主要考虑到存在停电中断情况,故类比文献[7]将停电后情况权重设置为0.8,即 $\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.8, \gamma = 1\,000$ 元/个, $C = 2\,000$ 元/天.根据本文前面所提到的充电站特性,结合专家打分法给出4个目标函数的权重分别为 $w_{Z_1} = 0.4$ (服务效益); $w_{Z_2} = 0.3$ (断电风险); $w_{Z_3} = 0.15$ (预选址模型); $w_{Z_4} = 0.15$ (增建选址模型).本文选定服务效益函数的距离临界值为 $[D^-, D^+] = [20, 70]$ .同时,已知需求量的偏离值为初始值的30%,即 $\hat{d}_i = 0.3d_i, d_i(k) \in [0.7d_i, 1.3d_i], d'_i(k) \in [\min\{d_i, d_i(k)\}, \max\{d_i, d_i(k)\}]$ ,本文在Matlab仿真过程中,免疫算法测试参数设置为:种群规模取为50,记忆库容量取为10,迭代次数取为100,交叉概率取为0.6,变异概率取为0.4,多样性评价参数取为0.95,充电站选址数为6.

本算例考虑电动汽车需求点与充电站点的指派与分布问题时,已知的算例数据有:充电汽车需求点与6个待选充电站点之间的距离,如表1所示;充电汽车用户需求量,如表2所示;各充电站选址风险值,如表3所示;根据MOP模型计算得到每个目标函数值的上下界值,如表4所示.

表1 充电站候选点到用户需求点的距离 单位: km

需求点	候选点					
	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
$I_1$	3.1	4.1	1.9	6.4	9.0	4.6
$I_2$	8.2	7.0	7.1	7.9	3.5	9.4
$I_3$	3	1.4	2.9	3.5	7.0	2.1
$I_4$	3.4	3.0	6.4	1.2	6.7	2.0
$I_5$	5.9	4.7	5.0	5.9	3.1	7.1
$I_6$	7.1	6.0	9.4	3.8	5.0	6.3
$I_7$	3.4	2.4	5.9	4	5.1	2.9
$I_8$	5.8	4.5	7.7	2.9	3.4	5.5
$I_9$	8.0	6.9	10.4	4.7	5.8	7.1
$I_{10}$	6.8	5.6	5.8	6.8	3.3	8.0
$I_{11}$	1.7	2.9	2.5	5.0	8.3	3.1
$I_{12}$	4.7	4.6	1.7	7.0	7.2	6.5

表2 充电汽车用户需求量 单位: 辆

充电汽车需求点	停电前需求 $d_i$	停电后需求 $d_i(k)$
$I_1$	144	[101, 187]
$I_2$	120	[84, 156]
$I_3$	144	[140, 260]
$I_4$	180	[56, 104]
$I_5$	120	[98, 182]
$I_6$	210	[147, 273]
$I_7$	60	[42, 78]
$I_8$	120	[84, 156]
$I_9$	90	[63, 117]
$I_{10}$	96	[67, 125]
$I_{11}$	210	[210, 390]
$I_{12}$	128	[90, 166]

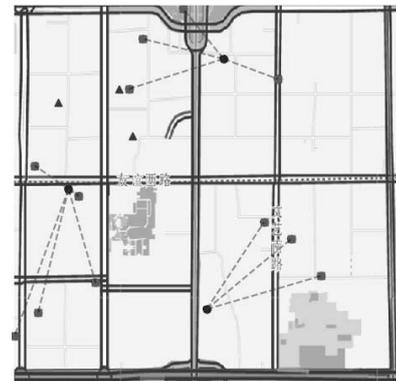
表3 充电站选址点潜在风险值

充电站选址点	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$
潜在风险值 $r$	0.033 2	0.028 3	0.021 6	0.022 9	0.028 5	0.031 8

表4 目标函数值

目标函数	目标值	
	最小值	最大值
$Z_1$ (服务效益)	0.386	0.956
$Z_2$ (瘫痪概率)	0.021 6	0.092 5
$Z_3$ (预选址运营成本(元/天))	44 635	95 706
$Z_4$ (增建选址后运营成本(元/天))	50 583	129 404

建模过程中,当 $l_i = 0, \delta_i = 1$ 时,此时的模型为求最优解,即取最小成本、约束范围最大条件下的模型;当 $l_i = 1, \delta_i = 0$ 时,此时模型为求最差非劣解,即最大成本、约束范围最小条件下的模型解.为计算方便,本文取 $l_i, \delta_i$ 分别为统一值,即取 $l_i = 1, \delta_i = 0$ ,以求解在最不利条件下模型的优化解<sup>[21]</sup>.通过两阶段多目标区间选址模型得到选址方案,充电中断整个情景过程如图4~图6所示.为检验本文模型的有效性,分别采用了传统 $p$ -median模型和本文所提出的smoip-median模型对随机生成的算例进行分析求解,得到结果如表5所示.



▲ 未选择设施点 ■ 需求点 ● 被选择设施点  
× 停电设施点 ----- 加权距离 ◆ 增建设施点

图4 预选址阶段

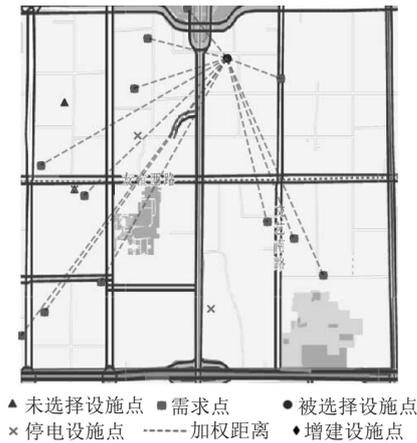


图5 充电站瘫痪阶段

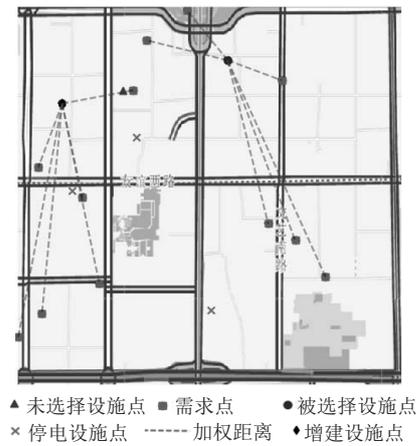


图6 增建选址阶段

表5 两种模型计算出目标函数值

各目标函数计算值	2smoip-median	p-median
$f$	0.785	0.702
$Z_1$	0.956	0.923
$Z_2$	0.0709	0.0846
$Z_3$	46890	44635
$Z_4$	50583	58747

结果显示多目标函数的总体满意度水平  $0.785 > 0.702$ , 表明本文所提出的2smoip-median模型相比传统p-median拥有更好的满意度. 4个目标函数值分别为: 服务效益、设施选址瘫痪概率、预选址运营成本 and 增建选址后运营成本. 由表4可知: 服务效益最大值为0.956, 占比为100%; 设施选址瘫痪概率为

0.0709; 预选址单日运营成本为46890元, 增建后单日运营成本为50583元. 最终选址方案: 选择C、D、E处设施点建设充电站, 增建充电站点为F点. 根据算例中表3、表4以及表5中数据, 结合算例算法得出算例数据的成本计算结果如表6所示.

表6 不同模型下的单日运营成本对比 单位: 元/天

模型	2smoip-median	p-median	p-center
瘫痪前规划充电总运营成本	46890	44635	45946
瘫痪后规划充电总运营成本	63016	70394	63016
增建充电站总运营成本	57583	66747	72577
增建后运营成本	50583	58747	63577
充电站增建运营成本	2000	2000	2000
需求分配调整成本	5000	6000	5000

根据该组数据计算结果, 可以看出本文提出的2smoip-median模型只在瘫痪前规划总运营成本略高于其他两个传统模型, 而在发生事故后, 根据本文所提出的2smoip-median模型中的预选址模型计算出瘫痪后单日运营成本为63016元, 远低于p-median模型所得到的单日充电总运营成本70394元. 针对增建充电站总运营成本, 可以看出当选定增建充电站的位置后, 本文2smoip-median模型得到增建后单日运营成本为50583元, 远低于传统p-median模型与传统p-center模型的58747元和63577元. 同时, 本文模型的增建充电站单日总运营成本为57583元, 也低于其他两个模型的增建总运营成本. 因此, 可以理解为充电站发生瘫痪情况时, 本文的2smoip-median模型在第1阶段的预选址以及增建选址方面都优于传统p-median模型和传统p-center模型. 由该组算例可以看出, 传统p-center模型由于考虑了公平原则, 即最远安全距离要最小, 在第2阶段增建设施的选址方面不如传统p-median模型以及本文的2smoip-median模型, 也可明显看出p-median模型适应选址过程中的成本最小原则.

为避免模型计算结果存在偶然性, 在其他区域随机产生100组数据并计算得出表7. 通过表7, 可以得出如下结论: 1) 本文2smoip-median模型相较于p-center模型和p-median模型, 在表7的6个属性指标

表7 100组数据下不同模型单日运营成本计算结果对比

成本/元	p-center	p-median	2smoip-median	改进百分比/%
停电前规划充电总运营成本	33266	29371	30266	-3.05
停电后规划充电总运营成本	71694	63185	55440	12.26
增建充电站总运营成本	63477	61153	50859	16.83
增建后运营成本	52727	50653	43359	14.40
充电站增建运营成本	2000	2000	2000	0.00
需求分配调整成本	9000	8500	5500	35.29

中,正向优化了4个指标属性,其中最大优化程度达到35.29%。存在1个负向优化指标,是因为本文的模型核心在于优化充电中断情景下电动汽车充电站的选址决策,因此无法在常规情景保证本文模型的最优化;2)本文模型相较于传统 $p$ -median模型仅在单日增建充电站总运营成本方面的优化值为10294元,根据一年365天计算,本文模型可优化总额约为375.7万元,因此本文提出的2smoip-median模型在充电站选址领域具有一定的经济和现实意义。

### 3.2 算法对比

为验证免疫优化算法的优越性,将其与传统遗传算法进行比较,设置相同的迭代次数。两种算法的参数如表8所示。

表8 两种算法参数

算法	参数设置	运算时间/s
免疫优化算法	种群规模50,记忆库容量10,迭代次数100,交叉概率0.6,变异概率0.4,多样性评价参数0.95	14.15
传统GA	种群规模为50,迭代次数100,交叉概率0.6,变异概率0.4	219.98

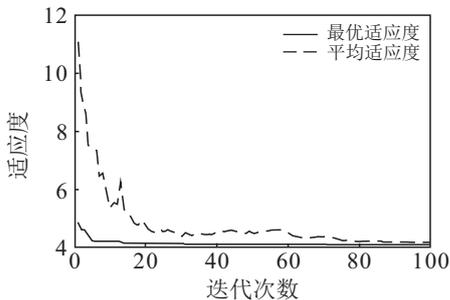


图7 免疫算法收敛曲线

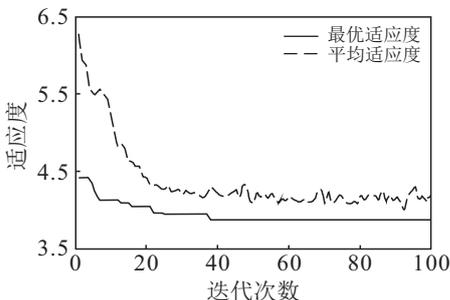


图8 遗传算法收敛曲线

## 4 结论

本文以 $p$ -median模型为基础,结合不确定需求模型,解决充电中断情况下的充电站选址可靠性优化决策问题。首先,构建了一个以传统 $p$ -median模型为基础的充电中断下的“预选址”模型,在预选址模型中,由于充电中断时充电汽车需求量与调动成本变动均未知,在“预选址”模型中引入不确定需求模型

与安全行驶距离。其次,根据充电中断后得到的新需求以及成本变动信息等,构建了充电中断后的“增建选址”模型,结合当前充电站选址现状引入多目标区间模型,保证充电站后续运营的稳定性并对模型进行求解。最后,通过对模型进行数值对比分析,分析结果表明:本文的2smoip-median模型在停电后的各项运营成本中有明显优化,其中最大优化度达35.29%,并且仅在增建充电站总运营成本方面的年优化值约为375.7万元。因此,本文模型具有一定的经济价值与现实研究意义。

本文的相关研究虽然提供了一些有意义的结果,但仍有一定的局限性,这也为今后的研究提供了一个值得思考的方向。首先,为方便分析计算,本文的不确定需求模型构建相对简单,而实际情况影响需求的因素很多,可以在相关模型中设定更多变量和参数反映实际情况。其次,本文在讨论安全行驶距离时选用的是欧氏距离,需要结合地理信息情况对实际距离定义作进一步的改进,使得模型与实际情景更为切合。最后,面对实际突发问题时,决策者可能会遇到更加复杂的系统,精确算法将不再适用,需要针对特定的问题特点开发更复杂的启发式算法来获得更好的成果。虽然这些扩展使模型具有更好的鲁棒性和动态性,但本文所提出模型的基本结果依然保持不变。

### 参考文献(References)

- [1] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“89”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192. (Sun H D, Xu T, Guo Q, et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.)
- [2] 刘慧, 杨超. 需求不确定的服务设施网络设计模型鲁棒性研究[J]. 运筹与管理, 2016, 25(1): 117-125. (Liu H, Yang C. Robust research on service facility network design problem with demand uncertainty[J]. Operations Research and Management Science, 2016, 25(1): 117-125.)
- [3] Church R, ReVelle C. The maximal covering location problem[J]. Papers of the Regional Science Association, 1974, 32(1): 101-118.
- [4] 王宁, 许益, 张磊, 等. 考虑消防联动与效益的消防站多目标选址方法[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(3): 664-678. (Wang N, Xu Y, Zhang L, et al. Multi-target location method for fire stations considering fire-fighting collaboration and efficiency[J]. Systems Engineering—theory & Practice, 2020, 40(3): 664-678.)
- [5] 葛春景, 王霞, 关贤军. 重大突发事件应急设施多重

- 覆盖选址模型及算法[J]. 运筹与管理, 2011, 20(5): 50-56.  
(Ge C J, Wang X, Guan X J. A multi-covering model and its algorithm for facility location response for large-scale emergencies[J]. Operations Research and Management Science, 2011, 20(5): 50-56.)
- [6] 朱建明. 损毁情景下应急设施选址的多目标决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(3): 720-727.  
(Zhu J M. Methods of multi-objective decision-making for emergency facility location problem under failure scenario[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2015, 35(3): 720-727.)
- [7] 杜博, 周泓. 不确定环境下应急设施选址问题两阶段鲁棒优化模型[J]. 工业工程, 2016, 19(5): 45-50.  
(Du B, Zhou H. A two-stage robust optimization model for emergency facility location problems under uncertainties[J]. Industrial Engineering Journal, 2016, 19(5): 45-50.)
- [8] 刘慧, 杨超, 宋广华. 需求不确定的设施选址与多阶段生产鲁棒模型研究[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(3): 760-764.  
(Liu H, Yang C, Song G H. Facility location and multi-period production problem considering robustness[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(3): 760-764.)
- [9] Lu C C. Robust weighted vertex  $p$ -center model considering uncertain data: An application to emergency management[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 230(1): 113-121.
- [10] Hakimi S L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph[J]. Operations Research, 1964, 12(3): 450-459.
- [11] 宋正娜, 颜庭干, 刘婷, 等. 新重力  $P$  中值模型及其在城市综合医院区位决策中的实证检验——以无锡市为例[J]. 地理科学进展, 2016, 35(4): 420-430.  
(Song Z N, Yan T G, Liu T, et al. A new gravity  $P$ -Median model and empirical test in urban comprehensive hospital location decision making: Take Wuxi as an example[J]. Progress in Geography, 2016, 35(4): 420-430.)
- [12] 张彩庆, 赵璐. 基于  $P$ -中值模型的电网检修公司分部选址模型[J]. 系统管理学报, 2014, 23(4): 501-506.  
(Zhang C Q, Zhao L. Division location model for power grid maintenance company based on  $P$ -Median[J]. Journal of Systems & Management, 2014, 23(4): 501-506.)
- [13] An Y, Zeng B, Zhang Y, et al. Reliable  $p$ -Median facility location problem: Two-stage robust models and algorithms[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 64: 54-72.
- [14] 卢媛媛, 郭志坚, 王宝玲, 等. 趋近理想灰关联多约束的交通救援中心中值选址模型[J]. 公路交通科技, 2018, 35(7): 114-119.  
(Lu Y Y, Guo Z J, Wang B L, et al. A traffic rescue centre Median location model approaching ideal grey relational constraints[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(7): 114-119.)
- [15] 聂丽. 医疗废弃物暂存处选址的多目标渐进覆盖模型与求解[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S1): 105-107.  
(Nie L. Multi-objective incremental coverage model and solution for the temporary location of medical waste[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(S1): 105-107.)
- [16] Molai A A, Khorram E. Linear programming problem with interval coefficients and an interpretation for its constraints[J]. Iranian Journal of Science & Technology Transaction A Science, 2008, 31(31): 369-390.
- [17] Ishibuchi H, Tanaka H. Multiobjective programming in optimization of the interval objective function[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48(2): 219-225.
- [18] Ben-Tal A, El Ghaoui L, Nemirovski A. Robust optimization[M]. Princeton: Princeton University Press, 2009: 1-145.
- [19] 程呈, 高敏, 刘晓光, 等. 解空间定向优化的快速免疫算法研究及其应用[J]. 控制与决策, 2017, 32(7): 1241-1246.  
(Cheng C, Gao M, Liu X G, et al. Research and application of fast immune algorithm for solution space directional optimization[J]. Control and Decision, 2017, 32(7): 1241-1246.)
- [20] 邓勇, 孙虎. 基于人工免疫算法的故障字典技术测点选择[J]. 控制与决策, 2017, 32(5): 925-929.  
(Deng Y, Sun H. Fault dictionary technology test point selection based on artificial immune algorithm[J]. Control and Decision, 2017, 32(5): 925-929.)
- [21] 郭焕换, 王飞跃, 裴甲坤, 等. 化工园区应急设施区间规划选址模型研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(5): 67-73.  
(Guo H H, Wang F Y, Pei J K, et al. Study of site selection model for interval programming of emergency facilities in chemical industry park[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(5): 67-73.)

## 作者简介

孙秉珍(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 从事粒计算与不确定性决策、应急管理决策等研究, E-mail: bzsun@xidian.edu.cn;

杨佳楠(1994—), 男, 硕士生, 从事新能源汽车充电站选址优化的研究, E-mail: 597885628@qq.com;

白军成(1993—), 男, 博士生, 从事医疗决策、机器学习的研究, E-mail: JunchBai@163.com;

楚晓丽(1985—), 女, 博士生, 从事中医药数据挖掘、智能决策的研究, E-mail: 1053305721@qq.com;

王婷(1986—), 女, 博士生, 从事数据科学与预测决策的研究, E-mail: wangting1986@stu.xidian.edu.cn;

陈香堂(1975—), 男, 副教授, 博士, 从事运营与供应链管理研究, E-mail: 1728578@qq.com.

(责任编辑: 孙艺红)