

# 控制与决策

Control and Decision

## 中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型

于冬梅, 高雷阜, 赵世杰

引用本文:

于冬梅, 高雷阜, 赵世杰. 中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1415–1420.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1028>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 改进非支配排序精英遗传算法的篦冷机参数优化

Optimization of grate cooler parameters based on improved no-dominated sorting genetic algorithm II

*控制与决策*. 2020, 35(5): 1217–1225 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0749>

### 基于分解和差分进化的多目标粒子群优化算法

Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on decomposition and differential evolution

*控制与决策*. 2017, 32(3): 403–410 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0186>

### 应急救援物资多目标分配与调度问题建模与求解

Modeling and solving multi-objective allocation-scheduling of emergency relief supplies

*控制与决策*. 2017, 32(1): 86–92 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1518>

### 服务能力受损情景下的应急设施选址模型

Emergency facility location model under service ability damage scenarios

*控制与决策*. 2016, 31(11): 1979–1984 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1155>

### 考虑蓄意攻击的第三方物流多周期可靠性网络设计

Multi-period reliable network design of third-party logistics with proactive attack considered

*控制与决策*. 2016, 31(11): 1953–1959 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1432>

# 中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型

于冬梅<sup>†</sup>, 高雷阜, 赵世杰

(辽宁工程技术大学 运筹与优化研究院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 应急设施选址是长期战略性决策布局问题, 选址-分配网络面临潜在的中断风险. 在中断情境下构建以成本经济性、覆盖质量均衡性及公平性为核心的多目标体系. 以最小化系统成本为目标反映经济性, 以覆盖服务质量最大化为目标反映均衡性, 以最大化最小需求覆盖水平为目标反映公平性, 建立中断情境下服务能力有限的可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型. 采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)对模型予以求解, 获得经济成本、覆盖服务质量均衡性与公平性之间的 Pareto 解集, 给出 Pareto 最优解集在三维空间的分布及应急设施选址布局网络的拓扑结构. 研究成果将为决策者在中断环境下设计可靠的选址-分配网络提供决策支持.

**关键词:** 应急设施; 选址分配; 中断; 多目标优化; 可靠性; NSGA-II

中图分类号: O221.6

文献标志码: A

## A multi-objective optimization model for reliable emergency facility location-allocation under disruptions

YU Dong-mei<sup>†</sup>, GAO Lei-fu, ZHAO Shi-jie

(Institute for Optimization and Decision Analytics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Emergency facility location is a long-term strategic decision layout problem, but the location-allocation network is confronted with potential disruption risk. The multi-objective evaluation system is proposed under disruptions which includes cost economy, equilibrium and fairness of coverage quality. A capacitated multi-objective model is established for reliable emergency facility location under disruptions, the constructed model reflects economy with the minimum system cost, equilibrium with the maximum coverage of service quality, and fairness with the maximum minimum coverage level. The non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) is presented to solve the model to obtain the Pareto set. The distribution of Pareto optimal set in three dimensions and the topological structure of emergency facility location network are given. The research results provide decision support for decision-makers to design a reliable location-allocation network under the disruption environment.

**Keywords:** emergency facility; location-allocation; disruption; multi-objective optimization; reliability; NSGA-II

## 0 引言

应急设施选址布局决策是应急救援的基础, 选址-分配优化模型的构建及其拓扑结构的优化是应急设施选址网络设计的重要内容. 应急设施的长期战略性地位促使决策者在选址优化模型构建时关注多种目标, 均衡多重约束. 同时, 自然灾害、事故灾害等因素导致设施中断的情形时有发生, 一旦设施中断, 其服务的需求点需由距离更远的设施为其提供应急服务, 选址网络的拓扑结构也会因此改变, 将严重影响整个系统的服务效率和响应能力. 因此, 中断情境下可靠性应急设施选址分配问题的研究意义重大.

可靠性设施选址问题(RFLP)近年来引起了国内

外学者的广泛关注, Snyder等<sup>[1]</sup>首次在选址模型中考虑设施中断情境, 建立了可靠性无容量限制的固定费用选址模型及可靠性P-中位模型, 并假设中断概率相等且相互独立, 同时考虑了设施的多级分配, 构建了混合整数优化模型并设计了拉格朗日(Lagrangian)算法予以求解; Li等<sup>[2]</sup>基于文献[1], 考虑在中断情境下增加备用设施并建立了可靠性设施选址模型, 利用Lagrangian松弛算法求解该模型; Cui等<sup>[3]</sup>基于文献[1]考虑设施的中断概率不等且相互独立, 建立了可靠性选址优化模型, 并设计了启发式优化算法和Lagrangian算法予以求解; 考虑中断情境的设施选址研究目前多着眼于单目标选址模型, Bahri等<sup>[4]</sup>考虑

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-12-29.

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0032, 20170520075); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJ2017QL031, LJ2019ZL001, LJ2019JL017).

责任编辑: 唐加福.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: yudongmei1113@163.com.

差异化建设成本,研究了含有一个虚拟备用设施的无容量限制的两阶段选址模型;Berman等<sup>[5]</sup>对P-中位选址模型进行了推广,假设设施具有互不相同的中断概率,构建了非线性优化模型,并基于一种改进贪婪优化算法进行优化求解;Farahani等<sup>[6]</sup>建立了可靠性最大覆盖选址模型,中断情境下以覆盖总需求量最大为优化目标,建立了无容量约束的混合整数规划模型,并设计了耦合人工蜂群算法进行求解;Yun等<sup>[7]</sup>基于设施不完全中断情境,利用需求点逐步试错策略访问应急设施,建立了混合整数优化模型,最终确定可靠性选址方案;Yeh等<sup>[8]</sup>从选址网络可靠性的角度建立了考虑设施中断的最大可靠度选址模型,采用模拟退火算法求解模型.了解更多考虑设施中断的选址内容可参见文献[9-14].

上述考虑中断情境的设施选址研究多为单目标模型,从多目标的角度出发,朱建明<sup>[15]</sup>建立了总救援时间、最大需求救援时间以及考虑设施中断而产生的额外增加救援时间最小的多目标选址优化模型,假设设施的服务能力是无限的,设计了遗传算法进行求解;Rayat等<sup>[16]</sup>提出了考虑中断因素的选址-分配-库存集成问题,基于部分覆盖建立了双目标优化模型;Medal等<sup>[17]</sup>建立了以最小化最大服务距离及最小化设施数量为目标的多目标选址优化模型,假设应急设施的服务质量相同,并基于权因子方法将多目标模型转化为单目标模型,采用基于二元搜索的三阶段启发式算法改进解的空间;Karatas等<sup>[18]</sup>考虑了应急设施选址的公平性及可靠性,融合了经典选址模型中P-中位模型、P-中心模型及最大覆盖模型的优化目标,假设设施的服务能力是无限的,提出了分支定界算法并嵌入迭代全局搜索技术求解模型,获得了多目标决策的Pareto边界.

综上所述,考虑中断情境的设施选址模型大多为单目标优化模型,而关于多目标优化模型并考虑应急设施的服务质量的优化目标及服务能力约束集成优化的文献鲜有报道.基于此,综合考虑经济性、均衡性、公平性的多目标决策及多重约束限制,建立中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型,采用NSGA-II对模型予以求解,获得Pareto非支配解集,便于决策者基于实际需求和偏好从Pareto解集中选择合理的选址-分配方案.

## 1 问题描述及数学模型

### 1.1 问题描述

中断情境下可靠性应急设施选址布局决策考虑应急设施选址-分配的多目标体系,建立以最小化系统成本、最大化期望服务质量水平、最大化最小需

求覆盖水平为目标的服务能力有限的多目标优化模型,确定应急设施点的位置及选址-分配网络的拓扑结构.

考虑应急设施的多源服务特性及需求点对应急服务质量满意度的异质性,扩展传统覆盖模型中的覆盖半径定义,引入应急设施选址中的应急服务质量覆盖函数,刻画不同需求点对应急设施提供应急响应的覆盖服务质量的异质性,实现多梯级质量覆盖.设 $d(i, j)$ 为第 $i$ 个应急设施与第 $j$ 个需求点的距离, $\bar{d}$ 为需求点获得应急设施覆盖的最小临界距离, $\bar{\bar{d}}$ 为需求点获得应急设施覆盖的最大临界距离, $\bar{d} \leq \bar{\bar{d}}$ ,引入如下Fermi-type型非线性覆盖函数<sup>[19]</sup>:

$$F(d(i, j)) = \begin{cases} 1, & d(i, j) \leq \bar{d}; \\ \frac{1}{1 + 10^{[(d(i, j) - \bar{d}) / (\bar{\bar{d}} - \bar{d}) - 1] / b}}, & \bar{d} < d(i, j) \leq \bar{\bar{d}}; \\ 0, & d(i, j) > \bar{\bar{d}}. \end{cases}$$

其中: $b$ 为刻画感知服务质量敏感程度的因子,其值越大意味着函数敏感性越强; $\rho$ 为覆盖半径因子.

本文考虑多梯级覆盖分配,设 $I = \{0, 1, \dots, K - 1\}$ 为需求点集合, $i \in I$ ;  $J = \{0, 1, \dots, L\}$ 为备选应急设施点集合, $j \in J$ ;  $P$ 为拟开设应急设施个数.对于每个需求点,基于大需求量优先服务,并至多在 $R$ 个覆盖梯级上分配一个非中断应急设施为其提供服务.设 $r$ 为应急设施为需求点提供服务所处的覆盖梯级, $r = 0, 1, \dots, R - 1$ ,其中 $r = 0$ 为应急设施初始覆盖梯级,其余为备用设施覆盖梯级, $R$ 为需求点分配的非中断应急设施级数.考虑分配给需求点 $i$ 的应急设施均中断的极端情形,引入一个虚拟备用应急设施,在候选应急设施集合中编号为 $L$ ,并假设该设施是完全不中断的,若第 $i$ 个需求点的需求未被满足而必须由虚拟备用应急设施为其提供服务,则产生惩罚成本. $\lambda_i$ 为第 $i$ 个需求点需求未被满足时的单位距离惩罚成本; $f_j$ 为在 $j$ 处设立应急设施的固定成本; $q_j$ 为在 $j$ 处设立单位容量的可变成本; $C_j$ 为在 $j$ 处能为应急设施设立的最大容量; $h_i$ 为第 $i$ 个需求点的应急资源需求; $c_{ij}$ 为第 $j$ 个应急设施到第 $i$ 个需求点的单位运输成本,且 $c_{iL} = \lambda_i$ ; $c_j$ 为在 $j$ 处设立应急设施的容量; $l_j$ 为在 $j$ 处设立应急设施的安全库存; $p_j$ 为第 $j$ 个应急设施的中断概率, $0 \leq p_j \leq 1$ ; $d(i, j)$ 为第 $i$ 个需求点与第 $j$ 个应急设施之间的距离; $P_{ijr}$ 为第 $i$ 个需求点由第 $j$ 个应急设施在第 $r$ 覆盖梯级上提供服务的概率.若第 $j$ 个应急设施开设,则 $X_{ij}$ 为1,否则为

0. 若需求点  $i$  在第  $r$  覆盖梯级上由第  $j$  个应急设施提供服务, 则  $Z_{ijr}$  为 1, 否则为 0.

### 1.2 数学模型

基于上述条件, 建立中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型.

目标函数为

$$G_1 = \min \sum_{j=0}^{L-1} (f_j X_j + q_j c_j) + \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{j=0}^L \sum_{r=0}^R P_{ijr} c_{ij} d(i, j) Z_{ijr}; \quad (1)$$

$$G_2 = \max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} h_i F(d(i, j)) Z_{ijr} P_{ijr}; \quad (2)$$

$$G_3 = \max \{ \min F(d(i, j)) Z_{ijr} P_{ijr} + (1 - Z_{ijr}) P_{ijr} \}, \quad \forall 0 \leq i \leq K - 1, 0 \leq j \leq L, 1 \leq r \leq R. \quad (3)$$

约束条件为

$$c_j \leq C_j X_j, \quad \forall 0 \leq j \leq L - 1; \quad (4)$$

$$l_j \leq \sum_{i=0}^{K-1} h_i Z_{ijr} \leq c_j,$$

$$\forall 0 \leq j \leq L - 1, 0 \leq r \leq R; \quad (5)$$

$$\sum_{r=0}^{R-1} Z_{ijr} \leq X_j, \quad \forall 0 \leq i \leq K - 1, 0 \leq j \leq L - 1; \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^{L-1} Z_{ijr} + \sum_{b=0}^{r-1} Z_{iLb} = 1, \quad \forall 0 \leq i \leq K - 1, 0 \leq r \leq R; \quad (7)$$

$$\sum_{r=0}^R Z_{iLr} = 1, \quad \forall 0 \leq i \leq K - 1; \quad (8)$$

$$P_{ij0} = 1 - p_j, \quad \forall 0 \leq i \leq K - 1, 0 \leq j \leq L; \quad (9)$$

$$P_{ijr} = (1 - p_j) \sum_{t=0}^{L-1} \frac{p_k}{1 - p_k} P_{i,t,r-1} Z_{i,t,r-1}, \quad \forall 0 \leq i \leq K - 1, 0 \leq j \leq L, 1 \leq r \leq R; \quad (10)$$

$$X_j, Z_{ijr} \in \{0, 1\}, \quad \forall 0 \leq i \leq K - 1, 0 \leq j \leq L, 0 \leq r \leq R. \quad (11)$$

目标函数(1)表示最小化中断情境下的系统成本, 包括应急设施建立的固定成本、设立容量的可变成本及应急设施提供给需求点服务的期望运输成本之和最小. 目标函数(2)表示中断情境下最大化期望服务质量水平. 目标函数(3)表示最大化应急设施中断情境下最小覆盖质量水平. 式(4)表示应急

设施设立的容量不超过该设施所能提供的最大容量, 且只有选定开设的应急设施才能设立容量. 式(5)表示分配到应急设施的总需求量不超过该应急设施设立的容量并实现安全库存的合理预置. 式(6)表示只有开设的应急设施才能为需求点提供服务. 式(7)表示每个需求点或者在第  $r$  级上由一个常规应急设施为其提供服务, 或者在第  $b$  ( $b < R$ ) 级上由虚拟备用应急设施为其提供服务. 式(8)表示若分配给需求点的常规应急设施均完全中断, 则必须在某一级上分配给虚拟备用应急设施. 式(9)和式(10)为转移概率公式<sup>[3]</sup>: 当  $r = 0$  时,  $P_{ijr}$  即为应急设施  $j$  不中断的概率; 当  $1 \leq r \leq R$  时, 若第  $j$  个应急设施在第  $r - 1$  级上为第  $i$  个需求点提供服务, 则  $P_{ijr} = \frac{p_k(1 - p_j)}{1 - p_k} P_{i,t,r-1}$ ,  $0 \leq t \leq L$ , 由式  $\sum_{j=0}^{L-1} Z_{ijr} + \sum_{b=0}^{r-1} Z_{iLb} = 1, \forall 0 \leq i \leq K - 1, 0 \leq r \leq R$  可知, 至多存在一个  $t$  使得  $P_{i,t,r-1} = 1$ , 从而确保此概率转移公式的正确性. 式(11)表示变量属性.

## 2 模型求解

多目标优化时各目标间相互冲突, 难以同时达到最优, 只存在 Pareto 最优解集. 多目标进化算法是基于群智能搜索的启发式随机优化算法, 利用其求解多目标优化问题(MOPs)时具有一次运行就能获得多个 Pareto 非劣解的优点. 多年来, 涌现出许多性能优异的多目标进化算法, 其中 NSGA-II<sup>[20]</sup> 是学术界公认的求解 MOPs 的行之有效的算法, 该算法在 2、3 个目标的优化问题中取得了较好的优化效果, 在资源调度、库存管理等领域中得到了广泛的应用<sup>[21-23]</sup>. 算法的核心特色是引入精英策略, 有利于保持父代中的优良个体进入下一代, 并通过对种群中所有个体的分层存放, 使得最佳个体不会丢失. 该算法在快速找到 Pareto 前沿和保持种群多样性方面都有较好的效果. 下面给出 NSGA-II 求解中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型的具体流程.

step 1: 对模型相关参数进行设置及初始化, 包括: 应急设施建立的固定成本  $f_j$ , 可变成本  $q_j$ , 每个应急设施能够设立的最大容量  $C_j$ , 每个应急设施设立的安全库存  $l_j$ , 每个需求点的需求  $h_i$ , 每个应急设施的中断概率  $p_j$ , 惩罚成本  $\lambda_i$ , 应急设施覆盖级数  $R$ , 第  $j$  个应急设施到第  $i$  个需求点的单位运输成本  $c_{ij}$ , 覆盖服务质量敏感程度因子  $b$ , 覆盖半径因子  $\rho$ , 各应急设施覆盖需求点的最小、最大临界距离  $\bar{d}, \bar{\bar{d}}$ . NSGA-II 中需要设置的参数有: 交叉概率  $\alpha$ 、变异概率  $\beta$ 、种群

规模 $\text{Num}_{\text{agent}}$ 、最大迭代次数 $\text{Iter}_{\text{max}}$ .

step 2: 编码准则和染色体设计. 设计多参数编码方案, 种群中每个个体的编码方式表示为 $\text{Individual} = (X_1, \dots, X_L, Z_{111}, \dots, Z_{1L1}, \dots, Z_{K-1L1}, \dots, Z_{K-1LR})$ . 随机初始化 $\text{Num}_{\text{agent}}$ 个个体的初始种群 $M_L$ , 生成 $\text{Num}_{\text{agent}}$ 个 $\text{Num}_{\text{agent}} \times (2 \times (L - 1))$ 的矩阵, 矩阵中每一行代表一个个体, 每相邻两列表示一个应急设施的位置.

step 3: 适应度值计算和快速非支配排序. 基于目标函数的适应度值采用快速非支配排序方法进行非劣分层, 种群中的个体分配到不同的非支配前端集合中, 同时计算每个非支配前端集合中个体的拥挤距离, 结合目标函数间的差异值, 计算拥挤度值, 进而判断一个种群中某个特定解附近的种群密度. 基于二元锦标赛方式随机选择种群中的两个个体, 比较处于各个非支配前端集合中个体间的拥挤密度, 将密度小的个体构成种群 $M_{O1}$ .

step 4: 遗传算法的行为操作. 对种群 $M_{O1}$ 进行交叉和变异遗传操作, 产生新的个体进入种群中, 形成新的第一代种群 $N_L$ .

step 5: 种群的合并. 将父代种群 $M_L$ 与子代种群 $N_L$ 中的所有个体进行合并, 产生新的种群 $R_L$ .

step 6: 计算 $R_L$ 中每个个体相应的分目标适应度值, 基于step 3的快速非支配排序方式, 进行重新排序和非劣分层, 同时计算各个非支配分层中个体间的拥挤距离及拥挤度, 选择新的最优产生的种群个体构成新的父代种群 $N_{L+1}$ , 基于遗传算法的行为操作依次产生下一代子群.

step 7: 判断 $\text{Iter}_{\text{max}}$ 是否达到预设的最大迭代次数, 若是, 则输出每个个体最优适应度值和最优个体, 反之, 迭代次数加1并跳转执行step 2, 直至获得最优的Pareto非劣解集.

### 3 算例分析

为了验证模型及算法的可行性, 本文通过随机生成算例进行数值实验, 基于不同规模的节点网络求解多目标优化模型, 在相同条件下比较不同中断情境下的选址优化结果, 给出Pareto最优解集在三维空间的分布, 同时给出应急设施选址-分配网络的拓扑结构. 以2015a为操作平台, 在Intel(R)、Core(TM) i7-6500U CPU、2.50 GHz、8.00 GB内存、Windows 10操作系统的PC机上执行算法.

在 $[0, 300] \times [0, 300]$ 的平面区域上随机产生潜在的需求点, 应急设施建立的固定成本 $f_j$ 在 $[300, 500]$

内随机产生, 可变成本 $q_j$ 在 $[100, 150]$ 内随机产生, 每个应急设施能够设立的最大容量 $C_j$ 在 $[1500, 2000]$ 内随机产生, 每个应急设施设立的安全库存 $l_j$ 在 $[30, 50]$ 内随机产生, 每个需求点的需求 $h_i$ 在 $[80, 100]$ 内随机产生, 惩罚成本 $\lambda_i$ 在 $[50, 100]$ 内随机产生, 应急设施覆盖梯级 $R = 2, 3, 4$ , 第 $j$ 个应急设施到第 $i$ 个需求点的单位运输成本 $c_{ij}$ 在 $[5, 10]$ 内随机产生, 中断概率 $p_j$ 在 $[0.1, 0.6]$ 内随机产生. 覆盖服务质量敏感程度因子 $b = 0.5$ , 覆盖半径因子 $\rho = 3.5$ , 每个需求点的最小、最大临界距离分别在 $[3, 110]$ 和 $[120, 500]$ 内随机产生. 本文采用实验法探索算法的参数设置, 通过多次测试获得较好的参数组合: 交叉概率 $\alpha = 0.8$ , 变异概率 $\beta = 0.01$ , 种群规模 $\text{Num}_{\text{agent}} = 100$ , 设置最大迭代次数 $\text{Iter}_{\text{max}} = 300$ .

首先, 基于NSGA-II求解中断情境下可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型, 基于算例的不同规模, 获得10组算例的优化结果如表1所示.

表1 不同算例规模下的选址优化结果

算例	$K$	$P$	$p_j$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	覆盖总 需求量	设施总 容量
1			0.1	14983.65	1457.86	0.65	1426.30	1504.74
2		4	0.2	15536.41	1658.90	0.87	1587.58	1597.21
3		5	0.3	17217.25	1897.38	0.96	1654.23	1902.32
4		18	0.1	17658.65	1336.53	0.73	1526.50	1635.25
5		4	0.2	18024.78	1540.69	0.78	1687.93	1854.96
6		5	0.3	19863.55	1685.78	0.92	1740.79	2032.53
7		4		27693.54	2396.35	0.62	2678.60	2698.75
8		5		27987.68	2663.58	0.73	2789.63	2875.65
9		30	0.2	28963.76	2689.67	0.81	2807.24	2968.80
10		8		29874.39	2968.74	0.90	2897.65	3068.47

从优化计算的结果可以看出, 对于不同规模选址网络的算例, 随着需求点规模增加及拟建应急设施数量的增加, 选址的总成本随之增加, 设立容量也相应增加, 随着拟建应急设施数量的增加, 覆盖的总需求量增加. 当潜在需求点个数与拟建应急设施个数相同时, 3个目标函数之间呈现此消彼长的关系, 获得经济成本、覆盖服务质量均衡性以及覆盖公平性之间的权衡. 在规模(节点个数)及其他参数设置相同的情况下, 应急设施中断概率的变化对最优选址方案的影响显著, 应急设施中断概率增大时, 选址的总成本逐渐增加, 容量呈现增加趋势, 但覆盖服务质量降低, 反映公平性的最小需求覆盖水平增加. 由此可见, 当决策者考虑应急设施中断风险趋于乐观时, 设计的选址分配网络更精益, 总成本相对较小, 而当始料未及的灾害事件发生时, 网络将会受到较大的冲击. 因此,

决策者需基于不同的风险偏好和决策目标在节约成本、覆盖均衡性及公平性之间权衡。

以算例6为例,分析应急设施中断对选址分配决策的影响,针对18个潜在需求点,拟建立4个应急设施的选址布局网络,算法经过300次迭代寻优,在不同中断概率下获得的Pareto最优前沿如图1和图2所示。

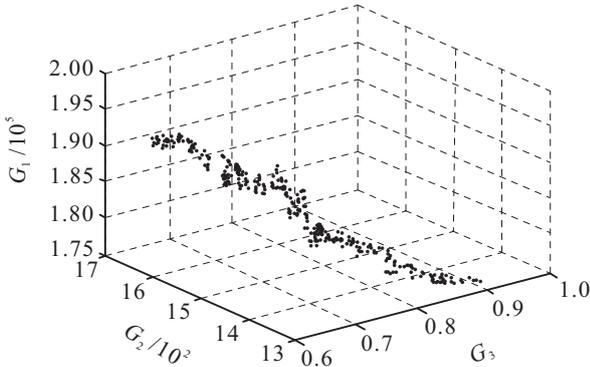


图1  $p_j = 0.1$ 时Pareto最优解集在三维空间的分布

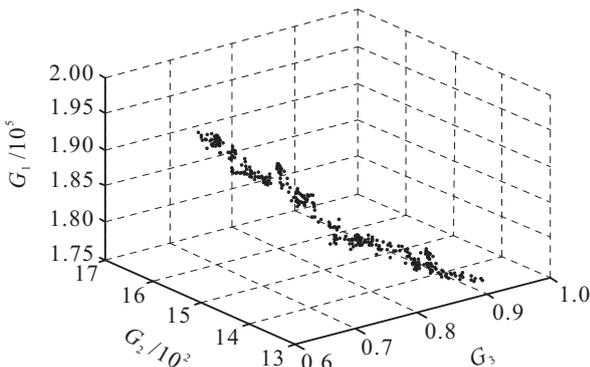


图2  $p_j = 0.2$ 时Pareto最优解集在三维空间的分布

如图1和图2所示的Pareto非劣解集类似一条空间中不连续分布的上升曲线,函数图像曲线上的每个点代表一个非劣解,且解集中的各个非劣解之间没有好坏之分,该曲线由256个非劣解在目标空间中较均匀分布而成.在所得Pareto最优解集中,目标函数之间呈现此消彼长的关系.从整体函数图像可以看出,系统总成本、期望服务质量水平及最小需求覆盖水平3个目标之间是相互对立和相互关联的,当某一个目标函数值发生变化时,必将引起其余两个目标函数值的变化.当选址决策的目标趋向于以成本控制的视角考虑时,在曲线中靠近目标函数 $G_1$ 的左下半支中选择相对折中的解;当选址决策的目标更趋向于以期望服务质量水平均衡的视角考虑时,在曲线中靠近目标函数 $G_2$ 的左下半支中选择相对折中解,但会以付出较高的系统成本为代价;当选址决策的目标更趋向于以覆盖水平的公平性视角考虑时,在曲线中靠近目标函数 $G_3$ 的右上半支中选择满意解。

进一步以可视化的形式给出应急设施选址-分配网络的拓扑结构,如图3和图4所示。

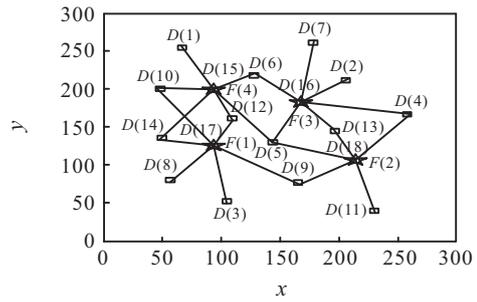


图3  $p_j = 0.1$ 时选址-分配网络的拓扑结构

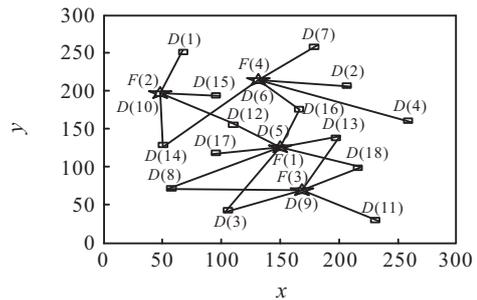


图4  $p_j = 0.2$ 时选址-分配网络的拓扑结构

以上对应急设施的中断概率进行不同的设置,获得了不同的选址分配结果.图3和图4中小矩形表示需求点的位置,星形表示选定应急设施点的位置,星形与小矩形之间的连线表示对应的应急资源分配.不同中断概率下,应急设施选址-分配网络的拓扑结构截然不同,各应急设施点在不同的选址网络拓扑结构下服务分配均发生改变.从拓扑结构图3和图4中可以看出,在服务能力有限的网络结构下,覆盖需求点并为其提供应急资源服务的未必是离其最近的应急设施,应急设施不是单独为某个需求点或者某几个需求点服务的独立个体,而是协同服务的集体,各个应急设施协同覆盖、合作覆盖,满足其应急资源需求和覆盖服务质量需求。

### 4 结论

本文基于中断风险决策环境研究应急设施选址多目标决策问题,考虑应急设施覆盖服务质量的非均衡性、应急资源需求的异质性的特点,建立了中断情境下服务能力有限的可靠性应急设施选址-分配多目标优化模型,根据模型特点采用NSGA-II求解模型,并通过随机生成的数值算例验证了模型和算法的可行性,获得了不同规模的可行度较高的多目标选址模型的Pareto非劣解集.基于不同的中断概率进行敏感性分析,分别获得Pareto最优解集在三维空间的分布,同时给出应急设施选址-分配网络的拓扑结构,便于决策者根据风险偏好在Pareto前沿面上获得最优的

选址-分配方案. 进一步可考虑风险规避及多周期环境下选址布局网络的优化建模和决策.

#### 参考文献(References)

- [1] Snyder L V, Daskin M S. Reliability models for facility location: The expected failure cost case[J]. *Transportation Science*, 2005, 39(3): 400-416.
- [2] Li Q, Savachkin A. Reliable distribution networks design with nonlinear fortification function[J]. *International Journal of Systems Science*, 2016, 47(4): 805-813.
- [3] Cui T, Ouyang Y, Shen Z J M. Reliable facility location design under the risk of disruptions[J]. *Operations Research*, 2010, 58(4): 998-1011.
- [4] Bahri S, Rusman M. Reliable facility location model considering disruption risk in logistic model[J]. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2013, 8(6): 177-182.
- [5] Berman O, Krass D, Menezes M B C. Locating facilities in the presence of disruptions and incomplete information[J]. *Decision Sciences*, 2009, 40(4): 845-868.
- [6] Farahani R Z, Hassani A, Mousavi S M, et al. A hybrid artificial bee colony for disruption in a hierarchical maximal covering location problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 75: 129-141.
- [7] Yun L, Qin Y, Fan H, et al. A reliability model for facility location design under imperfect information[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 81: 596-615.
- [8] Yeh C T, Fiondella L. Optimal redundancy allocation to maximize multi-state computer network reliability subject to correlated failures[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 166: 138-150.
- [9] Shen Z J M, Zhan R L, Zhang J. The reliable facility location problem: Formulations, heuristics, and approximation algorithms[J]. *Inform Journal on Computing*, 2011, 23(3): 470-482.
- [10] Yu G, Haskell W B, Liu Y. Resilient facility location against the risk of disruptions[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 104: 82-105.
- [11] Jalali S, Seifbarghy M, Sadeghi J, et al. Optimizing a bi-objective reliable facility location problem with adapted stochastic measures using tuned-parameter multi-objective algorithms[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 95: 45-57.
- [12] 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.
- [13] Lu M, Ran L, Shen Z J M. Reliable facility location design under uncertain correlated disruptions[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2015, 17(4): 445-455.
- [14] Mohammadi M, Tavakkoli-Moghaddam R, Siadat A, et al. Design of a reliable logistics network with hub disruption under uncertainty[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(9): 5621-5642.
- [15] 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.)
- [16] Rayat F, Musavi M M, Bozorgi-Amiri A. Bi-objective reliable location-inventory-routing problem with partial backordering under disruption risks: A modified AMOSA approach[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 59: 622-643.
- [17] Medal H R, Pohl E A, Rossetti M D. A multi-objective integrated facility location-hardening model: Analyzing the pre-and post-disruption tradeoff[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 237(1): 257-270.
- [18] Karatas M, Yalc E. An iterative solution approach to a multi-objective facility location problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 62: 272-287.
- [19] Fewell M P, Ozols S. Simple detection-performance analysis of multistatic sonar for anti-submarine warfare[R]. Edinburgh: Defence Science and Technology Organisation, 2011.
- [20] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [21] 张国富, 王永奇, 苏兆品, 等. 应急救援物资多目标分配与调度问题建模与求解[J]. *控制与决策*, 2017, 32(1): 86-92. (Zhang G F, Wang Y Q, Su Z P, et al. Modeling and solving multi-objective allocation-scheduling of emergency relief supplies[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(1): 86-92.)
- [22] Mousavi S M, Sadeghi J, Niaki S T A, et al. A bi-objective inventory optimization model under inflation and discount using tuned pareto-based algorithms: NSGA-II, NRGA, and MOPSO[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 43: 57-72.
- [23] Deb K. *Multi-objective optimization*[M]. Boston: Springer, 2014: 403-449.

#### 作者简介

于冬梅(1986—), 女, 副教授, 博士, 从事最优化方法及应用等研究, E-mail: yudongmei1113@163.com;

高雷阜(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事最优化理论与方法等研究, E-mail: gaoleifu@163.com;

赵世杰(1987—), 男, 讲师, 博士, 从事优化与管理决策的研究, E-mail: zhao2008shijie@126.com.