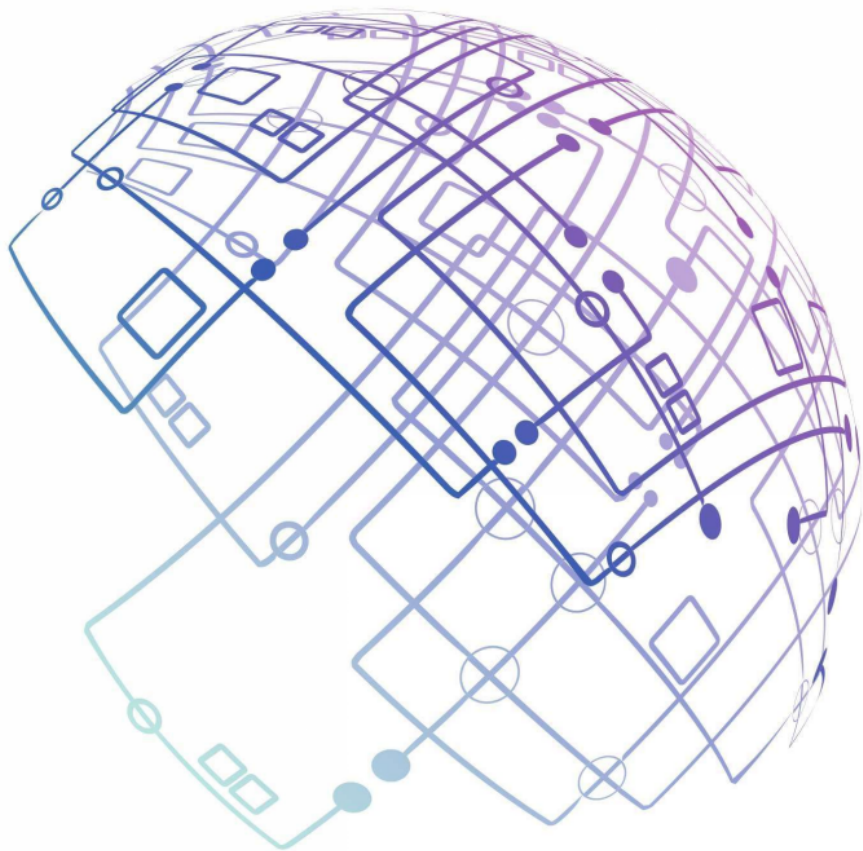


# 基于轴辐网络的重大突发事件 应急设施布局优化理论与应用

关贤军 王霞 葛春景 著



## 内 容 简 介

针对重大突发事件应急服务设施选址,本书采用轴辐网络理论进行应急设施网络布局,运用覆盖理论等设施选址理论,建立满足大规模应急救援下多次需求和多点需求的设施枢纽点和服务点的选址模型,并设计算法和选取了四川等地的算例进行求解分析。

本书适用于应急管理、工程管理领域的专业人员阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

基于轴辐网络的重大突发事件应急设施布局优化理论与应用 / 关贤军, 王霞, 葛春景著. -- 上海: 同济大学出版社, 2020.9

ISBN 978-7-5608-9476-8

I. ①基… II. ①关… ②王… ③葛… III. ①地震灾害—紧急避难—公共场所—选址—研究 IV. ①P315.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第168674号

---

## 基于轴辐网络的重大突发事件应急设施布局优化理论与应用

关贤军 王霞 葛春景 著

责任编辑 姚焯铭 责任校对 徐春莲 封面设计 张微

---

出版发行	同济大学出版社	www.tongjipress.com.cn
	(地址:上海市四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)	
经 销	全国各地新华书店	
排 版	南京月叶图文制作有限公司	
印 刷	江苏凤凰数码印务有限公司	
开 本	710mm×960mm 1/16	
印 张	9	
字 数	180 000	
版 次	2020年9月第1版 2020年9月第1次印刷	
书 号	ISBN 978-7-5608-9476-8	
定 价	68.00元	

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# 前 言

进入 21 世纪以来,我国遭遇地震、冰冻、泥石流、SARS 等多种重大突发事件,造成了巨大的财产损失和人员伤亡。在应对重大突发事件过程中,受灾点对应急服务资源的需求表现出多次需求、多点需求、需求量大和需求时间长等特点,这为提供应急服务的应急设施提出了更高的要求。为有效解决大规模应急服务资源需求问题,合理布局和优化应急服务设施至关重要。

本书以应急服务设施选址布局优化为切入点,在分析重大突发事件下应急服务需求的基础上,将轴辐网络理论应用到应急服务设施布局,设计了应急服务设施轴辐网络,研究了轴辐网络中的非枢纽点设施选址问题、枢纽点设施的选址-分配问题、轴辐网络中的绕道和拥堵问题、应急服务设施的不确定性环境的鲁棒优化问题以及考虑配送时序特征的应急服务设施轴辐网络选址优化问题,分别构建了数学模型,设计了相应算法并通过算例验证了模型及算法的有效性。进一步完善和扩展了应急服务设施选址布局理论与相关优化方法,为应急管理决策者对应急服务设施布局的科学决策提供依据。

本书核心内容主要有以下几个方面:

第一,对于重大突发事件中的需求量大,需求时间长等特点,设计了应急服务设施点轴辐网络布局体系,在非枢纽设施点选址基础上,再选择建立起到集中、分类、运转等调度和指挥中心功能的枢纽设施点,通过枢纽设施点将区域内的设施资源联动起来,为应急需求点持续供应大规模应急服务资源。

为解决应急服务需求点的多次需求、多点同时需求的问题,以经典覆盖模型为基础,释放了模型中的临界覆盖距离过于严格和一次性覆盖的假设,根据应急需求点的重要程度(权重)不同,对覆盖质量进行等级划分,采取有所差异

的服务质量水平形式,在满足基本覆盖要求的同时,对重要的需求点进行多重覆盖,同时考虑了重大突发事件对服务设施能力破坏的情况,构建了多重覆盖模型(MQCLP)。该模型使得在满足覆盖距离的情况下,为需求点提供多个设施的覆盖,同时应急需求点获得不同的阶梯形的距离覆盖。由于该覆盖模型属于 NP-Hard 问题,本书在传统的遗传算法的基础上进行改进,设计了贪婪遗传算法对多重覆盖模型进行求解,并通过算例证明了模型和算法的有效性。

对于枢纽点的选址和非枢纽点分配问题,提出枢纽覆盖半径,在强实效性约束下,构建了单分配枢纽集覆盖模型(SHSCP)。为了降低模型的复杂程度,提高求解效率,对模型进行线性化改进。针对模型特点,设计了改进的遗传算法对模型进行求解。通过较大规模的数据进行算例验证,对各约束变量进行分析,计算结果令人满意,算法的收敛速度和计算效率也表明了算法的有效性。

第二,研究了应急服务设施轴辐网络中的绕道、拥堵优化。为满足应急需求点对应急服务的大批量需求,有效利用轴辐网络的规模效益和密度经济,在网络中设置部分枢纽设施点对救援物资配送起到集散作用。由于应急服务设施点之间必须通过一两个枢纽点才能抵达应急需求点,增加了出行的绕道时间。对于绕道问题,根据应急服务的强时效性要求,设立最大绕道系数限制,提出两种解决绕道问题的策略:一是在原有 L-SHSCP 中增加绕道系数限制,构建带有绕道约束的单分配枢纽覆盖模型( $\gamma$ -SHSCP)来重新布局设施,通过算例分析模型各参数的约束能力和对于计算结果的影响变化大小。对不同的应急情况预测和风险的容忍程度,由决策者设立具体的绕道系数大小来解决绕道问题。二是在不改变原来网络结构布局的情况下,同时根据绕道系数的大小,在超过最大绕道系数的两个非枢纽点之间设立“捷径”直通通道,满足两点之间的直通服务。“捷径”的数量与系数大小呈正相关关系,系数越大,“捷径”越少,通过实例说明当系数释放到一定程度后, $\gamma$ -SHSCP 模型等同于 SHSCP。两种策略适用于不同的情况,这为决策者解决绕道问题提供参考依据。

在单分配的应急服务设施轴辐网络中,由于很多应急服务资源汇集到枢纽点,如果枢纽点容量有限,或者由于灾害对枢纽设施点的破坏造成枢纽点拥堵和无法服务,使得分配给该枢纽点的非枢纽设施点资源无法抵达灾区。为解决

此问题,本书提出两种策略:一是改变布局结构,构建多分配的枢纽集合覆盖模型,即一个非枢纽点可以同时分配给多个枢纽点,按照此模型对应急服务设施的选址进行布局,得到的布局网络可以有效避免枢纽点的拥堵问题;二是在不改变原来布局的情况下,只增加非枢纽点的分配方式,即让非枢纽点除了分配给原来枢纽点外,还分配给距离其最近的其他枢纽点设施,这样在没有拥堵的情况下,可以按照原来的分配方式进行配送,如果出现拥堵或者无法服务的情况,非枢纽点可以转向其他功能完好的枢纽点进行周转,这种策略同样可以有效解决枢纽点的拥堵问题。

第三,研究了不确定环境下的应急服务设施轴辐网络布局优化。由于重大突发事件发生的时间、地点、概率以及破坏程度具有不确定性,使得受灾点对应急服务设施的需求也具有不确定性,包括需求数量的不确定性和服务质量的不确定性。同时由于选址布局面临诸多不确定因素,如地理状况、人口分布、交通运输能力、经济实力等,所以构建具有良好鲁棒性的应急服务设施网络布局是本书重点内容之一。根据经典鲁棒优化的三种方法,提出了三种 $\gamma$ -SHSCP的鲁棒模型,可作为不同风险偏好决策者的参考依据。本书根据应对重大突发事件的特点和应急救援的要求,构建了双重 $\lambda$ 鲁棒优化模型( $\lambda$ -SASCH),即模型的函数目标和最远两点的出行时间与各种情景下的最优值之间的偏差分别控制在 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 之内,目的是使具有较好条件的候选设施点更易成为枢纽点、最优两点的最大出行时间尽量最小。针对鲁棒模型,给出了鲁棒解的求解方法。为了和前面章节中的模型结果进行对比,通过算例分别对 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 进行分析,同时给出了满足两个偏差约束的模型最终鲁棒解,虽然鲁棒解不是各种情景下的最优解,但均为可行解,适用于各种不同的情景,对于不确定性的环境变化不敏感,具有很好的鲁棒性,从而有效规避各类不确定性的风险。

第四,考虑时序特征的应急服务设施轴辐网络优化对于有序合理配送应急资源起着重要作用,保证在紧急状态下有序、高效、准确地调度应急资源,有序开展救助工作。有些救援工作(如地震救援)具有很强的时效性,随着不同阶段各项救援工作的依次开展,需要向灾区提供救援装备、医疗物资、后勤保障等不同类型的物资,救援和应急物资配送存在明显的先后顺序。由于不同类别应急

物资时效性要求不同,则需要根据救援和物资配送时序特征划分多个覆盖临界,构造基于多个多层次质量覆盖的选址模型。

本书综合考虑物资配送时序特征和仓库容量,以最大化覆盖总需求点权重,最大化最低覆盖质量水平和最小化加权最大救援时间为目标,建立了应急设施点多级覆盖选址模型。利用极大模理想点法构造偏差率最小化模型法和NSGA-II算法这两种方法进行求解,结合案例,就不考虑和考虑物资配送时序特征与仓库容量的情形进行对比研究,并比较了两种算法的优劣性。

最后对全书进行了总结,并对书中存在的不足和有待进一步深入研究的问題提出继续研究的方向和展望。书中内容为多年来所做课题研究成果的总结,其中部分成果为最近完成。

另外,要感谢老师尤建新教授多年来的指导,感谢研究生周晗、李梦欣所做的大量工作。

编 者

2020年6月

# 目 录

## 前言

第 1 章 导论 .....	1
1.1 研究背景及概念 .....	1
1.2 研究意义 .....	4
1.3 研究现状 .....	5
1.3.1 应急服务设施选址优化 .....	5
1.3.2 轴辐网络布局优化 .....	9
1.3.3 不确定性及鲁棒优化 .....	12
1.4 研究内容和结构框架 .....	16
第 2 章 应急服务设施轴辐网络布局优化 .....	20
2.1 应急服务问题背景 .....	20
2.2 应急服务设施轴辐网络布局优化 .....	23
2.2.1 轴辐网络在应急管理领域的应用 .....	23
2.2.2 应急服务设施轴辐网络运行 .....	26
2.3 本章小结 .....	29
第 3 章 应急服务设施轴辐网络非枢纽点布局优化 .....	30
3.1 问题背景 .....	30
3.2 MQCLP 模型 .....	36
3.3 求解 MQCLP 的贪婪遗传算法 .....	38
3.3.1 算法要素 .....	38
3.3.2 贪婪遗传算法流程 .....	39

3.4	MQCLP 模型在应急服务设施点选择中的应用	41
3.5	本章小结	44
<b>第 4 章</b>	<b>应急服务设施轴辐网络枢纽点布局优化</b>	<b>45</b>
4.1	问题背景	45
4.2	L-SHSCP 模型	48
4.2.1	原有模型	48
4.2.2	线性化改进模型	50
4.3	应急服务设施轴辐网络枢纽点布局算法求解	51
4.4	L-SHSCP 模型实际应用及分析	55
4.5	本章小结	61
<b>第 5 章</b>	<b>应急服务设施轴辐网络绕道、拥堵优化</b>	<b>62</b>
5.1	轴辐网络绕道问题背景	62
5.2	$\gamma$ -SHSCP	63
5.2.1	构建模型	63
5.2.2	算例分析	64
5.3	带有“捷径”的轴辐网络构建	69
5.4	轴辐网络中的拥堵问题背景	73
5.5	$\gamma$ -MAHSCP 模型	73
5.5.1	原有模型及改进模型	73
5.5.2	求解 $\gamma$ -MAHSCP 模型的分散搜索算法	75
5.5.3	增加非枢纽点分配方式策略	77
5.6	本章小结	78
<b>第 6 章</b>	<b>不确定条件下应急服务设施轴辐网络布局鲁棒优化</b>	<b>79</b>
6.1	问题背景	79
6.2	不确定问题的优化方法	80
6.3	鲁棒模型	81
6.3.1	三种鲁棒优化模型	81
6.3.2	$\lambda$ -SASCH 模型	84

6.4	鲁棒解的求解流程及算法·····	85
6.5	算例分析·····	86
6.6	本章小结·····	90
<b>第 7 章</b>	<b>考虑时序特征的应急服务设施轴辐网络设施点布局优化</b> ·····	<b>91</b>
7.1	问题背景·····	91
7.2	应急服务设施点布局优化模型·····	92
7.2.1	不考虑时序特征和仓库容量的优化模型·····	93
7.2.2	考虑时序特征和仓库容量的优化模型·····	95
7.3	应急服务设施点布局优化模型求解·····	97
7.4	算例分析·····	103
7.5	本章小结·····	120
<b>第 8 章</b>	<b>结论与展望</b> ·····	<b>121</b>
8.1	主要结论·····	121
8.2	研究与展望·····	121
<b>参考文献</b>	·····	<b>124</b>

## 1.1 研究背景及概念

### 1. 研究背景

我国是世界上灾害频率高、种类多、破坏严重的国家之一,每年遭受着各种自然灾害、事故灾害、突发卫生事件以及突发社会安全事件,给人民生命财产安全造成巨大损失。资料显示,从 1990 年至 2008 年 19 年间,在我国因各类自然灾害,平均每年约 3 亿人受灾,倒塌房屋 300 万间,紧急转移安置人口 900 多万人次,直接经济损失 2 000 多亿元人民币,并且有 50% 以上的人口、70% 以上的城市分布在气象、地震、地质、海洋等自然灾害严重的地区<sup>[1]</sup>。

进入 21 世纪以来,我国陆续遭遇各类重大突发事件:肆虐全国的“非典”、2008 年南方暴雪冰冻灾害、汶川大地震、玉树地震和甘肃舟曲特大泥石流灾害等。这类重大突发事件造成巨大的人员伤亡<sup>[2,3]</sup>、财产损失<sup>[4,5]</sup>,环境遭到严重破坏<sup>[6]</sup>。例如 2008 年的汶川地震,造成了四川、陕西、甘肃、重庆、河南、云南等地大量人员伤亡和经济损失。截至 2008 年 6 月 28 日,四川省遇难人数达到 68 683 人,失踪 18 404 人,受伤 360 358 人;倒塌房屋、严重损毁不能再居住和损毁房屋涉及近 450 万户,1 000 余万人无家可归;重灾区面积达 10 万平方公里。根据国家汶川地震专家委员会调查评估,“5·12”汶川大地震造成的直接经济损失高达 8 451 亿元人民币<sup>[7]</sup>。

各类重大突发事件造成的巨大损失,主要原因有:一是重大突发事件的巨大破坏性,重大突发事件突发性强、破坏性大、影响范围广,而且容易发生次生

灾害。二是人们对突发事件的应急准备不足。如果按照常规性灾害备灾,一旦遭遇重大突发事件,特别是毁灭性灾害的打击,防灾减灾工作将处于措手不及、忙而无序的尴尬境地。

为有效应对重大突发事件,一方面要完善重大突发事件的预警系统、提高重大突发事件的预警能力;另一方面要合理配置应急服务资源,做到充分备灾。然而,在应对重大突发事件过程中,所需要的应急资源无论是数量、质量还是种类都是前所未有的。所以,有效应对这类重大突发事件,需要大量应急服务设施同时投入应急救援工作中。

目前我国大多数区域的应急服务设施的数量和服务质量水平一般是按照应对常规突发事件的标准进行布局设计,由于重大突发事件具有破坏性强,需要的应急服务设施数量大、种类多,突发事件发生概率低等特点,传统的应急服务设施布局虽然能满足少量应急服务资源需求,但对于大规模应急资源调度问题,则易造成调度局面混乱、拥堵或中断等情况。例如在汶川地震中,由于地震造成大面积的房屋倒塌,区域内布局的专业救援设备缺乏,在应急救援初期,即营救生命的黄金时间,应急服务人员只能徒手进行应急营救,不仅耽误救援时机,造成更大损失和伤亡,同时应急服务人员的人身安全也存在着很大隐患。传统的应急服务设施布局不能应对如此复杂的局面,救援救助工作很难顺利进行,尤其在形成灾害链或灾害群的复杂情况下,这些问题将更加突出。

本书从应对重大突发事件的应急服务设施布局问题入手,对应急服务设施进行选址、分配,构建应急服务设施的联动网络,将区域内所有的应急服务设施联动起来,使得应急服务设施联动网络不仅需要满足常规突发事件的应急需求,而且更能够有效应对各类重大突发事件以降低损失。

## 2. 相关概念

### 1) 重大突发事件

国务院 2006 年 1 月 8 日发布的《国家突发公共事件总体应急预案》<sup>[8]</sup>定义了突发公共事件,它是指突然发生,造成或者可能造成重大人员伤亡、财产损失、生态环境破坏和严重社会危害,危及公共安全的紧急事件。根据突发公共事件的发生过程、性质和机理,突发公共事件主要分为自然灾害、事故灾难、公

共卫生事件和社会安全事件四类。

2007年8月30日通过并于2007年11月1日开始实施的《中华人民共和国突发事件应对法》<sup>[9]</sup>中规定的突发事件是指突然发生,造成或者可能造成严重社会危害,需要采取应急处置措施予以应对的自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件。《中华人民共和国突发事件应对法》按照社会危害程度、影响范围等因素,将突发事件分为特别重大、重大、较大和一般四级。

依据《国家突发公共事件总体应急预案》和《中华人民共和国突发事件应对法》的对突发(公共)事件的划分,本书提出了对重大突发事件的界定。具体表述为:重大突发事件(Large-scale Emergency)是指突然发生,造成或者可能造成重大人员伤亡、财产损失、生态环境破坏和严重社会危害的紧急事件,且影响人口达到100人以上,影响区域面积达10平方公里以上的紧急事件。

本书界定的重大突发事件包括上述法律法规提出的重大级别和特别重大级别的突发事件。例如2010年4月14日,在我国青海省玉树藏族自治州玉树县发生的7.1级地震,造成2 064人遇难,175人失踪,12 135人受伤,10多万户灾民需要转移安置<sup>[10]</sup>。这类突然发生,造成大量人员伤亡的突发事件属于本书所界定的重大突发事件。

## 2) 应急服务设施

应对重大突发事件需要大量的应急设施投入应急救援活动中,而应急设施又分为不同的种类。根据应急服务设施(也称为应急资源点或应急出救点)的特征,一般可以分为两类:第一类是提供应急服务,如消防站、紧急医疗服务设施等,通常在一定范围内考虑提供及时的应急服务;第二类是提供应急物资和资源,通常考虑在区域内提供足够的应急物资和资源,如食品、饮用水、棉被和帐篷等。

应急设施根据需求者和服务者的来往问题,可分为固定服务设施和移动服务设施<sup>[11]</sup>,其中固定服务设施是指需求者(服务接受者)必须到达提供服务的固定场所才能接受服务,如医院、防灾公园、避难场所等;移动服务设施是指提供服务的服务者需要达到需求点,并提供服务。一般设施都属于移动服务设施,例如消防站、医疗救援中心、专业工程抢险等。

本书研究的应急服务设施属于此类移动应急服务设施(简称应急服务设施,以下文中提及的应急服务设施均属于移动应急服务设施)。

### 3) 应急服务设施布局

应急服务设施布局是在一定区域内,根据应急服务需求的特点,确定此区域内应急服务设施的数量和位置,来满足区域内的应急服务需求。

应急服务设施布局通常分为:永久性应急设施布局(Permanent Facility Location)和临时性服务设施布局(Temporary Facility Location/ Layout)两种。永久性应急服务设施布局是属于灾前提前规划布局,是提前应急准备过程(Preparedness for Emergency Requirement),例如,消防站的选址布局、公安部门的选址布局等;临时性应急服务设施布局是根据突发事件发生后的情况临时确定地点的布局(Temporary Response for Requirement),例如,设立应急物资分发中心、医疗小队集聚点等。

根据上述概念的界定,本书中应对重大突发事件的应急服务设施布局是指有效应对各类重大突发事件,提前对永久性的移动类应急服务设施进行规划,确定其数量和位置的过程。

## 1.2 研究意义

### 1. 实践意义

有效应对重大突发事件需要大规模的应急服务资源参与应急救援过程中,而常规应急服务设施布局已不能适应此类应急救援的情况。本书对应对重大突发事件的应急服务设施轴辐网络布局与优化问题进行研究,其研究的意义主要在于:

(1) 能为决策者提供一般意义上应急服务设施网络布局的研究方案。应对重大突发事件的选址布局问题,需要考虑应急需求的多点同时需求和多次需求的特点,这需要在建模技术和方案求解上寻求突破,所以研究应急服务设施多重覆盖问题对应急管理者而言具有更重要的实践意义。

(2) 实现区域应急服务资源共享与优化。重大突发事件中的应急需求还包

括数量大、需求时间长等特点,这就需要有源源不断的后援资源,因此本书建立的应急服务设施轴辐网络能够利用枢纽的集散功能、枢纽之间的规模效益和密度经济,从而满足重大突发事件中应急服务的需求,构建的模型和求解方案能够为整个区域的应急服务设施的整体规划提供决策参考依据。

## 2. 理论意义

本书涉及的理论有选址理论、轴辐网络理论和启发式算法等优化方法和理论。本书根据应对重大突发事件对应急服务需求的特点,将轴辐网络理论用于应急服务设施布局中,对非枢纽点的应急服务设施选址、枢纽点的选址一分配、针对轴辐网络中的绕道缺点和拥堵以及考虑时序特征的应急服务设施轴辐网络设施点选址优化展开了研究,分别构建了相应的模型,并设计了对应的启发式算法,这些研究在理论上将进一步完善和丰富选址理论、轴辐网络理论以及相关优化理论。

## 1.3 研究现状

### 1.3.1 应急服务设施选址优化

随着选址问题的研究得到巨大的发展,设施选址理论也不断完善。在设施选址(Facility Location Problem)问题中,形成了以三类模型为基础的选址理论,众多选址问题的模型都是在此基础上的改进或扩展。这三类模型分别是覆盖选址模型、 $p$ -中值(中位)选址模型和  $p$ -中心选址模型。而覆盖问题又分为集覆盖问题和最大覆盖问题<sup>[12]</sup>,最大覆盖选址问题(MCLP)最初是由 Church 和 Reville(1974)<sup>[13]</sup>提出的,通过确定设施数目使覆盖需求点的人口为最大; Church(1991)<sup>[14]</sup>等建立了一个双目标最大覆盖选址模型,在最大覆盖距离内,使覆盖的需求点数目最大化。同时,使未覆盖的需求点到最近设施点的距离最小化。集合覆盖问题研究的是在满足所有需求点的前提下,设施点的建设费用最小的问题。Plane(1977)<sup>[15]</sup>, Daskin(1981)<sup>[16]</sup>等对集合覆盖问题做了大量的研究。 $p$ -中心选址模型是 Hakimi(1964)<sup>[17]</sup>提出的,该模型的目标是为  $p$  个服

务设施进行选址,使得各个需求点到  $p$  个服务设施之间的总加权距离最小。 $p$  中心选址问题研究的是确定数量的  $p$  设施,使各个设施服务需求点的(加权)最大距离最小,该问题同样是由 Hakimi 提出的。

ReVelle 和 Swain(1970)<sup>[18]</sup> 最早给出了  $p$ -中值问题的整数线性规划模型:

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{当候选设施点 } j \text{ 被选中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}, x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{需求点 } i \text{ 被指派给设施点 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases},$$

则  $p$ -中值模型的整数线性规划模型为

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (\omega_i d_{ij}) x_{ij} \quad (1-1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (1-2)$$

$$x_{ij} - y_j \leq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (1-3)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (1-4)$$

$$x_{ij}, y_j \in (0, 1), \forall i \in I, j \in J \quad (1-5)$$

目标函数式(1-1)表示各个需求点到  $p$  个服务设施之间的总加权距离最小;约束式(1-2)保证每个需求点仅指派给一个服务设施;约束式(1-3)保证只有当设施点开放时,需求点才能支配给该设施点;其余约束条件意义同上。

由于  $p$ -中值问题属于选址模型的“最小和(minisum)”问题, $p$ -中值模型是以需求点的服务需求  $\omega_i$  作为权重进行加权, $p$ -中值模型的最优解趋向于把服务设施设置在靠近服务需求大,即  $\omega_i$  较大的需求点的位置,因此, $p$ -中值问题也被称为  $p$ -“重心”问题<sup>[19]</sup>。

$p$ -中心选址问题( $p$ -Center Problem)研究的是确定数量的  $p$  设施,使各个设施服务需求点的(加权)最大距离最小,该问题同样是由 Hakimi 提出的。根据设施在网络中的位置不同,中心问题可分为极点中心问题(即设施被设置在网络的节点上)和绝对中心问题(即设施可以设置在网络中的任何地方)。其中极点  $p$ -中心模型如下所示。

设需求点到设定的设施之间的最大距离为  $L$ ,  $y_j, x_{ij}$  为 0-1 整数决策变

量,取值意义同  $p$ -中值模型,则极点  $p$ -中心模型为

$$\min L \quad (1-6)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (1-7)$$

$$x_{ij} - y_j \leq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (1-8)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (1-9)$$

$$L - \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \geq 0, \forall i \in I \quad (1-10)$$

$$x_{ij}, y_j \in (0, 1), \forall i \in I, j \in J \quad (1-11)$$

其中,目标函数式(1-6)表示最大距离最小;约束式(1-10)表示任何需求点  $i$  与最近的设施点  $j$  之间的距离不能超过最大距离  $L$ ;其余约束条件意义同  $p$ -中值模型。

$p$ -中心选址问题是属于“最小最大(minimax)”问题。和集合覆盖模型不同,在覆盖模型中,标准覆盖距离是预先确定的,而  $p$ -中心选址问题也是要“覆盖”全部需求点,但不使用外部输入的覆盖距离  $D$ ,而是模型“内生”地确定与设置  $p$  设施相适合的最小覆盖距离  $L$ 。

在应急服务设施选址领域, $p$ -中值模型和  $p$ -中心模型主要应用于在固定场所提供服务的应急设施,但也可以应用于各类专业工程抢险救灾单位(如通信、电力、道路工程抢险车辆等)这样的移动服务设施的选址决策问题。这些应急服务设施,应急响应的及时性要求不是很高。

选址问题的经典模型,主要适用于企业在满足客户需求的基础上,使设施建造费用、生产费用、运输与配送费用及库存费用最小化的设施选址问题。但由于应急领域的设施选址与传统企业设施选址相比具有特殊性,传统的选址模型很难满足应急资源布局要求,于是国内外很多学者更加重视并研究应急设施选址问题。

在应急设施选址问题中,很多学者从限定时间和成本问题入手,即在限定时间内,如何以最小的成本到达服务设施需求点。Harewood (2002)<sup>[20]</sup>采用设施覆盖问题中的排队论的方法,计算了应急设施在应急时间内到达的概率,再

以最小成本为目标对救护车的部署和调度问题进行了研究。以时间和成本作为模型的约束条件的研究文献还包括 Brotcorne (2003)<sup>[21]</sup>、Goldberg (2004)<sup>[22]</sup> 以及 Alsalloum(2006)<sup>[23]</sup> 等。方磊(2003,2004,2005)<sup>[24-26]</sup> 在考虑了满足应急系统时间紧迫性的前提下,给出了基于系统的费用最小数学模型,并提出了基于分支界定、数据包络分析方法(DEA)等方法的应急布局最优模型。孙文秀等(2007)<sup>[27]</sup> 认为,在已有的优化目标的数学模型中,所给出的求解方法经检验并不适用于所有的实际情况,作者对已有的方法进行了改进和修补,给出了一个实际应用的适用于任意网络的算法。

在各类突发事件中,应急服务设施选址涉及经济、技术、社会、安全等诸多因素。于是很多学者提出了基于多目标的应急服务设施布局模型:Galvao (2005)<sup>[28]</sup> 和 Hari (2008)<sup>[29]</sup> 分别以分阶段的方式对应急设施的布局选址问题进行分析,并以限制时间、运行成本以及设施覆盖率问题为约束条件进行了建模;Hari (2009)<sup>[30]</sup> 等在文献[29]的基础上同时考虑了应急设施到达概率问题,采用了随机规划范式对分阶段模型进行了研究。尤文等(2008)<sup>[31]</sup> 利用多目标免疫算法,给出了一种多目标城市应急设施布局选址问题的数学模型,并进行了有效性验证;韩强、宿洁(2007)<sup>[32, 33]</sup> 在带限期约束的应急服务设施选址模型的基础上,通过对搜索操作和参数合理设置,利用模拟退火算法,提出了多目标的应急设施布局问题的模型。杨锋等(2008)<sup>[34]</sup> 认为,将 DEA 用于应急设施布局决策具有合理性,作者考虑了道路特性,对多个设施布局问题进行了研究。魏汝营(2009)<sup>[35]</sup> 等综合考虑应急设施选址的效率性、公平性和成本等多方面因素,建立了一个多目标决策模型,采用线性加权和法求解该模型。贺小容(2010)<sup>[36]</sup> 等根据应急系统的特性,提出了基于  $p$ -中值问题的应急系统多层次选址问题,作者所探讨的应急服务设施分为两层,其中高层能提供的服务包括低层能提供的服务。需求的流动可以从需求点直接到高层级的应急设施,也可以从需求点先到层级低的应急设施,再由层级低的应急设施转到层级高的应急设施。在需求多方向地流向应急系统及层级系统之间有不同容量限制的背景下建立了整数规划模型,并借助于 Matlab 软件进行算例分析。

由于设施选址问题属于 NP-Hard 问题,对于大规模数据的问题,传统的精