

基于广义最大覆盖模型的人防专业队布局研究\*

魏连雨,王金伟,李雪,巨利荣

(河北工业大学 土木与交通学院,天津 300401)

**摘 要:**人防建设是我国国防建设重要的组成部分,针对我国城市现状人防专业队工程建设数量不足、布局缺乏科学性等问题,分析了最大覆盖模型在布局问题上的不足,进而引入广义最大覆盖模型(GMCLP),探讨改进了人防专业队的布局方法。GMCLP 模型解决了最大覆盖模型(MCLP)中覆盖度是二元值假设的缺陷,不仅实现了设施点在不同覆盖度下对所有需求点的覆盖,还减少了设施点的数量。用 GMCLP 模型对实例进行抢险抢修专业队进行布局,结合 ArcGIS10.0 中的 New Analyst 功能进行求解。结果表明,GMCLP 模型不仅能够不同程度覆盖所有需求点,而且还可以减少抢险抢修专业队的数量,节约政府财政支出。

**关键词:**广义最大覆盖模型;人防工程布局;人防专业队;ArcGIS

中图分类号:TU92      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)03-0601-06

Research on Civil Defense Professional Team Layout Based on Generalized Maximum Coverage Model

Wei Lianyu, Wang Jinwei, Li Xue, Ju Lirong

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P.R. China)

**Abstract:** Civil defense construction is an important part of China's national defense construction. In view of the problem of insufficient quantity and scientific layout of the civil defense team in our country, the deficiency of the maximum coverage model on layout is analyzed. The paper introduces the generalized maximum coverage model, and discusses the way to modify the layout method of civil defense team. Generalized maximum coverage model solves the maximum coverage model defects of the two element value hypothesis about the coverage, realizes the coverage of all demand points in different levels and reduces the number of facilities. Using the generalized maximum coverage model to layout of emergence and rush repair team(ERRT), combined with the Network Analyst function of ArcGIS10.0 to solve. The results show that the generalized maximum coverage model not only can cover all the needs of different levels, but also can reduce the number of professional teams and save the government expenditure.

**Keywords:** generalized maximum coverage model; civil air defense project layout; civil air defense professional team; ArcGIS

0 引言

随着我国城市化进程的不断加快和新时期世界军事的不断变革,地下空间已然成为城市建设和人防建设中的不可缺少的一部分<sup>[1]</sup>。人防工程建

设属于城市的基础设施建设,是现代化城市建设的重要组成部分<sup>[2]</sup>。人防专业队是为满足防空袭战争的需要,在防空重点城市按专业组成担负人民防空勤务的组织,是战时保证人民生命财产安全、城市正常运行的重要保障。

\* 收稿日期:2017-11-23(修改稿)  
作者简介:魏连雨(1957-),男,天津人,硕士,教授,博导,主要从事交通运输规划与管理方向研究。  
E-mail: wly57@126.com

如何对人防专业队伍进行科学合理的布局,既能减少政府财政的支出,又能确保战时城市防空袭的需要,传统的“画圆法”早就不能满足现代化城市发展的需要<sup>[3]</sup>。Church 和 Reville 提出了最大覆盖模型(MCLP),该模型解决了  $N$  个供应点能够覆盖最多需求点问题。贺鹏用此模型进行了人防专业队的布局研究,MCLP 模型目标函数为  $\max \sum_{i \in I} w_i y_i$ ,约束条件为  $y_i - \sum a_{ij} x_j \leq 0$ ,其中  $a_{ij}$ 、 $x_j$ 、 $y_i$  是二元值的变量。此模型存在的问题在于  $a_{ij}$ 、 $x_j$ 、 $y_i$  为二元值变量,即需求点只有被覆盖与不被覆盖两种选择,即此模型存在着需求点可能不被覆盖的问题<sup>[4]</sup>。针对这个问题,衍生了广义最大模型(GMCLP),此模型可以实现不同空袭风险等下在其相覆盖度下的全面覆盖<sup>[5]</sup>,还可以对专业队有重点地进行布局,减少人防专业队工程的数量,节约财政支出。

1 广义最大覆盖模型概述

1.1 广义最大覆盖模型

Berman 等最早提出了广义最大覆盖模型(GMCLP),此模型把传统最大覆盖模型(MCLP)中的覆盖度二值化假设改为多元化的假设,并首先提出了“部分覆盖”的理念,要求全部需求点都可以被覆盖,只是覆盖的程度不一样,目标是让覆盖节点加权之和达到最大。依据 GMCLP 理念,可把模型改进为

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_i c_{ij} y_{ij} \tag{7}$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 (i \in I, j \in J) \tag{8}$$

$$\sum_{j \in J} x_j = N \tag{9}$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \tag{10}$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad (i \in I, j \in J) \tag{11}$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad (i \in I, j \in J) \tag{12}$$

式中: $c_{ij}$ 是需求点  $i$  相对供应点  $j$  的覆盖度,通常和距离有关系;

$$y_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{候选点 } j \text{ 未能够覆盖需求点 } i \\ 1 & \text{候选点 } j \text{ 能够覆盖需求点 } i \end{cases}$$

目标函数——式(7)能够使被覆盖的需求点加权和达到最大;约束条件——式(8)表明唯有在候选

点  $j$  选中,候选点  $j$  才有可能覆盖需求点  $i$ ;约束条件——式(9)表明从候选点中要选择供应点的个数  $N$ ;约束条件——式(10)限定了每个需求点  $i$  全部被唯一 1 个并且只能被 1 个供应点所覆盖;约束条件——式(11)和式(12)限定了  $x_j$  和  $y_{ij}$  是二元值。

1.2 覆盖度的确定

覆盖度的确定主要包括 3 个步骤,即城市子区域的划分、空袭风险等级的确定、覆盖度的确定。

1.2.1 城市子区域的划分

为了更好地确定责任分区和在遭遇空袭能够迅速救援,对城市进行子区域划分。在进行城市子区域的划分时,主要考虑以下原则:

(1)城市子区域的划分要充分结合城市的地形特点。

(2)城市子区域的划分要结合城市总体规划的土利用性质、用途等规划,要充分考虑城市功能边界。

(3)城市子区域应该以主干道路为边界,由一系列相邻的街区为组成的单元。

(4)城市子区域的划分要尽量和城市的行政边界一致,以便于统一管理。

1.2.2 空袭风险等级的确定

空袭风险等级的确定主要考虑重要目标数量、用地性质、人口密度、建筑质量等因素<sup>[6-7]</sup>,一般可以将城市划分为 3 个等级:一级重点防护区、二级重点防护区、一般防护区。以抢险抢修专业队为例,按照《人民防空战术技术要求》一般抢险抢修专业队的服务半径与重要目标的距离为 200 ~ 3 000 m。取主干路的速度 50 km/h,故抢险抢修专业队到达救援现场的时间应在 0.24 ~ 3.6 min 之间,抢险抢修专业队的响应时间参考《人民防空战术技术要求》,一级重点防护区空袭风险最高,对应的响应时间取 3 min;二级重点防护区次之,取 5 min;一般防护区空袭风险较低,取 8 min。

1.2.3 覆盖度的确定

采用分段函数来表示覆盖度,既可以顾及到不同责任分区的空袭风险等级,又将覆盖度为二元的函数变成覆盖度为多元的函数。

$$c(t)=\begin{cases}1 & (t\leqslant t_1) \\ 1-\frac{t-t_1}{t_u-t_1} & (t_1<t<t_u) \\ 0 & (t\geqslant t_u) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $c$ 是和距离有关(此处把距离转变成对应道路的行车时间)的覆盖度; $t$ 是供应点至需求点车辆行驶的时间; $t_u$ 是响应时间的上限; $t_1$ 是响应时间的下限。

不同的空袭风险等级的响应时间是不一样的,具体数值见 1.2.2 节。当供应点和需求点之间行车时间在响应时间的下限之内时,其覆盖度的值为 1;当两点之间的响应时间在响应时间上限以外时,覆盖度的值为 0;当响应时间处于上、下限区间时,覆盖度是 0~1 之间的递减函数。

2 实例研究

选取某城市的一部分区域作为研究对象,抢险抢修专业队布局流程如图 1。第 1 步,划分子区域及根据相关因素确定其空袭的风险等级;第 2 步,生成道路拓扑网络,并输入道路的等级以及专业队车辆在模型中的行驶速度;第 3 步,求解不同风险等级子区域在其相应覆盖度下抢险抢修专业队布局,为广义最大覆盖模型打下基础;第 4 步,参考第 3 步结果,通过不断调整模型中专业队的数量及位置,用广义最大覆盖模型对抢险抢修专业队进行布局。

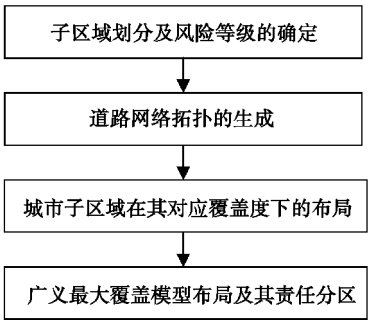


图 1 抢险抢修专业队布局流程图

Fig. 1 Flowchart of emergence and rush repair team layout

2.1 分析处理

2.1.1 子区域的划分

按照 1.2.1 子区域划分的原则,将研究区域划分成 160 个子区域,具体分区结果如图 2。

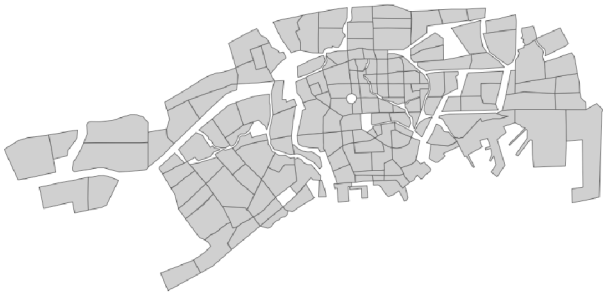


图 2 研究区域分区结果

Fig. 2 Result of study area partition

2.1.2 确定子区域风险等级

利用研究区域的用地布局规划图(2020 年)、用地及住房建设规划图(2020 年)等,并结合重要目标的分布情况,按照 1.2.2 对已经划分好的子区域进行空袭风险分级(如图 3)。



图 3 研究区域空袭风险分级图

Fig. 3 Study area air strike risk grading

2.1.3 路网拓扑生成

根据研究区域道路交通规划(2008—2020 年),提取道路中心线作为人防专业队救援通道网络图(如图 4)。其中,把道路简化成节点与节点间的连线,把道路交叉口简化成网络上的节点,根据研究区域道路交通规划的道路等级及其道路的设计速度,考虑到模型中人防专业队行车时受道路因素的影响<sup>[8]</sup>,取人防专业队车辆行驶的速度如表 1,人防专业队救援网络确定的原则如下:

(1)人防专业队布局中路网拓扑要以城市实际交通网为依据进行简化。

(2)随着路网拓扑中的节点数目增多,计算量会增大,误差也会增大,故应尽量减少主干路以外的节点数量。

(3)在建立的网络拓扑中,用行车时间表示节点间路径的长度。

(4)假设每个子区域可能发生火灾的地点为该区域的心(即需求点),此中线点要与子区域网络节点相连接。

在网络拓扑中主要包括点、线、面三要素,点要素主要包括道路节点、子区域中心点和抢险抢修专业队候选点;线要素主要是指提取的道路中心线,在提取过程中输入速度和道路等级等要素,然后利用字段计算器算出经过路段的时间;面要素是指根据子区域划分的原则划分的城市子区域。

抢险抢修专业队的主要任务是对道路、桥梁、重要目标等工程进行抢险抢修,故在已经生成的人防专业队救援通道网络图中,选取主干路以上道路的十字交叉口为抢险抢修专业队的候选点,以保证遭遇空袭时能够快速的对受空袭区域进行抢险抢修<sup>[9-10]</sup>(抢险抢修专业队候选点位置如图 5)。

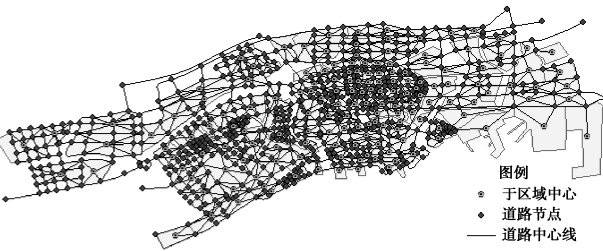


图 4 人防专业队救援通道网络图

Fig. 4 Channel network of civil air defense professional team



图 5 抢险抢修专业队候选点位置图

Fig. 5 Candidate points position of ERRT

表 1 人防专业队平均行车速度

Table 1 Average driving speed of ERRT

道路等级	行车速度	
	道路的 设计速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	人防专业队 行车速度 的设定/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )
高速公路	100	80
快速路或国道	80	65
主干路或旅游路	50~60	50
次干路或一般公路	40	35

2.2 广义最大覆盖模型在抢险抢修专业队布局中的实现

目前 ArcGIS10.0 中 New Analyst 扩展模块中的 New Location-Allocation 功能提供 6 种典型优化模型,其中 Maximize Capacitated Coverage 模型和 Minimize Facilities 模型适用于政府出资建设具有强制性服务范围的防灾急救等应急保障设施的规划布局<sup>[11-12]</sup>。ArcGIS10.0 中的 Maximize Capacitated Coverage 模型是以最大覆盖模型为基础,通过增加约束条件,来实现抢险抢修专业队位置与需求点之间不超过所设置的约束条件。Minimize Facilities 模型是通过最大化覆盖范围模型改进而成的模型,此模型可在抢险抢修专业队候选点中自动选出尽量少的点,使抢险抢修专业队的服务半径(可以是时间、距离等)之内的需求点最多。

Minimize Facilities 只可以实现一个覆盖度下的位置分配(即实现 MCLP 模型),不能直接实现 GMCLP 模型。在此,先通过 Minimize Facilities 模型求出各空袭风险等级下 ERRT 的位置和数量(如表 2 和图 6),然后对 ERRT 位置和数量进行不断的调整,直至实现所有等级的子区域在其覆盖度下实现全面覆盖。

在调整过程中,因一级重点防护区对相应时间的要求高,故 ERRT 的位置要优先考虑 3 min 专业队及其周边候选点的位置。ERRT 的数量要以 3 个风险等级下所需 ERRT 数量最多的往上调,然后通过分别加载不同等级需求点的位置,设置相应的中断点,直至所有需求点都满足其覆盖度的要求。

表 2 不同风险等级需要抢险抢修专业队数

Table 2 Number of ERRT in different risk levels

风险等级	专业队数目/个
一级重点防护区	6
二级重点防护区	3
一般重点防护区	4

由表 2 可知,实现一级重点防护区全部覆盖最少需要 6 支抢险抢修专业队,故要实现研究区域在对应的覆盖度情况下全面覆盖,需要最少的抢险

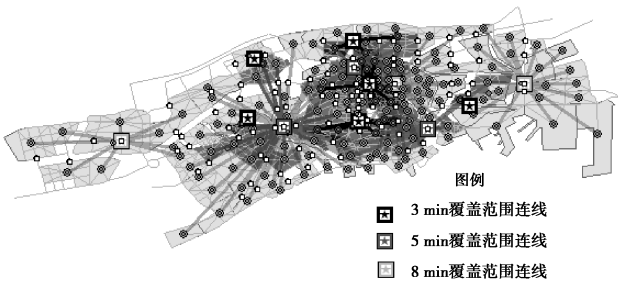


图 6 不同风险等级下最少设施点及其位置

Fig. 6 Minimum facility and location in different risk levels

抢修专业队为 6 支。

通过不同覆盖度情况下专业队的位置分布情况,对抢险抢修专业队的位置和数量不断进行调整,最终得到 7 支抢险抢修专业队能够实现研究区域在相应覆盖度的全部覆盖(如图 7)。用 MCLP 模型对研究区域进行专业队布局,响应时间参考《人民防空战术技术要求》,统一取 4 min,布局结果如图 8。

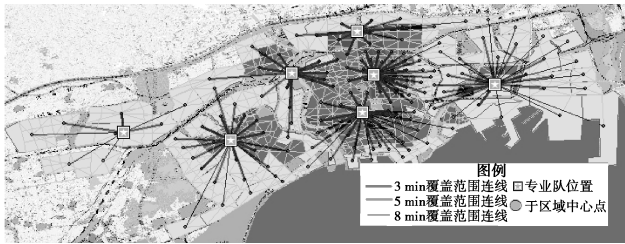


图 7 广义最大覆盖模型布局结果

Fig. 7 Layout results of GMCLP



图 8 最大覆盖模型布局结果

Fig. 8 Layout results of MCLP

结合广义最大覆盖模型布局结果,7 支抢险抢修专业队的布局以及相应覆盖度下专业队覆盖的区域,得出每个专业队的责任分区(如图 9)。

### 2.3 结果分析

根据最大覆盖模型对研究区域布局抢险抢修专业队,10 支专业队覆盖 154 个子区域,其中 6 个子区域不能够覆盖。由图 6 布局结果可以看出,有

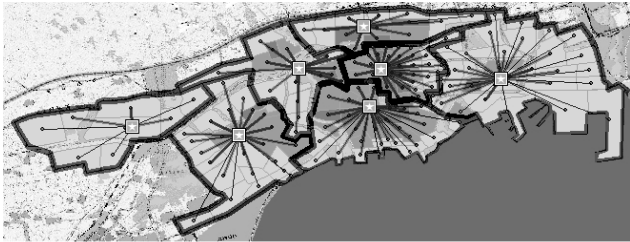


图 9 抢险抢修专业队责任分区

Fig. 9 Responsibility partition of ERRT

的抢险抢修专业队覆盖子区域较少,个别子区域不能够覆盖到,并且在位置布局时对整个研究区域平等对待,增加了抢险抢修专业队的数量和政府财政支出,造成了资源的浪费。

用广义最大覆盖模型对人防专业队的抢险抢修专业队进行布局,7 支专业队就可以满足整个研究对象在其相应覆盖度下的要求,实现研究区域的全面覆盖。其中,4 支专业队位于研究对象的中部,距离相对较近,响应时间主要分布在 3~5 min 的之内,这与研究对象中部的子区域主要是一级重点防护区和二级重点防护区相协调;3 支专业队伍位于研究对象两侧,主要对一般重点防护区进行抢险抢修,其责任分区的面积较大,主要是满足对城市全部子区域进行全覆盖的要求。

### 3 结语

通过用广义最大覆盖模型对抢险抢修专业队的布局问题进行研究,并根据子区域不同的空袭风险等级设定不同的响应时间,确定其覆盖度。对 ArcGIS 中的 Network Analyst 模块中的 Maximize Capacitated Coverage 模型和 Minimize Facilities 模型进行改进,通过对候选点位置和数量的不断调整和对调整的结果不断验证,实现了不同空袭风险等级子区域在相应的覆盖度下实现全部覆盖。与传统最大覆盖模型比较而言,广义最大覆盖模型可以解决人防专业队布局问题,实现不同覆盖度下的全面覆盖,克服了传统最大覆盖模型可能个别需求点不能覆盖的问题,而且有针对性地对重点防护区进行布局,减少了专业队的数量,节约了政府财政支出。

关于子区域的划分及空袭等级确定、模型中行车速度以及覆盖度的确定,还需要进一步深入探

讨。但是就整个方法而言,其在人防专业队布局等应急类设施布局方面比传统最大覆盖模型更具有适用性和实用性。

参考文献(References)

[1] 陈志龙,伏海艳. 城市地下空间布局与形态探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1):25-29,33. (Chen Zhilong, Fu Haiyan. Probing at urban underground space layout and form [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005,1(1): 25-29,33. (in Chinese))

[2]] 毕微微,董娟,马鹏飞,等.平战结合人防掩蔽工程保障能力评估[J].地下空间与工程学报,2016,12(增1):318-324.(Bi Weiwei,Dong Juan, Ma Pengfei, et al. The supporting capacity assessment of the civil Air defense projects at peacetime and wartime[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2016,12 (Supp.1):318-324.(in Chinese))

[3]] 赵子维,陈志龙,郭东军,等.基于 GIS 的人防专业队工程选址适应性评价[J].地下空间与工程学报, 2014,10(增1):1539-1544.(Zhao Ziwei,Chen Zhilong, Guo Dongjun, et al.GIS-based adaptability evaluation of work site selection for civil defense Team[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10 (Supp.1):1539-1544.(in Chinese))

[4] 张静,刘茂. 广义最大覆盖模型在消防站优化选址中的应用[J]. 安全与环境学报, 2009,9(1):169-172. (Zhang Jing, Liu Mao. Application of generalized maximum coverage model in optimal location of fire station [J].Journal of Safety and Environment, 2009, 9 (1): 169-172. (in Chinese))

[5] 殷代君. 广义最大覆盖模型在应急设施选址中的应用研究[D].济南:山东大学, 2007. (Yin Daijun. The applications of generalized maximal covering model in emergency facility location problem [D]. Jinan: Shandong University, 2007. (in Chinese))

[6] 贺鹏. 基于空袭灾难风险分区的人防工程布局规划研究[D]. 长沙:中南大学,2013. (He Peng. Study on the planning of civil air defense projects basing on the air raid disaster risk zoning [D]. Changsha: Central

South University, 2013. (in Chinese))

[7] 彭建,柳昆,郑付涛,等. 基于 AHP 的地下空间开发利用适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 (4):688-694. (Peng Jian, Liu Kun, Zheng Futao, et al. Evaluation for the suitability of underground space exploitation and utilization based on AHP [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2010, 6 (4): 688-694. (in Chinese))

[8] 牛强,彭翀. 基于现实路网的公共及市政公用设施优化布局模型初探[J]. 交通与计算机, 2004,22(5): 49-53. (Niu Qiang, Peng Chong. Preliminary study on optimal distribution model of public and municipal utilities based on real road network [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2004, 22(5):49-53. (in Chinese))

[9] 郭东军,陈志龙,杨延军. 城市地下空间规划中人防专业队工程布局探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (增1): 2532-2535. (Guo Dongjun, Chen Zhilong, Yang Yanjun. Discussion on layout of works of service team for civil air defense in underground space planning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Supp. 1): 2532-2535. (in Chinese))

[10] 郭东军,陈志龙,杨延军,等. 防空专业队工程布局目标与方法探讨[J]. 地下空间, 2004,24(2):235-238. (Guo Dongjun, Chen Zhilong, Yang Yanjun, et al. Discussion on the target and method of air defense professional team project layout [J]. Underground Space, 2004, 24(2):235-238. (in Chinese))

[11] 李晓翠. GIS 技术在空间选址中的应用[D]. 西安:长安大学,2007. (Li Xiaocui. Application research of GIS in spatial location selection [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese))

[12] 钟凯文. 基于 GIS 的城市人防工程空间分析模型的建立与实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29 (1): 71-73. (Zhong Kaiwen. Construction and implementation of GIS-Based spatial analysis models for civil air defense engineering[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2006, 29 (1): 71-73. (in Chinese))