

# 基于 $P$ -中心模型的城市轨道交通线网 应急救援站选址研究

吴 莹 陆愈实

(中国地质大学(武汉)工程学院, 430074, 武汉)

**摘 要** [目的]随着城市轨道交通线网的扩大,其系统风险变得更为复杂且不可控。为提高城市轨道交通系统的应急救援能力,需对线网内应急救援站的选址问题展开研究。[方法]将地铁覆盖区域按照城市道路环线进行分区限速,得到任意路径的速度矩阵,结合距离矩阵进行转换后得到时间矩阵。在此基础上,计算任意站点间基于时间最短路径。考虑时间、救援关系、成本 3 个方面的约束条件,建立了以系统最大救援时间最小化为目标的  $P$ -中心选址模型。以武汉市城市轨道交通线网应急救援站选址为案例,应用该模型,并采用自适应遗传算法在 MATLAB 软件中进行编程求解,得出该线网应急救援站选址的最优方案。[结果及结论]与相似研究相比,该选址方案投入更少但效益更大,充分证明了所提的  $P$ -中心模型具有先进性。

**关键词** 城市轨道交通; 线网; 应急救援站选址;  $P$ -中心模型; 自适应遗传算法

**中图分类号** U298.6

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.09.014

## Research on Site Selection of Emergency Rescue Station in Urban Rail Transit Line Network Based on $P$ -center Model

WU Ying, LU Yushi

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), 430074, Wuhan, China)

**Abstract** [Objective] With the expansion of urban rail transit line network, the system risks become more complicated and uncontrollable. In order to improve the emergency rescue capability of urban rail transit system, site selection of emergency rescue stations within the line network needs to be studied. [Method] The subway coverage area is divided into speed limit sections according to the urban road loop to obtain the speed matrix of any path. Combined with the distance matrix, the time matrix is obtained after transformation. On this basis, the shortest time-based path between any stations is calculated. Considering the constraints in time, rescue relationship and cost 3 aspects, the  $P$ -center model with the goal of minimizing the maximum rescue time of the system is estab-

lished. Taking the site selection of emergency rescue stations of Wuhan rail transit line network as a case and applying this model, the adaptive genetic algorithm is used in MATLAB software for programming solution, and the optimal scheme for the site selection of emergency rescue stations in this line network is obtained. [Result & Conclusion] Compared with similar researches, this site selection scheme featuring less investment but greater benefits fully proves that the  $P$ -center model proposed in the paper is advanced.

**Key words** urban rail transit; line network; site selection of emergency rescue station;  $P$ -center model; adaptive genetic algorithm

对应急设施选址问题的研究已经历了半个多世纪的发展。学者们不断引入各科理论来优化城市轨道交通线网应急救援站选址问题,并建立了相关的规划模型。1964 年,全球范围内首次提出了网络上的“ $P$ -中心”与“ $P$ -中值”问题,引起了广泛讨论;1998 年,受整数目标规划启发,提出了多目标选址模型并应用于消防站选址上;2012 年,提出了最大覆盖模型并应用在医疗设施选址上。

2004 年起,我国的学者们从城市规划决策角度研究了应急设施的选址模型。在应急设施选址研究的基础上,对城市轨道交通线网应急救援站选址的研究逐步发展起来。文献[1]以救援时间最短和选址数量最少为目标,建立了地铁应急救援站选址的多目标模型。文献[2]应用网络科学理论,建立了城市轨道交通线网应急救援站选址的  $P$ -中心模型。文献[3]引入复杂网络理论,对节点进行了脆弱性分析,提出了针对脆弱性节点提高应急救援站覆盖率的目标,建立了层级多目标选址模型。文献[4]结合网络中心性,建立了  $P$ -中心模型,并通过抗毁性验证分析,对研究结果进行了评价。

但是,目前基于精细化备选点覆盖范围计算方法的研究较少。本文对城市轨道交通应急救援站

备选点覆盖范围的确定方法进行优化,同时考虑城市轨道交通的线网特征与站点特性,以系统最大救援时间最小化、救援成本最小化为目标,建立了与实际更切合且简单易操作的模型,并运用自适应遗传算法进行求解。

## 1 问题描述

随着城市轨道交通线网的持续扩充,其结构日趋复杂。借助无向网络的理论知识来建立规划模型,是目前城市轨道交通线网应急救援站选址最主要的研究手段<sup>[2]</sup>,即:将城市轨道交通线网映射成无向网络  $G = \{Q, E\}$ , 顶点集  $Q$  对应线网站点,边集  $E$  表示线网中 2 个站点的相邻相接关系。

本文基于如下假设进行研究:①应急救援需求只发生在线网的节点(即车站)上,应急救援站也设在节点上;②救援车辆为机动车,采取道路交通方式,救援路径为确定路径;③救援车辆沿城市轨道交通所映射线路行驶,不考虑道路交通拥堵问题;④各站点发生应急事故的可能性相等;⑤应急救援站的应急能力足够大,能满足对应站点的任何救援需求。

基于以上 5 点假设,城市轨道交通线网应急救援站选址问题可转化为:在无向网络中,所有顶点都是需求点,须将部分顶点定为供应点;在一定约束条件下,各供应点可通过网络的边覆盖全部需求点。

## 2 建立模型

### 2.1 基于时间的最短路径矩阵算法

随着城市轨道交通线网规模的扩大,有学者提出了分区限速的概念,使得应急救援站备选点覆盖范围的计算更加科学<sup>[5]</sup>。该研究以备选点的最大覆盖距离为标准,判断需求点是否能被覆盖。备选点最大覆盖距离  $S_{da}$  的计算式为:

$$S_{da} = v_{da} t_{da} \quad (1)$$

式中:

$v_{da}$ ——备选点所在区域的车辆运行最大速度(以下简称“区域限速”);

$t_{da}$ ——备选点的应急响应时间。

式(1)在实际应用中存在矛盾之处,图 1 为式(1)算法存在问题示例。如图 1 所示,站点 5 在环线 I 内,区域限速为  $v_{x1}$ 。站点 12 在环线 II 上,区域限速为  $v_{x2}$ ,且  $v_{x1} < v_{x2}$ 。设  $t_5$  是站点 5 的应急响应时间,则判断站点 12 能否被站点 5 覆盖的标准应为

站点 5 的最大覆盖距离  $v_{x1} t_5$ 。但由图 1 可明显看出,此时站点 5 的最大覆盖距离采用  $v_{x2} t_5$  进行计算更为合理。设  $l_{5-12}$  为站点 5 与站点 12 的距离,若  $v_{x1} t_5 < l_{5-12} < v_{x2} t_5$ ,则应判定站点 12 能被站点 5 覆盖,而此类误差情况并不少。

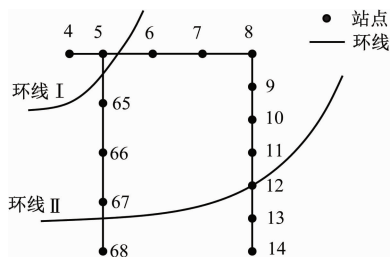


图 1 式(1)算法存在问题示例

Fig. 1 Example of problems with the equation (1) algorithm

因此,本文对备选点覆盖范围的确定方法进行改进,改进思路为:①在分区限速基础上,确定任意路径对应的速度,建立速度矩阵,将初始距离矩阵转换为时间矩阵,进而计算基于时间的最短路径;②以基于时间的最短路径为基础,确定备选点的覆盖范围。

#### 2.1.1 区域限速

限速区域按城市环线来划分。以武汉市为例,用道路环线把武汉市划分为内环线以内、内环线与二环线间、二环线与三环线间、三环线与四环线间、四环线以外 5 个区域。由市中心向外,各区域限速分别设为  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$ , 且  $v_1 < v_2 < v_3 < v_4 < v_5$ 。各区域限速可参考相关研究经验、城市道路交通限速规则、各类统计数据及实地考察情况等确定。

#### 2.1.2 计算基于时间的最短路径

收集所有相邻站点间的距离数据,建立距离矩阵  $D$ 。根据区域限速情况,确定网络中每条边对应的速度,建立速度矩阵  $V$ 。在此基础上,计算时间矩阵  $T_0$ 。

Floyd 算法适合求解任意两点之间的最短路径,且计算简便,是城市轨道交通线网应急救援站选址研究时计算最短路径的常用方法<sup>[6]</sup>。根据该算法,在 MATLAB 软件中编写 Floyd 算法的程序,读取  $T_0$ ,即可求得基于时间的最短路径矩阵  $T$ 。

### 2.2 构建基于网络中心性的 P-中心模型

#### 2.2.1 指标选取

网络分析中,度量网络中心性的指标有度中心性、介数中心性、接近中心性等<sup>[24]</sup>。根据城市轨道交通线网的特点,本文选取度中心性、介数中心性 2 个指标进行分析。

### 2.2.1.1 度中心性

度中心性是刻画节点中心性的最直接度量指标,用度值来反映。对于 1 个拥有  $g$  个节点的无向图,将节点  $\alpha$  的度值定义为节点  $\alpha$  与其他  $g-1$  个节点的直接联系总数,用  $C_\alpha$  表示。用  $a_{\alpha\beta}$  表示节点  $\alpha$  与节点  $\beta$  的关系,若 2 个节点直接联系,  $a_{\alpha\beta}=1$ ; 若 2 个节点不直接联系,  $a_{\alpha\beta}=0$ ;  $\alpha=\beta$  时,  $a_{\alpha\beta}=0$ 。由此可得  $C_\alpha$  的计算公式为:

$$C_\alpha = \sum_{\beta=1}^g a_{\alpha\beta} \quad (2)$$

式(2)中,  $a_{\alpha\beta}$  可构成矩阵  $A$ 。

### 2.2.1.2 介数中心性

介数中心性用以描述节点作为“桥梁”的重要作用,一般用介值来反映。将经过节点  $\alpha$  的最短路径数定义为节点  $\alpha$  的介值(用  $B_\alpha$  表示)。介值越大,表示该节点在网络中的通信作用越强。 $B_\alpha$  的计算式为:

$$B_\alpha = \sum_{s \neq \alpha \neq f, s < f} \frac{\sigma_{sf}(\alpha)}{\sigma_{sf}} \quad (3)$$

式中:

$\sigma_{sf}$ ——节点  $s$  到节点  $f$  最短路径的总数;

$\sigma_{sf}(\alpha)$ ——节点  $s$  到节点  $f$  最短路径中,经过节点  $\alpha$  的路径数。

为方便比较,将式(3)进行量纲一化,量纲一化后的介值为  $B'_\alpha$ ,其计算式为:

$$B'_\alpha = \frac{B_\alpha}{(g-1)(g-2)/2} \quad (4)$$

### 2.2.2 模型描述

$P$ -中心模型的核心思想是合理布置  $p$  个应急救援站,在满足覆盖需求的前提下,使得所有需求站到服务该站的应急救援站距离中的最大距离最小<sup>[4]</sup>。

将城市轨道交通线网映射成无向网络  $G=(Q, E)$ , 设线网内的站点总数为  $r$ , 则需求点集合为  $U=\{u_1, u_2, \dots, u_r\}$ ,  $u_\delta$  为集合中第  $\delta$  个元素。原则上所有的站点都是备选点,但因  $r$  一般过大,确定必选点与备选点,有利于缩小解的范围。基于节点网络中心性的特征,将一些特殊站点设为必选点,设  $y_\varepsilon$  为第  $\varepsilon$  个必选点,  $m$  为必选点总数,则必选点集合为  $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ ,  $Y \in U$ 。再设  $x_\zeta$  为第  $\zeta$  个备选点,  $n$  为备选点总数,则备选点集合  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,  $X \in U$ , 且  $Y \notin X$ 。设必选点与备选点的集合为  $Z$ , 即  $Z=X \cup Y$ ,  $z_\eta$  为集合  $Z$  的第  $\eta$  个元素。应急救援站在  $Z$  中产生,总数为  $p$ 。

模型目标定为使所有需求站到服务该站的应急救援站的时间中的最大时间最小,即系统的最大救援时间  $t_{\max}$  最小,  $t_{\max}$  的计算式为:

$$t_{\max} = \max_{u_\delta \in U} \{ \min_{z_\eta \in Z} t(u_\delta, z_\eta) \} \quad (5)$$

式(5)中,  $t(u_\delta, z_\eta)$  取自时间最短路径矩阵  $T$ 。设  $i, j$  为站点序号,  $1 \leq i \leq r, 1 \leq j \leq r$ 。则最终确定模型描述如下:

$\min t_{\max}$

$$\text{s. t. } \begin{cases} t_{ij} e_{ij} \leq T, \forall i, \forall j \\ \sum_j^r e_{ij} = 1, \forall i \\ \sum_j^r h_j + \sum_j^r k_j = p \\ e_{ij} = \begin{cases} 1, & u_j \text{ 为应急站且 } u_j \text{ 为 } u_i \text{ 提供服务} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ h_j = \begin{cases} 1, & u_j \in X \text{ 且 } u_j \text{ 为应急站} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ k_j = \begin{cases} 1, & u_j \in Y \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

约束条件中:前 2 个约束可确保每个需求站都能且只被单次覆盖;后 2 个约束用以控制应急救援站数量  $p$ ,即成本约束。

## 3 算例

本文以武汉城市轨道交通线网为算例,验证本文所提方法的有效性。

### 3.1 武汉城市轨道交通线网概况

截至 2022 年 5 月,武汉城市轨道交通运营线路共计 11 条(1 号线、2 号线、3 号线、4 号线、5 号线、6 号线、7 号线、8 号线、11 号线、16 号线及阳逻线),车站 246 座(其中 32 座换乘站未重复计数)。参考武汉地铁集团有限公司官方发布的线网图,在 AutoCAD 软件中绘制无向网络  $G=\{Q, E\}$ ,共设 246 个节点,264 条边,并给各车站节点编号,如第 5 个节点编号为 q5。将武汉市区道路的内环线、二环线、三环线、四环线投射到武汉城市轨道交通线网中,部分区段稍作处理,以确保每条路径对应区域速度的唯一性。

距离矩阵  $D$  的数据来自武汉地铁集团有限公司官网,由内至外 5 个区域限速分别为:  $v_1=30$  km/h,  $v_2=35$  km/h,  $v_3=40$  km/h,  $v_4=45$  km/h,  $v_5=50$  km/h。基于上述限速确定每条路径对应的车辆速度,得到速度矩阵  $V$ ,进而求得时间矩阵  $T_0$ 。

在 MATLAB 软件中编写程序,求得基于时间的最短路径矩阵  $T$ 。

### 3.2 必选点与备选点的确定

$P$ -中心模型中,确定必选点与备选点十分关键,一般从网络中心性(含度中心性、介数中心性)及站点本身性质2个方面予以考虑。

#### 3.2.1 度中心性

在 MATLAB 软件中对距离矩阵  $D$  进行变换,可得出式(2)所需的矩阵  $A$ 。根据式(2)求得度值  $C_\alpha$ ,其结果如表1所示。

表1 节点的度中心性计算结果

Tab.1 Calculation results of node degree centrality

| $C_\alpha$ | 节点数量 | 节点编号   |
|------------|------|--|
| 6          | 2    | q83, q149  |
| 5          | 1    | q38  |
| 4          | 22   | q3, q14, q20, q21, q22, q23, q36, q41, q44, q45, q48, q49, q50, q55, q78, q80, q85, q108, q110, q112, q117, q157 |
| 3          | 7    | q52, q53, q64, q71, q89, q127, q143  |
| 2          | 200  | q2, q4, q5, q6, q7, q8, q9, q10, q11, q12, q13, q15 等  |
| 1          | 14   | q1, q32, q33, q69, q70, q91, q164, q165, q183, q196, q211, q215, q236, q246                                      |

注:  $C_\alpha = 2$  时对应的节点数量为 200 个,表中仅列举了部分节点编号。

#### 3.2.2 介数中心性

根据式(3)、式(4)在 MATLAB 软件中编写程序,利用矩阵  $A$  可算得  $B'_\alpha$ 。本文仅列出  $B'_\alpha$  由大到小排序的前 20 位,其结果如表2所示。

表2 节点的介数中心性计算结果

Tab.2 Calculation results of node betweenness centrality

| 排名 | 节点编号 | $B'_\alpha$   | 排名 | 节点编号 | $B'_\alpha$   |
|----|------|---------------|----|------|---------------|
| 1  | q149 | 0.267 731 007 | 11 | q56  | 0.190 498 494 |
| 2  | q55  | 0.234 636 614 | 12 | q14  | 0.189 605 526 |
| 3  | q53  | 0.233 906 158 | 13 | q22  | 0.189 216 384 |
| 4  | q50  | 0.219 055 763 | 14 | q85  | 0.187 836 968 |
| 5  | q23  | 0.215 527 388 | 15 | q57  | 0.184 008 029 |
| 6  | q54  | 0.210 116 150 | 16 | q48  | 0.179 765 779 |
| 7  | q112 | 0.209 660 422 | 17 | q58  | 0.177 450 652 |
| 8  | q80  | 0.204 852 941 | 18 | q45  | 0.176 451 436 |
| 9  | q78  | 0.202 748 000 | 19 | q83  | 0.172 732 997 |
| 10 | q108 | 0.197 675 877 | 20 | q59  | 0.170 826 363 |

#### 3.2.3 站点特殊性质

车辆段或停车场(以下简称“场段”)是城市轨道交通线网中已有的场所资源。将应急救援站设置在场段内,可节省工程建设费用,提高土地资源利用率。武汉市城市轨道交通线网中,场段共 23 个。其中,武汉市轨道交通 1 号线、2 号线、3 号线共有 9 个场段,其分布情况如表3所示。

表3 武汉市城市轨道交通 1 号线、2 号线、3 号线场段分布情况

Tab.3 Depot and parking lot distribution of Wuhan rail transit Line 1, Line 2 and Line 3

| 场段名称    | 对应的节点编号 | 所属线路号          |
|---------|---------|----------------|
| 古田车辆段   | q8      | 1 号线           |
| 桥北路停车场  | q16     | 1 号线           |
| 汉口北停车场  | q32     | 1 号线           |
| 天河停车场   | q33     | 2 号线           |
| 常青车辆段   | q39     | 2 号线           |
| 中山北路停车场 | q50     | 2 号线(与 7 号线共用) |
| 佛祖岭停车场  | q69     | 2 号线           |
| 升官渡停车场  | q74     | 3 号线           |
| 三金潭车辆段  | q165    | 3 号线           |

注:场段对应的节点为距该场段最近的站点。该节点被选中时,表示应急救援站并非设在站点内,而是设在对应的场段内。

选取必选点时,首先参考度值  $C_\alpha$ ,若  $C_\alpha$  相等,则优先考虑对应场段的节点。然后参考介值,同时以分散布置为原则进行适当取舍,最终选出 11 个必选点,其集合为  $\{q3, q14, q38, q50, q55, q64, q71, q83, q108, q149, q157\}$ 。

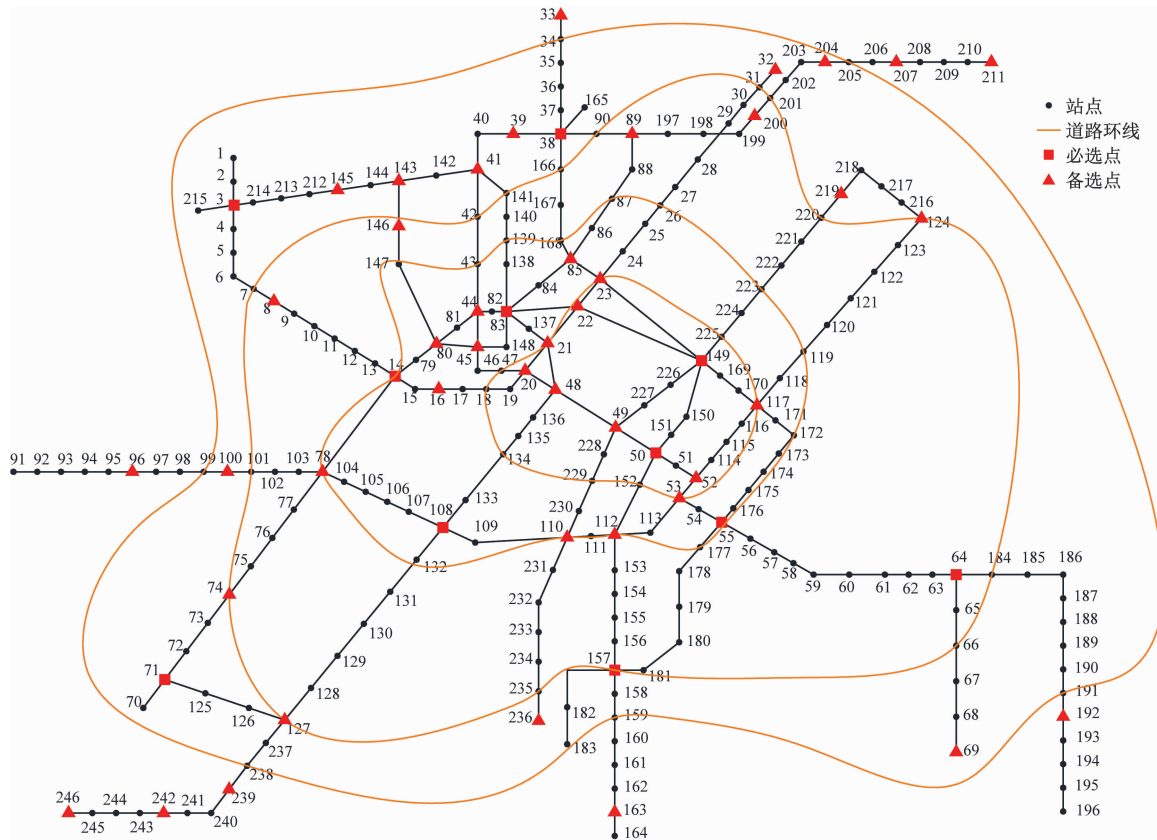
选取备选点时,应以数量适中、分散布置、覆盖全网为原则。 $C_\alpha \geq 3$ 、 $B'_\alpha$  排名前 20、对应场段的节点均可作为备选点。将上述节点在网络中进行标记,在备选点集中的区域应适当取舍,在备选点稀疏的区域应适当增设。在排除了上文的 11 个必选点后,得到 43 个备选点,其集合为  $\{q8, q16, q20, q21, q22, q23, q32, q33, q39, q41, q44, q45, q48, q49, q52, q53, q69, q70, q74, q80, q85, q89, q96, q100, q110, q112, q117, q124, q127, q143, q145, q146, q163, q192, q200, q204, q207, q211, q219, q236, q239, q242, q246\}$ 。

将必选点与备选点标记在武汉市城市轨道交通线网中,如图2所示。

### 3.3 应用模型与自适应遗传算法求解

将上述数据代入上文构建的模型中,即可开始





注:图内数字为站点的编号。

图2 武汉市城市轨道交通线网应急救援站必选点与备选点分布图

Fig.2 Distribution map of mandatory and alternative selection points for emergency rescue stations in Wuhan rail transit line network

求解。选址问题的求解方法一般有解析法、最优化方法、启发式方法及遗传算法等,其中,遗传算法具有良好的全局搜索能力,简单通用,被广泛应用于选址类最优化问题中<sup>[4]</sup>。

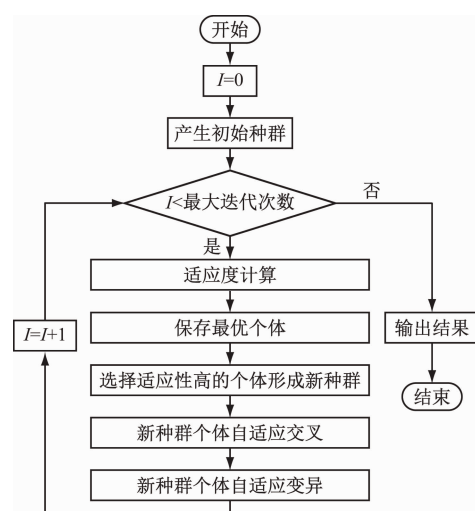
传统的遗传算法搜索能力有限。改进后的自适应遗传算法中,交叉概率与变异概率可根据算法进化需求进行自动调整,使得求解过程更具方向性。自适应遗传算法流程如图3所示,在MATLAB软件中编写程序,代入参数进行求解。

### 3.4 结果分析

遗传算法具有一定的随机性,须多次调节参数并运行程序,因此,模型求解过程产生了7个方案,其结果如表4所示。表4中,每增加1座应急救援站, $t_{\max}$ 均有一定程度下降, $t_{\max}$ 降至11.294 4 min后不再降低。

表4中, $\Delta t_{\max}$ 越大,增加1座应急救援站的经济效益越强。方案5对应的 $\Delta t_{\max}$ 最大,为此,将方案5确定为最终选址方案。即:武汉市城市轨道交通线网内共设置应急救援站25座,其 $t_{\max}$ 为11.611 2

min,对应的节点集合为 $\{q_3, q_{14}, q_{21}, q_{32}, q_{33}, q_{38}, q_{41}, q_{50}, q_{55}, q_{64}, q_{71}, q_{83}, q_{89}, q_{96}, q_{108}, q_{124}, q_{127}, q_{149}, q_{157}, q_{163}, q_{192}, q_{204}, q_{207}, q_{236}, q_{242}\}$ 。



注: $I$ 为迭代的次数。

图3 自适应遗传算法流程图

Fig.3 Flow chart of adaptive genetic algorithm

表4 模型求解结果

Tab.4 Model solution results

| 方案序号 | $p/\text{座}$ | $t_{\max}/\text{min}$ | $\Delta t_{\max}/\text{min}$ |
|------|--------------|-----------------------|------------------------------|
| 方案1  | 21           | 16.062 5              |                              |
| 方案2  | 22           | 15.916 5              | 0.146 0                      |
| 方案3  | 23           | 14.328 9              | 1.587 6                      |
| 方案4  | 24           | 14.072 0              | 0.256 9                      |
| 方案5  | 25           | 11.611 2              | 2.460 8                      |
| 方案6  | 26           | 11.325 6              | 0.285 6                      |
| 方案7  | 27           | 11.294 4              | 0.031 2                      |

注:本方案的  $t_{\max}$  与上一个编号方案的  $t_{\max}$  之差记为本方案的  $\Delta t_{\max}$ 。

方案5对应的应急救援站共计25座,分别为:码头潭公园站、宗关站、大智路站、汉口北停车场、天河停车场、宏图大道站、常青花园站、中山北路停车场、街道口站、武汉东站、东风公司站、香港路站、后湖大道站、新农站、钟家村站、青山车辆段、老关村车辆段、徐家棚站、野芷湖车辆段、纸坊停车场、长岭山车辆段、武湖停车场、武生院站、青菱停车场、桂子湖站。

图4为武汉市城市轨道交通线网应急救援站分布图。

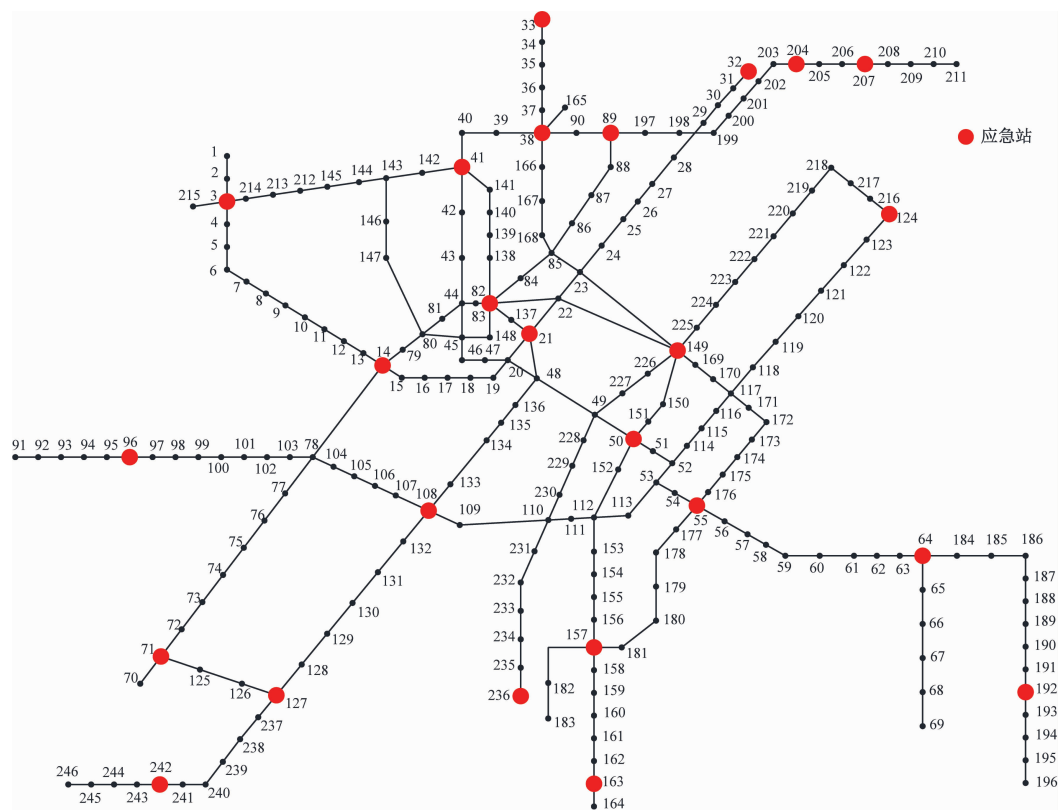


图4 武汉市轨道交通线网应急救援站分布图

Fig. 4 Distribution map of emergency rescue stations in Wuhan rail transit line network

本文算例中,选址方案设置了25座应急救援站,其数量在线网车站总数中的占比为10.16%,最大救援时间为11.611 2 min。

而在武汉城市轨道交通线网应急救援站选址的上一轮研究中<sup>[4]</sup>,在198座车站中设置了23座应急救援站,应急救援站的占比为11.62%。此时的最大救援距离为10.6 km,对应图2中的节点q1—q9,按照本文制定的限速规则,可换算得到最大救援时间为14.521 7 min。

本次研究发现,地铁覆盖区域扩大后,边缘站

点间距往往很大,同样条件下需要的应急救援站数量或最大救援时间会有所增加。而与上一轮研究相比,本文选址方案的应急救援站数量占比减少了1.46%,最大救援时间减少了2.910 5 min,实现了投入更少资金获得更大效益的预期目标,由此也可证明本文的研究方法具有一定的先进性。

#### 4 结语

本文以救援车辆分区限速为基础,首次提出将传统研究中基于距离计算最短路径转化为基于时

间计算最短路径,使得根据最短路径计算应急救援站备选点的覆盖范围时更为精确。此外,本文考虑了时间、救援关系、成本 3 个方面的约束条件,建立了以最小化系统最大救援时间为目标的  $P$ -中心选址模型。

以武汉市轨道交通应急救援站选址为对象应用该模型,结合网络中心性与站点性质分析确定了必选点与备选点,运用自适应遗传算法在 MATLAB 软件中进行编程求解,最终确定设置 25 座应急站,最大救援时间为 11.611 2 min 的最佳选址方案。与相似研究进行对比,本方案投入更少但效益更大,这证明本研究具有先进性。

目前城市轨道交通线网应急救援站选址的研究中,选取备选点与必选点的过程仍具有一定的主观性。如何提高量化分析的比重,进一步降低选址研究的主观性,值得进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] 孙彩红. 基于网络化的地铁应急救援站选址方法研究[J]. 科技信息, 2010(28): 775.  
SUN Caihong. Research on the location method of subway emergency rescue station based on network[J]. Science & Technology Information, 2010(28): 775.
- [2] 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 res-

cue stations based on network centrality[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

- [3] 祝蕾. 基于复杂网络理论的城市轨道交通应急救援站选址研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
ZHU Lei. Research on location of urban rail transit emergency rescue stations based on complex network theory [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [4] 冉连月. 基于复杂网络的城市轨道交通灾害风险与脆弱性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.  
RAN Lianye. Research on disaster risk and vulnerability of rail transit based on complex network[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [5] 曹璇, 胡锐, 郭兆能, 等. 城市轨道交通应急资源选址和配置方法研究[J]. 交通运输研究, 2016, 2(4): 54.  
CAO Liu, HU Rui, GUO Zhaoneng, et al. Emergency resource location and distribution of urban rail transit[J]. Transport Research, 2016, 2(4): 54.
- [6] 张梅. 城市轨道交通线网应急救援站的选址应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
ZHANG Mei. Study on the application of location selection of urban rail transit emergency station[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- 收稿日期:2022-05-09 修回日期:2022-09-08 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-05-09 Revised:2022-09-08 Published:2024-09-10  
· 通信作者:吴莹,助理工程师,wuying5584@cug.edu.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 79 页)

## 4 结语

在设计初期对安全功能进行识别并分配安全目标,对 APM 项目的安全交付和开通运营至关重要。此外,通过安全目标的识别和验证,还可以防止 SIL 的过度使用,避免由此带来的资源浪费。MODSafe 方法作为一种获得多方认可的 SIL 分配的通用方法,为半定量分析高安全需求模式和低安全需求模式下的 SIL 及 SIL 分配提供了简单可行的方法论,填补了既有标准中的空白。随着城市轨道交通的进一步发展及业内对安全认证需求的持续提升,本文阐述的 SIL 分配方法可为 APM 等集成类系统 SIL 的确定及评估提供参考。

## 参考文献

- [1] 燕飞, 唐涛, 闫宏伟. 安全完善度等级 SIL 的概念与划分原则

研究[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(5): 79.

- YAN Fei, TANG Tao, YAN Hongwei. Research on concept and allocation principle of safety integrity level[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(5): 79.
- [2] WIGGER P. MODSafe-modular urban transport safety and security analysis[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 48: 2616.
- [3] 娄琦. 旅客自动运输系统(APM)全自动驾驶应用解析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(增刊2): 16.  
LOU Qi. Application analysis of automatic passenger transportation system (APM) driving[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(S2): 16.

- 收稿日期:2022-05-24 修回日期:2022-06-22 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-05-24 Revised:2022-06-22 Published:2024-09-10  
· 通信作者:王一先,工程师,wang.yixian@pats-crrc.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license