

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.012

城际快速路客运站点设置方法

冯树民¹, 胡宝雨¹, 马栋才¹, 王弟鑫²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 成都市规划设计研究院, 610041 成都)

摘 要: 为方便城际快速路沿线居民出行, 提出城际快速路客运站点设置方法. 针对城际快速路客运线路的运营特点, 提出一种寻求最少数量的居民点集对沿线居民点进行全覆盖的算法; 以居民步行总距离最小为目标建立优化模型, 确定每个居民点集所对应客运站点的最佳位置; 为了提高客运线路的运行效率, 引入灰色聚类方法, 建立量化的聚类指标体系及标准, 通过评估每个站点的重要度对站点的数量进行优化; 最后以一条城际快速路为例对上述方法进行验证. 结果表明: 该方法是一种行之有效的站点设置方法, 实现了站点位置和数量的双优化, 能够满足城际快速路沿线主要居民出行需求和线路快速运行的需要, 从而使得城际快速路上客运站点的布局更加合理.

关键词: 城市交通运输; 城际快速路; 站点设置; 集合覆盖; 灰色聚类

中图分类号: U125 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)03-0071-06

Setting method of passenger site on inter-city expressway

FENG Shumin¹, HU Baoyu¹, MA Dongcai¹, WANG Dixin²

(1. School of Transportations Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. Chengdu Institute of Planning and Design, 610041 Chengdu, China)

Abstract: To facilitate residents travel along inter-city expressway, the setting method of passenger sites on inter-city expressway was proposed. In accordance with the operating features of passenger lines on inter-city expressway, an algorithm was proposed to achieve full coverage for all settlements by seeking the minimum number of settlement sets. Optimization model was established with the target of minimizing total walking distance to determine the best place of each passenger site corresponding with settlement set. In order to improve the operational efficiency of passenger lines, grey clustering method was introduced and the quantitative clustering index system was established to optimize the number of sites by assessing the important degree of each site. Finally, the above method was validated by a case study. The results show that it is an effective approach for setting sites. The method achieves dual optimization for the location and the number of passenger site, meets the demand of the most residents along the intercity expressway, and makes site layout more reasonable on inter-city expressway.

Keywords: urban transportation; inter-city expressway; site setting; set covering; grey clustering

随着社会经济的不断发展, 相邻城市之间的联系日益紧密, 城际快速路应运而生. 城际快速路客运是一种新兴的“公交化”客运发展模式, 兼具公路客运和城市公交二者的特点. 目前城际快速路客运站点的设置大多凭主观经验, 部分站点设置不合理, 导致一些沿线居民出行不便, 这极大制约了城际快速路客运的发展. 目前, 对于客运站点设置的研究主要集中在城市公交站点间距^[1-3]和选址^[4-6]等方面, 城际快速路上的站点设置还没有相关研究. 为此, 借鉴城市公交站点设置的原则和方法, 基于集合

覆盖原理和灰色聚类理论, 提出了城际快速路客运站点的设置方法.

1 城际快速路客运线路分析

城际快速路是在城市一体化(或同城化)发展过程中为加强城市之间交通上的便捷联系而修建的, 通常道路路段实行半封闭状态, 供汽车分向、分车道行驶, 道路中央原则上设隔离带, 两边不设封闭, 设计行车速度可为 60、80、100 km/h, 机动车道可根据交通需求采用双向 10 车道、8 车道或 6 车道. 通过城际快速路可以建立边缘地区与中心城市互通通道, 可以促进城市之间经济的交流, 带动城市周边地区经济的发展.

作为一种新的道路形式, 城际快速路目前在我国

收稿日期: 2015-06-28.

基金项目: 黑龙江省交通厅科技项目(MJ20110034).

作者简介: 冯树民(1973—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 胡宝雨, hubaoyu87@163.com.

还处在起步阶段,一般修建在城市的外围或相邻城市之间,道路两侧以农田用地为主,建筑用地为辅;沿线不设收费站,在道路等级上一般比高速公路低,部分路段可由高速公路改造而成.我国现已建成的城际快速路有郑州—开封之间的郑开大道、沈阳—抚顺之间的沈抚大道、沈抚二号公路等.城际快速路客运服务

于两端城市及沿线居民的公交出行,一般形式为城际公交,如郑开城际公交、沈抚城际公交.城际快速路客运有别于目前的公路客运,借鉴了城市公交的运营模式,具有定线运行、定点停靠、循环发班、票价优惠等特点,更有利于沿线居民出行,如图 1 所示.



(a) 郑开大道

(b) 郑开公交

图 1 城际快速路及其客运示意图

城际快速路客运线路的起讫点一般为两端城市的重要客运枢纽,按照客运线路途经的区域,可将其分为市区部分和城际快速路部分.在市区部分,线路采用大站运行方式,仅停靠客流密集的站点,站距一般为 1~2 km;在城际快速路部分,线路通常根据沿线客流需求大小选择性停靠,站点间距不宜过小,最小站距一般为 2 km,同时为提高客运的安全性,站点采用港湾式停靠站.由于两端城市的主要客流集散点已经形成,在市区部分客运站点设置比较明确,可合用部分公交站点.而在城际快速路部分,站点的设置受到沿线居民出行、道路条件以及道路基础服务设施等因素的影响,应满足如下要求:1) 站点应设置在靠近居民分布密集,出行率较高的路段,减少沿线居民的出行距离.2) 站点应设置在具有良好线形条件和地形条件的路段,提高客运车辆停靠的安全性.3) 站点应设置在人行横道、地道、天桥等过街设施附近,方便乘客过街.

由于城际快速路两侧大多为农村居民点,传统的城市公交站点选址方法不完全适用.为此,本文针对城际快速路上的客运站点提出了设置方法,该方法以设置最少的站点设施最大化满足沿线居民出行需求为核心目标,同时兼顾了居民出行的方便性和线路运行的高效性.

2 客运站点的设置方法

2.1 居民点集的确定

为了避免站点设施的重复建设,在城际快速路两侧的居民点之间寻找可以共用站点的居民点集,并寻找最少数量的居民点集对沿线所有居民点实现

全覆盖,具体步骤如下:

1) 城际快速路两侧 R (站点服务半径) 范围内为城际快速路的影响带状区.

2) 在划定的影响区域内寻找所有可以共用同一个站点的居民点对(集),如图 2 所示.对于影响区内分布的任意两个居民点 p, q ,它们之间的距离为 L ,根据平面几何原理,如果它们位于城际快速路的同侧,如图 2(a) 所示,则这两个居民点共用同一个站点的条件为 $L^2/4 + X^2 \leq R^2$ (两居民点连线的中垂线分别与居民点连线、城际快速路相交于两点, X 为这两点之间的距离),记为居民点对 $\{p, q\}$;同理,若它们位于城际快速路的异侧,如图 2(b) 所示,则这两个居民点共用同一个站点的条件为 $L \leq 2R$,记为居民点对 $\{p, q\}$.两居民点位于同侧且连线垂直于城际快速路这种情况是两居民点位于同侧的特殊情况 ($L \leq R$).

对于 N 个居民点 ($N \geq 3$),如果这 N 个居民点可以共用同一个站点,则构成一个居民点集.此时,可将居民点对和居民点集统称为广义的居民点集,每个居民点集对应一个客运站点.当 $N = 3$ 时,3 个居民点 p, q, h 构成一个三角形,如图 2(c) 所示,寻找该三角形的外接圆,如果这个外接圆半径小于等于站点服务半径,即 $R' \leq R$,则这 3 个居民点能够共用同一个站点,记作居民点集 $\{p, q, h\}$.当 $N > 3$ 时,以 $N = 5$ 为例,5 个居民点 p, q, h, g, k 构成一个五边形,如图 2(d) 所示,寻找该五边形的最小外接圆,如果这个最小外接圆半径小于等于站点服务半径,即 $R' \leq R$,则这 5 个居民点能够共用同一个站点,记作居民点集 $\{p, q, h, g, k\}$.

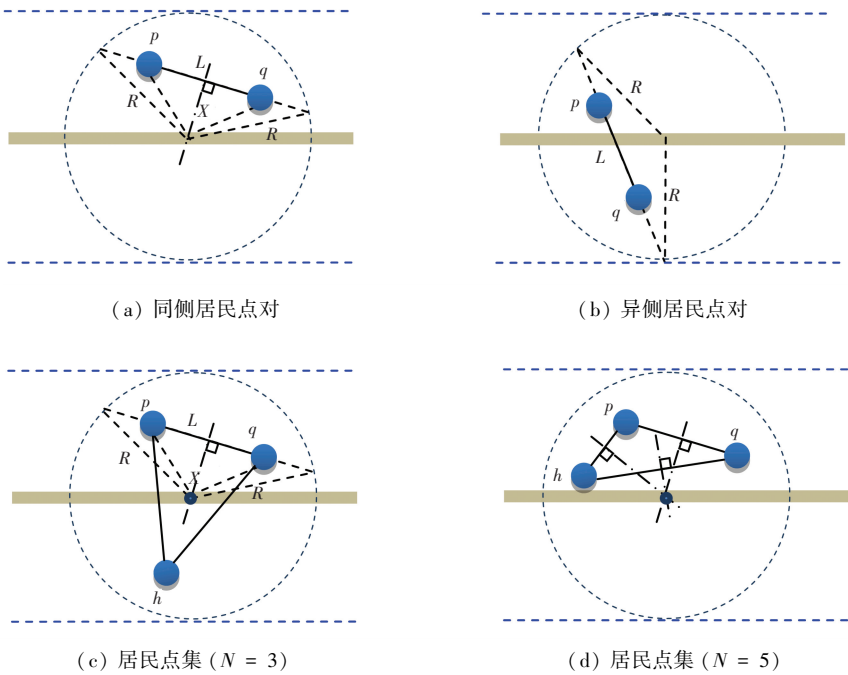


图 2 居民点对(集)构成

3) 在所有居民点集的基础上, 寻找最少数量的居民点集覆盖所有居民点^[7-8]. 以居民点为行, 居民点集为列, 建立矩阵 $A = \{a_{ij}\}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 为居民点编号, $j = 1, 2, \dots, m$ 为居民点集编号. 若第 j 个居民点集中包含居民点 i , 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$. 从矩阵 A 中选取最少的列组成新的矩阵 A_1 , 满足矩阵 A_1 的各行求和均不小于 1, 此时, 所选取的列组成的集合即对应了居民点集的目标集合.

2.2 站点最佳位置选择

利用上述方法确定的居民点集与客运站点一一对应, 但并未体现站点的具体位置. 为了方便居民出行, 提高城际快速路客运的吸引力, 站点的最佳位置应使得所服务的居民点集内各居民点居民到达该站点的步行总距离最小. 假设第 j 个居民点集内有 n 个居民点, 它们共用站点 s , 第 i 个居民点人口总量为 P_i , 居民出行率为 r_i , 与站点 s 的步行距离为 d_i , 则站点 s 的服务区域内所有居民点居民到达站点 s 步行总距离为 $Y = \sum_{i=1}^n (P_i \times r_i \times d_i)$. 因此, 站点 s 的最佳位置就是在城际快速路上寻找使得 Y 取得最小值的位置. 计算过程如下: 首先, 根据城际快速路道路中心线的几何线形, 利用最小二乘法拟合城际快速路的曲线方程 L ; 然后, 在确定的居民点集内标定居民点 i 的坐标 (a_i, b_i) , 如果对应站点的坐标为 (x, y) , 则建立如式(1)目标优化问题; 最后, 通过问题求解获得站点坐标的最优解 (x^*, y^*) , 该坐标确定的位置即可近似为客运站站点的最佳位置.

$$\min Y = \sum_{i=1}^n (P_i \times r_i \times d_i). \quad (1)$$

s. t.

$$\begin{cases} r_i = \sqrt{(a_i - x)^2 + (b_i - y)^2}, \\ (x, y) \in L. \end{cases}$$

2.3 站点数量优化

以上站点的设置覆盖了沿线所有居民点的居民出行, 站点数量一般较多, 但出于线路运行的高效性考虑, 应选择大站停靠而不宜全部设置. 灰色聚类是根据灰色关联矩阵或灰色的白化权函数, 将一些观测指标或者观测对象划分为若干个可定义类别的方法^[9], 是一种综合评价方法, 能够自动产生指标权重, 减少了评价过程中的主观因素^[10]. 为此, 引入灰色聚类方法对这些站点进行重要度评估, 按重要程度可将站点分为极端重要、非常重要、重要、一般重要和不重要 5 类.

设有 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 个聚类对象; j ($j = 1, 2, \dots, m$) 个聚类指标; k ($k = 1, 2, \dots, s$) 为不同灰类的个数; d_{ij} 为第 i 个聚类对象在第 j 个聚类指标下的样本值, 一般通过调查统计得到; f_j^k 为 j 指标 k 子类的白化权函数. 灰色聚类方法的步骤如下^[10]:

1) 指标值和样本值无量纲化处理, 构建无量纲化的指标体系和样本白化矩阵 D . 由于样本值和指标值的量纲不同, 数值差异很大, 故对数据进行无量纲处理: $x' = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$.

2) 确定灰类白化权函数, 即将聚类指标 j 按照灰类 k 确定白化函数 $f_j^k(d_{ij})$. 一般根据聚类指标和白化数确定上限测度白化权函数、适中测度白化权函数和下限测度白化权函数 3 类白化权函数 (如图 3 所示), 其函数表达式分别记作 $f_j^k[\lambda_j^k(1), \lambda_j^k(2),$

—, —], $f_j^k[\lambda_j^k(1), \lambda_j^k(2), \dots, \lambda_j^k(4)]$, $f_j^k[—, —, \lambda_j^k(3), \lambda_j^k(4)]$.

3) 计算各指标在各灰类下的权 η_j^k , 即

$$\eta_j^k = \lambda_j^k / \sum_{j=1}^m \lambda_j^k. \tag{2}$$

式中 η_j^k 为 j 指标 k 子类的权, λ_j^k 为 j 指标 k 子类的临界值. 对于上限测度白化权函数, $\lambda_j^k = \lambda_j^k(2)$; 对于适中测度白化权函数, $\lambda_j^k = \lambda_j^k(2)$; 对于下限测度

白化权函数, $\lambda_j^k = \lambda_j^k(3)$.

4) 计算灰色变权聚类系数 σ_i^k , 即

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m [f_j^k(d_{ij}) \times \eta_j^k]. \tag{3}$$

若 $\sigma_i^{k^*} = \max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\}$, 则聚类对象 i 属于灰类 k^* .

从而根据灰类 k^* 所对应的站点重要度对站点数量进行优化.

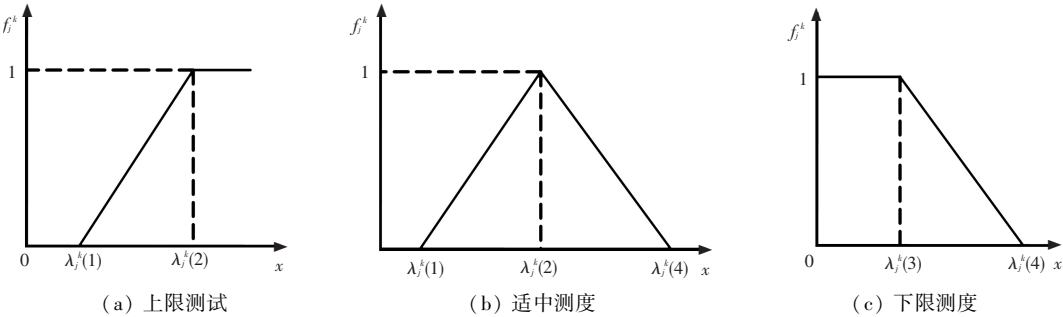


图 3 白化权函数

3 案例分析

以一条城际快速路为例,在两侧半径为 1 km 的影响带内分布有 20 个居民点,居民点编号如图 4 所示. 选取站点服务半径为 1 km,经计算将以上 20 个

居民点划分为 12 个居民点集,即 {1,2,3,4}、{3,5}、{5,6,7}、{6,8}、{8,9}、{9,10}、{10,11}、{12,13}、{14}、{15,16,17}、{17,19}、{18,19,20}, 对应的列为 $j = 1, 2, 3, \dots, 12$, 因此计算得出矩阵 $A_{20 \times 12}$, 如图 5 所示.

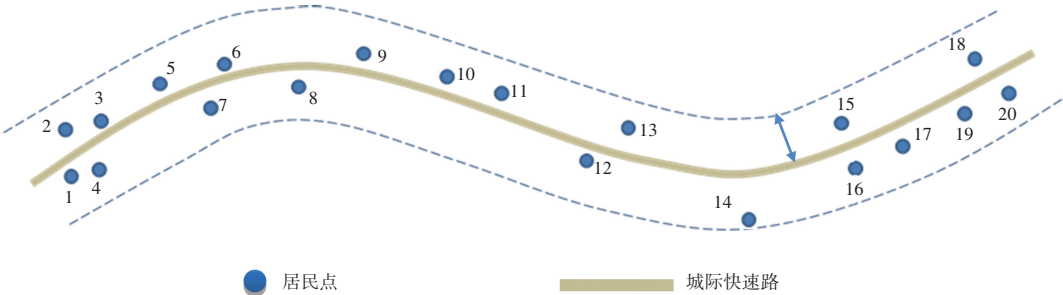


图 4 城际快速路影响带内居民点分布

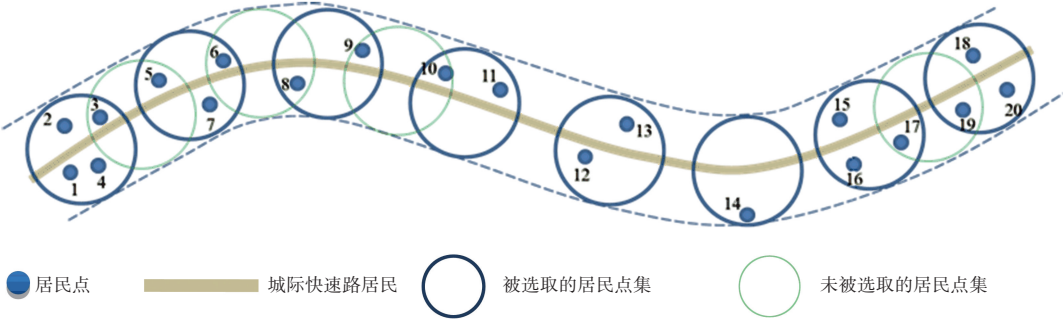


图 5 居民点集

当从矩阵 A 中选取第 1、3、5、7、8、9、10、12 列时,它们所组成的新矩阵 A_1 的各行求和均不小于 1,同时 8 列是所选取的最少列数. 因此,该城际快速路设置 8 个站点将实现对沿线 20 个居民点的全

覆盖,依次编号为 $s_1 \sim s_8$. 根据服务区域内的居民点分布,利用式 (1) 以居民步行总距离最小为优化目标确定各客运站点的最佳位置,如图 6 所示.

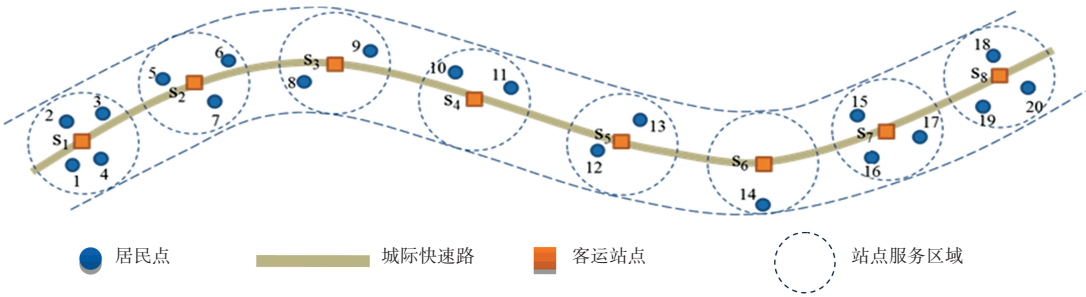


图6 城际快速路客运站站点的位置

城际快速路客运站站点的重要程度与站点所吸引的客流量情况和所处的道路位置等有关. 从定量的角度, 分别选取站点服务区域内的居民点数量 X_1 (个)、人口数量 X_2 (万人)、地区生产总值 X_3 (百万元/a)、居民出行率 X_4 (次/d) 和居民点到站点的平均距离 X_5 (km) 作为城际快速路客运站站点重要程度的聚类指标. 对于各指标的评价阈值, 国内外没有相关的标准可参考, 因此结合以往的规划经验, 建立城际快速路客运站站点重要度指标评价体系及标准, 如表1所示.

表1 城际快速路客运站站点重要度指标评价体系及标准

聚类指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
极端重要	≥ 5	≥ 0.75	≥ 800	≥ 0.50	≤ 0.20
非常重要	4	0.60~0.75	600~800	0.45~0.50	0.20~0.40
重要	3	0.45~0.60	400~600	0.40~0.45	0.40~0.60
一般重要	2	0.30~0.45	200~400	0.35~0.40	0.60~0.80
不重要	1	<0.30	<200	<0.35	0.80~1.00

采用灰色聚类方法对图6中设置的8个站点进行聚类. 聚类对象为站点 $s_i, i = 1, 2, \dots, 8$; 聚类指标为 $X_j, j = 1, 2, \dots, 5$; 灰类 $k = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别对应极端重要、非常重要、重要、一般重要和不重要. 通过调查统计得到每个客运站点服务区内的5类聚类指标值, 如表2所示.

表2 客运站点聚类指标值

站点编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
s_1	4	0.85	880	0.50	0.35
s_2	3	0.70	750	0.46	0.70
s_3	2	0.45	500	0.38	0.75
s_4	2	0.50	520	0.30	0.70
s_5	2	0.40	380	0.36	0.50
s_6	1	0.20	240	0.35	0.90
s_7	3	0.60	700	0.43	0.65
s_8	3	0.65	680	0.45	0.60

分别对表1、2中的数据进行无量纲化处理, 获取无量纲化的指标值(见表3)和样本白化矩阵 D .

考虑到聚类指标 X_5 表示居民点到站点的平均距离, 越小客运站点重要度越高, 因此聚类指标 X_5 无量纲化的指标值与实际值相反.

表3 无量纲化的聚类指标体系

聚类指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
极端重要	≥ 1.00	≥ 1.00	≥ 1.00	≥ 1.00	0.80~1.00
非常重要	0.75	0.80~1.00	0.75~1.00	0.90~1.00	0.60~0.80
重要	0.5	0.60~0.80	0.50~0.75	0.80~0.90	0.40~0.60
一般重要	0.25	0.40~0.60	0.25~0.50	0.70~0.80	0.20~0.40
不重要	0	<0.40	<0.25	<0.70	<0.20

$$D = \{d_{ij}\}_{5 \times 5} = \begin{pmatrix} 0.75 & 1.13 & 1.10 & 1 & 0.65 \\ 0.50 & 0.93 & 0.94 & 0.92 & 0.30 \\ 0.25 & 0.60 & 0.63 & 0.76 & 0.25 \\ 0.25 & 0.67 & 0.65 & 0.60 & 0.30 \\ 0.25 & 0.53 & 0.48 & 0.72 & 0.50 \\ 0 & 0.27 & 0.30 & 0.70 & 0.10 \\ 0.50 & 0.80 & 0.88 & 0.86 & 0.35 \\ 0.50 & 0.87 & 0.85 & 0.90 & 0.40 \end{pmatrix}.$$

根据以上指标值和样本值确定 j 指标 k 子类的白化权函数分别为

$$\begin{aligned} f_1^1[0.8, 1, -, -], & \quad f_1^2[0.6, 0.75, -, 0.9], \\ f_1^3[0.35, 0.5, -, 0.65], & \quad f_1^4[0.1, 0.25, -, 0.4], \\ f_1^5[-, -, 0.2, 0.25]; & \quad f_2^1[0.8, 1, -, -], \\ f_2^2[0.7, 0.9, -, 1.1], & \quad f_2^3[0.5, 0.7, -, 0.9], \\ f_2^4[0.3, 0.5, -, 0.7], & \quad f_2^5[-, -, 0.4, 0.6]; \\ f_3^1[0.75, 1, -, -], & \quad f_3^2[0.65, 0.85, -, 1.1], \\ f_3^3[0.4, 0.65, -, 0.85], & \quad f_3^4[0.15, 0.35, -, 0.6], \\ f_3^5[-, -, 0.25, 0.45]; & \quad f_4^1[0.85, 1, -, -], \\ f_4^2[0.8, 0.95, -, 1.1], & \quad f_4^3[0.7, 0.85, -, 1], \\ f_4^4[0.6, 0.75, -, 0.9], & \quad f_4^5[-, -, 0.7, 0.85]; \\ f_5^1[0.6, 0.8, -, -], & \quad f_5^2[0.5, 0.7, -, 0.9], \\ f_5^3[0.3, 0.5, -, 0.7], & \quad f_5^4[0.1, 0.3, -, 0.5], \\ f_5^5[-, -, 0.2, 0.4]. \end{aligned}$$

由白化权函数可知临界值 λ_j^k , 利用式(2)计算

得权值矩阵 $\boldsymbol{H} = \{\eta_j^k\}_{5 \times 5}$, 其中 j 为行, k 为列, 即

$$\boldsymbol{H} = \{\eta_j^k\}_{5 \times 5} = \begin{pmatrix} 0.21 & 0.18 & 0.16 & 0.12 & 0.11 \\ 0.21 & 0.22 & 0.22 & 0.23 & 0.23 \\ 0.21 & 0.20 & 0.20 & 0.16 & 0.14 \\ 0.21 & 0.23 & 0.27 & 0.35 & 0.40 \\ 0.17 & 0.17 & 0.16 & 0.14 & 0.11 \end{pmatrix}.$$

通过式(3)计算灰色变权聚类系数矩阵 $\boldsymbol{\Sigma} = \{\sigma_i^k\}_{8 \times 5}$, 即

$$\boldsymbol{\Sigma} = \{\sigma_i^k\}_{8 \times 5} = \begin{pmatrix} 0.67 & 0.46 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0.39 & 0.50 & 0.30 & 0.14 & 0 \\ 0 & 0 & 0.39 & 0.67 & 0.32 \\ 0 & 0 & 0.39 & 0.29 & 0.46 \\ 0 & 0 & 0.34 & 0.67 & 0.35 \\ 0 & 0 & 0 & 0.33 & 0.96 \\ 0.12 & 0.38 & 0.56 & 0.20 & 0.03 \\ 0.23 & 0.54 & 0.45 & 0.07 & 0 \end{pmatrix}.$$

对于站点 s_1 , $\max_{1 \leq k \leq 5} \{\sigma_1^k\} = \sigma_1^1 = 0.67$, 则有灰类 $k = 1$ 对应的重要度为极端重要, 同理可得其他客运站点的重要度: s_2 和 s_8 非常重要, s_3 和 s_5 一般重要, s_4 和 s_6 不重要, s_7 重要. 根据各站点的重要度情况, 建议舍去不重要的站点 s_4 和 s_6 , 即在城际快速路沿线设置站点 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_5 、 s_7 、 s_8 .

4 结 论

- 1) 城际快速路是一种新的道路形式, 通过分析城际快速路客运线路的运营形式、特点, 给出了城际快速路客运站点设置间距、要求的建议.
- 2) 提出一种寻求最少数量的居民点集对沿线居民点进行全覆盖的算法, 有利于实现客运线路的大站停靠; 以优化居民点集内居民步行总距离为目标确定站点的最佳位置, 极大方便沿线居民的出行; 引入灰色聚类法对站点的重要度进行评估, 依据每

个站点的重要度优化沿线站点的数量, 实现快速客运的目的.

3) 案例分析结果表明, 该方法实现了城际快速路客运站点位置和数量的优化, 满足了沿线居民出行需求和线路快速运行的需要.

参考文献

[1] WIRASINGHE S C, GHONEIM N S. Spacing of bus-stops for many to many travel demand [J]. Transportation Science, 1981, 15(3): 210-221.

[2] SAKA A A. Model for determining optimum bus-stop spacing in urban areas [J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(3): 195-199.

[3] CHIEN S I, QIN Z. Optimization of bus stop locations for improving transit accessibility [J]. Transportation Planning and Technology, 2004, 27(3): 211-227.

[4] 谭满春, 徐建闽, 毛宗源. 城市公共汽车停靠点选址模型 [J]. 公路交通科技, 1999, 16(2): 59-61.

[5] 王秋平, 丁禹元, 徐乐, 等. 城市公交停靠站选址与平面布置优化 [J]. 交通科技与经济, 2011 (3): 55-57.

[6] 龚翔, 陈学武, 李娅. 城市快速公交停靠站点在交叉口的选址研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(11): 115-120.

[7] CEDER A, PRASHKER J N, STERN J I. An algorithm to evaluate public transportation stops for minimizing passenger walking distance [J]. Applied Mathematical Modelling, 1983(7): 19-24.

[8] CEDER A. Public transit planning and operation: theory, modeling and practice [M]. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2007.

[9] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.

[10] 王媛媛, 陆化普, 秦旭彦. 基于灰色聚类分析的城市交通路网综合评价方法研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22(8): 118-121.

(编辑 魏希柱)