

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201806134

城市轨道交通车站双层选址模型

程国柱¹, 周林芳²

(1.东北林业大学 交通学院,哈尔滨 150040;2.哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院,哈尔滨 150090)

摘 要: 为保证城市轨道交通车站选址的合理性,避免建成后分担率低的情况,建立基于既定线路和候选车站的双层选址模型. 上层模型以客流量最大为目标,且在对候选车站进行客流量预测时,建立地理加权回归模型. 下层模型考虑经济属性,将乘客出行成本和运营方成本作为城市轨道交通综合交通成本,以单位乘客综合交通成本最小为目标. 通过对比多个启发式算法,确定基于模拟退火算法的求解流程. 以哈尔滨地铁 1 号线为例,运用所建立模型对该线路的车站进行重新选址. 结果表明:采用该模型所得到的车站选址方案其各车站每日上车乘客量之和为 191 553 人,较现有的 177 010 人,增长了 14 543 人,增长比例为 8.2%;而新选址方案的牵引能耗成本为每日 15 972 元,较现有车站的 17 501 元,减少了 1 529 元,减少比例为 8.7%. 所建立的城市轨道交通车站双层选址模型能同时保证选址结果的社会效益和经济效益.

关键词: 城市轨道交通;车站选址;双层模型;地理加权回归;模拟退火算法

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)03-0186-07

Bi-level model of urban rail transit stations location

CHENG Guozhu¹, ZHOU Linfang²

(1.School of Traffic and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2.School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to ensure the rationality of urban rail transit stations location and avoid low sharing rate after construction, a bi-level model was established based on the selected route and candidate stations. The upper level aimed to achieve maximum ridership, and a GWR model was selected for ridership forecast at candidate stations. The lower level aimed to achieve minimum comprehensive cost per passenger, and the urban rail transit comprehensive transportation cost was defined to include both ridership cost and operating cost. Several heuristic algorithms were compared, and the simulated annealing algorithm was selected to solve the bi-level model. Harbin Metro Line 1 was taken as a case. The established model was used to optimize the location of the stations on this route. Results showed that there were 191 553 passengers per day at the optimized stations. Compared with the ridership of 177 010 at the current stations, there is an increase of 14 543 passengers with an increasing rate of 8.2%. The cost of energy consumption of the optimized stations was 15 972 yuan, which is 1 529 yuan less than that of the current stations with a decreasing rate of 8.7%. Therefore, the established bi-level model of urban rail transit station location can guarantee both social and economic benefits.

Keywords: urban rail transit; station location; bi-level model; GWR; simulated annealing algorithm

鉴于城市轨道交通大运量和可以充分利用城市地下空间的特点,其已经成为缓解城市交通问题的有效途径. 但在其发展中也暴露出一些问题,如客流预测值与实际情况相差较大,造成资源闲置或供不应求;城轨快线车站间距小,不能发挥效率优势等. 目前,专门对城市轨道交通车站选址的研究相对较少,国外主要从客流预测和车站间距优化(主要是普通公交车站间距)两个方面开展研究,而国内则相对侧重城市轨道交通车站间距优化的研究. 文献[1]对美国 265 个城区进行了研究,发现价格

机制和发车间隔对客流量的影响较地理因素、经济水平、人口特征等更直接、显著. 文献[2]通过结构方程研究了自变量对客流量的作用及自变量之间的关系. 文献[3]基于地形条件的差异对步行、公交吸引力和公交车加速度的影响,研究了公交车站设置问题. 文献[4]基于轨道交通与普通公交的合作关系,得到了不同阈值下的优化站间距. 文献[5]建立了以居民出行时间最小为目标的市郊铁路站间距优化模型. 文献[6]建立了以乘客出行时间成本和车票收入最大化为目标的站间距优化模型. 文献[7]以不同地铁线路的效益费用和客流量作为不同方案的对比条件,确定了地铁车站的初步布局方法. 但车站间距优化模型得出的一般均为某种特定条件下的优化值,不具有广泛适用性.

本文从客流预测和车站间距两个方面入手,建立双层模型对城市轨道交通车站选址问题进行研究。本文的车站间距优化并非得出某个具体站间距值,而是基于整条线路,以运营成本和出行成本最小化为目标,协调各车站间距。

1 选址模型构建

城市轨道交通作为一种公共交通,其社会效益是首要的,即应首先保证乘客选择的公平性,为尽可能多的城市居民提供服务。其次,应考虑其经济属性,本文考虑了乘客和运营两方面的成本,并将二者之和定义为城市轨道交通综合交通成本。良好的车站选址应在保证服务平等性的基础上,使综合交通成本处于较低水平。

1.1 上层模型

为确保服务的平等性,首先应确定各车站的客流量特征,即需对候选车站的客流量进行预测。目前,主要采用四阶段法和基于普通最小二乘法的回归模型进行预测。四阶段法虽已得到广泛应用,但其依赖于大量资料,成本高,且主要适用于对大范围区域进行交通预测,而对车站吸引范围规模的研究则不适用。多元回归模型虽使预测成本降低,且能够得到不同变量对客流的影响,但各变量的系数在不同预测单元内均相等,忽略了变量对客流的影响在地理空间上的差异。地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型适用于解决空间异质性问题,其考虑地理位置属性,基于局部回归对自变量和因变量的关系进行研究,能够体现自变量对因变量的影响在空间上的变化,即对于每一预测单元均能得到一组唯一的系数组合。

1.1.1 影响因素分析

已有研究^[8]表明,土地使用是决定居民出行生成的核心,且不同土地使用类型会对居民出行强度和出行目的产生影响。结合现有研究和我国土地分类标准,将车站服务范围内的土地类型分为行政管理、教育文化、居住、商业、休闲娱乐和医疗卫生共6类。参考文献^[8],以85%的乘客覆盖率确定车站服务范围,本文使用路网距离表示该阈值。在车站服务范围内,乘客选择城市轨道交通出行的概率随其到车站的路网距离增加而呈现降低趋势。即对不同位置的建筑物而言,其对客流的贡献率呈现依路网距离增加而衰减的特征。定义以上6类土地使用类型的建筑实际楼层面积和该衰减规律的乘积为加权楼层面积,表达式为

$$A_{wi} = D(L_n) \cdot A_i \quad (1)$$

式中: A_{wi} 为建筑 i 的加权楼层面积, $D(L_n)$ 为乘客

选择乘坐轨道交通的概率依路网距离的衰减函数, A_i 为建筑 i 的实际楼层面积。

以上,行政管理、教育文化、居住、商业、休闲娱乐和医疗卫生6类土地使用类型的建筑加权楼层面积仅从绝对量上对用地情况进行描述,而未考虑车站吸引范围内不同土地使用类型的搭配对客流量的影响。因此,引入土地使用多样性指数^[9],即

$$I_{\text{ind}} = \frac{-\sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln p_i}{\ln n} \quad (2)$$

式中 p_i 为第 i 类用地的楼层面积与各类用地总楼层面积之比, n 为不同性质用地的类别数。

公交换乘和“P+R”模式能够延伸车站服务范围,促进多式联运,因此,将车站200 m范围内的接驳公交线路数量和“P+R”设施的有无作为解释变量。

中心度表示某车站与线路中其他车站的物理距离上的联系强度,中心度越高,联系性越强,从而越有可能吸引更多客流,因此,也将其作为解释变量之一。但由于换乘车站客流吸引特征的不同和位置的不确定性,因此,不考虑候选车站。其值大小在(0, 1)内,取值越大,表示车站越靠近线路中心,计算公式为

$$I_{ac_i} = \frac{\min(d_{n_i})}{d_{n_i}} \quad (3)$$

式中 I_{ac_i} 为第 i 个车站的中心度, d_{n_i} 为第 i 个车站到其他各车站的路网距离之和。

1.1.2 基于GWR的客流量预测模型

本文以1 d为单位,预测车站上车乘客量。建立GWR模型之前,需对上述解释变量进行系数显著性检验。此外,共线性变量的存在将使运算结果出现 R^2 偏高的假象。需基于普通最小二乘法,采用方差膨胀因子(VIF)检验自变量的多重共线性。当某自变量的VIF值大于等于10时(严格时,以7.5为标准),认为该自变量与其他自变量之间存在多重共线性,需要剔除。具体的共线性变量需要结合实际情况,根据VIF检验结果进行确定。GWR模型为

$$Q_i = \beta_{i0} + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_j + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中: Q_i 为第 i 个车站的上车乘客量, x_j 为上述变量中通过显著性检验和方差膨胀因子检验的第 j 个解释变量, β_{ij} 为第 i 个车站的第 j 个解释变量的系数, β_{i0} 为第 i 个车站的截距, ε_i 为第 i 个车站的残差。

GWR模型在运算时,将考虑各回归样本点其某带宽范围内样本点的信息,并根据与其距离大小,对周围样本点的信息设定权重。本文采用适应性核函数确定带宽。计算权重的方法有多种,Gaussian函数

法和 bi-square 法应用最多,本文选用 Gaussian 函数法对权重进行计算,即

$$w_{ij} = \exp\left(-\left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right). \tag{5}$$

式中: w_{ij} 为第 j 个车站的变量相对于第 i 个车站的权重, d_{ij} 为 i, j 两个车站间的距离, b 为限制样本范围的带宽.

所以,在带宽范围内,各位置样本相对回归样本点的权重矩阵为

$$\mathbf{W}(i) = \begin{bmatrix} w_{i1} & & & \\ & w_{i2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & w_{in} \end{bmatrix}. \tag{6}$$

式中 $\mathbf{W}(i)$ 为回归样本点 i 的权重矩阵.

根据加权最小二乘法,可以得到 $\beta(i)$ 的估计向量为

$$\hat{\beta}(i) = [\mathbf{X}^T \mathbf{W}(i) \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}(i) \mathbf{Q}. \tag{7}$$

其中:

$$\beta(i) = (\beta_{i0}, \beta_{i1}, \dots, \beta_{in}), \tag{8}$$

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n], \tag{9}$$

$$\mathbf{Q} = [Q_1, Q_2, \dots, Q_m]. \tag{10}$$

1.1.3 车站选址上层模型

上层模型以上车乘客量最大为目标函数为

$$\max Q_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \zeta_i. \tag{11}$$

式中: Q_{total} 为各车站上车乘客量之和, ζ_i 为 0-1 变量,当候选车站 i 被选中时,其为 1,反之为 0.

约束条件为

$$400 \leq S_k^{-1} \leq 1\,500, \tag{12}$$

$$N_{\min} \leq \sum_{i=1}^n \zeta_i \leq N_{\max}. \tag{13}$$

式中: S_k^{-1} 为被选中的相邻车站 $k-1$ 和 k 之间的站间距,其中 400 m 为文献 [10] 中日本的情况,1 500 m 为参考既有线路的最大站间距, $N_{\min}$ 为给定线路按最大站间距可设置的最小车站数, $N_{\max}$ 为给定线路按最小站间距可设置的最大车站数.

1.2 下层模型

鉴于不同候选车站上车乘客量的差异,对不同候选车站进行组合,按照乘客出行分布特征,将其分配到其他车站,将导致出行成本的差异,且运营方成本也会不同.合理车站选址应保证乘客出行成本和运营成本,即城市轨道交通综合交通成本处于较低水平.下层模型基于车站间距优化对综合交通成本进行研究.此站间距优化并非得出某个车站间距最优值,而是基于整条线路,对候选车站进行协调,

使各车站间距的组合结果能使综合交通成本处于较低水平.

1.2.1 乘客出行成本

以车站 i 单日上车乘客为研究对象,乘客出行成本包括:步行至车站的时间成本、站内候车时间成本、行程时间成本、离站至目的地的时间成本及车票费用,即

$$C_{ri} = C_{fi} + C_{wi} + C_{vi} + C_{li} + C_{ti}. \tag{14}$$

式中: C_{ri} 为乘客出行成本, C_{fi} 为乘客步行至相应车站的时间成本, C_{wi} 为乘客站内候车时间成本, C_{vi} 为乘客行程时间成本, C_{li} 为乘客离站至目的地的时间成本, C_{ti} 为乘客的车票费用.

将车站服务范围以 100 m 路网距离为单位,分成多个距离带,则步行至车站的时间成本为

$$C_{fi} = V_f \sum_{j=1}^n Q_{ij} \frac{d_j}{v_r}. \tag{15}$$

式中: V_f 为步行的单位时间价值, Q_{ij} 为站点 i 的第 j 个带宽内每日的客流生成量, d_j 为第 j 个带宽的中点与对应车站的路网距离, v_r 为乘客步行的平均速度.

乘客候车时间主要由发车间隔决定,候车成本为

$$C_{wi} = Q_i V_w T_w. \tag{16}$$

式中 V_w 为乘客候车的单位时间价值, T_w 为平均候车时长.

本文假设乘客均匀到达车站,则乘客站内平均等待时间为

$$T_w = \frac{\Delta T}{2}. \tag{17}$$

式中 ΔT 为发车间隔.

行程时间成本为乘客乘坐列车的时间成本,主要由乘客所经过的车站决定,即

$$C_{vi} = \sum_m Q_i^m V_v T_{ij}^m. \tag{18}$$

式中: Q_i^m 为由车站 i 上车且到车站 j 下车的乘客量, V_v 为乘客单位行程时间价值, T_{ij}^m 为列车由车站 i 到车站 j 的时长.

列车运行时间由牵引时间、惰行时间、制动时间与驻站时间 4 个部分组成.牵引时间又包括加速运行时间与匀速运行时间.因此,由车站 i 到车站 j 的时长为

$$T_{ij} = \sum_{k=2}^n \zeta_{ij}^k (T_t^k + T_i^k + T_b^k) + n_{ij} T_s. \tag{19}$$

式中: ζ_{ij}^k 为二元变量,当乘客在车站 i 上车、在车站 j 下车,且经过车站 k 时,其为 1,否则为 0, T_t^k 为列车到达车站 k 前的牵引时间, T_i^k 为列车到达车站 k 前的惰行时间, T_b^k 为列车到达车站 k 前的制动时间, n_{ij} 为车站 i, j 之间的车站数量, T_s 为列车驻站时长.

牵引时间 T_t^k 为

$$T_t^k = T_a^k + T_c^k. \quad (20)$$

式中 T_a^k 为车辆到达车站 k 之前的加速时间, T_c^k 为车辆到达车站 k 之前的匀速运行时间。

本文假设乘客离站至目的地的时间成本与步行至车站的时间成本相同,即

$$C_{li} = C_{fi}. \quad (21)$$

一般,车票成本由乘客出行经过的车站数决定,即

$$C_{ti} = \sum_n Q_i^j \cdot P_k \quad (22)$$

式中 P_k 为车站 i j 之间,车站数为 k 时所对应的车票费用。

综上,单日各车站上车乘客的出行成本之和为

$$C_r = \sum_{i=1}^n \{ 2V_f \sum_{j=1}^n Q_{ij} \frac{d_j}{v_r} + Q_i V_w \frac{\Delta T}{2} + \sum_{n=2}^n \sum_{k=2}^n Q_i V_v [\zeta_{ij}^k (T_a^k + T_c^k + T_i^k + T_b^k) + n_{ij} T_s] + \sum_n Q_i^j P_k \}. \quad (23)$$

1.2.2 运营成本模型

运营成本方面,考虑了列车购置成本、列车上工作人员成本、车队保养成本、站内工作人员成本和牵引能耗成本,以上成本均以单位工作日计算。

不同车站间距组合将导致列车运行周期的差异。在相同发车间隔下,运营周期越长,对车队规模要求越高。列车购置成本为

$$C_f = N_f p_v. \quad (24)$$

式中 p_v 为单位列车组购置费用, N_f 为车队规模,车队规模表示为

$$N_f = \frac{T_R}{\Delta T}, \quad (25)$$

其中 T_R 为列车运行周期。

运行周期 T_R 为列车离开始发站并返回所经过的时长,具体包括列车在各区间的加速运行时长、匀速运行时长、惰行时长、制动时长及在中间车站的驻站时长之和,即

$$T_R = 2 \sum_{k=2}^n (T_a^k + T_c^k + T_i^k + T_b^k) + (2n - 1) T_s. \quad (26)$$

列车自购买至达到使用年限,每日使用成本为

$$C_{vd} = \frac{[2 \sum_{k=2}^n (T_a^k + T_c^k + T_i^k + T_b^k) + (2n - 1) T_s] P_v (1 - \delta_v)}{365 \cdot \Delta T \cdot n_y}. \quad (27)$$

列车上工作人员成本为

$$C_d = V_d \cdot n_d \cdot N_f. \quad (28)$$

式中: C_d 为列车上工作人员的单位工作日成本, V_d

为列车内工作人员每日平均工资, n_d 为一个列车组内的工作人员数量。

车队保养成本和站内工作人员成本分别为

$$C_m = V_m \cdot N_f, \quad (29)$$

$$C_s = V_s \cdot n_s \cdot \sum_{i=1}^n \zeta_i. \quad (30)$$

式中: C_m 为车队保养成本, V_m 为单位列车组的保养费用, C_s 为站内工作人员成本, V_s 为站内工作人员平均工资, n_s 为各车站工作人员数量平均值。

为简化列车运行特征,假设列车在加速阶段为匀加速。加速运行时间和匀速运行时间分别为

$$T_a^k = \sqrt{\frac{2S_a^k}{A_a}}, \quad (31)$$

$$T_c^k = \frac{S_c^k}{V_{\max}}. \quad (32)$$

式中: S_a^k 为到车站 k 前的加速运行距离, A_a 为加速运行阶段的加速度, S_c^k 为到车站 k 前的匀速运行距离, $V_{\max}$ 为列车最大运行速度。

惰行时间和制动运行时间分别为

$$T_i^k = \sqrt{\frac{2S_i^k}{A_i}}, \quad (33)$$

$$T_b^k = \sqrt{\frac{2S_b^k}{A_b}}. \quad (34)$$

式中: S_i^k 为到车站 k 前的惰行距离, A_i 为惰行阶段减速度, S_b^k 为到车站 k 前的制动距离, A_b 为制动阶段减速度。

列车编组由动车和拖车构成。其中,动车装有电机,提供动力。在匀加速阶段,由于牵引力恒定,所以发动机为恒转矩工作模式。在匀速运行阶段,由于牵引力和速度均恒定,所以发动机处于恒功率工作模式。在制动阶段,列车优先采用电制动,当速度低于某阈值时,开始采用空气制动。因此,单位列车编组在一个运行周期内实际使用的电能应为牵引消耗电能与再生电能被利用部分的差值,即

$$E_g = n_g P_e [P_t \sum_{k=2}^n (\frac{T_a^k}{2} + T_c^k) - P_f \sum_{k=2}^n T_f^k (1 - \delta_r^k)] / 3600. \quad (35)$$

式中: n_g 为单位列车编组中动车的数量, P_e 为用电单价, P_t 为动车电机额定功率, P_f 为动车再生电能功率, T_f^k 为再生电能时间, δ_r^k 为电阻制动消耗电能的比例。

再生电能时间 T_f^k 为

$$T_f^k = \frac{V_{b0} - V_{bc}}{A_b}. \quad (36)$$

式中 V_{b_0} 为制动初始速度, V_{b_c} 为由电制动转向空气制动的速度阈值.

考虑到乘客量的增加会使得综合交通成本增大,因此,以单位乘客的综合交通成本作为下层模型的目标函数,即

$$C_o = \frac{1}{Q} \{ P_v (1 - \delta_v) [2 \sum_{i=2}^n (\sqrt{\frac{2S_a^k}{A_a}} + \frac{S_c^k}{V_{\max}} + \sqrt{\frac{2S_i^k}{A_i}} + \sqrt{\frac{2S_b^k}{A_b}}) + (2n - 1) T_s] / (365 n_y \Delta T) + N_f (V_d \cdot n_d + V_m) + n_d n_g P_e \frac{2T_o}{\Delta T} [P_t \sum_{k=2}^n (\frac{T_a^k}{2} + T_c^k) - P_f \sum_{k=2}^n T_f^k (1 - \delta_r^k)] / 3\ 600 + V_s \cdot n_s \cdot \sum_{i=1}^n \zeta_i + \sum_{i=1}^n C_{ri} \cdot \zeta_i \} . \quad (37)$$

式中 C_o 为单位乘客综合交通成本, n_d 为每日发车次数.

约束条件为

$$\frac{T_d}{T_R} \cdot N_f \cdot C_u \geq Q_{\text{total}} . \quad (38)$$

式中 T_d 为城市轨道交通 1 d 内的运行时间, C_u 为一个列车组的容量.

该约束条件能够保证单日城市轨道交通乘客的出行需求得到满足.

考虑到模拟退火算法在运算过程中,需计算之前解和当前解的目标函数之差,且该算法只能用于求解最小值问题,因此,在模拟退火算法编程中将目标函数转化为基于个人的地铁综合交通成本与上车乘客总量的比值,即

$$\min Z = \frac{C_o}{Q} . \quad (39)$$

2 模型求解方法

2.1 方法的选取

双层优化模型求解的难度表现在两方面:其一,双层模型的非凸性使得优化解一般为局部最优解;其二,双层规划模型为 NP-hard 问题,传统寻优方法不再适用. 而启发式算法,如遗传算法、蚁群算法、禁忌搜索算法、随机搜索算法和模拟退火算法等适用于解决 NP-hard 问题. 然而,前 4 类算法求解到的基本为局部最优解,其可能和全局最优解相差较大. 而模拟退火算法能跳出局部最优,进而可能得到全局最优解. 因此,使用该算法对模型进行求解.

2.2 求解流程

如图 1 所示为采用模拟退火算法求解车站选址双层模型的基本流程.

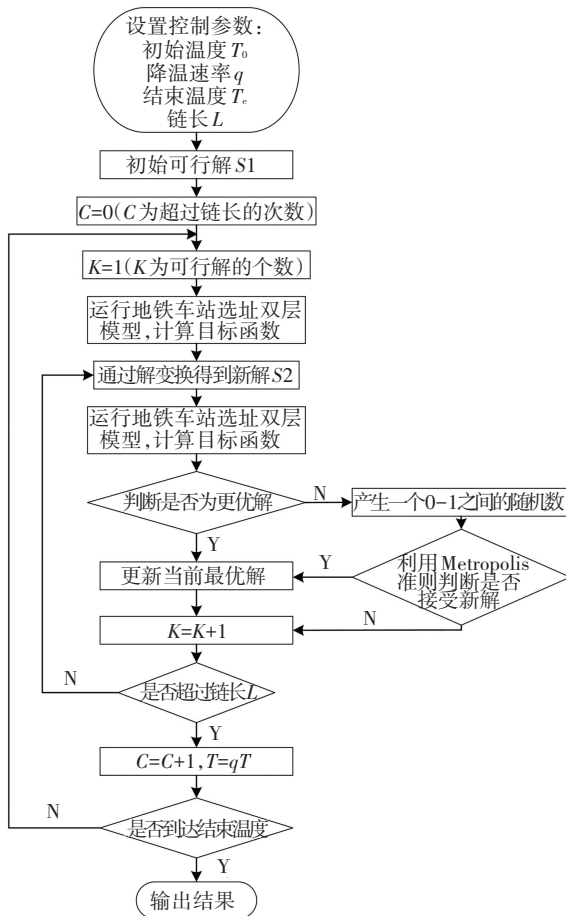


图 1 基于模拟退火算法的双层车站选址模型求解流程

Fig.1 Solving process of the bi-level model of stations locating based on simulated annealing algorithm

模拟退火算法广泛应用于解决组合类问题,通过提高初始温度、改变链长、控制降温速率和调整停止条件等措施,可以改善求解结果. 且根据 Metropolis 准则,其能以某概率接受恶化解的特征,使得该算法能够跳出局部最优.

3 案例分析

以哈尔滨地铁 1 线为例,利用所建立模型对该线路进行重新选址,并将新选址方案和现有车站选址进行对比.

基于 ArcGIS10.1,建立了哈尔滨地铁 1 号线线路、现有车站(由于哈东站和哈南站两个车站主要承担来往火车站的乘客,客流吸引特征与其他车站明显不同,因此,未加以考虑)、车站范围内 6 类用地性质的建筑的 shp 文件和乘客步行道路网络数据集,坐标系采用 Beijing 1954 投影坐标系,并计算了各要素的经纬度. 以 100 m 为间隔设置候选车站,共得到 110 个候选车站. 在 ArcGIS 环境下,首先基于 GWR 模块

对现有车站上车乘客量进行回归分析,在此基础上,对各候选车站的上车乘客量进行了预测.

3.1 候选车站客流量预测

通过乘客出行生成点调查结果,确定使用 800 m 路网距离作为哈尔滨地铁车站服务范围,其小于经验值 800 m 欧氏距离. 楼层数和用地类型通过百度实景

地图获得. 表 1 所示为通过系数显著性检验和 VIF 检验所确定的解释变量. 需要指出的是,对于哈尔滨地铁 1 号线,其各车站服务范围内的土地使用多样性和上车乘客量呈负相关,考虑主要原因是当土地使用多样性提高,居民能够在一定范围内满足其生存需求,因此减少了适用于地铁的中远距离出行.

表 1 系数显著性及 VIF 检验结果

Tab.1 Results of coefficients significance test and VIF test

变量	标准化系数	标准误差	T 统计量	P 值	方差膨胀因子
行政管理	0.094 273	0.033 479	2.815 875	0.020 178 *	1.458 305
商业	0.061 854	0.011 056	5.594 447	0.000 321 *	4.216 001
休闲娱乐	0.081 615	0.027 559	2.961 483	0.015 927 *	1.648 124
医疗卫生	0.070 774	0.014 872	4.758 912	0.001 042 *	1.944 497
土地使用多样性	-17 086.759 74	7 933.307 189	-2.153 800	0.049 633 *	6.537 472
200 m 范围内接驳公交线路	138.831 792	48.961 656	2.835 521	0.019 542 *	1.175 988

基于 ArcGIS10.1,运用 GWR 模型对现有车站的上车乘客量和解释变量进行回归分析,结果显示 Adjusted R^2 为 0.81,AIC 值为399.01,而基于 OLS 的多元回归模型其 Adjusted R^2 为 0.74,AIC 值为 399.01. 因此,所建立的 GWR 模型较多元回归模型有更高的解释能力. 在此基础上,使用预测模块对候选车站上车乘客量进行预测. 表 2 为部分车站的预测结果,其中,GWR 模型预测结果中的局部 R^2 与一般的全局回归预测模型中的 R^2 有所不同,其一方面能够评价预测结果的优劣,另一方面又能反映模型的稳定性. 结果显示,各车站的客流量预测结果的局部 R^2 均在 0.9 以上,说明预测结果较为理想.

表 2 候选车站上车客流量预测结果

Tab.2 Ridership forecasting results of candidate stations

序号	车站名称	上车乘客量预测值	局部 R^2
1	桦树街候选车站 1	7 258	0.918 8
2	桦树街候选车站 2	7 275	0.918 7
3	桦树街候选车站 3	7 338	0.918 5
4	桦树街候选车站 4	7 121	0.918 3
5	桦树街候选车站 5	6 696	0.918 1
⋮	⋮	⋮	⋮
109	哈达车站候选车站 4	6 405	0.946 8
110	哈达车站候选车站 5	6 016	0.947 0

3.2 城市轨道交通综合交通成本模型参数标定

参考文献[11-16],对乘客出行成本、乘客出行分布规律、列车运行规律和电机耗电发电参数进行了标定. 利用 ArcGIS 路网分析功能,得到了各候选车站之间的距离和乘客步行距离. 由于哈尔滨地铁 1 号线长度有限,因此,没有考虑候列车上工作人员成本、车队保养成本、站内工作人员成本和列车购置

成本的影响.

3.3 求解结果

设置模拟退火算法初始温度为 50 000、停止温度为 100 000,链长为 10,降温速率为 0.98. 在 MATLAB R2015a 环境下,根据模拟退火算法原理进行编程对模型进行了求解,结果见表 3 和图 2~4.

表 3 选址结果中的候选车站编号

Tab.3 Serial numbers of candidate stations in the locating result

车站 序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
候选车站 编号	3	10	15	19	26	32	36	42	55	61	66	78	82	89	100	108

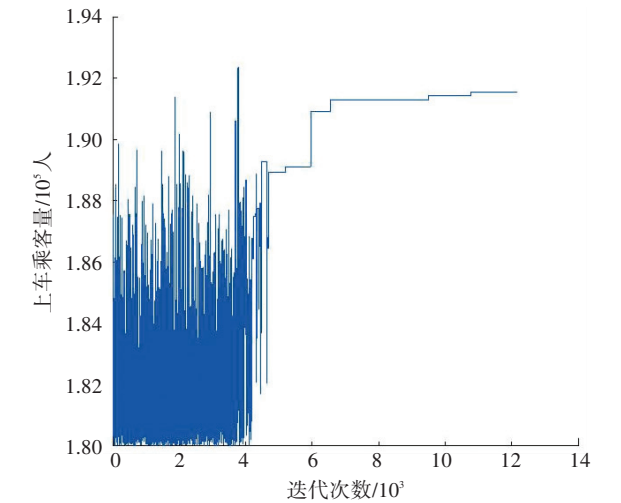


图 2 上车乘客量随迭代次数的变化
Fig.2 Changes of boardings with iterations

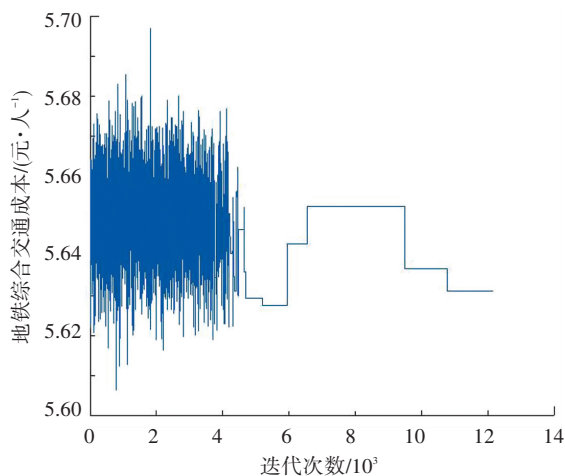


图 3 综合交通成本随迭代次数的变化

Fig.3 Changes of metro comprehensive cost with iterations

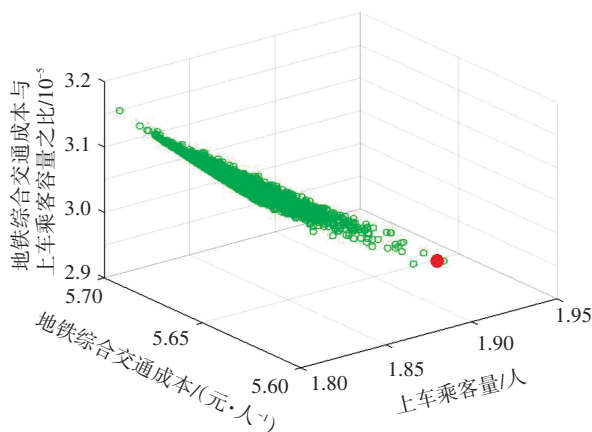


图 4 模拟退火算法解集和最优解

Fig.4 Solution set and optimal solution of simulated annealing algorithm

可以看出,在第 10 830 次迭代运算后,得到了最优车站选址方案. 该方案的候选车站编号为 3—10—15—19—26—32—36—42—55—61—66—78—82—89—100—108. 该候选车站组的上车乘客量之和为 191 553 人,较现有车站上车乘客量 177 010 人,增长了 14 543 人,增长比例为 8.2%;牵引能耗成本为 15 972 元,较现有车站运营成本 17 501 元,减少了 1 529 元,减少比例为 8.7%.

图 5 为新选址方案中各车站上车乘客量和现有车站上车乘客量的比对. 可以看出,新选址方案并非每个车站的上车乘客量均大于现有各车站的上车乘客量,其中桦树街车站、烟厂车站、医大一院车站、和兴路车站现有的上车乘客量大于选址优化后的车站上车乘客量.

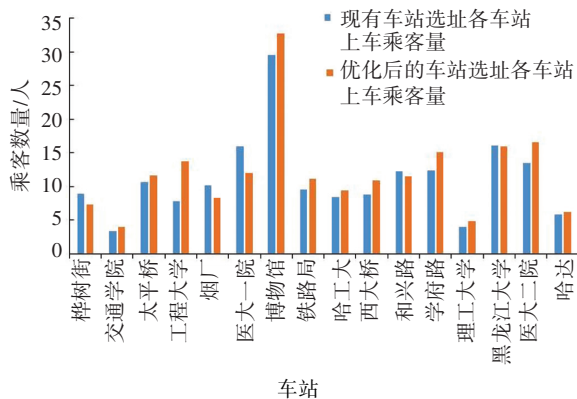


图 5 现有车站选址及优化后的车站选址各车站上车乘客量对比

Fig.5 Comparison of boardings between the current stations and the optimized stations

4 结 论

1) 构建了城市轨道交通车站双层选址模型,上层模型以客流量最大为目标,下层模型以综合交通成本最低为目标,给出了基于模拟退火算法的双层车站选址模型求解方法.

2) 考虑车站吸引范围内不同位置建筑单位楼层面积对客流贡献率的影响,和不同解释变量对不同车站客流量影响的差异,建立了基于 GWR 的客流预测模型,模型预测精度较基于 OLS 的多元回归模型高.

3) 以哈尔滨为例,运用所建立模型对地铁 1 号线进行重新选址,结果表明,该双层模型既能够使所选车站的客流量较高,又能使乘客出行成本和运营方成本较少,能够同时保证社会效益和经济效益.

4) 在实际车站选址过程中,还需考虑车站与地面建筑物的关系,尤其是车站对建筑物地下结构稳定性的影响和列车运行对建筑物产生的振动、噪声的影响. 此外,还需考虑地下管线和地质水文条件等,下一步研究将对模型进行进一步优化、完善.

参考文献

- [1] TAYLOR B D, MILLER D, ISEKI H, et al. Nature and/or nurture? Analyzing the determinants of transit ridership across US urbanized areas [J]. Transportation Research Part A: Policy & Practice, 2009, 43(1): 60
- [2] SOHN K, SHIM H. Factors generating boardings at metro stations in the Seoul metropolitan area [J]. Cities, 2010, 27(5): 358
- [3] CEDER A, BUTCHER M, WANG L. Optimization of bus stop placement for routes on uneven topography [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 74: 40
- [4] 王芳. 基于出行方式选择的轨道交通站间距确定[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(6): 36
WANG Fang. Spacing determination of rail transit stations based on travel mode choice [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2011, 32(6): 36

(下转第 200 页)