

文章编号: 2095-2163(2020)01-0084-05

中图分类号: U231

文献标志码: A

# 地铁乘客乘降时间分析与优化

王 通, 郝妍熙, 胡 华, 刘志钢

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

**摘 要:** 乘客乘降时间是决定地铁停站时间的一个关键因素, 如何在实际运营中最大可能地减少列车的停站时间, 成为地铁系统设计时不得不考虑的重要问题。本文提出了乘客乘降时间估计方法, 对乘客乘降时间特征及影响因素进行了调查与分析, 针对上海地铁10号线存在的现状问题提出了优化建议。

**关键词:** 乘客乘降时间; 影响因素; 优化方案

## Analysis and optimization of metro passenger boarding and landing time

WANG Tong, HAO Yanxi, HU Hua, LIU Zhigang

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** Passenger boarding and landing time is a key factor in determining subway stop times. How to minimize the stopping time of subway trains in practical operation has become an important question when the subway system is designed. This paper presents an estimation method of passenger boarding and landing time. After that, the characteristics and influencing factors of passenger boarding and landing time are investigated and analyzed. Finally, some suggestions on optimization of Shanghai metro line 10 are put forward.

**[Key words]** passenger boarding and landing time; influencing factors; optimization scheme

### 0 引 言

城市轨道交通具有运量大、快速、安全、准时等优点, 在城市公共交通体系中发挥着不可替代的作用。目前, 上海地铁路网客流均处于上升的趋势, 运能运量矛盾逐渐显露并且将在一段时间内持续存在。如何提升列车旅行速度, 满足未来增加开行列车对数需求, 成为了提升线路整体运能和服务水平的重要因素之一。

乘客乘降时间是城市轨道交通列车停站时间的重要组成部分。因此, 在城市轨道交通停站时间编制与修订研究中, 对乘客乘降行为和时间展开研究, 并基于 AFC 数据和乘客乘降行为特征分析来建立停站时间估计模型, 对提高城市轨道交通系统的旅行速度与运行效率具有重要意义<sup>[1]</sup>。

### 1 乘客乘降时间估计方法研究

#### 1.1 乘客乘降时间估计模型

乘客乘降时间是城市轨道交通列车停站时间的重要组成部分, 对乘客上下车行为与时间特点的把控, 将直接影响列车停站时间的确定, 从而对城市轨道交通运营组织管理产生影响。对此拟做阐释论述

如下。

#### 1.1.1 乘客乘降时间影响因素分析

乘客乘降时间可表示为站台上候车乘客数与乘客平均乘降车时间的乘积, 一辆列车停站过程中必要的乘客乘降时间取决于各车门前乘客乘降时间的最大值。因此, 列车停站时间中的合理乘降时间值与列车各车门平均乘降人数、各车门乘降人数分布不均衡系数和乘客平均上下车时间等参数有关<sup>[2]</sup>。列车各车门平均乘降人数受进出站人数、列车发车间隔和车门数的影响; 各车门乘降人数分布不均衡系数受站台楼扶梯数量及分布、乘降人数规模、站台客流组织等因素的影响; 从前文分析可知, 乘客平均乘降时间又受到乘客行为特征、乘客素质(上下车秩序)、是否携带行李、车内拥挤程度和列车剩余座位数等因素的影响。因此, 考虑多个影响因素建立停站时间估计模型将是一个复杂庞大的工程, 亟待后续的深入系统研究。

根据对上海地铁运营数据的可获得性和模型的实用性, 本文选取列车上车人数、列车下车人数、车门数量、列车发车间隔和列车车厢拥挤度(用断面

基金项目: 十三五国家重点研发计划(2017YFC0804900)。

作者简介: 王 通(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 城市轨道交通运营管理; 郝妍熙(1990-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 交通大数据挖掘与智慧运营; 胡 华(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 轨道交通规划与管理、多模式公共交通系统优化与管理; 刘志钢(1974-), 男, 博士, 教授, 上海工程技术大学城市轨道交通学院院长, 主要研究方向: 城市轨道交通运营管理优化及安全技术。

收稿日期: 2019-09-29

满载率表示)为主要影响因素,在对其进行参数分析与标定的基础上建立乘客乘降时间估计模型。

### 1.1.2 模型基本假设

由于列车实际停站时间取决于最大客流车门处的乘客上下车时间,因而计算时不仅要考虑不同车站的客流分布规律,还要考虑乘客在站内的移动情况,以便于数据的统计分析。此外,对于给定的客流,研究希望得到最小的列车停站时间。很明显,最小停站时间只有当客流均匀分布在所有车门和车厢时才能取得。故针对以上考虑,给出如下假设:

(1)乘客在列车各车门都进行上、下车活动,并且各车门处上、下车人数不均匀分布;

(2)上、下车乘客比较集中,在地铁列车开启车门前已经做好了上、下车的准备;

(3)乘客严格按照先下后上的秩序进行,上、下车客流不互相干扰;

(4)对于岛式站台,忽略对向客流间的相互干扰;

(5)停站时间与各车门处上车、下车人数是相互独立的线性关系;

(6)假设乘客无滞留情况,候车乘客在列车到达后即能全部上车<sup>[3]</sup>。

### 1.1.3 乘客乘降时间估计模型

列车在车站停站过程中所需最小的乘客乘降时间,即在正常追踪时间间隔下,保证站台候车乘客以正常的速度上下车即按下车门或屏蔽门关门按钮所需的时间,即安全停站时间。

列车在车站停站过程中应保证拥挤度最高的关键候车区各车门乘客的乘降时间需求,即停站时间应小于等于列车各车门的需求乘降时间的最大值。对应公式可表示为:

$$T_j \leq \max (T_{j1}^{(1)}, T_{j2}^{(2)}, T_{j3}^{(3)}, \dots), \quad (1)$$

因此,得到车站  $j$  某运行方向(上行或下行)上的乘客乘降时间估计模型,即:

$$T_j = f(P_j, Q_j, \delta, t_{\text{均}}) = \frac{P_j + Q_j}{m * n} * \delta * t_{\text{均}}. \quad (2)$$

其中,  $T_j$  表示车站  $j$  的某运行方向的乘客乘降时间估计值,(单位:s);  $P_j$  表示车站  $j$  某单位时间内(小时或 15 min 或更短的时间间隔内,本项目为 15 min)单向进站客流量,人/15 min;  $Q_j$  表示车站  $j$  某单位时间内(15 min)单向出站客流量,人/15 min;  $m$  表示车站  $j$  的某单位时间内(15 min)的单向列车预定发车列数,列/15min;  $n$  表示车站  $j$  的某运行方向停站列车的总车门数,门/列;  $\delta$  表示各车门乘降人数的不均衡分布系数;  $t_{\text{均}}$  表示乘客人

均乘降时间,s/人。

上述估计模型中,  $P_j$ 、 $Q_j$  可以基于上海地铁票务清分系统推估获取,  $m$ 、 $n$  可以根据上海地铁列车运行图和各线路列车车型及编组数等数据计算获取。因此,考虑多个影响因素对各车门乘降人数分布不均衡系数和乘客平均乘降时间进行估计,是本文的重点和难点。

本文基于上海地铁现状各站车门乘降人数分布不均衡系数和乘客平均乘降时间的大量视频调查数据,分析其主要影响因素,在此基础上建立各车门乘降人数分布不均衡系数和乘客平均乘降时间的参数分层估计方法;进一步,用标定的地铁列车乘客乘降时间估计模型对上海地铁各站乘客乘降时间进行估计,并通过与实际值的对比分析,对模型估计效果进行评价和验证。

## 1.2 车门平均乘降人数估计

### 1.2.1 参数估计

列车各车门的平均乘降人数估计,计算公式如下:

$$q_j = \frac{P_j + Q_j}{m * n}. \quad (3)$$

其中,  $q_j$  表示超高峰 15 min 车站  $j$  每列车每车门的平均乘降人数;  $P_j$  表示超高峰 15 min 车站  $j$  的单向进站客流量;  $Q_j$  表示超高峰 15 min 车站  $j$  的单向出站客流量;  $m$  表示各线路超高峰 15 min 列车发车对数;  $n$  表示各线路的列车车门数。

### 1.2.2 参数校验

为了验证估计人数的准确性,下面进行乘降人数估计值与实际值的相关性分析,数据采用上海地铁某日各站上下行进出站 AFC 数据。

相关分析是分析客观事物之间相关性的数量分析方法。许多事物或现象之间总是相互联系的,并且可以通过一定的数量关系反映出来。

相关分析具有能够判断变量之间有无联系、把握相关关系的方向与密切程度等作用。利用相关性分析可以判断乘降人数估计值与实际值是否有关联及其密切程度。本报告利用皮尔逊(Pearson)系数进行两者的关联性分析。Pearson 相关系数计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (4)$$

线性相关的方向通过相关系数的符号来表示,

“+”号表示正相关,“-”表示负相关。相关系数的数值范围是介于-1与+1之间:如果 $|r|$ 越接近0,表明2个变量越没有线性相关关系;如果 $|r|$ 越接近1,则表示2个变量越完全线性相关。乘降人数估计值与实际值的散点图及相关系数计算值见图1、图2。显著性水平为 $0 < 0.05$ ,说明乘降人数估计值与实际值显著相关。相关程度系数 $r = 0.608$ ,说明两者显著相关。可见,基于AFC分方向进出站数据的车门平均乘降人数估计值可以反映各站乘客的实际乘降人数分布特征。

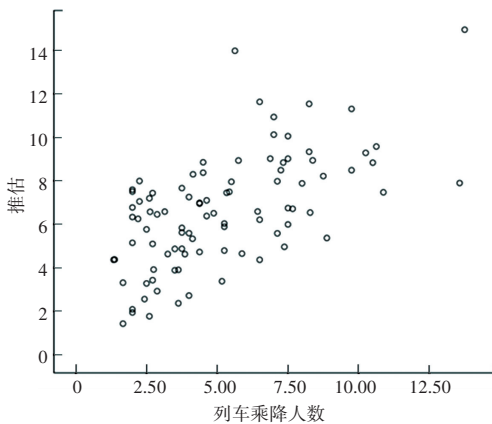


图1 乘降人数与车站列车实际人数散点图

Fig. 1 Scattered point diagram of boarding and landing passenger number and actual number of station trains

相关性

|        |            | 推估人数 | 实际乘降人数 |
|--------|------------|------|--------|
| 推估人数   | Pearson相关性 | 1    | .608   |
|        | 显著性(双侧)    |      | .000   |
|        | N          | 92   | 92     |
| 实际乘降人数 | Pearson相关性 | .608 | 1      |
|        | 显著性(双侧)    | .000 |        |
|        | N          | 92   | 92     |

\*\*.在0.1水平(双侧)上显著相关

图2 推估人数与实际人数的相关性分析

Fig. 2 Analysis of the correlation between the estimated number and the actual number

### 1.3 乘降人数车门分布不平衡系数估计

#### 1.3.1 参数定义

站台候车客流是动态变化的,在不同时段、不同方向、不同车门的乘降人数分布具有很大的不平衡性,而这种不平衡性是影响列车停站时间的重要因素。如前所述,列车的停站时间取决于某一扇车门最大的乘降人数与其所消耗的乘降时间。因此,本项目定义乘降人数车门分布不平衡系数如下:

$$\delta = \frac{t_{\max}}{t_{\text{列均}}} \quad (5)$$

其中, $\delta$ 表示乘降人数车门不平衡系数; $t_{\max}$ 表示1列车最大的乘降时间; $t_{\text{列均}}$ 表示1列车各车门的平均乘降时间。

#### 1.3.2 参数推估思路

本次研究通过视频数据采集和计算各站各车门的乘降人数、乘降时间和车门分布不平衡系数;利用相关性分析方法分析车门分布不平衡系数和车站下游断面满载率、列车各车门平均乘降人数的相关性,从而找到车门分布不平衡系数的主要影响因素;在此基础上,基于概率统计的方法,以主要影响因素为依据,对乘降人数车门不平衡系数进行分层估计。

#### 1.3.3 乘降人数车门分布不平衡系数的估计方法

本文基于概率统计的方法,以车门平均乘降人数为依据,对乘降人数车门分布不平衡系数进行分层估计。首先,绘制车门分布不平衡系数累计频率分布图,见图3。

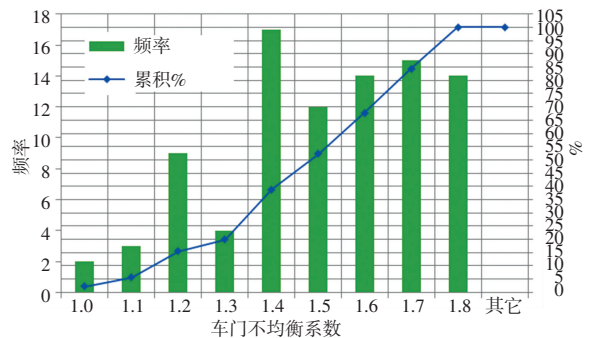


图3 乘降人数不平衡系数累计频率分布图

Fig. 3 Accumulated frequency distribution map of unbalanced coefficient of passengers and landers

根据车门分布不平衡系数的累计频率分布图,以10%为累计频率分段,分别计算该频段下的车门平均乘降人数,见表1。

表1 车门不平衡系数的累计频率分段值

Tab. 1 Accumulated frequency segmentation value of door unbalance coefficient

| 累计频率/% | 列车不平衡系数   | 车门平均乘降人数  |
|--------|-----------|-----------|
| 0-10   | 1.00-1.15 | 7.314 815 |
| 10-20  | 1.15-1.30 | 7.370 370 |
| 20-30  | 1.30-1.35 | 6.903 846 |
| 30-40  | 1.35-1.42 | 5.944 444 |
| 40-50  | 1.42-1.50 | 7.125 000 |
| 50-60  | 1.50-1.55 | 3.981 481 |
| 60-70  | 1.55-1.61 | 4.638 889 |
| 70-80  | 1.61-1.63 | -         |
| 80-90  | 1.63-1.72 | 3.194 167 |
| 90-100 | 1.72-1.80 | 4.103 333 |

从表 1 可见, 车门平均乘降人数随每百分之十的车门不平衡系数的递增而递减: 在 0-30% 的范围内, 即不平衡系数值在 1-1.35, 乘降人数在 7 人以上; 在 30%-50% 的范围内, 即不平衡系数值在 1.35-1.5, 乘降人数在 6-7 人内; 在 50%-70% 的范围内, 即不平衡系数值在 1.5-1.6, 乘降人数在 4-6 人内; 在 70%-100% 的范围内, 即不平衡系数值在 1.6-1.8, 乘降人数在 4 人以下。因此, 按照车门平均乘降人数对车门分布不平衡系数进行分层, 见表 2。

表 2 列车不平衡系数的分层与估计

Tab. 2 Layering and estimation of train disequilibrium coefficient

| 不平衡系数<br>区段 | 乘降<br>人数      | 列车不平衡<br>系数   | 分层<br>区间 |
|-------------|---------------|---------------|----------|
| 1.00-1.35   | 7.158 602 151 | 1.227 530 602 | 7 人以上    |
| 1.35-1.50   | 6.534 722 222 | 1.421 909 427 | 6-7 人    |
| 1.50-1.60   | 4.434 523 810 | 1.535 052 832 | 4-6 人    |
| 1.60-1.80   | 3.965 517 241 | 1.692 427 316 | 4 人以下    |

由表 2 可见, 基于车门平均乘降人数分层区间:  $[0, 4], (4, 6], (6, 7], (7, \infty)$ , 可以将乘降人数车门分布不平衡系数划分为 4 层: 1-1.35, 1.35-1.5, 1.5-1.6, 1.6-1.8。分别计算这 4 层区间的车门分布不平衡系数的均值, 分别为 1.22, 1.42, 1.53, 1.69。基于车门平均乘降人数的车门分布不平衡系数可写作如下数学形式:

$$\delta = \begin{cases} 1.22, & q \leq 4; \\ 1.42, & 4 < q \leq 6; \\ 1.53, & 6 < q \leq 7; \\ 1.69, & 7 < q. \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\delta$  表示乘降人数车门分布不平衡系数,  $q$  表示车门平均乘降人数估计值。

### 1.4 人均乘降时间估计

(1) 参数定义。乘客人均乘降时间是影响停站时间的重要因素, 根据国家标准《地铁设计规范 GB50157》, 乘客人均乘降时间建议值为 0.6 s/人。实践中, 地铁乘客上下车速度受到很多因素的影响, 如车门宽度、乘客年龄、气候条件等, 导致其实际人均乘降时间存在一定波动和差异, 因此在进行乘降时间估计时不能仅简单引用 0.6 s/人的标准建议值。本文基于上海地铁 10 号线的视频数据, 调查统计超高峰 15 min 时段部分车站各三列车所有车门的乘降时间与乘降人数数据, 通过式 (7) 计算得到一组人均乘降时间值, 即:

$$t_{人均} = \frac{t_{\text{门}}}{q_{\text{门}}} \quad (7)$$

其中,  $t_{人均}$  表示车门人均乘降时间;  $t_{\text{门}}$  表示某车门的乘客乘降时间;  $q_{\text{门}}$  表示某车门的乘客乘降人数。

(2) 参数推估思路。通过人均乘降时间实际值的累计频率分布确定其合理取值范围, 在此基础上分析人均乘降时间的影响因素, 并基于影响因素对人均乘降时间进行聚类估计。

#### 1.4.1 根据累计图, 确定人均乘降时间的限值

本文通过视频数据调查与采集了约 1 000 个乘客人均乘降时间数据值, 其累计频率分布图如图 4 所示。

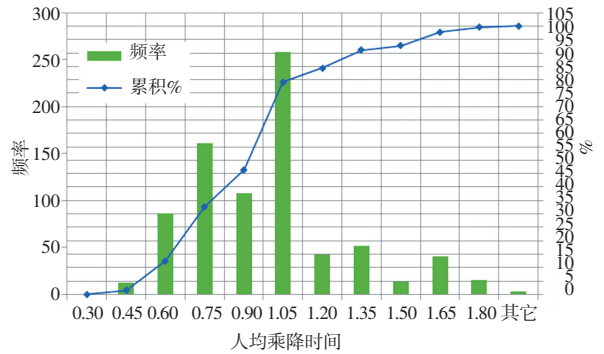


图 4 人均乘降时间累计频率分布图

Fig. 4 Accumulated frequency distribution map of average boarding and landing time

由图 4 可见, 85% 的人均乘降时间分布在 0.5-1.35 的范围区间。为消除两端极大极小值对人均乘降时间的影响, 本文取 0.5-1.35 作为人均乘降时间的合理范围值。

#### 1.4.2 人均乘降时间估计函数

人均乘降时间的分段估计函数如下:

$$t_{均} = \begin{cases} 0.5, & q > 8, \varepsilon \leq 0.5; \\ 0.68, & q > 8, 0.5 < \varepsilon \leq 0.7; \\ 0.74, & q > 8, 0.7 < \varepsilon; \\ 0.74, & 4 < q \leq 8, \varepsilon \leq 0.4; \\ 0.86, & 4 < q \leq 8, 0.4 < \varepsilon \leq 0.7; \\ 1, & 4 < q \leq 8, 0.7 < \varepsilon; \\ 1.1, & q < 4. \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\delta$  表示乘降人数车门不平衡系数;  $\varepsilon$  表示车站下游断面满载率;  $q$  表示车门平均乘降人数估计值。

## 2 上海地铁 10 号线各站乘客乘降时间优化方案分析

### 2.1 上海地铁 10 号线乘客乘降时间优化方案

本文对上海地铁 10 号线各站乘降时间进行估

计,具体步骤如下:

(1)利用各时段超高峰 15 min AFC 进站客流量  $P_j$  以及出站客流量  $Q_j$ 、列车在该 15 min 内的开行对数  $m$ 、列车车门数  $n$  (列车编组数 \* 每编组的车门数),通过式(1)计算得到各站上下行方向的每车门平均乘降人数估计值;

(2)基于每车门平均乘降人数估计值  $q_j$ ,根据式(5)确定列车车门分布不均衡系数估计值  $\delta$ ;

(3)基于各时段超高峰 15 min 的车站下游断面时客流量  $D_{\text{断面}}$  以及车站下游断面运能  $c$ ,确定车站

下游断面满载率  $\varepsilon = \frac{D_{\text{断面}}}{c}$ ;

(4)根据每车门平均乘降人数估计值  $q_j$  和车站下游断面满载率  $\varepsilon$ ,根据式(8)确定人均乘降时间估计值  $t_{均}$ ;

(5)根据式(8),计算各站乘客乘降时间估计值,即:

$$T_j^6 = q_j * \delta * t_{均}. \quad (9)$$

根据上述估计方法,计算得到 10 号线各时段各站的上、下行乘降时间。早高峰时段上行方向的乘降时间估计值最大,为 325.4 s;平峰时段上行方向的乘降时间估计值最小,为 136.9 s。上下行总乘降时间估计值在早高峰最大,为 597.2 s;在双休日时段最小,为 288.9 s;而在平峰和晚高峰时段分别为 292.8 s 和 550.3 s。虹桥 2 号航站楼、虹桥路、交通大学、陕西南路、新天地、老西门、南京东路、天潼路、海伦路、四平路是换乘站,由于存在换乘客流,因此其乘降时间比其他一般车站乘降时间的估计值大;其中老西门与南京东路的换乘客流最大,因此其乘降时间也最大。

## 2.2 对比分析

各时段总乘降时间估计值与图定值对比分析结果见表 3。从表 3 分析可知,由于估计值受乘降时间上限值影响,乘降时间估计值能并没有较好地反映实际客流规律,而乘降时间图定值多数是经验估计值,缺乏对各站司机作业时间和乘客乘降时间的细分要素估计,因此乘降时间估计值与图定值之间存在差值,且总估计值均小于总图定值。10 号线各站乘降时间的估计值与图定值差值在双休日时段最大,其总差值为 -659 s;在早高峰时段最小,其总差值为 -193 s;平峰和晚高峰时段的总差值分别为 -447 s 和 -230 s。

表 3 各时段总乘降时间估计值与图定值对比分析

Tab. 3 Comparison and analysis of total boarding and landing time estimates and graph fixed values in different periods

| 乘降时间 |      | 上行  | 下行  | 总和  | 估计值与图定值总差值 |
|------|------|-----|-----|-----|------------|
| 早高峰  | 总图定值 | 400 | 390 | 790 |            |
|      | 总估计值 | 325 | 272 | 597 | -193       |
| 平峰   | 总图定值 | 370 | 370 | 740 |            |
|      | 总估计值 | 137 | 156 | 293 | -447       |
| 晚高峰  | 总图定值 | 390 | 390 | 780 |            |
|      | 总估计值 | 282 | 268 | 550 | -230       |
| 双休日  | 总图定值 | 474 | 474 | 948 |            |
|      | 总估计值 | 145 | 144 | 289 | -659       |

从各站的停站时间估计值与图定值的偏差看,在早高峰时段,上行方向各站的偏差较小,而下行方向的各站偏差较大,其中,海伦路站下行方向和四平路上行方向的偏差最大,其乘降时间估计值与图定值的差值分别为 14 s 和 -14 s;在平峰时段,上行的偏差较大,而下行方向的各站偏差较小,其中,南京东路站上行方向的偏差最大,其乘降时间估计值比图定值小 23 s;在晚高峰时段,上行方向各站的偏差较小,而下行方向的各站偏差较大,其中,豫园站下行方向偏差最大,其乘降时间估计值比图定值小 15 s;在双休日时段,上、下行方向的偏差均较大,其中,南京东路站上行方向的偏差最大,其乘降时间估计值比图定值小 27 s。4 个时段乘降时间估计值均有显著减少的车站为南京东路站。

## 3 结束语

本文基于 AFC 数据和乘客乘降行为特征分析建立乘客乘降时间估计方法,对乘客乘降时间影响因素进行实地调查分析,同时也对上海地铁 10 号线乘客乘降时间实地调查分析,并提出了乘客乘降时间优化建议。数据分析表明乘客乘降时间的合理分配是提高列车运行效率的重要途径。本文研究成果可为地铁运营管理人员制定与优化合理停站时间提供依据。

## 参考文献

- [1] 何红. 基于调研数据的城市轨道交通列车停站时间规律分析及预测模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [2] 周明. 上海地铁停站时间影响因素分析及优化[J]. 交通世界, 2018(9):166-168.
- [3] 张碧纯,卢弋. 城市轨道交通停站时间建模研究[J]. 交通与运输(学术版),2011(2):48-52.