

# 列车延误条件下的地铁车站站台客流分布演化规律研究<sup>\*</sup>

洪 玲 杨婧一

(上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 为避免列车延误条件下尤其是高峰时段引发的车站站台客流积压, 精确掌握客流随时间的分布情况, 分析了列车延误条件下乘客候车区选择的影响因素, 建立了基于效用函数的乘客候车区选择模型, 设计增量分配算法仿真推演列车延误条件下的站台客流分布演化规律。以上海轨道交通 8 号线沈杜公路站为例进行仿真验证。结果表明, 模型算法能够更精准地辅助车站制定站台客流引导策略、客流管控措施以及确定应急响应启动时机。

**关键词** 地铁站台; 列车延误; 客流分布

**中图分类号** U293.1<sup>+</sup>3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.12.004

## Evolution Pattern of Metro Station Platform Passenger Flow Distribution under Train Delay Condition

HONG Ling, YANG Jingyi

**Abstract** To avoid passenger flow backlog on train platform caused by train delay, especially during peak hours, to accurately grasp the passenger flow distribution over time, the influencing factors of passenger waiting area selection under train delay condition are analyzed, and a passenger waiting area selection model based on utility function is established. An incremental allocation algorithm is designed to deduce the evolution pattern of platform passenger flow distribution under train delay condition through simulation. Shendu Highway Station of Shanghai Metro Line 8 is taken as simulation verification example, results show that the model and algorithm can accurately assist the station to formulate platform passenger flow guidance strategies and management measures, and to determine the timing of emergency response activation.

**Key words** metro platform; train delay; passenger flow distribution

**Author's address** The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, 201804, Shanghai,

China

列车延误事件是近些年来地铁运营过程中最常见的问题。高峰时段的列车延误势必会造成部分车站的客流积压, 给网络运营安全带来严峻挑战。站台是地铁车站乘客聚集度最高、个体和群体行为最复杂的场所, 候车乘客时空分布的不均衡会直接影响地铁车站的运营效率和服务水平, 甚至会在列车延误站台客流量较大的情况下诱发安全事故。可见, 充分了解高峰时段列车延误条件下地铁车站站台客流的分布演化规律, 建立科学、合理的站台候车乘客选择模型, 对车站客流运营组织管理具有重要的理论和实际意义。

目前, 针对站台候车乘客分布的理论研究多侧重于传统行人流量-客流密度-走行速度三个参数的关系<sup>[1]</sup>, 以及站台聚集乘客总数<sup>[2-3]</sup>、站台平均客流密度或最大客流密度随时间变化情况的研究<sup>[4-5]</sup>等, 亦或是仅从宏观角度对站台客流的时空分布特性进行结论性说明。对乘客候车区选择过程模型的研究<sup>[6-14]</sup>, 或过多强调候车区人数和走行路径对乘客的吸引力, 没有综合考虑乘客由站台入口至候车区的客流密度等因素的影响; 或固定效用函数模型关键影响因素自变量的权重值。对此, 本文在效用函数的基础上引入走行路径阻抗的概念, 以体现乘客走行区域的客流密度条件对乘客候车区选择行为的影响。

## 1 地铁车站站台客流时空分布特征

对上海轨道交通 8 号线(以下简为“8 号线”)沈杜公路站(市光路方向)2022 年 1 月 18 日—20 日早高峰时段的站台客流分布情况进行观测, 并通过视频记录乘客的候车区选择行为。观测得到有效

<sup>\*</sup> 上海市 2021 年度“科技创新行动计划”基础研究领域项目(21JC1400602)

数据共6组、1 632条。沈杜公路站的站台为岛式站台,共有3个楼扶梯出入口,其中扶梯位于站台左右两侧,楼梯位于站台中部。列车为7节编组,每侧有28个车门。相应的,每侧站台有28个候车区,编号如图1所示。

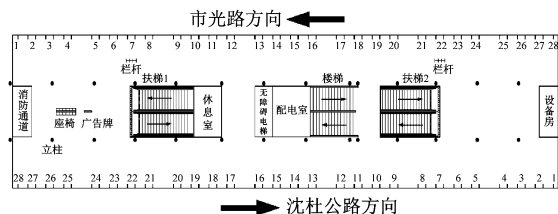


图1 沈杜公路站站台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Shendu Highway Station platform

根据现场观测记录数据,绘制市光路方向早高峰站台候车区客流分布图,如图2所示。

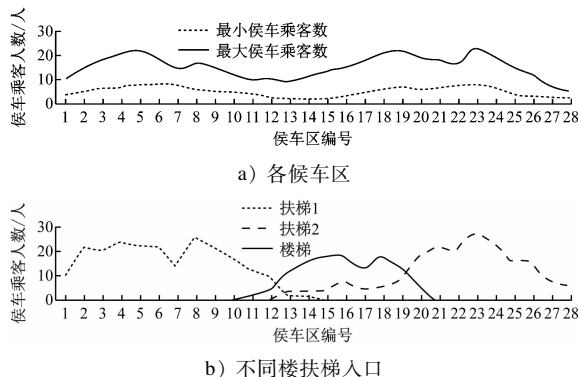


图2 沈杜公路站市光路方向早高峰站台客流分布图

Fig. 2 Diagram of platform passenger flow distribution of Shendu Highway Station in Shiguang Road direction

分析图2可得该站的站台客流时空分布特征:

1) 在早高峰时段,乘客在站台的候车分布是不均匀的:不同位置的候车区候车乘客数量有所不同,且具有较大差异。如图2 a)所示,3—6、17—24候车区的候车乘客数量为峰值;1—2、7—16、25—28候车区的候车乘客数量为谷值。

2) 在靠近楼扶梯入口处的候车区,候车客流量为峰值。候车乘客数量最大的候车区(5候车区、19候车区及23候车区)均靠近楼扶梯入口处,可见乘客具有倾向于就近选择候车区的心理。

3) 经由不同楼扶梯入口到达站台的乘客,选择候车区的范围有所不同。如图2 b)所示,由扶梯1到达站台的乘客,会选择1—14候车区;由扶梯2到达站台的乘客,会选择13—28候车区;由楼梯到达站台的乘客会选择10—21候车区。

4) 与楼扶梯入口处距离相同的候车区候车乘客数量并不相同。进一步分析发现,候车乘客数量与候车区距楼扶梯入口处的距离并不呈现线性相关关系。例如,4候车区和10候车区距扶梯1入口的距离相同,但最大候车乘客数量分别为21人和12人,相差较大。

上述站台客流分布特征是该时空环境下乘客候车选择行为的集中体现。

## 2 模型与算法

### 2.1 乘客选择候车区的主要影响因素

为了更精确地掌握站台客流时空分布的规律,需分析乘客选择候车区的主要影响因素。

本文以列车延误为研究背景,故不考虑列车到站引起的站台客流分布变化情况,仅从站台设施设备布局及区域客流情况角度来分析乘客选择候车区的影响因素。

#### 2.1.1 站台楼扶梯入口与候车区的相对走行距离

乘客 $i$ 由站台楼扶梯入口处步行至候车区 $j$ 排队候车的距离为相对走行距离 $d_{ij}$ ,其主要与站台类型、站台楼扶梯入口位置、走行过程中站台上的障碍物等相关。由图2 a)可知,乘客倾向于选择与站台楼扶梯入口距离较近的候车区。这说明, $d_{ij}$ 会影响乘客对候车区的选择,且乘客选择候车区的意愿与 $d_{ij}$ 一般成反比,即:

$$P_{ij} \propto 1/d_{ij} \quad (1)$$

式中:

$P_{ij}$ ——乘客 $i$ 选择候车区 $j$ 的概率。

#### 2.1.2 乘客走行区域的客流密度

乘客走行区域的客流密度增大,会增加乘客前往候车区的走行路径阻抗,使乘客花费更大的体力成本和心理成本。

走行区域客流密度还能反映站台上正在前往候车区的动态客流对后续到达乘客选择候车区的影响。在列车延误条件下,站台整体客流密度较高且持续增加。乘客走行区域客流密度主要同站台客流总量和乘客走行区域面积有关。

走行区域可按楼扶梯入口对候车区的辐射范围(即该入口到达的乘客选择候车区的范围)来划分。乘客选择候车区的意愿与乘客走行区域客流密度一般成反比,即:

$$P_{ij} \propto 1/\rho_n \quad (2)$$

式中:

$\rho_n$ ——第  $n$  个楼扶梯入口处走行区域的客流密度。

$d_{ij}$  与  $\rho_n$  都作用于乘客前往候车区的过程中,二者在时间和空间上重合。故引入路径阻抗函数的概念,有:

$$r_{ij} = \left( \frac{d_{ij}}{\max(d_{ij})} \right)^b + a \left( \frac{\rho_n}{\max(\rho_n)} \right)^b \quad (3)$$

式中:

- $r_{ij}$ ——乘客  $i$  前往候车区  $j$  的路径阻抗;
- $a$ ——调整系数,按文献[15]取  $a = 0.15$ ;
- $b$ ——感知因子,按文献[15]取  $b = 4$ 。

### 2.1.3 乘客视野度

乘客视野度指乘客到达站台时视野范围内候车区情况的清晰程度。乘客一般会选择到达站台入口时视线范围内的候车区。列车延误条件下,站台上乘客数量较大,乘客视野相对受限。乘客视野度主要与乘客与候车区之间间隔的候车区数量、障碍物数量、间隔候车区中最大排队人数相关,它们会在某些程度上遮挡乘客的视线。乘客选择候车区的意愿与乘客视野度成正比<sup>[13]</sup>。

$$s_{ij} = \frac{1}{o_{ij} + m_{ij} + \max(l_j)} \quad (4)$$

式中:

- $s_{ij}$ ——乘客  $i$  对候车区  $j$  的视野度;
- $o_{ij}$ ——乘客  $i$  和候车区  $j$  之间的障碍物数量;
- $m_{ij}$ ——乘客  $i$  和候车区  $j$  之间的候车区数量;
- $\max(l_j)$ ——乘客  $i$  和候车区  $j$  之间各候车区的最大排队人数。

### 2.1.4 候车区现状指数

候车区现状指数由该候车区现有候车乘客数量与候车区设计规定的最大候车乘客数量的比值表示,反映当前候车区的客流密度,主要与候车区面积及候车区现有候车乘客数量相关。在列车延误条件下,如果站台乘客数量较大,则乘客倾向于选择  $d_{ij}$  较大、但相对人少的候车区。乘客选择候车区的意愿与其现状指数成反比。

$$q_j = l_j / Q_j \quad (5)$$

式中:

- $q_j$ ——候车区  $j$  的现状指数;
- $l_j$ ——候车区  $j$  现有候车乘客数量;
- $Q_j$ ——候车区  $j$  的最大候车乘客数量。

### 2.1.5 引导措施

为了平衡站台客流分布,避免出现安全隐患,

当高峰时段发生列车延误时,车站会采取一定的站台引导措施。

常见的站台引导措施按引导方式可分为物理引导措施和语音引导措施。物理引导措施通过设置栏杆或隔离带等物理设施,让乘客按照规定路线行走,既能改变客流流线,也能减缓客流到达速度。语音引导措施主要包括人工引导措施和广播引导措施。人工引导措施主要由引导员根据对当前站台客流分布情况的判断,引导乘客前往排队人数较少的候车区,以保持站台客流走行空间的畅通。当站台客流量较大时,引导员的作用范围相对有限。广播引导措施主要通过放置在站台固定区域的扩音器或音响等广播设备,提醒乘客前往指定区域或尽快移动离开有拥堵风险的区域。

对此,本文引入 0-1 变量的引导系数  $g$  来表示引导措施的设置情况。作用范围为引导员附近的两个候车区。 $g_j$  表示候车区  $j$  是否处于引导设施作用范围, $g_j = 0$  表示不处于, $g_j = 1$  表示处于。

### 2.1.6 站台楼扶梯入口到达率

站台楼扶梯入口到达率  $\lambda_n$  是单位时间内经由第  $n$  个入口到达站台的乘客数量,主要同车站类型、车站进站客流量、电梯输运速度,以及楼、扶梯位置等有关。 $\lambda_n$  决定了站台的总客流量,也决定了候乘人数的数量级。当  $\lambda_n$  较大时,一旦发生列车延误,各候车区排队人数将迅速累积,候车区的客流密度也将迅速升高。若车站为换乘站,由于换乘客流具有脉冲性客流的特点,故  $\lambda_n$  呈现周期性变化,且换乘客流倾向于选择靠近换乘站台的楼扶梯,会导致各入口的  $\lambda_n$  有所差异。

## 2.2 乘客的候车区选择模型与算法

### 2.2.1 模型建立

根据上述乘客选择候车区的影响因素,作如下假设:

- 1) 本文研究背景为列车延误条件下,此时列车暂未到达、乘客推迟乘降,故不考虑乘降行为。
- 2) 乘客到达候车区后不再进行二次排队选择。
- 3) 高峰时段的通勤客流通常会根据自己的出行目的直接选择上、下行一侧的站台候车区,上下行乘客的互相影响较小,故本模型只针对站台一侧候车区进行研究,不考虑另一个方向乘客的影响。
- 4) 乘客到达站台后立即根据视野范围内的信息做出候车区选择的决策,即不考虑乘客的反应时间和在站台上的徘徊行为。

5) 乘客均为标准理性人,会根据已有信息做出正确行为判断。

乘客在站台上的候车区选择问题本质上是路径选择行为问题。已有研究通常采用随机效用理论来分析此类问题,其将乘客出行路径转化为多方案的离散选择模型<sup>[16]</sup>。随机效用理论为每个方案计算出对应的效用值,量化该方案对乘客的吸引程度,最终得到乘客选择该方案的概率。

效用值不能被直接观测到,通常被认为是一个随机变量,由确定项和随机项两部分组成。本文用  $U_{ij}$  表示乘客  $i$  选择候车区  $j$  的效用值,  $V_{ij}$  表示乘客  $i$  选择候车区  $j$  的确定项效用值,  $\varepsilon_{ij}$  表示乘客  $i$  选择候车区  $j$  的随机项效用值(也称为概率项效用值)。故有:

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

确定项由可观测到的站台设施设备布局和与客流情况相关的影响因素确定,是各影响因素自变量的线性加权:

$$V_{ij} = \beta_j + \sum_{k=1}^K \alpha_{jk} x_{jk} = \beta_j + \alpha_{j1} r_{ij} + \alpha_{j2} s_{ij} + \alpha_{j3} q_j + \alpha_{j4} g_j + \alpha_{j5} \lambda_n \quad (7)$$

式中:

$\beta_j$ ——确定项效用值线性表达式的截距;

$K$ ——影响因素自变量的个数;

$\alpha_{jk}$ ——候车区  $j$  第  $k$  个影响因素自变量的系数;

$x_{jk}$ ——候车区  $j$  第  $k$  个影响因素自变量。

随机项用来表示乘客对确定项影响因素认知的偏差。目前,交通问题乘客选择方案应用最广泛的是多项 Logit 模型(MNL)。随机项一般服从 Gumble 分布,随机项部分的期望值为零,即  $E[\varepsilon_{ij}] = 0$ 。根据效用最大化理论,每个乘客都会选择效用值最大的方案,即乘客  $i$  选择候车区  $j$  的效用值大于选择其他任意候车区的效用值:

$$P_{ij} = (U_{ij} \geq U_{il}), \forall j \neq l, j \in J, l \in J = P(V_{ij} + \varepsilon_{ij} \geq V_{il} + \varepsilon_{il}) = P(\varepsilon_{il} - \varepsilon_{ij} \leq V_{ij} - V_{il}) = F(V_{ij} - V_{il}) \quad (8)$$

式中:

$J$ ——候车区集合;

$l$ —— $J$  中除了  $j$  以外的其他候车区;

$F$ ——Gumble 分布的分布函数<sup>[17]</sup>。

根据 Gumble 分布的分布函数和密度函数,可推导出:

$$P_{ij} = e^{V_{ij}} / \sum_{j=1}^J e^{V_{ij}} \quad (9)$$

$$\text{且 } 0 \leq P_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^J P_{ij} = 1.$$

## 2.2.2 客流分布演化规律算法

随着候车乘客到达站台、选择候车区、前往候车区、候车等一系列出行流程的进行,站台候车区的候车客流会呈现一定的演化规律。站台客流演化规律实质上就是客流随时间变化在站台上的空间分布变化情况,可采用增量分配的方法将一定时间间隔(本文取 1 s)内到达站台的乘客,通过乘客候车区选择模型不断分配到各候车区。客流分布演化规律算法流程如图 3 所示,其主要步骤为:

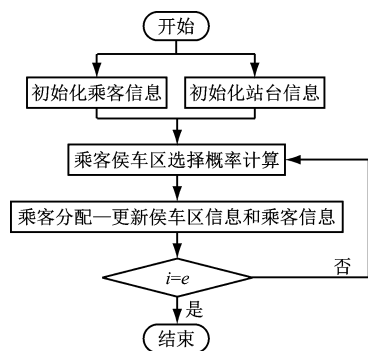


图 3 客流分布演化规律算法流程图

Fig. 3 Flow chart of passenger flow distribution evolution pattern algorithm

步骤 1: 初始化乘客信息,得到  $A_i(n, t_1, j, t_2)$ 。其中,  $t_1$  为乘客到达站台的时刻,乘客预计选择候车区  $j$ ,  $t_2$  为乘客走行时间。此外,  $i = 0, 1, 2, \dots, e$ , 其中  $e$  为乘客总量。

步骤 2: 设置  $i = 0$ , 初始化站台信息,即  $J(j, l_j = 0), \lambda_n$ 。

步骤 3: 令  $i = i + 1$ , 运用乘客候车区分布模型迭代计算  $P_{ij}$ , 记录  $\max(P_{ij})$  的  $j$ 。

步骤 4: 计算乘客  $i$  走行时间  $t_2 = d_{ij} v_{ij}$ , 重写  $A_i$ ; 其中  $v_{ij}$  为乘客  $i$  前往候车区  $j$  的平均走行速度。

步骤 5: 乘客信息  $A_i(n, t_1, j, t_2)$  表内遍历, 判断是否有  $t_1 + t_2 = t$  ( $t$  为当前仿真时刻); 有, 则更新  $l_j = l_j + 1$ ; 无, 则进行下一步。

步骤 6: 更新时间  $t = t + 1$ , 判断  $i = e$ ; 是, 则计算结束并输出乘客信息表  $A$ ; 否则返回步骤 3。

需注意的是: 步骤 2 初始化站台信息时需输入站台影响因素相关的确定变量取值, 如走行区域面积  $c_n, Q_j, o_{ij}, m_{ij}$ 、引导人员位置等。

3 算法的应用案例

3.1 背景及参数确定

以沈杜公路站为例,该站为 8 号线市光路方向始发站,也是浦江线换乘站。根据乘客候车选择主要影响因素自变量和乘客候车区选择模型,运用 SPSS(统计产品与服务解决方案)软件对调研的有

效数据进行 MNL 回归分析,因变量为每个记录数据中乘客选择的候车区编号;对照组乘客选择了 28 候车区( $j=28$ ),显著性检验置信区间设置为 95%。采用极大似然估计法对参数进行标定,并通过似然比检验和卡方值对拟合结果进行检验。各候车区的影响因素自变量系数取值如表 1 所示。

表 1 影响因素自变量系数取值(部分)

Tab.1 Value of influencing factor independent variable coefficients (partly)

$j$	$r$	$s$	$q$	$\lambda$	$g$	常数
1	3.923	210.625	58.341	-0.779	-10.286	-10.931
2	-8.420	410.600	64.130	-2.075	-24.601	-2.304
3	15.332	1288.877	127.638	-1.979	2.287	-102.629
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
25	-335.632	328.482	49.254	1.610	-28.713	17.208
26	-175.457	-6.214	-18.164	0.358	-28.696	46.225
27	-58.940	-25.860	-14.275	-1.276	-30.715	43.193

3.2 模型检验

模型检验结果如图 4 所示。由图 4 a)可知,显著性值小于 0.05,说明本模型有统计学意义,模型通过检验。根据图 4 b),依次列出的 3 个伪 R 方值均较高,且前两项超过 0.98,说明模型对原始变量变异的解释程度较好,能解释几乎全部信息,其拟合程度优秀。根据图 4 c),最终进入模型的影响因素为  $r$ 、 $s$ 、 $q$ 、 $\lambda$  及  $g$ ,其显著性值表明,这 5 个自变量(影响因素)对模型构成均有显著贡献,具有研究意义。

3.3 站台客流分布演化规律仿真

本文采用 Stapass 仿真软件,从列车离开站台时起,模拟站台候车乘客的分布演化过程。8 号线早高峰时段的列车开行间隔时间  $t_{\text{间隔}}=1\text{ min }30\text{ s}$ ,根据乘客候车区分布模型和算法,选择较短列车延误工况(延误 3 min,相当于 2 个  $t_{\text{间隔}}$ )和较长列车延误工况(延误 7 min 30 s,相当于 5 个  $t_{\text{间隔}}$ ),对站台客流时空分布情况进行研究。

如图 5 a)所示,在非延误条件下,站台客流密度最大的候车区位于楼扶梯入口处,说明乘客倾向于选择离楼扶梯入口较近的候车区。这与图 2 a)观测记录结果一致。由此可见,乘客的候车区选择模型能很好地反映沈杜公路站站台的客流分布现实情况,验证了模型的准确性。

根据列车延误后的站台客流分布仿真推演结

模型拟合条件		似然比检验		
模型	-2对数似然	卡方	自由度	显著性
仅截距	1 781.976			
最终	563.665	1 218.311	135	.000

a) 模型拟合信息

考克斯-斯奈尔	.989
内戈尔科	.990
麦克法登	.684

b) 伪 R 方指标

效应	模型拟合条件 简化模型的-2 对数似然	似然化检验		
		卡方	自由度	显著性
截距	827.810	64.146	27	.000
$r$	794.029	230.364	27	.000
$s$	716.565	152.900	27	.000
$q$	743.273	179.608	27	.000
$\lambda$	557.446	130.097	27	.000
$g$	511.711	142.923	27	.000

c) 似然比检验结果

图 4 拟合检验结果截图

Fig.4 Screenshot of fitting test results

果,可精准判断采取客流引导措施及管控措施的时机,具体如下:

1) 为了避免楼扶梯入口处的候车区客流密度过大,造成局部拥堵,在延误开始时(列车未按既定时间到达),即引导乘客选择距楼扶梯入口较远的候车区;

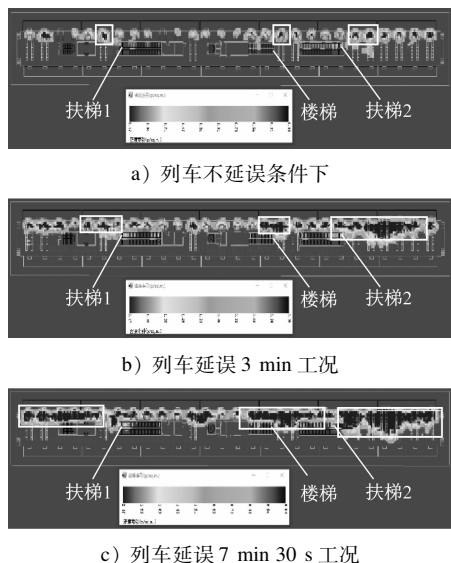


图5 沈杜公路站的站台瞬时客流密度分布图

Fig. 5 Distribution diagram of instantaneous passenger flow density on Shendu Highway Station platform

2) 为了避免出现图5 c)的站台所有候车区客流积压的情况,应在出现图5 b)的客流分布表现时,在站厅层采取客流管控措施,降低站台的乘客量增加速度;

3) 当延误时间过长时,为了避免车站客流严重积压,应提前仿真推演站台客流分布,并根据推演结果精准确定启动应急响应预案的具体时间点,以便及时采取应急疏散措施,防止安全事故。

对于站台客流引导策略、客流管控措施或应急响应预案:如果启动时机滞后,则会错过最佳客流管控时机;如果启动时机过早,则会降低乘客的满意度,影响车站服务水平。可见,精准确定响应措施的启动时机,能有效改善站台客流时空分布的不均衡特征,提高列车延误条件下、尤其是高峰时段的车站客流组织效率。

## 4 结语

本文以沈杜公路站为例,基于站台客流分布现场调研情况,总结了站台客流时空分布的不均衡特征,分析了乘客候车区选择的影响因素,进而建立了基于效用函数的乘客候车区选择模型。通过动态标定乘客候车区选择模型的影响因素参数,可以保证乘客候车分布选择模型的拟合结果与实际情况一致,进而精准地推演客流分布规律,更有效地指导车站客流组织管理。参数标定和检验结果显示,模型拟合程度良好。通过设计增量分配算法,

运用仿真软件能准确推演列车延误条件下的客流分布演化规律,进而确定站台客流引导策略、客流管控措施及车站应急响应预案的最佳启动时机。

## 参考文献

- [1] 李三兵,陈峰,李程垒. 对地铁站台集散区客流密度与行进速度的关系探讨[J]. 城市轨道交通研究,2009(12):4.  
LI Sanbing, CHEN Feng, LI Chenglei. Passages' density and travel speed at subway stations[J]. Urban Mass Transit, 2009(12):4.
- [2] KEPAPTSOGLU K, KARLAFTIS M G. A model for analyzing metro station platform conditions following a service disruption [C]// Proceedings of 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Funchal: IEEE, 2010.
- [3] 傅晨琳,黄敏,张学强. 考虑不同滞留程度的城市轨道交通车站侧式站台人数计算模型[J]. 城市轨道交通研究,2020(1):6.  
FU Chenlin, HUANG Min, ZHANG Xueqiang. Calculation model of passenger number on urban rail transit side platform under different retention grades[J]. Urban Mass Transit, 2020(1):6.
- [4] 刘映池,朱顺应,彭增辉,等. 轨道交通站台拥挤指数计算模型[J]. 物流技术,2017(4):74.  
LIU Yingchi, ZHU Shunying, PENG Zenghui, et al. Calculation model of rail transit platform crowding index[J]. Logistics Technology, 2017(4):74.
- [5] 夏琦琦. 上海轨道交通站台乘客排队候车行为研究[J]. 城市建筑,2020(4):7.  
XIA Shuaiqi. The study of passengers' waiting behavior on Shanghai rail transit platforms[J]. Urbanism and Architecture, 2020(4):7.
- [6] 刘光通,孔德文,郑宣传,等. 基于BC算法的地铁站台乘客分布建模及应用[J]. 都市快轨交通,2021(2):8.  
LIU Guangtong, KONG Dewen, ZHENG Xuanchuan, et al. Simulation model construction and application of platform passenger distribution[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021(2):8.
- [7] 许阳. 城市轨道交通车站站台候车乘客分布规律研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.  
XU Yang. Research on the spatial distribution of waiting passengers on the platform of a rail transit station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [8] 武勇彦,荣建,刘小明,等. 轨道交通车辆到达前站台乘客候车分布研究[J]. 北京工业大学学报,2012(6):5.  
WU Yongyan, RONG Jian, LIU Xiaoming, et al. Passengers distribution in urban rail transit platform before vehicle arrival[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012(6):5.
- [9] 濮桦. 基于地铁站台设施布局的候车乘客分布与优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.  
PU Ye. Study on the distribution of waiting passengers and the optimization based on the facilities' layout of subway platform [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.