

# 考虑乘客选择行为的地铁车站承载能力瓶颈识别方法

黄家骏<sup>1</sup>, 徐瑞华<sup>1</sup>, 邓颖<sup>2</sup>, 奚梦汝<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 安诚傲林规划设计顾问(上海)有限公司, 上海 200051)

**摘要:** 乘客选择行为引起地铁车站客流量分布动态变化, 并导致拥堵的传播, 是承载能力瓶颈产生的关键因素之一。通过分析乘客在站服务事件链, 构建地铁车站系统中设施设备关联网。在分析乘客选择行为作用下的关联网特性的基础上, 建立了节点约束下的车站客流分配模型, 并引入动态惩罚函数求解该模型, 结合求解结果, 提出通过节点受影响程度指标来识别能力瓶颈。以上海地铁陆家浜路站为例分析, 与 StaPass 软件的仿真结果进行对比, 验证了该方法的可行性和准确性, 有助于快速分析不同客流条件下车站客流分布, 并确定能力瓶颈。

**关键词:** 地铁网络; 承载能力瓶颈; 设施设备关联网; 乘客选择行为; 客流分配模型; 动态惩罚函数

中图分类号: U291.69

文献标志码: A

## Identification of Bottleneck for Passenger Transport Capacity of Metro Station Considering Passenger Choice Behavior

HUANG Jiajun<sup>1</sup>, XU Ruihua<sup>1</sup>, DENG Ying<sup>2</sup>, XI Mengru<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Hyder ACLA Consulting(Shanghai)Limited, Shanghai 200051, China)

**Abstract:** Passenger choice behavior, which causes dynamic changes of the passenger flow distribution and leads to the spread of congestion, is one of the key factors of bottleneck for passenger transport capacity. An association network of facilities is set up based on the analysis of passenger service chain in station. Then the passenger flow distribution model with node capacity constraints is established considering the passenger choice behavior. The dynamic penalty function is introduced to solve this model. Based on the result of the solution, the identification of bottleneck for passenger transport capacity through the index of affected degree of nodes is proposed. Finally, a case study of Lujiabang Road

Station in Shanghai is carried out and compared with the simulation results of StaPass, verifying the feasibility and accuracy of this approach, which can help to analyze the passenger flow distribution of metro station in different scenarios.

**Key words:** metro network; bottleneck for passenger transport capacity; association network of facilities; passenger choice behavior; passenger flow distribution model; dynamic penalty function

在地铁网络化进程加快, 巨量客流常态化且稳步增长的背景下, 承担客流集散功能的地铁车站所面临的客运组织压力尤为明显。在大客流冲击下, 由于缺乏对车站承载能力瓶颈的科学识别, 限流时机及条件、应急处置方案等客运组织决策主要依靠车站管理人员的经验判断, 难以准确把握和有效利用车站内设施设备能力间关系。

车站承载能力瓶颈(下文简称能力瓶颈)是指当前客流条件下, 地铁车站在客运组织过程中影响正常客运服务的关键限制因素, 一般为设施设备。一旦能力瓶颈处发生拥堵或丧失服务能力, 地铁车站难以疏散, 并导致无法提供客运服务。传统静态识别方法是采用“木桶原理”确定能力瓶颈<sup>[1]</sup>。该方法未考虑车站系统内设施设备布局间的关系, 结果缺乏科学性。越来越多的学者将地铁车站抽象成复杂网络<sup>[2]</sup>, 从不同角度描述了设施设备布局间的关系, 并通过最大流<sup>[3]</sup>、逆向搜索<sup>[4]</sup>等理论识别能力瓶颈, 但是未考虑乘客选择行为的影响。

在动态识别方面, 国内外学者的研究主要基于排队论和系统仿真两种方法展开。排队论<sup>[5-10]</sup>考虑了单个设施设备乘客拥堵特性, 以及同一流线上拥堵传播特性, 但是忽略了客流拥堵在不同流线上传播,

收稿日期: 2017-09-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71271153); 国家自然科学基金青年基金(71701152); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120170239)

第一作者: 黄家骏(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: 1210720@tongji.edu.cn

通讯作者: 徐瑞华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为运输组织现代化。E-mail: rxhu@tongji.edu.cn

因此识别结果略有偏差。

系统仿真方法分别从宏观层面<sup>[11-14]</sup>和微观层面<sup>[15-18]</sup>两个角度通过仿真模型或工具对轨道交通车站客运服务流程进行模拟。该方法能再现不同场景下的客流运动过程,并获得空间客流密度、速度等统计指标。但上述指标反映的是客流运动状态,无法与设施设备能力直接关联,仅能从侧面辅助经验识别能力瓶颈,并且存在仿真建模复杂等应用方面的不足。

综上所述,除了系统仿真方法,其他方法并未考虑到乘客选择行为及拥堵传播对能力瓶颈产生的影响。而系统仿真方法受制于应用效率以及统计指标类型,较难在车站设计改造、运营组织管理工作中提供客观、量化的决策参考。考虑乘客选择行为、设施设备布局等因素,实现快速、准确地识别能力瓶颈是急需解决的问题。

乘客选择行为会引起地铁车站客流量分布动态变化,并使网络产生级联失效进而导致拥堵的传播<sup>[19]</sup>。因此,本文从乘客选择行为角度,构建车站设施设备关联网络,并提出节点约束下的车站客流分配模型。基于客流分配结果提出相应的指标,实现对承载能力瓶颈的快速识别。

### 1 基于在站事件链的车站设施设备关联网络

#### 1.1 地铁客流在站事件链

地铁车站客流可以分为 3 类:进站客流、出站客流和换乘客流。每类客流在车站内的集散过程可以看作“按照次序使用各类设施设备(组)完成一系列事件”,即在站事件链。不同类型客流需要完成的在

站事件链不同<sup>[20]</sup>。

(1)对于进站客流来说,乘客将经历“进站→购票(针对单程票客流)→验票→通过楼梯(非同一楼层)→……→候车→上车”的事件链。其中,“购票”环节仅限非持有特殊票或交通卡的乘客需要进行。

(2)对于出站客流来说,乘客将经历“下车→通过楼梯(非同一楼层)→……→验票→出站”的事件链。

(3)对于换乘客流来说,乘客将经历“下车→通过楼梯(非同一楼层)→……→验票(非一票换乘车站)→通过楼梯(非同一楼层)→候车→上车”的事件链。其中,“验票”环节仅限乘客在非“一票换乘”车站需要进行。

根据在站事件链的定义,每个事件环节均涉及不同类型的设施设备(含通道)。需要注意的是,列车实际上不属于车站设施设备,但在上下车事件中是唯一的设施设备,具有重要的作用,所以将进站列车当成车站设施设备。因此,在站事件链也可以转化成车站设施设备链,如表 1 所示。

表 1 车站设施设备链

Tab.1 Illustration for facility chains in normal stations

客流类型	车站设施设备链
进站客流	出入口→(自动售票机)→自动检票机→楼扶梯(通道)→……→楼扶梯(通道)→列车
出站客流	列车→楼扶梯(通道)→……→楼扶梯(通道)→自动检票机→出入口
换乘客流	列车→楼扶梯(通道)→……→楼扶梯(通道)→列车

#### 1.2 地铁车站设施设备关联网络

车站设施设备链描述了地铁站内主要设施设备(组)间由于客流运动产生的耦合关系。每条车站设施设备链中,各节点可以细化为具体设施设备(组),并融合形成开环、有向的车站设施设备关联网络(下文简称关联网络),如图 1 所示。

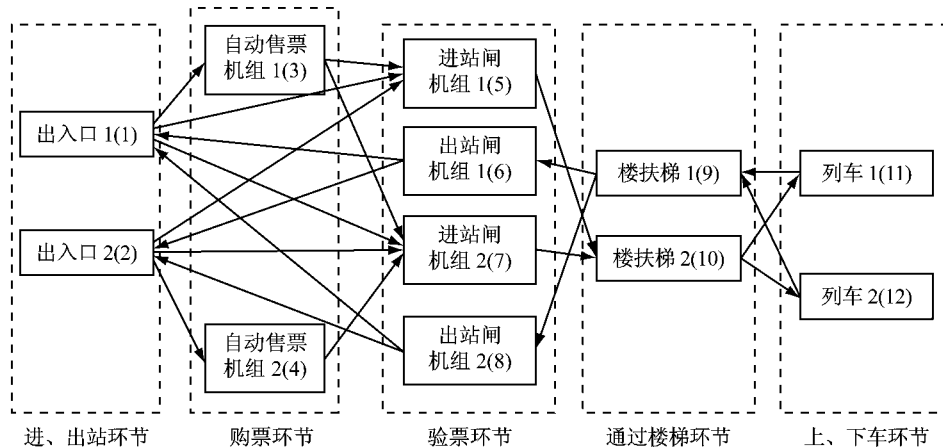


图 1 非换乘车站设施设备关联网络

Fig.1 The association network of facilities in normal stations

其中,关联网  $G(N, A)$  的相关定义如下:

(1) 定义  $N$  为节点集, 每个节点  $n(n \in N^*)$  是在站事件链中某一环节的设施设备. 以图 1 为例, 进出站闸机组(节点 5~节点 8)对应了进出站客流中的“验票”环节.

(2) 定义  $A$  为有向边集,  $L$  为有向边长度集  $I(I \subset N)$  为起点集,  $J(J \subset N)$  为迄点集. 有向边  $a(a \in A)$  表示节点  $i(i \in I)$  到节点  $j(j \in J)$  的可达路段, 亦表征事件链中相邻环节的衔接关系. 其长度  $l_a(l_a \in L)$  定义为节点  $i$  与节点  $j$  的中点间直线距离.

(3) 除了出入口节点, 节点  $n$  的限制容量用最大通过能力  $C_n$  表示, 我国《地铁设计规范》<sup>[1]</sup> 已有相应的计算公式. 对于列车节点, 限制容量为本站允许上车的最大人数, 由上一区间满载率、本站下车人数、车辆定员三者共同决定.

(4) 除了端点的节点(出入口和列车), 在限制容量范围内, 节点  $n$  的流量守恒, 即流入量等于流出量. 对于列车节点, 其限制容量会导致留乘现象, 因此在进站或换乘方向上, 列车节点的流入量与流出量不一定均衡.

## 2 模型与方法

### 2.1 乘客选择行为作用下关联网特性分析

受选择行为的影响, 乘客在进入下个环节前会选择最合理(心理效用最高或阻抗最低)的设施设备及路径. 这一过程导致了关联网中各路段的流量处于动态变化的状态. 当某个节点的客流流入量超过限制容量时拥堵发生, 乘客选择该节点的概率将极大降低. 乘客对剩下非拥堵节点进行选择, 引发网络中客流量的重分配, 产生级联失效.

级联失效是指如果网络中一个或少量的元素(节点或边)因发生故障而不可用, 会引发网络中流量的重分配, 反过来又会引起其他节点因负载过高而“崩溃失效”, 由此使得故障逐步传播、产生级联效应, 最终可能导致网络中相当一部分节点甚至整个网络的崩溃<sup>[21]</sup>. 级联失效不仅能评估影响网络稳定性的关键节点或边, 也能反映拥堵在网络中的传播特征.

与传统的级联失效不同, 关联网中“崩溃失效”的节点为到达限制容量的节点, 并将保持该节点的流入量不变, 继续服务乘客.

综上, 由于乘客选择行为, 关联网  $G(N, A)$  具有级联失效性质, 网络中客流量分布也处于动态变

化状态. 最终, 网络中乘客将到达均衡状态, 即各非零路径的阻抗相等或都到达限制容量. 因此, 构建节点容量约束下的客流分配模型求解车站客流均衡状态, 并根据结果对节点受影响程度的排序识别能力瓶颈.

### 2.2 假设条件

(1) 任意有向边  $a$  不存在限制容量, 但存在路径阻抗. 因为在设计规划阶段, 设计师尽可能避免了流线间在走行空间内的相互干扰; 在运营组织阶段, 运营管理人员可以通过蛇形排队等方式增加走行空间的容载量.

(2) 任意节点  $n$  的限制容量是其固有属性, 不随着使用强度和时间的增加而变化.

(3) 不考虑乘客个体属性、运动过程以及速度损失, 客流在有向边上的流速是均衡的, 并在关联网中以流体形式存在.

(4) 列车的到发是周期性过程, 所反映的是每单位周期所能承担的客流量. 为了统一计量单位, 需要转换成每单位时间能承担的客流量. 并假设上下行列车同时到发.

(5) 乘客完全熟知服务流程以及各事件环节所涉及的设施设备, 不会在执行选择行为时出现滞留或“选择不定”等现象.

(6) 在路径选择结束并开始运动后, 乘客不能重新选择路径. 此外, 不考虑乘客运动过程中的微观路径规划.

(7) 乘客在节点中接受服务后, 不会出现滞留在节点内的情况, 比如: 列车到站时间内, 下车乘客都能够顺利下车; 通过闸机的乘客能快速通过闸机等.

### 2.3 考虑乘客选择行为的客流分配模型

轨道交通车站日常服务对象主要为通勤客流或常住居民, 这部分乘客或频繁在某一车站上下车, 或能够快速获取车站内引导信息, 对于车站结构和设施设备布局相对比较了解. 因此, 乘客在车站内的选择过程可以认为是在信息完全状态下对下一环节中节点的选择决策.

在现实环境中, 乘客一般会选择距离较短且舒适的节点进行服务<sup>[20]</sup>. 因此, 乘客的选择决策重点考虑起迄点的距离和指向迄点的路段拥挤程度两个因素, 则有向边  $a$  的阻抗函数  $w_a(x)$  如下:

$$w_a(x) = w_{0,a} + a_0(x/C_j)^b, \quad a_0, b \geq 0 \quad (1)$$

式中:  $w_{0,a}$  为有向边  $a$  的距离阻抗;  $C_j$  为节点  $j$  (对于有向边  $a$  来说亦为迄点  $j$ ) 的限制容量;  $a_0$  为调整因子, 参考取值为  $a_0 = 0.15^{[22]}$ ;  $b$  为感知因子, 参考取

值为  $b=4^{[22]}$ .

可见式(1)由两部分组成:

(1) $w_{0,a}$ 用来描述讫点  $j$  没有被乘客选择时的初始阻抗,与有向边边长呈正相关,即

$$w_{0,a} = (l_a/\max(L))^b \quad (2)$$

式中: $\max(L)$ 表示有向边长度集中最大长度.

(2) $a_0(x/C_j)^b$ 用来描述拥挤程度,表示随着流量的增加,乘客感觉越拥挤.其中,定义  $x_a$  为有向边  $a$  的流量,则  $x=x_a$ .

对于节点容量约束下的客流分配模型,令  $X$  表示所有边流量组成的集合, $x_a \in X$ ;  $f_{k,<r,z>}$  表示 OD 对  $<r,z>(r \in I, z \in J)$  的第  $k$  条路径的流量;  $K_{r,z}$  表示 OD 对  $<r,z>$  间的所有非空路径集;  $q_{r,z}$  表示 OD 对  $<r,z>$  间的总流量.建立如下模型:

$$\min Z(X) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} w_a(x) dx \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k \in K_{r,z}} f_{k,<r,z>} = q_{r,z}, \forall r \in I, z \in J \quad (4)$$

$$f_{k,<r,z>} \geq 0, \forall r \in I, z \in J, k \in K_{r,z} \quad (5)$$

$$x_a = \sum_{r \in I} \sum_{z \in J} \sum_{k \in K_{r,z}} f_{k,<r,z>} \delta_{a,k,<r,z>}, \forall a \in A \quad (6)$$

$$g_j(x) = \frac{\sum_a x_a}{C_j} \leq 1, \forall j \in J \quad (7)$$

式(6)表示如果有向边  $a$  属于 OD 对  $<r,z>$  第  $k$  条路径的边时,  $\delta_{a,k,<r,z>} = 1$ , 否则  $\delta_{a,k,<r,z>} = 0$ . 式(7)为节点容量约束条件,  $\sum_a x_a$  表示所有指向讫点  $j$  的有向边的流量总和.

上述模型是一个严格的凸规划模型,因此边流量具有唯一的最优解.根据 KKT 条件,定义  $\mu = \mu_{r,z}$  和  $\lambda = \lambda_j$  分别表示式(4)和式(7)的拉格朗日乘子,模型的最优解条件如下:

$$\left( \sum_{a \in A} (w_a(x) + \sum_{j \in J} \lambda_j \frac{\partial g_j(x)}{\partial x}) \delta_{a,k,<r,z>} - \mu_{r,z} \right) f_{k,<r,z>} = 0, \forall r \in I, z \in J, k \in K_{r,z} \quad (8)$$

$$\sum_{a \in A} (w_a(x) + \sum_{j \in J} \lambda_j \frac{\partial g_j(x)}{\partial x}) \delta_{a,k,<r,z>} - \mu_{r,z} \geq 0, \forall r \in I, z \in J, k \in K_{r,z} \quad (9)$$

$$(g_j(x) - 1)\lambda_j = 0, \forall j \in J \quad (10)$$

$$g_j(x) - 1 \leq 0, \forall j \in J \quad (11)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (12)$$

式(4)~式(7)

式(8)和式(9)符合 Wardrop 用户均衡原理<sup>[23]</sup>.

定义每条路径  $k$  的广义费用  $c_{k,<r,z>}(x, \lambda)$  为

$$c_{k,<r,z>}(x, \lambda) = \sum_{a \in A} (w_a(x) +$$

$$\sum_{j \in J} \lambda_j \frac{\partial g_j(x)}{\partial x}) \delta_{a,k,<r,z>} \quad (13)$$

则当  $f_{k,<r,z>} > 0$  时,有:

$$\mu_{r,z} = \min_{k \in K_{r,z}} \{c_{k,<r,z>}(x, \lambda)\} \quad (14)$$

### 3 能力瓶颈识别方法

#### 3.1 客流分配模型求解

对于容量限制下的客流分配模型,通常采用惩罚函数法进行求解<sup>[24]</sup>.其中,动态惩罚函数法是一个有效的求解算法.定义关于讫点  $j$  的惩罚函数  $p_j(x, \alpha_j)$  如下:

$$p_j(x, \alpha_j) = \alpha_j \Psi(g_j(x)) \quad (15)$$

式中,  $\alpha_j$  为惩罚因子,  $\Psi(g_j(x))$  为分段函数如下:

$$\Psi(g_j(x)) = \begin{cases} \frac{0.01}{(1-g_j(x))} & g_j(x) < 1 \\ 100(g_j(x) - 1) + 1 & g_j(x) \geq 1 \end{cases} \quad (16)$$

对于任意  $\alpha_j > 0$ , 当  $g_j(x) < 1$  时,  $p_j(x, \alpha_j)$  的值趋于 0; 当  $g_j(x) > 1$  时,  $p_j(x, \alpha_j)$  的值趋于无穷大.惩罚因子  $\alpha_j$  是动态变化,令  $\alpha_{j,s}$  表示第  $s$  次迭代后的惩罚因子,则

$$\alpha_{j,s} = p_j(x_{s-1}, \alpha_{j,s-1}) \quad (17)$$

式中,  $x_{s-1}$  为第  $s-1$  次迭代后的流量.

新的阻抗函数定义为

$$\bar{w}_a(x) = w_a(x) + \sum_{j \in J} p_j(x, \alpha_j) \frac{\partial g_j(x)}{\partial x} \quad (18)$$

用惩罚函数  $p_j(x, \alpha_j)$  替代  $\lambda_j$ , 且路段流量变换为关于路径流量的函数,即

$$x_a(f) = \sum_{r \in I} \sum_{z \in J} \sum_{k \in K_{r,z}} f_{k,<r,z>} \delta_{a,k,<r,z>} \quad (19)$$

广义费用  $c_{k,<r,z>}(x, \lambda)$  变换为关于  $f$  和  $\alpha$  的函数:

$$c_{k,<r,z>}(f, \alpha) = \sum_{a \in A} (w_a(x_a(f)) + \sum_{j \in J} p_j(x_a(f), \alpha_j) \frac{\partial g_j(x_a(f))}{\partial x}) \delta_{a,k,<r,z>} \quad (20)$$

将式(20)与式(8)、式(9)以及式(4)~式(6)联立,则容量限制下的客流分配问题可转换为无约束下非线性互补问题:

$$(c_{k,<r,z>}(f, \alpha) - \mu_{r,z}) f_{k,<r,z>} = 0, \forall r \in I, z \in J, k \in K_{r,z} \quad (21)$$

$$c_{k,<r,z>}(f, \alpha) - \mu_{r,z} \geq 0, \forall r \in I, z \in J, k \in K_{r,z} \quad (22)$$

$$f_{k,<r,z>} \geq 0 \quad \forall r \in I, z \in J, k \in K_{r,z} \quad (23)$$

$$\left( \sum_{k \in K_{r,z}} f_{k,<r,z>} - q_{r,z} \right) \mu_{r,z} = 0, \forall r \in I, z \in J \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K_{r,z}} f_{k,<r,z>} - q_{r,z} \geq 0, \forall r \in I, z \in J \quad (25)$$

$$\mu_{r,z} \geq 0, \forall r \in I, z \in J \quad (26)$$

参考 Aashtiani 的线性方法<sup>[25]</sup>求解上述非线性互补问题,具体步骤如下:

步骤 1:初始化

以出入口节点和列车节点为起讫点,按各类客流向分别构建多个 OD 对  $\langle r, z \rangle$  及其客流量. 令  $K_{r,z}$  为空集,  $s=0, f=0, \epsilon=0.001, \lambda_0=0.1 \cdot \text{avg}(w_{0,a})a \in A$ .

步骤 2:分解和线性化

(1) 令  $s=s+1$

(2) 对于任意起点  $r$ :

(2.1) 根据式(17)计算  $\bar{w}_a(x_{s-1})$  并以最小值为指标确定最短路径  $k_{r,z}$ , 令  $\mu_{r,z}$  为该路径的广义费用, 见式(14);

(2.2) 对于任意讫点  $z$ , 令  $\alpha=\lambda_{s-1}$ :

(2.2.1) 当不满足  $\frac{\min_{k \in K_{r,z}} c_{k,<r,z>}(f, \alpha) - \mu_{r,z}}{\mu_{r,z}} \leq \epsilon$  时, 将最短路径  $k_{r,z}$  添加至  $K_{r,z}$ , 且设置  $f_{k_{r,z}}=0$ ;

(2.2.2) 对于  $k \in K_{r,z}$ , 加载当前流量  $\bar{f}_k=f_k$ ;

(2.2.3) Aashtiani 的线性方法<sup>[25]</sup>联立求解式(27)和式(28), 获得新的流量分布  $f_k$  有

$$(c_{k,<r,z>}(\bar{f}, \alpha) + \sum_{k' \in K_{r,z}} [(f_{k'} - \bar{f}_{k'}) \frac{\partial c_{k,<r,z>}(\bar{f}, \alpha)}{\partial f_{k'}}] - \mu_{r,z}) f_{k,<r,z>} = 0, \forall k \in K_{r,z} \quad (27)$$

$$c_{k,<r,z>}(\bar{f}, \alpha) + \sum_{k' \in K_{r,z}} [(f_{k'} - \bar{f}_{k'}) \frac{\partial c_{k,<r,z>}(\bar{f}, \alpha)}{\partial f_{k'}}] - \mu_{r,z} \geq 0, \forall k \in K_{r,z} \quad (28)$$

(2.2.4) 若 OD 对  $\langle r, z \rangle$  的所有路径均无法再分配多余流量, 则维持该客流分布不变, 并剔除 OD 对  $\langle r, z \rangle$  不参与后续计算.

(2.2.5) 当不满足

$$\frac{\max_{k \in K_{r,z}; \bar{f}_k > 0} c_{k,<r,z>}(f, \alpha) - \mu_{r,z}}{\max_{k \in K_{r,z}; \bar{f}_k > 0} c_{k,<r,z>}(f, \alpha)} \leq \epsilon \text{ 时, 执行步骤 2 的 (2.2.2);}$$

(2.2.6) 计算  $\epsilon_{r,z} =$

$$\frac{|\max_{k \in K_{r,z}; \bar{f}_k > 0} c_{k,<r,z>}(f, \alpha) - \mu_{r,z}|}{\mu_{r,z}};$$

步骤 3:更新流量和拉格朗日算子

$$x_s = x(f), \lambda_s = p(x_s, \lambda_{s-1}).$$

步骤 4:终止判断

(1) 如果不满足  $\sum_{r \in I} \sum_{z \in J} q_{r,z} \epsilon_{r,z} / \sum_{r \in I} \sum_{z \in J} q_{r,z} \leq \epsilon$

时, 执行步骤 2;

(2) 当  $\alpha_{j,0} = \lambda_0, \alpha_{j,s} = \lambda_{s-1}$ , 且满足下列收敛条件:

$$\begin{cases} g_j(x_s) \leq 1, \forall j \in J \\ (1 - g_j(x_s)) \alpha_{j,s} \leq 0.01 \alpha_{j,0}, \forall j \in J \end{cases}$$

则输出当前流量分布, 否则执行步骤 2.

文献[26]已证明上述动态函数法的收敛性, 本文不再赘述.

### 3.2 能力瓶颈识别指标

根据上述模型和方法, 输入的客流条件不同会产生不同的分配结果. 因此, 通过对各节点的受影响程度进行评估排序, 能为识别能力瓶颈提供参考依据.

(1) 对于已到达限制容量的节点, 均比未达到限制容量的节点的受影响程度高, 在当前客流条件下是能力瓶颈点. 附加阻抗  $\sum_{j \in J} p_j(x, \alpha_j) \frac{\partial g_j(x)}{\partial x}$  (来自式(18))用来评估该类节点间的受影响程度. 附加阻抗越高的节点越需要重点疏解/改造.

(2) 对于未达到限制容量的节点, 采用  $g_j(x)$  评估受影响程度. 当  $g_j(x)$  超过用户设定的阈值时, 则认为该节点为潜在能力瓶颈.

## 4 案例分析

### 4.1 案例及参数确定

以上海轨道交通陆家浜路站为例进行算例分析. 陆家浜路站是上海轨道交通 8、9 号线换乘站, 地下一层为共用站厅, 有 6 个出入口(图 2a). 站厅内南北两侧的楼梯通向 B2 层的 8 号线站台(图 2b), 东西两侧的楼梯通向 B3 层的 9 号线站台(图 2c). 8、9 号线换乘是通过 B2-B3 层的换乘夹层(图 2d)进行, 采用楼梯十字换乘形式.

根据陆家浜路站的客流在站事件链情况, 构建车站设施设备关联网, 结果如图 3 所示(节点标号见图 2). 图 3 中节点上方标识该节点的限制容量, 是通过《地铁设计规范》<sup>[1]</sup>计算得到.

根据陆家浜路站早高峰历史客流数据和 8、9 号线行车数据, 设置相关参数:

(1) 8 号线进站客流为 5 120 人  $\cdot$  h<sup>-1</sup>、出站客流为 5 600 人  $\cdot$  h<sup>-1</sup>, 9 号线进站客流为 2 400 人  $\cdot$  h<sup>-1</sup>、出站客流为 1 400 人  $\cdot$  h<sup>-1</sup>. 为简化计算, 6 个出入口均分进出站客流.

(2) 8 号线换 9 号线客流为 13 100 人  $\cdot$  h<sup>-1</sup>, 9 号线换 8 号线客流为 7 100 人  $\cdot$  h<sup>-1</sup>.

(3)8 号线编组车型为 6C, 开行频次为 20 对 · h<sup>-1</sup>. 至本站最大上车人数约为车辆定员的 20%.

(4)9 号线编组车型为 6A, 开行频次为 20 对 · h<sup>-1</sup>. 至本站最大上车人数约为车辆定员的 20%.

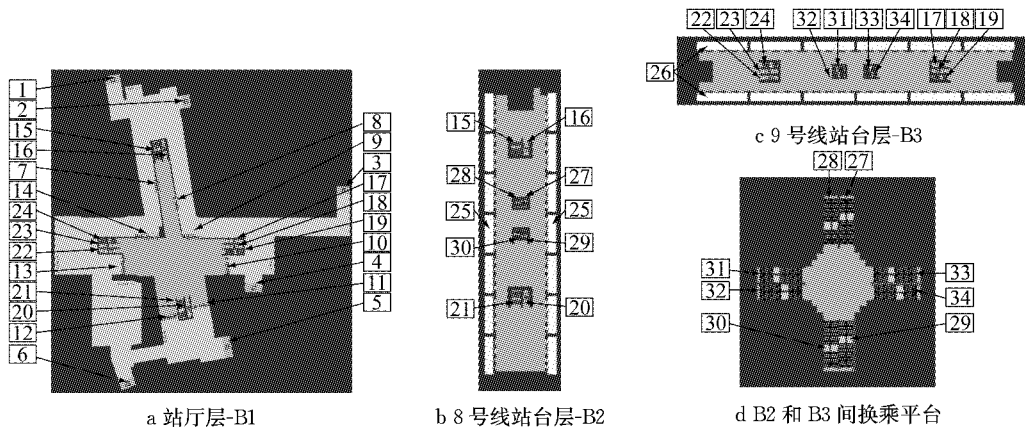


图 2 陆家浜路站示意图

Fig.2 Sketches of LJB Station

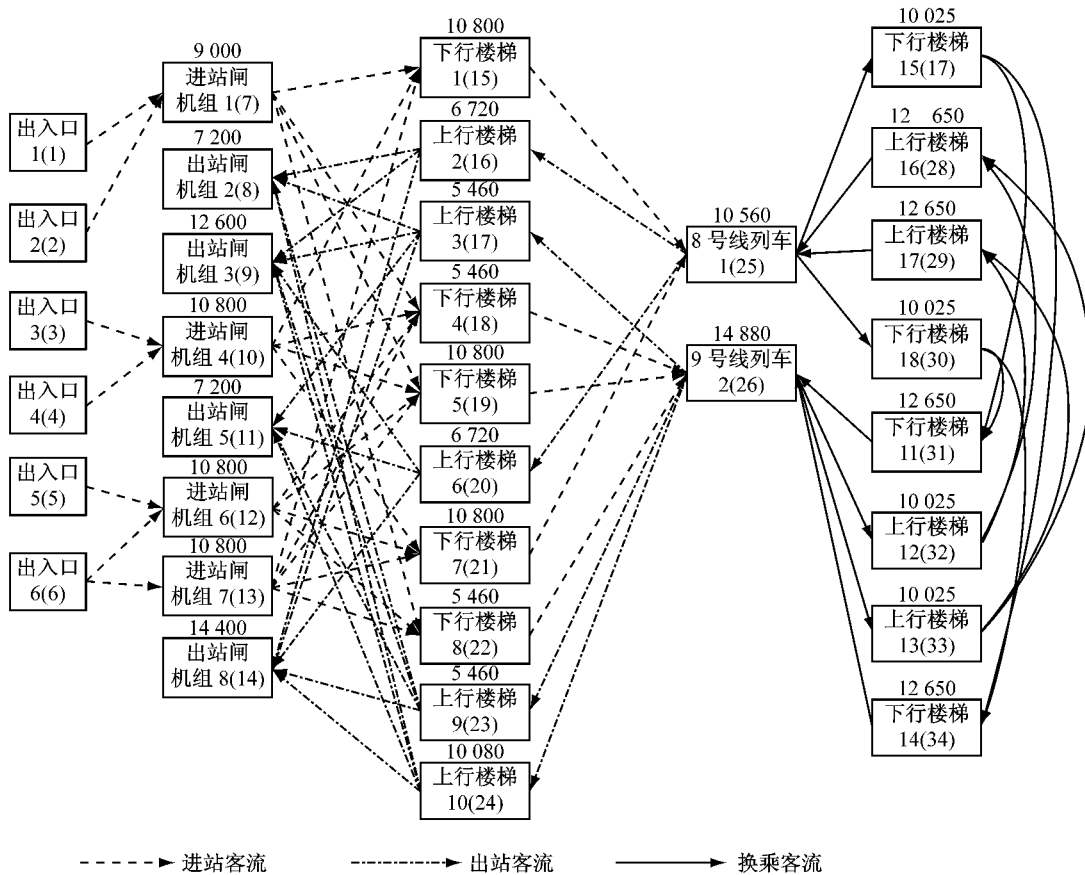


图 3 陆家浜路站的车站设施设备关联网(单位:人 · h<sup>-1</sup>)

Fig.3 The association network of facilities in LJB Station (Unit: P · h<sup>-1</sup>)

从 CAD 图纸中获取各条边的距离参数, 用矩阵的形式表示(如图 4 所示). 横向为起始节点, 纵向为终止节点.

### 4.2 结果与分析

上述模型算法通过 C# 编程实现, 并在 2.9 GHz i7CPU 和 8GB 内存的环境上计算. 客流分配结

果见表 2. 迭代收敛效果如图 5 所示.

由表 2 可知, 8 号线列车节点和 9 号线列车节点超过了节点限制容量, 因此是能力瓶颈位置. 其余节点均未超过限制容量, 统计受影响程度超过 0.5 的节点, 分别为节点 27(0.653)、节点 30(0.653)、节点 31(0.518)、节点 34(0.518).

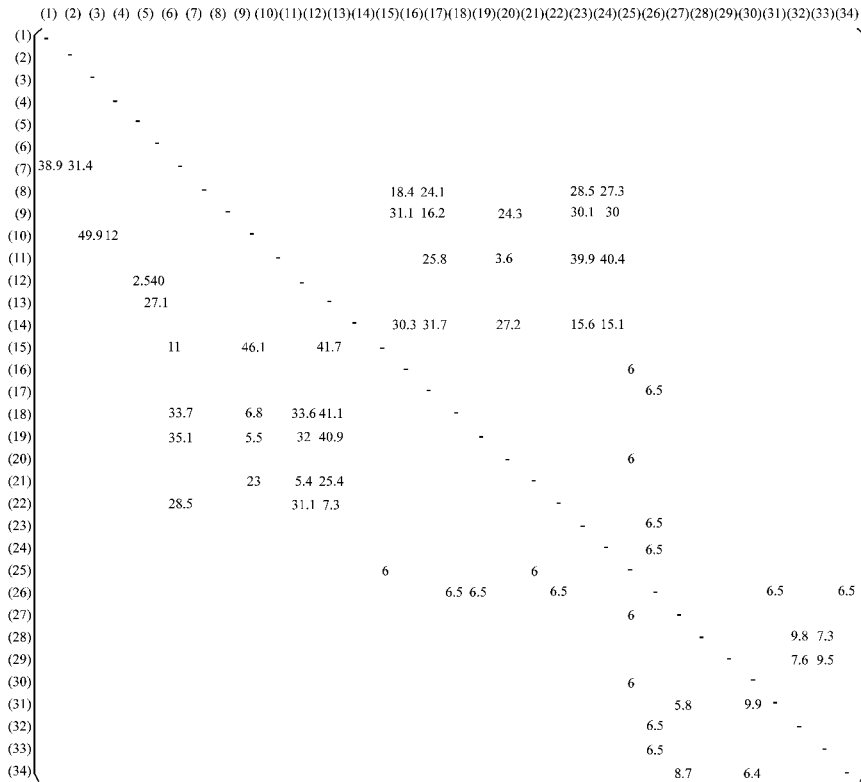


图 4 网络各边的距离矩阵(单位:m)

Fig.4 The distance matrix of association network of facilities

表 2 节点限制容量及分配结果表

Table 2 The limit capacity of nodes and passenger allocation results

节点	类型	限制容量/ (人·h <sup>-1</sup> )	分配 结果	附加 阻抗	节点	类型	限制容量/ (人·h <sup>-1</sup> )	分配 结果	附加 阻抗
7	闸机	9 000	2 507	0	21	楼梯	10 080	1 253	0
8	闸机	7 200	2 800	0	22	楼梯	5 460	1 253	0
9	闸机	12 600	368	0	23	楼梯	5 460	368	0
10	闸机	10 800	2 507	0	24	扶梯	10 080	664	0
11	闸机	7 200	2 800	0	25	列车	10 560	10 560 (溢出 1660)	1.571
12	闸机	10 800	1 253	0	26	列车	14 880	14 880 (溢出 620)	0.416
13	闸机	10 800	1 253	0	27	楼梯	10 025	6 550	0
14	闸机	14 400	664	0	28	楼梯	12 650	3 550	0
15	楼梯	10 080	2 507	0	29	楼梯	12 650	3 550	0
16	扶梯	6 720	2 800	0	30	楼梯	10 025	6 550	0
17	楼梯	5 460	368	0	31	楼梯	12 650	6 550	0
18	楼梯	5 460	895	0	32	楼梯	10 025	3 550	0
19	扶梯	10 080	1 612	0	33	楼梯	10 025	3 550	0
20	扶梯	6 720	2 800	0	34	楼梯	12 650	6 550	0

为了验证上述识别方法的合理性,采用车站客流微观仿真软件 StaPass 进行仿真校验. 由于仿真方法准确地模拟了乘客在站运动过程,因此通过仿真方法得到的客流分布密度可以辅助能力瓶颈的识别,并侧面验证模型的合理性. 仿真 1 h 后,车站客流分布密度结果通过色块形式展示,如图 6 所示. 以 F 级服务水平(密度为 3.2~4.2 人·m<sup>-2</sup>)为潜

在的能力瓶颈点,密度大于 4.2 人·m<sup>-2</sup>为能力瓶颈点,则图 6:①8、9 号线的车厢和候车区等处密度均明显超过 4.2 人·m<sup>-2</sup>,甚至达到 5 人·m<sup>-2</sup>;②节点 27、节点 30、节点 31、节点 34 等接近 4.2 人·m<sup>-2</sup>,其余节点均小于 3.2 人·m<sup>-2</sup>;③8 号线车厢和候车区密度明显高于 9 号线.

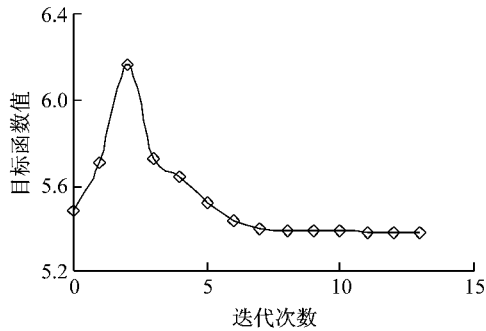


图 5 目标函数收敛情况

Fig. 5 The convergence of the objective function

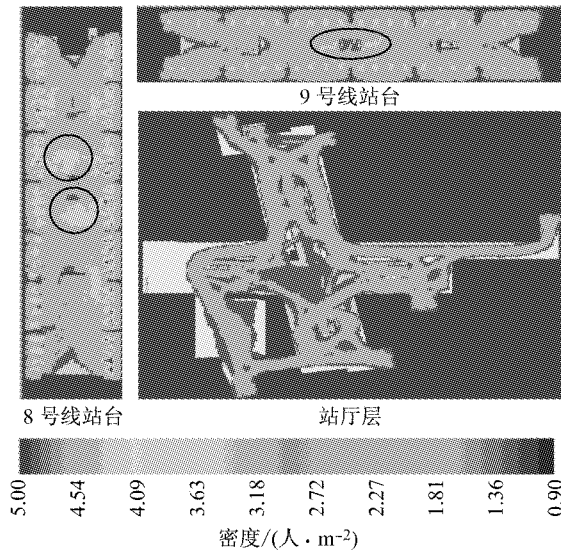


图 6 客流密度分布仿真云图

Fig.6 The density map exported from StaPass

在现实场景中,早高峰 8 号线多个车站限流,增加了 8 号线列车在陆家浜路站的限制容量。陆家浜站实行换乘限流,引导乘客进行站厅换乘,从时间上错开了同时乘车的流线。上述客运组织措施也从侧面证明了 8 号线列车、换乘楼扶梯是本站的能力瓶颈。

## 5 结论

从乘客在站服务事件链的分析切入,利用事件链的耦合关系构建车站设施设备关联网络。在乘客选择行为作用下,该关联网络具有级联失效和客流动态分布等特性。在此基础上,建立考虑乘客选择行为的客流分配模型,并引入动态惩罚函数求解节点容量限制下的客流分配问题。基于求解结果按节点受影响程度指标排序,形成能力瓶颈动态识别方法。通过上海地铁陆家浜路站的案例分析与 StaPass 软件仿真结果的对比,验证该方法不仅能够快速确定

能力瓶颈,还有助于分析不同客流环境下车站设施设备网络负载变化,进而指导车站运营管理组织工作。但是该方法未考虑单个设施设备的到达率和服务率的影响,在今后的研究中可以继续深化。

## 参考文献:

[ 1 ] 北京市规划委员会. 地铁设计规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.  
Beijing Municipal Commission of Urban Planning. The code for metro design[M]. Beijing:China Planning Press, 2014.

[ 2 ] 单征,宋瑞,李婷婷,等.城市轨道交通车站集散能力瓶颈识别方法研究[J].交通信息与安全,2014,32(1):117.  
SHAN Zheng, SONG Rui, LI Tingting, *et al.* Identification approach of bottleneck for gathering and distributing capacity in urban rail transit stations[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2014, 32(1):117.

[ 3 ] 汪瑞琪,张缨.城市轨道交通车站客流集散瓶颈识别及排序方法[J].交通信息与安全,2017,35(1):71.  
WANG Ruiqi, ZHANG Ying. Identification and ranking approaches of bottleneck for gathering and distributing capacity in stations of urban rail transit [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2017, 35(1):71.

[ 4 ] 夏荷香,刘尔辉.基于逆向搜索的轨道交通车站客流瓶颈筛选方法研究[J].交通运输研究,2015,1(2):36.  
XIA Hexiang, LIU Erhui. A screening method for passenger flow bottleneck in rail transit station based on reverse search [J]. Transport Research, 2015, 1(2):36.

[ 5 ] CRUZ F R B, SMITH J M G. Approximate analysis of M/G/c/c state-dependent queueing networks [J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(8): 2332.

[ 6 ] CRUZ F R B, Van WOENSEL T, SMITH J M G, *et al.* On the system optimum of traffic assignment in M/G/c/c state-dependent queueing networks [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201(1): 183.

[ 7 ] 陈绍宽,刘爽,肖雄,等.基于M/G/c/c模型的地铁车站楼梯通道疏散能力瓶颈分析[J].铁道学报,2012,34(1):7.  
CHEN Shaokuan, LIU Shuang, XIAO Xiong, *et al.* M/G/c/c-based model of passenger evacuation capacity of stairs and corridors in metro stations[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(1):7.

[ 8 ] XU Xinyue, LIU Jun, LI Haiying. An analytical method to calculate station evacuation capacity [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(10):404.

[ 9 ] 董晓净.基于网络排队模型与控制体模型的地铁车站乘客应急疏散能力瓶颈识别方法[D].北京:北京交通大学,2012.  
DONG Xiaojing. Network queueing and control volume-based evaluation model for emergency evacuation in metro stations [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[ 10 ] 单征. 地铁车站集散能力瓶颈识别方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2015  
SHAN Zheng. Research on the bottleneck identification method for gathering and distributing capacity of subway stations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[ 11 ] FATEH K. A hybrid Petri nets-based simulation model for



- evaluating the design of railway transit stations [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2007, 15 (8):935.
- [12] 胡清梅. 轨道交通车站客流承载能力的评估与仿真研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.  
HU Qingmei. Passenger carrying capacity evaluation and simulation of rail transit station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011
- [13] 薛霏,方卫宁,郭北苑. 基于系统动力学的轨道交通车站客流演变算法[J]. *铁道学报*, 2014, 36(2):1.  
XUE Fei, FANG Weining, GUO Beiyuan. Rail transit station passenger flow evolution algorithm based on system dynamics [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(2):1.
- [14] BURSTEDDE C, KLAUCK K, SCHADSCHNEIDER A, *et al.* Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2001, 295(3-4): 507.
- [15] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487.
- [16] 付婷. 城市轨道交通车站集散能力瓶颈识别[D]. 北京:北京交通大学, 2014  
FU Ting. Bottlenecks identification of urban rail transit station collection and distribution capacity [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [17] HADDAD H, KHATIB M, LACROIX S, *et al.* Reactive navigation in outdoor environments using potential fields [C]// *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Leuven, IEEE, 1998; 1232-1237.
- [18] 任俊学. 综合客运枢纽内集散网络瓶颈识别方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010.  
REN Junxue. Study on the bottlenecks identification methods of distributed network in comprehensive passenger hub[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [19] HELBING D, Mukerji P. Crowd disasters as systemic failures: analysis of the Love Parade disaster[J]. *EPJ Data Science*, 2012, 1(1): 7.
- [20] 高鹏,徐瑞华. 城市轨道交通车站客流仿真中的事件驱动模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(11):2121.  
GAO Peng, XU Ruihua. Event-driven simulation model for passenger flow in urban mass transit station [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2010, 30(11):2121.
- [21] 谢丰,程苏琦,陈冬青,等. 基于级联失效的复杂网络抗毁性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, 51(10):1252.  
XIE Feng, CHENG Suqi, CHEN Dongqing, *et al.* Cascade based attack vulnerability in complex networks[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2011, 51(10): 1252.
- [22] 郑建风. 复杂网络建模与典型网络上的动力学过程研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010.  
ZHENG Jianfeng. Studies on complex network modeling and dynamical processes in typical networks[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010
- [23] WARDROP J G. Wardrop J G. Some theoretical aspects of road traffic research [C]// *Inst Civil Engineers Proc. London: Institution of Civil Engineers*, 1952: 325-378.
- [24] 程琳,王炜,王欣,等. 一种求解容量约束下交通网络流模型的新梯度方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(3):345.  
CHEN Lin, WANG Wei, WANG Xin *et al.* New gradient method for the capacitated network flow model[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2006, 34(3):345.
- [25] AASHTIANI H Z. The multi-modal traffic assignment problem [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1979.
- [26] SHAHPAR A H, AASHTIANI H Z, BABAZADEH A. Dynamic penalty function method for the side constrained traffic assignment problem [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2008, 206(1): 332.