

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2019.03.014

基于网络瓶颈控制的轨道交通 车站客流疏导研究

王 琨, 孙立山, 罗 薇, 王顺超, 张亚军

(北京市交通工程重点实验室(北京工业大学), 北京 100124)

摘 要: 轨道交通客流在特定时空区间的强聚集效应导致车站内部设施的服务能力与客流量不匹配, 极易造成乘客拥堵、滞留等问题。通过对轨道交通车站客流流线大范围调研, 确定服务设施实际通行能力, 识别车站瓶颈区域。进而利用多点联动的瓶颈控制方法, 构建网络瓶颈客流疏导模型, 协调流线网络结构中设施通行能力的匹配度, 计算瓶颈点上下游客流调节量。以北京东单地铁换乘站为例进行流线瓶颈优化, 制定不同客流强度下瓶颈优化方案, 验证模型的有效性和实用性。模型可协助车站管理人员明确瓶颈控制区域的范围, 并制定详细的限流泄流乘客量分配, 为高密度客流组织提供理论依据与数据支撑。

关键词: 城市轨道交通; 车站设施; 客流流线; 瓶颈控制; 量化分析

中图分类号: U231.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-6073(2019)03-0084-07

Passenger Flow Distribution in Railway Stations Based on Network Bottleneck Control Model

WANG Kun, SUN Lishan, LUO Wei, WANG Shunchao, ZHANG Yajun

(Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering (Beijing University of Technology), Beijing 100124)

Abstract: The service capacity of subway station facilities does not accommodate huge passenger demands due to the strong cluster effect of subway passenger flow in a particular time and space. System service quality declines rapidly, thereby leading to the congestion and detention of passengers in the station during peak periods. In this paper, large-scale investigation of subway station streamline and facilities are carried out and the actual capacity of service facilities are measured. The bottleneck areas of the rail transit station are then classified by passenger streamline. Thus, a network bottleneck passenger flow distribution model is built using multipoint interlink gating control method. The regulation of passenger volume in the bottleneck area is then calculated by analyzing the matching degree of facility capacity in the streamline network structure. A case study of Dongdan station in Beijing is considered where the model is implemented to control streamline bottleneck. In addition, the bottleneck optimization scheme is calculated for different passenger flow intensities. The validity and practicality of model are verified and thus provide the theoretical basis and data support for high-density passenger flow organization. The model can assist station managers to determine the bottleneck control area and to develop detailed passenger flow assignment.

Keywords: urban rail transit; station facility; passenger flow streamline; bottleneck area control; quantitative analysis

收稿日期: 2018-04-15 修回日期: 2018-05-16

第一作者: 王琨, 女, 硕士研究生, 从事轨道交通规划、设计理论与技术的研究, wangkun1292@163.com

导师简介: 孙立山, 男, 教授, 主要研究方向: 公共交通规划、客运枢纽规划设计、道路交通安全等。

基金项目: 北京市科技计划项目资助(D161100005616001); 北京市自然科学基金重点项目资助(4181002)

随着北京市轨道交通网络的扩张, 车站内容流量急剧增长。2017 年北京轨道交通日均客流量达到 1 035.6 万人次^[1], 车站在客流高峰时期的集散能力已经趋于饱和状态, 造成站内严重的乘客拥堵和滞留问题, 极大地影响乘客出行的舒适度^[2]。激增的客流暴露了相关设施通行能力的不足, 如何在常态大客流下保证乘客顺畅乘车成为社会日益关注的焦点问题。

在运营情况下对设施大范围改造十分困难, 因此, 根据客流状态对瓶颈区疏导更具有可实施性。地铁运营公司在瓶颈区常采用限流和人员引导等方式, 但由于缺乏科学理论基础, 不能有效进行管理。在不同客流强度下对瓶颈区的疏导量进行计算, 便于管理人员适量适度进行管理。

合理顺畅的流线是交通枢纽功能实现的先决条件^[3]。在流线设计方面, Kitti Subprasom 等^[4]通过构建费用最优模型, 从换乘设施运行和乘客便捷两个角度对车站流线组织进行优化, 计算不同期望下乘客最优占有空间。崔华伟等^[5]通过分析铁路综合交通枢纽的流线种类和特点, 归纳了轨道交通枢纽流线布置规律。张素芳^[6]利用 Anylogic 仿真软件, 以排队长度和花费时间指标对北京南站旅客流线进行仿真及评价。客流组织研究随着行人流理论的深入逐渐丰富, 在枢纽瓶颈研究方面, Seyfried 等^[7]研究分析相关交通瓶颈程序和规范的差

异, 得出行人流和瓶颈的宽度之间存在线性增加的关系。付婷^[8]在研究车站客流分布过程时, 将客流分布瓶颈分为静态瓶颈和动态瓶颈, 确定了旅客疏散系统的主要瓶颈。胡清梅等^[9]在研究车站出口瓶颈影响因素的基础上, 运用障碍物作用力的静态网络处理以及局部性原理, 优化了社会力模型。陈绍宽等^[10]结合地铁站和乘客楼梯疏散能力瓶颈渠道, 分析基于 C/M/C/C 排队模型的空间结构特点, 验证了该模型的有效性和实用性。

综合而言, 现有研究成果表明流线设计对枢纽效率影响显著, 瓶颈设施是影响轨道交通车站效率的主要因素; 但已有瓶颈研究多集中于识别和本身布局优化, 对于整体流线缺乏深入分析。因此, 针对车站内容流瓶颈区域进行实地调查及定量分析, 构建乘客流线网络结构, 将瓶颈区域作为节点, 量化不同客流强度下瓶颈点上下游客流调节量, 提高流线的设施服务能力匹配度, 有效缓解拥堵现象。

1 流线典型瓶颈区域现状调研

流线是交通枢纽内由于各类人员、车辆和物品的集散活动所产生的流动过程和流动路线。流线分析是对交通枢纽进行流线设计、组织及枢纽功能分区、空间布局的基础^[11]。如图 1 所示乘客在地铁站内活动的主要流线有进站流线、出站流线和换乘流线, 换乘流线类型较多, 现以通道换乘为例进行分析。

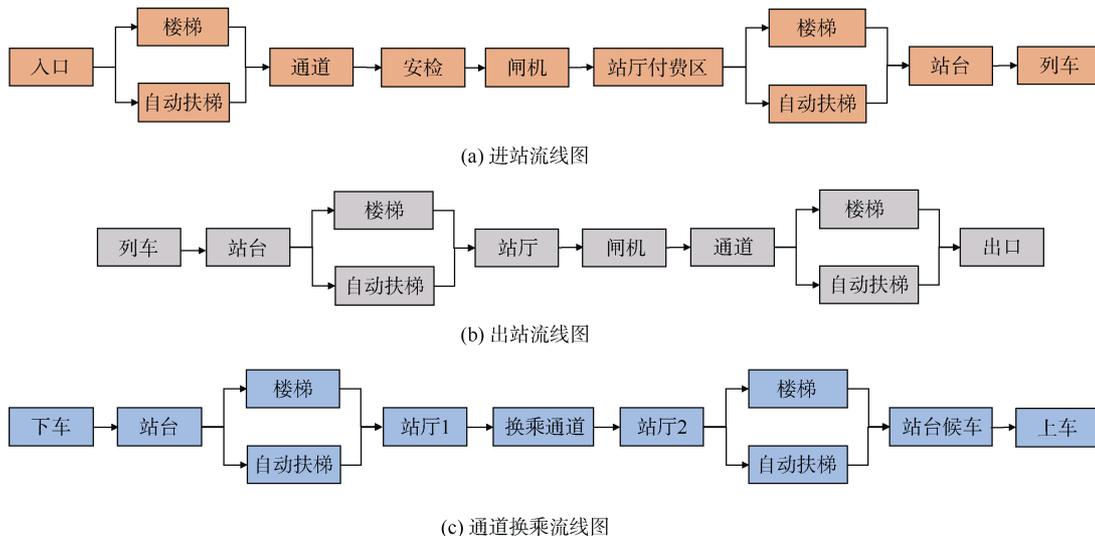


图 1 地铁车站乘客流线

Fig. 1 Passenger streamline of subway station

1.1 流线划分

进站流线即进站乘客的行走过程及路线, 进站流线的特点是乘客在不同的时间进站, 在进入安检前分

散和缓慢, 而进入闸机后人流相对集中。

出站流线即乘客下车后直接出站的行走过程及路线, 出站流线的特点是站台乘客周期性到达, 密度大

且行进速度快。

换乘流线即乘客下车后转线换乘到达车站另一站台并上车的行走过程及路线，换乘流线除具有出站流线的特点外，在换乘通道内易形成乘客拥堵。

1.2 瓶颈区域识别

地铁车站的疏散能力与车站设施配置、流线组织等密切相关，车站内部设施的客流通过能力受到设施本身的物理特性以及客流的运动特性影响，相邻设施通行能力匹配度低导致客流拥堵形成瓶颈。对北京市地铁站设施服务区域乘客的平均速度进行随机抽样统计分布如图 2 所示，在安检、自动扶梯、楼梯和通道处乘客平均速度分别降低 62.89%、58.57%、55.45% 和 22.09%，确定为本研究的瓶颈区域。下面根据车站乘客进站、出站和换乘流线的设置，对以上瓶颈区域的实际通行能力进行大范围调查与分析。

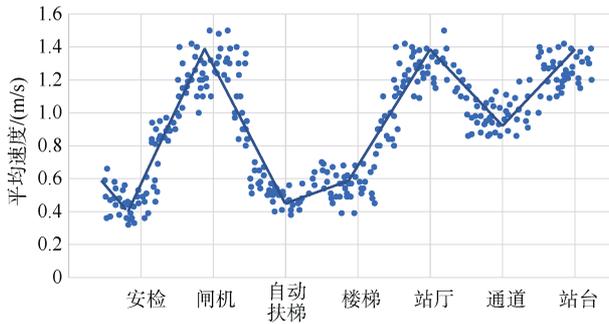


图 2 乘客平均速度分布
Fig. 2 Average velocity distribution of passengers in subway station

1.2.1 安检

北京地铁安检设施主要分为两大类：一类为车站只对乘客携带的行李进行 X 光机检查；另一类对乘客和携带的行李同时进行检查，设立 X 光机及安检门，有些站点增设人工检查对乘客进行手检。由于安检流程上的区别，其相应安检效率也存在一定的差异，统计北京市 45 座地铁站调查数据见表 1。

表 1 北京地铁站安检形式及效率

Tab. 1 Efficiency of security check in Beijing subway station

安检通道形式	安检效率 平均值/(s/人)	站点	站点数
包裹检查 乘客安检门 人工检查	2.3	王府井、建国门、天安门东、东单等	22
包裹检查 人工检查	1.8	安河桥北、磁器口、东单、芍药居等	10
包裹检查	1.2	十里河、车公庄西、劲松、永泰庄等	13

根据《北京市城市轨道交通运营管理办法》^[12]，地铁安检区域设置情况如图 3 所示。引导员引导乘客进入安检通道，值机员利用通道式安检机对物品进行检查，手检员针对可疑物品进行复检，手检区常位于疏散区前，乘客在通过手检区后直接离开安检区域。

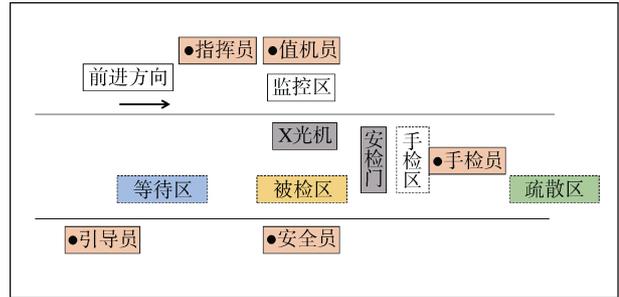


图 3 安检区域设置情况
Fig. 3 Facilities setting in security check area

对客流高峰期乘客安检时间进行随机抽样调查，安检区域乘客通过时间统计如图 4 所示。结果显示乘客的安检时间差异较大，其中通过整个安检区域最快仅需 14 s，而耗时最长则需 70 s，平均乘客通过安检区域的时间为 27.3 s。3 个区域中乘客的平均耗时最长的是等待区。在客流高峰期，安检区域已经成为车站效率的瓶颈点。

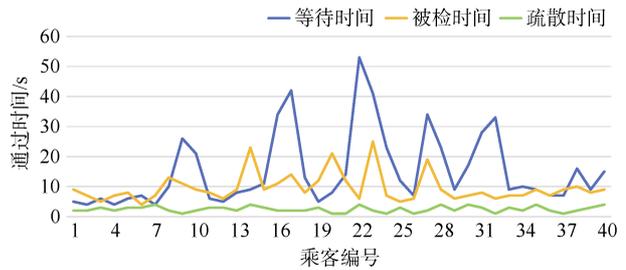


图 4 安检区域乘客通过时间统计
Fig. 4 Passenger passing time through the security check area

1.2.2 自动扶梯和楼梯

客流量在短时间迅速增加导致位于换乘和出站流线的自动扶梯成为瓶颈。自动扶梯的通过能力理论上为自动扶梯的每一级台阶都站立两个乘客时的承载人数。而实际运营中，乘客的到达是非连续的，部分乘客希望获得更大的自由空间，会等待自动扶梯运行一段距离后进入，实际通行能力小于理论值。北京市地铁站自动扶梯宽度为 1 m，运行速度为 0.5 m/s，实地调查 34 部自动扶梯在客流高峰期的行人到达与实际通过能力见表 2。表中自动扶梯的通过能力为 80~

88 人/(min/m)，换乘流线的上下行扶梯及出站流线上行扶梯为瓶颈。

表 2 地铁站扶梯行人到达及通过能力

Tab. 2 Pedestrian arrival and carrying capacity in elevator area

扶梯方向	所在流线	高峰行人到达/(人/(min/m))	扶梯通过能力/(人/(min/m))
上行	出站	126	80
	换乘	154	88
下行	进站	70	80
	换乘	114	84

北京地铁站中楼梯经常与扶梯并行设置，在高峰期引导乘客使用楼梯可以缓解自动扶梯处的拥堵^[13]。对于进站楼梯，虽然高峰期客流量大，但单位时间客流量均衡，不会造成拥堵现象；出站楼梯由于高度差大，行人以选取自动扶梯为主，楼梯处行人极少；换乘过程中由于高差小，楼梯使用率高，乘客到达具有周期性，易出现拥堵。对车站无同向自动扶梯的楼梯区域进行调查，结果见表 3。在客流高峰期，进站和出站流线的楼梯通过能力基本满足行人到达情况，排队时间不超过 10 s。在换乘流线中楼梯区域易形成瓶颈。

表 3 地铁站楼梯区域行人到达及通过情况

Tab. 3 Pedestrian arrivals and carrying capacity in staircase area

楼梯方向	所在流线	高峰行人到达/(人/(min/m))	楼梯通过能力/(人/(min/m))
上行	出站	53	58
	换乘	81	58
下行	进站	70	62
	换乘	82	64

1.2.3 通道

通道分为出入口通道和换乘通道，换乘通道客流密度高，拥堵区域出现在站厅或站台与通道的衔接处^[14]。通过调查得到换乘通道处行人到达与通道口实际通行能力见表 4。衔接处宽度差导致通道实际通行能力下降，换乘流线中通道为瓶颈，实际通行能力为 53~80 人/(min/m)，不同站点差异较大。

通过对瓶颈区域的调研发现，进站流线的安检区、出站流线的自动扶梯处及换乘流线的楼梯、自动扶梯和通道处为主要瓶颈区域，在流线其他设施通行能力允许的情况下，可通过对瓶颈区域进行疏导，限制客流进入瓶颈区并加快瓶颈区客流流出，提高车站效率。

表 4 地铁站换乘通道区域行人到达及通过情况

Tab. 4 Pedestrian arrivals and carrying capacity in corridor area

站点名称	通道宽度/m	衔接处宽度差/m	行人到达/(人/(min/m))	通过能力/(人/(min/m))
国贸	2.5	14.5	68	53
十里河	6	11	95	73
东单	5	10	88	80
东四	7.5	9.5	57	80
呼家楼	5	9	82	76

2 流线网络瓶颈客流疏导模型

在对北京市地铁流线的瓶颈区域分析基础上，确定了各类流线的典型瓶颈位置。瓶颈形成的根本原因是客流到达量大于设施通行能力，因此，最有效的瓶颈消散方法是通过合理协调设施间通行能力，限制设施上游输入和增加下游输出。为简化流线，将车站内设施作为节点表示。以车站设施为节点构成乘客流线网络，借鉴道路交通的多点联动瓶颈控制方法^[15]，可以实现瓶颈调节阈值的定量计算。多点联动瓶颈控制方法的核心思想是通过搜索排队溢出路段，将瓶颈的上游区域作为控制对象，以特定时间段内消散路段瓶颈为目标，计算车辆总调节量，利用信号控制方案优化节点拥堵，在车站流线网络结构中，可以借鉴该方法对流线瓶颈进行调节量分配。

2.1 确定瓶颈控制区域

当上游的某一节点对瓶颈节点的影响程度大于特定阈值时，该节点被定义为瓶颈节点的“限流”节点。同时，当瓶颈节点疏散的行人流对下游某一节点产生的影响度大于特定阈值时，将此节点设置为该瓶颈节点的“泄流”节点。

在乘客流线节点网络中，所有路径由 N 表示，以有向图表示乘客流线网络结构中所有行人流的集合 L ，相邻节点 i 和 j 的有向连接边用 $\langle n_i, n_j \rangle$ 表示。

$$L = \{l_{i,j} | l_{i,j} = \langle n_i, n_j \rangle, i, j = 1, 2, \dots, m\}$$

对于某一节点 j 而言，它的行人流负荷直接来源于上游若干节点 m 的行人流输出，其中一个节点 i 对 j 的流量负荷度影响率可表示为

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} \frac{q_{i,j}}{\sum_{h \in l_m^j} q_{h,j}}, & \langle n_i, n_j \rangle \in L \\ 0, & \langle n_i, n_j \rangle \notin L \end{cases}$$

式中： $q_{i,j}$ 为行人流由 i 进入 j 的流率，p/min； $q_{h,j}$ 为行人流由 h 进入 j 的流率，p/min； $\alpha_{i,j}$ 为节点 i 行人流对 j 的影响度； L_m^j 为 j 的上游节点所有客流输出的集合。

当上游节点流率减少 q_u 时，下游瓶颈节点流量减少 $\alpha_u q_u$ ；同理，当瓶颈节点作为上游节点流率增加 q_d 时，下游节点流入量增加 $\alpha_d q_d$ 。瓶颈控制区域由限流节点和泄流节点构成，对于某瓶颈节点而言，若其上游节点影响率大于阈值 $\alpha_{u, \max}$ 时，可作为瓶颈节点的“限流”节点；若其下游节点影响率大于阈值 $\alpha_{d, \max}$ 时，可作为瓶颈节点的“泄流”节点。瓶颈控制区域划分还应考虑限流泄流节点的可利用通行能力，最终综合确定瓶颈控制区域范围。

2.2 确定控制区调节量

2.2.1 总调节率确定

瓶颈区域客流疏散的目标是在理想时间内将瓶颈节点的排队人数消散至合理值，总调节量 ΔS 主要由瓶颈节点上下游流率差 ΔS_d 和初始排队消散率 ΔS_d 组成，即

$$\Delta S = \Delta S_d + \Delta S_a$$

瓶颈节点上下游流率差计算公式如下：

$$\Delta S_d = \sum_{z \in L_m^m} q_{z,m} - \sum_{u \in L_{out}^m} q_{m,u}$$

式中： ΔS_d 为瓶颈节点上游流入与下游流出率差值，人/min； m 为瓶颈节点； $q_{z,m}$ 为上游节点 z 流向瓶颈节点 m 的流率，p/min； $q_{m,u}$ 为瓶颈节点 m 流向下游节点 u 的流率，p/min； L_m^m 为瓶颈节点 m 的上游流入节点集合； L_{out}^m 为瓶颈节点 m 的下游流出节点集合。

初始排队消散率受理想消散时间影响，计算公式如下：

$$\Delta S_a = \frac{n(N_{m,\max} - N_{m,\text{idea}})}{T}$$

式中： $N_{m,\max}$ 为瓶颈节点初始排队人数； $N_{m,\text{idea}}$ 为瓶颈控制后理想排队人数； n 为瓶颈节点排队列数； T 为瓶颈控制的理想消散时间。

在实际中客流量具有波动性，瓶颈控制时可能出现节点上游输入小于下游输出的情况，此时设定 ΔS_d 等于 0，总调节量公式为

$$\Delta S = \Delta S_a + \max\{\Delta S_d, 0\}$$

2.2.2 上下游调节率分配

将总调节流率进行合理分配，均衡瓶颈控制对上下游节点的影响。由于上游流入率过量为瓶颈生成的主要原因，当瓶颈节点流入率小于流出时，界定最小

调节比例为 1 : 1，调节量计算公式为

$$\Delta S_{\text{down}} = \Delta S \cdot \min \left\{ \frac{1}{2}, \frac{\sum_{\omega \in L_{out}^m} q_{m,\omega}}{\sum_{z \in L_{in}^m} q_{z,m} + \sum_{u \in L_{out}^m} q_{m,u}} \right\}$$

$$\Delta S_{\text{up}} = \Delta S - \Delta S_{\text{down}}$$

式中： ΔS_{up} 为上游流入率调节量，p/min； ΔS_{down} 为下游流出率调节量，p/min。

3 实例研究

以东单地铁换乘站为例，利用网络瓶颈客流疏导模型对进出站和换乘流线的瓶颈节点进行控制，计算出瓶颈节点上下游的限流和泄流调节量。为简化研究对象，将车站设施和区域抽象为节点构成流线网络。东单地铁站站型结构与换乘流线如图 5 所示。



图 5 东单地铁站站型结构与换乘流线
Fig. 5 Structure and transfer streamline of Dongdan station

3.1 参数取值

根据《地铁设计规范》^[16]GB50157—2013 中对车站设施通行能力的要求及北京市地铁客流高峰期实际客流量，确定在进站和出站客流量 6 000、9 000、10 000 人/h，换乘客流量 4 000、6 000、8 000 人/h 进行客流疏导流量调节，模型暂未考虑客流冲突对通道和站厅的影响。对高峰期(2018 年 3 月 26 日—28 日)东单站设施实际通行能力和通行时间进行抽样调查，结合北京地铁瓶颈区现状调研结果，设置流线网络结构参数。

根据设施的物理参数和乘客运动特性，模型中进站客流服从泊松分布，由于轨道交通列车到发规律，换乘客流和出站客流具有周期性，以东单地铁站为例，早高峰列车到发周期 135 s 批量到达，理想消散时间为 2 min。参数设置情况见表 5。

3.2 瓶颈优化步骤

瓶颈优化步骤可分为 6 步：①确定流线网络瓶颈节点，根据相邻节点的影响率及可利用通行能力划分

瓶颈控制区域；②以瓶颈节点上下游行人流入率和流出率计算未调控前流率差值；③利用理想消散时间和理想消散排队人数确定初始排队消散率；④计算控制区总调节流量；⑤基于瓶颈节点上下游流率进行瓶颈控制区调节量分配；⑥根据流量负荷度影响率确定各限流泄流节点的对应调节量，优化瓶颈控制区域关键节点客流组织。

3.3 调节方案及分析

基于网络瓶颈疏导模型，计算得到不同流量下瓶颈控制区域范围及节点上下游客流调节方案，见图 6

和表 6，与未采取调控措施相比，效率提高 6.7%~11.5%。其中值得注意的是，在流量为 6 000 人/h 时，5 号线进站流线的楼梯 6 产生拥堵，成为瓶颈，当流量达到 10 000 人/h 时，拥堵已经蔓延至安检 4 和楼梯 6 两处节点，说明在流量达到 10 000 人/h 时，5 号线进站流线已达到极限承载能力，在实际管控中可以采取限制乘客进入车站的方式保证车站安全运行。当达到 8 000 人/h 流量时，换乘流线中也出现瓶颈蔓延现象，在该客流强度下车站应提前做好安全保障措施，如适当延长乘客行走距离缓解周期性客流短时间增加。

表 5 东单地铁站网络瓶颈客流疏导模型参数设置

Tab. 5 Model parameter setting of Dongdan station

流线类型	到达规律	瓶颈点排队长度/人	影响率临界值	可利用通行能力/(人/h)	理想消散时间/min	理想排队长度/人
进站流线	泊松分布	30	0.5	600	10	10
出站流线	批量到达	30	0.5	600	2	10
换乘流线	批量到达	30	0.5	600	2	15

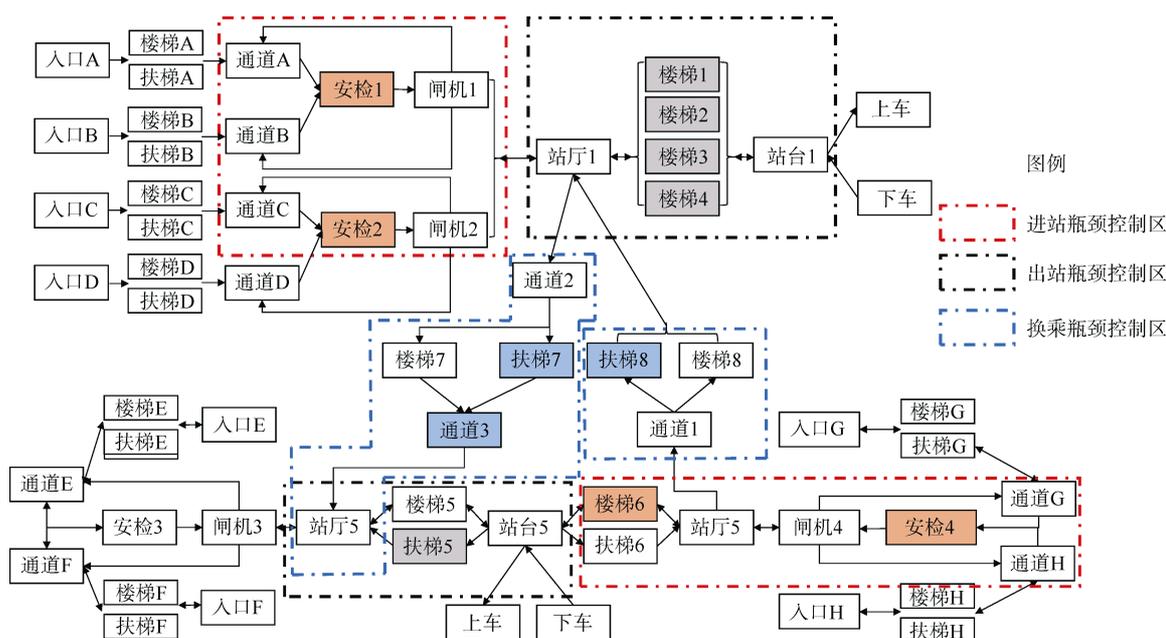


图 6 流线网络瓶颈位置

Fig. 6 Streamline network bottleneck position of Dongdan station

对于车站非付费区内的瓶颈控制区域，可采取站外限流或单进单出的方式控制进站流量，缓解站内运营设施的压力。同时，对于安检设备可以采用双侧通行的布置方式提高安检效率。为加快安检区域乘客服务速度也可增设安检服务台或将客流疏散到不同的安检口均衡安检人数。此外，可以通过及时调整闸机进出站方向比例确保快速疏散客流。

对于车站付费区内的瓶颈控制区域，可在通道设

施入口突变处设置为漏斗形渐变，提高行人通过瓶颈处的流畅性；对于自动扶梯和楼梯，可以在自动扶梯前设置迂回护栏，适当延长乘客行走距离，有效缓解周期性客流产生的拥堵，当自动扶梯前空间有限时可加设 1~2 m 的前置护栏或安排工作人员引导使用楼梯疏散客流；在站厅可设置警戒带、导流栏杆、导向牌和隔离柱等，有效分离进、出站客流和换乘客流。

表6 流线网络瓶颈节点流量调节方案

Tab. 6 Passenger flow adjustment scheme of streamline network bottleneck

流线类型	瓶颈点	调节量/(人/h)	控制方案			效率提高百分率/%
			6 000 人/h	9 000 人/h	10 000 人/h	
进站 流线	安检 1	上游限流	--	309	530	8.1
		下游泄流	--	255	382	
	楼梯 6	上游限流	341	533	--	11.5
		下游泄流	76	103	--	
	安检 4 和楼梯 6		10 000 人/h 流量下, 安检 4 上游限流 430 人/h, 下游泄流 167 人/h; 楼梯 6 上游限流 285 人/h, 下游泄流 209 人			6.8
出站 流线	楼梯 1	上游限流	173	504	640	6.2
		下游泄流	160	434	539	
	自动扶梯 5	上游限流	175	369	555	10.2
		下游泄流	161	332	487	
			4 000 人/h	6 000 人/h	8 000 人/h	效率提高百分率/%
换乘 流线	自动扶梯 8	上游限流	216	252	374	8.9
		下游泄流	178	208	309	
	自动扶梯 7	上游限流	247	303	--	9.6
		下游泄流	156	191	--	
	扶梯 7 和通道 3		8 000 人/h 流量下, 扶梯 7 上游限流 245 人/h, 下游泄流 137 人/h; 通道 3 上游限流 199 人/h, 下游泄流 117 人/h			6.7

4 结论

采用数学模型构建的方法, 以高密度客流为研究对象, 得到不同客流强度下瓶颈节点上下游客流调节方案。结论如下:

- 1) 进站流线的安检区、出站流线的自动扶梯处及换乘流线的楼梯、自动扶梯和通道处为主要瓶颈区域。
- 2) 利用多点联动的瓶颈控制方法确定瓶颈控制区域, 分配控制区客流调节量, 构建网络瓶颈客流疏导模型。
- 3) 计算东单站瓶颈控制区域, 制订瓶颈上下游客流调节量方案, 在高密度客流(10 000 人/h)条件下, 可能发生多个瓶颈拥堵蔓延的情况, 此时疏导量发生激增。
- 4) 基于流线网络客流疏导模型可为地铁车站设计和高峰期客流疏导提供一种有效的定量分析手段, 为轨道交通管理者提供数字化管控依据。

参考文献

[1] 北京交通规划研究中心. 2017 年北京市交通发展年度报告[R]. 北京交通规划研究中心, 2018.
Beijing Transportation Planning Research Center. Beijing annual report on transportation development[R]. Beijing Transportation Planning Research Center, 2018.

[2] 陈波. 地铁车站大客流组织措施[J]. 都市轨道交通, 2015, 28(3): 20-23.
CHEN Bo. Organizational measures for large passenger

flow in subway station[J]. Urban rapid rail transit, 2015, 28(3): 20-23.

[3] 孙宝凤, 高晶鑫, 贾洪飞. 基于流线分析的客运枢纽设施布置改进方法[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(12): 1637-1642.
SUN Baofeng, GAO Jingxin, JIA Hongfei. Improved facility layout planning for passenger terminal based on streamline analysis[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(12): 1637-1642.

[4] SUBPRASOM K, SENEVIRATNE P N. Cost-based space estimation in passenger terminal[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(2): 191-197.

[5] 崔华伟, 贾俊芳. 铁路客运综合交通枢纽流线特点及组织研究[J]. 铁道运输与经济, 2007, 29(5): 26-29.
CUI Huawei, JIA Junfang. Research on streamline characteristics and organization of railway passenger transport hub[J]. Railway transport and economy, 2007, 29(5): 26-29.

[6] 张素芳. 大型客运站旅客流线优化模型与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
ZHANG Sufang. Research on model and method for passenger flow optimization in a large Integrated traffic terminal[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

[7] SEYFRIED A, PASSON O, STEFFEN B, et al. New insights into pedestrian flow through bottlenecks[J]. Transportation science, 2009, 43(3): 395-406.

(下转第 101 页)