

城轨站人流线网络构建及走行时间计算

郭长弓, 顾保南

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 从人流线角度出发, 结合拓扑学原理, 提出 3 种基本元素来抽象行人设施及生成设施内、外走行路径, 并引入具有面积属性的实结点子模型, 解决流线交织区域的疏散问题, 进而构建完整的站内路网。通过现场观测给出 2 支流线交织区域的面积计算和拥挤度判断方法, 并结合宏观交通软件 VISUM, 计算得到路径的通过流量、走行时间等指标, 最后与微观仿真软件比较, 说明本文方法操作的便捷性及应用于设计阶段的优越性。

关键词: 城市轨道交通; 车站建模; 流线网络; 流线交织

中图分类号: U491.123

文献标志码: A

Network Creation and Travel Time Calculation of Pedestrian Flow in Urban Mass Transit Station

GUO Changgong, GU Baonan

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: From the perspective of pedestrian flow, a method is developed to analyze the collection and distribution capacity of pedestrian facilities' layout scheme conveniently in urban mass transit station. According to the topology theory, three kinds of basic elements are created to abstract the facilities and form the travel path in and out of them, whilst the concept of "true node" which means a node with its area is proposed to describe the conffliction of pedestrian flow. Through field observations, the method about area computing and congestion judging is set up in the conflict region of two intersectant pedestrian flow. Drawing support from software VISUM which is applied to macroscopic traffic, passenger flow, travel time and other index can be calculated. Compared to the microscopic simulation software, the convenience of this calculation model is illustrated especially in the design stage.

Key words: urban mass transit; station modeling; streamline network; streamline interleaving

近年来,我国部分城市轨道交通车站为确保线路顺畅不得不进行“限流”管制,2013 年 4 月止,北京和上海分别曾有 41,30 个车站实施常态化限流,且该数目会随出行客流的增长而增加,妨碍市民的出行。在设计年度内出现车站能力不足,一般被苛责是“因需求预测不准而出现的设计不合格现象”,但笔者认为车站设施布局设计难辞其咎。

当前多数车站设施布局设计选择套用“标准站”的做法,虽可降低工作量,但为运营后可能出现的站内疏散能力不足埋下隐患,因此须在设计阶段就对设施布局方案进行分析,消除瓶颈。既有的分析方法分两类:宏观层面的研究多集中在单个设施的通过能力、行人流三要素在设施上的相互关系及设施服务水平的划分等方面^[1];微观层面则通过研究行人个体间的相互作用和路径选择创建以元胞自动机模型^[2]和社会力模型^[3]为代表的动力学模型。国内外以此开发的软件分别有 Legion, STEPS^[4], NOMAD^[5]和 MRT-PedSim^[6], StaPass^[7]。虽然该类工具可直观、细致地模拟行人走行状态,计算出较为精确的结果,但前期准备工作繁多(如设计图清分),而且设计阶段会生成众多的设施布局方案。若一一用软件仿真,会产生庞大的工作量。宏观分析方法虽然很难反映出站内行人状态的过程性变化,但其基于较少的前期准备工作,便能得到相关指标(路径流量、饱和度、通行时间等)来用于瓶颈点找寻与疏散效果的初步评价,满足方案集筛选和调整的要求。

相对微观仿真中的空间网格划分和障碍物设置,宏观计算的前提为站内路网生成,而路网生成过程中不可避免要处理人流拥堵及交织问题,为此本文基于人流线层面提出一套站内路网的构建方法,并创建实结点模型初步解决流线交织现象。

收稿日期: 2013-02-25

第一作者: 郭长弓(1986—),男,博士生,主要研究方向为轨道交通车站设施布局、行人特征。E-mail: guochanggong@126.com

通讯作者: 顾保南(1962—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为城市轨道交通规划与设计、公路网规划、磁浮交通线路设计、综合交通枢纽规划与设计。E-mail: gbnnyh@163.com

1 站内行人流线网络构建方法

目前尚无人流线的定义,借鉴《建筑园林城市规划名词》中对“流线设计”的解释,可认为行人流线是指人群在空间中的走行轨迹,这与《地理学名词》中“路径”的含义相近,故在研究站内行人时将两者等价考虑。

流线有流程图^[8]、组织图^[9]2种描述方法,基于各自的优缺点分析^[9]进行有机结合:选择流程图反映设施的相互关系,然后重点采用组织图表示路径的生成。

以往关于行人流线的研究成果大多定性地分析站内流线组织方式及与空间构成要素的关系^[10]或通过拟合行人的步行参数来反映流线量值特征^[11]。近年来行人流线网络的定量分析逐渐受到重视,刘莹^[12]提出将轨道站抽象为由区域、节点和步行链路构成的正交化网络,并在路径选择时考虑统计冲突次数来表示流线交织带来的影响;胡春平等^[13]将综合客运枢纽抽象为 $m \times n$ (m 为路段性质、 n 为结点数)的多层网络连通图,在节点二次拆分的基础上构造了旅客全过程流线优化模型;赵莉^[14]提出了行人流线生成方法、流线分析和冲突消除方法,以干扰度、换乘阻抗为评价指标,建立了以结构效用最优为目标的设施布局优化模型。但既有研究尚存如下改进空间:研究者在构建路网时,仅给出部分设施的抽象方法,且同一设施的抽象方法也不尽相同,缺少一套完整详实的站内流线网络生成方法;流线交织问题未能妥善解决,已有的处理方法都在成网过程中将交织区域看成无面积大小的结点,却无法反映该区域客流饱和度特征,不能有效识别瓶颈,也较难准确获得交织带来的延误。

综上,本文首先结合空间拓扑理论提出站内行人路网的构建方法。

1.1 行人设施的抽象

站内行人设施包括自动售票机、服务窗口、安检

仪、闸机、楼梯、自动扶梯、通道、站厅和站台的可走行区域。因大多数车站早、晚高峰的服务客流以通勤为主,设乘客持有IC卡进出,故自动售票机与服务窗口在本文中不作分析。

1.1.1 基本元素

既有研究多以“结点”(node)和“边”(link)为基本元素^[12-17],按形态特征对设施进行抽象,例如,闸机因相对站厅体积较小常用单个结点表示,有时楼、扶梯亦会被“结点化”处理,对于流线交织区则一律用结点描述;而“边”的生成并不考虑障碍的存在,仅用直线连接,所形成的网络虽能完成客流分配,但对分析评价的难易度和结果的正确性造成影响:结点没有大小故无法用指标直观反映其拥挤情况,但交织处的拥挤程度恰恰是设计者关注的重点;在求解闸机(被抽象为结点)通过流量时,不能由分配直接得到,需先求得该结点所有连接边的流量,再作数值计算;过度抽象(将楼扶梯组作为一个结点)易忽略设施间的流线关系,无法准确体现设施的使用情况而影响计算结果;边所表达的路径真实长度需要逐一手动赋值,而不能直接用几何长度表示。

针对上述问题,在网络抽象时设置以下基本元素:

(1)边。与拓扑学中边的定义相同,具有名称、长度、类型、方向、通行能力等属性。用于描述可通行设施的内部区域及设施间的走行路径。

(2)虚结点。即拓扑学中的结点,具有名称、坐标、类型等属性,仅起定位作用。

(3)实结点。与虚结点相比,实结点具有面积属性,用于描述边的交织现象,可反映交织点的中心位置、进入及离开交织区流线的流量和方向。

1.1.2 规则设施的抽象方法

规则设施包括楼梯、扶梯、封闭通道、闸机组、安检仪等,其内部走行方向不大于2且平行于边界,通常可用“边-虚结点”的模式表现:进、出断面分别抽象为虚结点,并沿走行方向通过边连接,见图1。

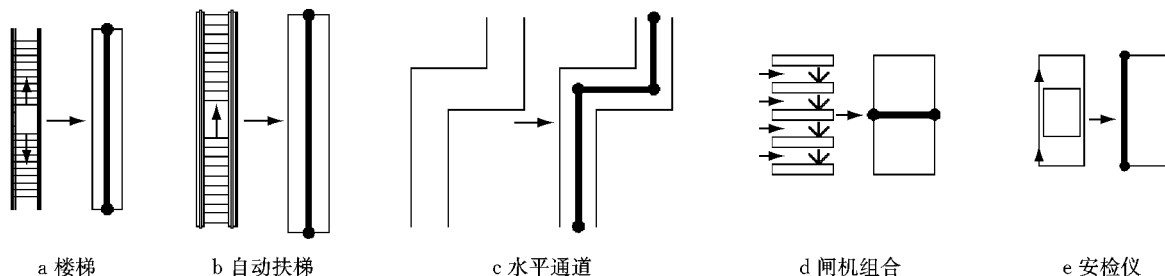


图1 规则设施的抽象方法

Fig.1 Abstracting methods of pedestrian facilities

封闭通道的侧墙与天花板采用无缝衔接,通常用于连接出入口与非付费区,见图1c;当多个同类设施并行紧密布设时,可视为单体设施进行描述,如图1d的闸机组。设施抽象完成后,保留轮廓线,反映实际所占的空间大小。

1.1.3 站厅、站台可走行区域的抽象方法

站厅与站台的走行区域因受其上所布设施的切割作用呈几何与走行方向的不规则性,故其抽象方法不同于规则设施,分通道和厅进行阐述。通道指满足方向规则性(走行方向平行于边界)但常不满足几何规则性(宽度发生变化)的空间,对于串联的不等宽通道组,可先选择宽度最小的单元按封闭通道进行抽象,然后向两端延伸直至通道组的进、出断面,从形态上表现为单一通道,但需在变截面处设置虚结点,分别输入每一节通道的真实宽度,如非付费区

内隔离栏杆与墙体所夹区域,见图2b。

厅指同时不满足方向规则性和几何规则性的大面积空间,如站厅付费区,其上流线可根据乘客接受设施服务的流程直接用边连接规则设施的端部虚结点来生成。贯穿设施边界的边不但失去真实性且会生成无效结点(交点),为解决该类情况作如下调整:从起始结点先连接被贯穿设施的顶点,再由该顶点连接目标结点。

站台层的侧站台与楼扶梯组所夹空间可分别按通道和厅进行处理,对于作为客流起迄点的列车车门可用虚结点反映其方位,但由于数量庞大(1列8节编组A型车有40个车门),需作如下简化:划分楼扶梯组的吸引范围,并沿楼扶梯两端断面将其分割成3个串联区域,每一区域包含的单侧车门合并为一个结点,见图2d。

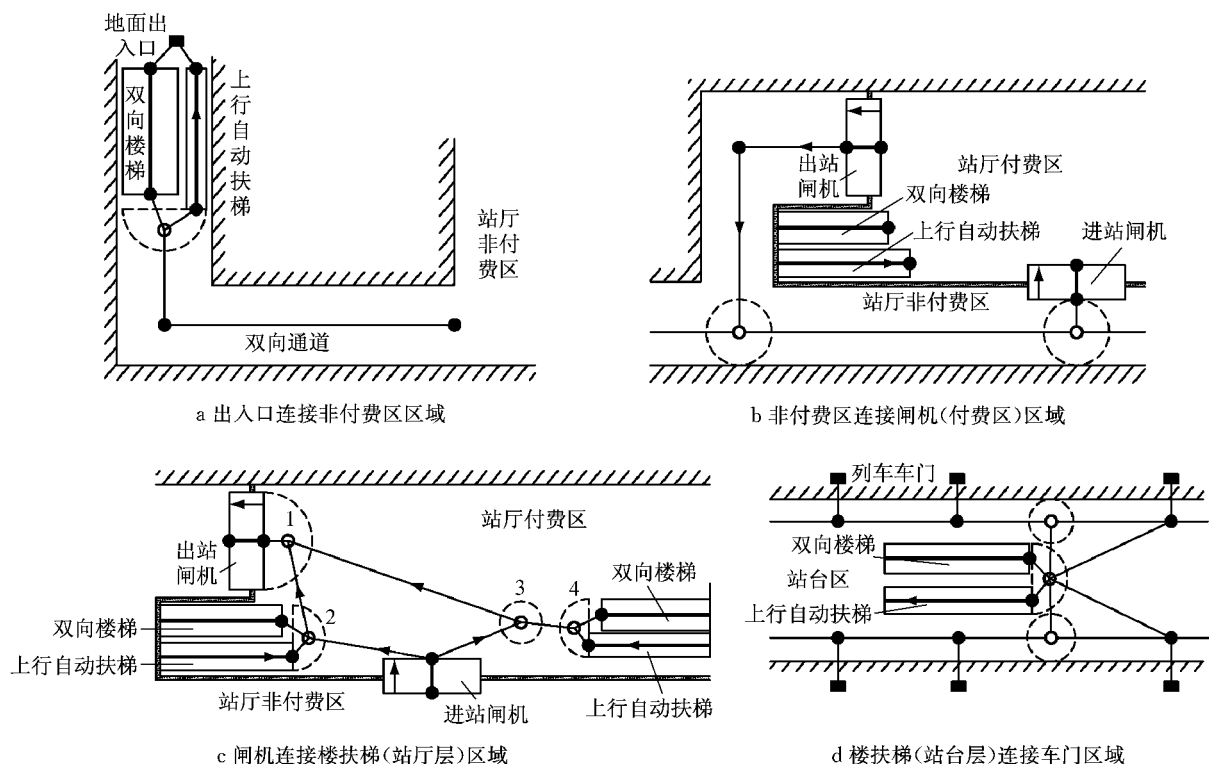


图2 进、出站各阶段流线网络生成示意

Fig.2 Generative process of passenger streamline between the entrance and platform

1.2 引入实结点模型的行人流线网络生成

流线网络的生成是指按一定顺序用基本元素连接已抽象的行人设施,使起迄点间形成通畅路径的过程。轨道交通车站的客流起迄点包括出入口和站台层的列车车门,在网络中以实心矩形表示,连接顺序则可参考乘客接受设施提供的服务流程,如图3。

实结点用于表示发生流线延误的区域,可分为拥堵型、交织型和混合型。拥堵型实结点的进入流率

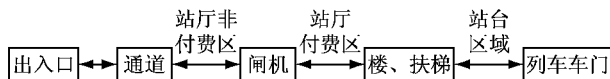


图3 轨交站内乘客接受设施服务的流程关系

Fig.3 Selection process of facilities for passengers in urban mass transit station

大于离开能力,使客流在结点区域集聚,降低疏散效率而产生延误;交织型实结点按成因分为:交汇/分流引起的摩擦冲突、相交穿插引起的交叉冲突和开

放空间的复杂交织冲突^[14]. 混合型实结点同时发生拥堵和交织, 主要特征有“拥堵合流”与“拥堵交叉”2种, 前者常见于闸机进入断面的前方区域, 如图 2c 中的 1 号结点; 后者常见于楼扶梯组端部区域, 如图 2c 中的 2, 4 号结点. 复杂交织是指较小空间内同时存在多个交叉点的现象, 在站台层楼扶梯组断面前方尤为显著, 见图 2d.

根据现场观测, 纯粹的分流断面很少发生拥堵, 因此闸机离开断面处不设置实结点; 此外, 当设施端部发生拥堵时, 其通过断面完全被行人侵占并向后方蔓延, 且集聚区域的投影宽度逐渐减小, 故假设该类实结点影响范围的形状为半圆(以断面宽度为直径), 其坐标取垂直于断面的半径的中点坐标. 当实结点远离设施端部时(多为交叉结点), 其影响范围

假设为圆形.

在列车未进站时, 车门处的候车队列可视为静止状态, 即使有行人沿侧站台前进, 也一般选择从队伍的后方绕行; 当列车到站时, 上下客在极短时间内完成, 每一车门产生的下车客流常跟随前方客流移动, 几乎不存在流线交织, 故车门连至侧站台通道的交点以虚结点表示, 见图 2d.

2 基于流线网络的走行时间计算模型

2.1 构建时间计算模型的总体思路

借鉴客流预测四阶段方法的基本思想, 以路径走行时间为阻抗进行客流分配, 得到路径饱和度、疏散总时间作为设施布局方案的评价指标, 见图 4.

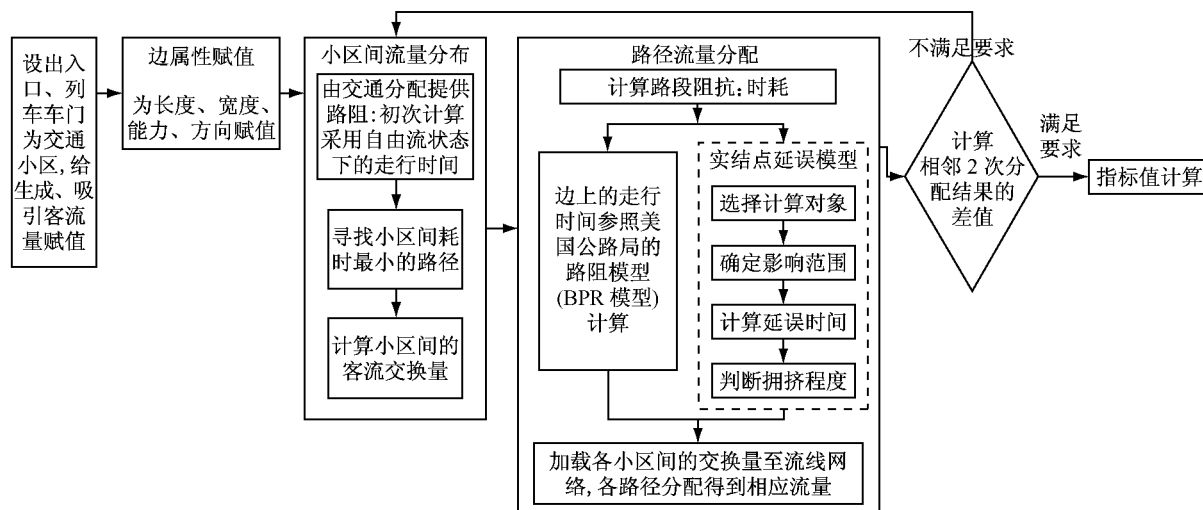


图 4 时间计算模型

Fig. 4 Analysis process of time calculation model in the station

其中路阻计算分为两部分: 路段上的走行时间采用 BPR 模型, 相关参数可参考文献^[17]或通过现场实测进行标定; 流线交织产生的延误时间则由实结点模型计算得到.

2.2 实结点延误时间计算模型

既有关于行人流线交织产生延误的宏观定量研究较少, 漆凯^[18]将枢纽节点抽象为有流量、无空间尺寸的虚拟点, 构建了基于 Webster 模型的节点广义费用函数, 分析了 2 股单向流线交叉产生的时间延误. 于学军^[19]认为因行人具备先到先过、无固定路线的特征, 使得借鉴于机动车延误的模型并不能很准确地对行人在交叉节点的行为进行描述, 故其利用仿真软件 Anylogic 分析了 2 条流线相交产生的 7 种节点组织形式的流量与时间关系, 得到十字交叉型与直转汇合型的组织形式对行人干扰程度较大.

本文采用 Vegas Pro9.0 视频分析软件对车站内 2 条流线交叉的视频进行分析, 提出实结点影响区域的面积计算模型, 并给出拥挤度的判断方法.

2.2.1 交织区面积的确定

只有先确定流线交织点的影响面积才能获得区域内的行人密度, 既为延误计算的前提, 亦为瓶颈分析的基础. 将一行中并列个体的宽度和作为流线宽度, 使流线呈带状, 则交织区域即为 2 个矩形的重叠部分, 假设流线中的个体均匀分布, 则交织区面积 A 为

$$A = \eta \cdot \csc \theta \cdot \frac{F_1}{f_1} \cdot \frac{F_2}{f_2} \quad (1)$$

式中: η 为修正系数; θ 为 2 支流线所成的向量角; F_1, F_2 分别交织前第 1 支、第 2 支流线的流率, 人 \cdot s^{-1} ; f_1, f_2 分别为交织前第 1 支、第 2 支流线的单宽

流率, $\text{人} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$.

通过视频分析获得式(1)中各参数,然后将交织面积的计算值与实测值进行比较. 可结合文献[20]的研究成果,推导出单宽流率 f 与速率 v 的关系(式(2)),故只需测量行人流速率即可.

$$f = v \cdot e^{\frac{1.051-v}{0.642}} \quad (2)$$

表1 交织区域面积计算

Tab.1 The calculated data about the area of the conflict region

编号	$f_1/(\text{人} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1})$	$F_1/(\text{人} \cdot \text{s}^{-1})$	$f_2/(\text{人} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1})$	$F_2/(\text{人} \cdot \text{s}^{-1})$	θ/rad	A/m^2	
						计算值	实测值
1	0.92	1.40	1.14	1.80	1.40	2.45	4.32
2	1.01	3.00	1.15	2.00	1.40	5.28	8.28
3	0.92	2.14	1.02	2.14	1.40	4.93	6.48
4	1.06	1.60	0.99	2.33	1.40	3.63	3.96
5	0.70	2.10	1.07	1.86	1.40	5.30	7.20
6	0.99	2.80	0.93	2.22	1.40	6.90	12.96
7	1.09	2.27	1.07	1.80	1.40	3.57	7.20
8	1.18	3.00	1.17	3.00	1.40	6.63	14.40
9	0.90	2.11	0.94	2.14	1.40	5.42	7.20
10	1.07	2.29	1.03	2.20	1.40	4.60	7.56

2.2.2 交织区延误及饱和度计算

借鉴文献[19]在研究2条流线交叉现象时得到的交织区延误的计算公式,如下:

$$T_N = T_0 + T_D = T_0(1 + \alpha \exp(\beta X_1) + \gamma X_2) = T_0 \delta \quad (3)$$

式中: T_N 为行人实际通过实结点的时间, s ; T_D 为实结点的延误时间, s ; T_0 为行人自由通过实结点的时间, s ; X_1, X_2 分别为与第1,2条流线饱和度相关的变量形式; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 为参数,其中 δ 可结合饱和度通过表格查询.

对交织区可能产生的最大密度值 ρ_{\max} 进行计算,为

$$\rho_{\max} = \rho_1 + \rho_2 + \rho_D = \rho_1 + \rho_2 + (F_1 + F_2)T_D/A \quad (4)$$

式中: ρ_1, ρ_2 分别为第1,2条流线发生交织前的密度; ρ_D 为交织区内因延误产生的附加密度.

将 ρ_{\max} 与文献[21]提供的人行通道各服务水平相比较,以判断交织区域是否存在拥堵.

3 案例计算及与微观仿真的比较

本文模型在加入实结点的基础上运用德国PTV公司的宏观仿真软件VISUM初步实现定量分析,其工作流程为:①导入图形,②设置设施属性,③建立路径及交通小区,④输入小区的生成、吸引量并设置路阻,⑤分配客流,⑥调试,⑦加入延误时间重分配,⑧分析结果.

计算结果见表1,实测数值与计算值变化趋势呈良好的一致性,故可认为式(1)的提出是合理的. η 的取值范围为1.3~1.7,是因为2支流线发生交织时,当行人密度增加使得可穿插间隙减少时,交织点处行人会选择减速等待以寻找下一穿插点,从而使得交织界面处流线宽度增加.

以上海轨道交通张江高科站为案例展示本模型的计算功能,并记录各流程的操作时间. 因CAD图仅发挥设施定位作用故无需进行严格的清图工作,只需在原图中凸显各结点即可,耗时0.33 h;步骤②,③即用结点和路段元素在底图上勾勒,并赋予路段方向、通过能力,耗时约2.12 h;以BPR为路阻函数,根据已有研究成果为不同设施的参数赋值,输入小区生成、吸引客流量后,由软件进行客流分布,耗时1.17 h;选择静态均衡分配方法进行一次分配,耗时0.10 h;调试过程中仅需对相关结点的转弯关系进行修改,耗时1.32 h;将分配结果输入实结点模型,并对交织区内的路段进行赋值,并重新分配,共进行了2次重分配,共耗时1.53 h. 以上步骤总耗时约7 h.

本模型生成的站内路网及客流分配结果见图5,

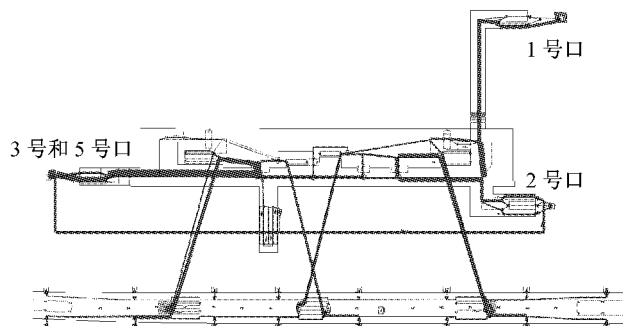


图5 本文模型形成的站内路网及分配结果

Fig.5 The streamline network generated by the time calculation model and the distributed flow on each route

其中路径的粗细对应流量大小,并可以统计出各出入口与站台间走行的人均时间和总时间,见表 2。

表 2 本文模型计算得到的早高峰进出站时耗

Tab.2 The calculated value of travel time in and out of the station during the morning rush hour

事件	研究对象	站台	人均时耗/s	总时耗/s
进站	客流来源	1 号口	152	132 680
		2 号口	133	
		3 号口,5 号口	355	
出站	客流去向	1 号口	250	511 878
		2 号口	188	
		3 号口,5 号口	234	

注:因 3 号口进、出站客流均经过 5 号口前方的平台,故将两者合并为一个小区。

为阐述本模型在使用上的便捷性,针对同一案例,以微观仿真软件 Legion 进行计算,其工作流程为:①清图并导入,②设置设施属性,③建立路径,④求客流分布矩阵,⑤导入数据并调试,⑥运行模拟,⑦分析结果。清图是指将车站 CAD 设计平面图中的各元素按是否成为行人走行障碍的标准分类放入“显示”和“仿真”2 个图层,费时 2.16 h;设施设置与路径建立的大体思路与本文方法相似,只是需采用 Legion 提供的相关元素,耗时约 3.82 h;客流分布的概念同本文模型,只是因仿真需要的是过程量,故要先设置仿真总时段(如 1 h),再分别以 5 min 为步长将生成、吸引点间的客流进行划分,该过程耗时 3.20 h;一般而言导入数据后程序会报显局部的不兼容信息或是输错信息,需进行调试,该过程耗时 3.16 h;然后执行仿真程序,根据模型复杂程度及电脑硬件可承受能力,1 h 的仿真过程在 1.81 h 内完成。以上步骤总耗时约 14 h。

2 种方法进行的案例计算在耗时上约差 7 h,本文模型对操作时间的节省(省去清图及人工客流分布两步骤)还是易见的。而对 2 线或多线换乘站,由于车站规模更大,结构更复杂,清图及仿真运行的时间也急剧增加,更能拉开 2 种方法的计算时差。此外,若要根据计算结果对设施布局进行调整,Legion 软件提供在界面的直接操作较为复杂,以楼梯拓宽为例,需将楼梯边界轮廓包含的所有点、线元素选中再通过平移使其变宽,然后删除既有的楼梯组件,并重新建立。期间由于 Legion 软件采用正交化网格对点、线进行定位,故移动距离不能做到完全精确,因此在布局变更时,通常先在 CAD 图中调整,再按完整流程进行仿真;而在本模型中,只需对该楼梯和相应并行通道的内部边的能力进行更改即可,可见在需要频繁作出调整的车站平面设计阶段本模型更具

优越性。

4 结语

在完成轨道交通车站行人设施抽象的基础上提出了一种行人流线网络的构建方法,并通过计算可以得到路径流量、饱和度、走行时耗、交织延误等主要指标,作为瓶颈点识别和设计调整的依据,以生成较优的布局方案。相比微观仿真,本文模型在前期建模和后期方案调整阶段的操作更便捷,节省了计算时间。

参考文献:

- [1] 张盛. 城市轨道交通地下车站行人设施规模和布局评价方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.
ZHANG Sheng. Study on evaluation methods of rail transit under ground station scale and facilities layout[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [2] Blue V J, Adler J V. Emergent pedestrian streams and cellular automata micro-simulation[J]. Transportation Research Board Record, 1998, 1644(1): 29.
- [3] Helbing D, Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E, 1995, 51: 4282.
- [4] Castle C J E, Waterson N P, Pellissier E, et al. A comparison of grid-based and continuous space pedestrian modelling software: analysis of two UK train stations[M]. New York: Springer, 2011.
- [5] Hoogendoorn P S. Microscopic simulation of pedestrian flows[C/CD]// Transportation Research Board. Washington D C: TRB, 2003.
- [6] 李得伟. 城市轨道交通枢纽乘客集散模型及微观仿真理论[D]. 北京:北京交通大学,2007.
LI Dewei. Modeling and simulation of microscopic pedestrian flow in MTR hubs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [7] 高鹏. 基于多智能体的轨道交通车站客流仿真模型及理论研究[D]. 上海:同济大学,2010.
GAO Peng. An agent-based simulation model for passengers in the urban mass transit station[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [8] Reynaldo S P J, Hutchinson G B. Passenger terminal simulation model[J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(4): 517.
- [9] 高晶鑫. 基于流线分析的客运枢纽内部设施布置优化研究[D]. 吉林:吉林大学,2009.
GAO Jingxin. Inner facility layout optimization based on streamline analysis for passenger terminal[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [10] 张帅. 城市轨道交通枢纽内部空间交通流线设计初探[D]. 北京:北京交通大学,2011.

(下转第 440 页)