

地铁车站站内设施高峰客流到达率计算方法研究

李晨林 仇婉约 徐行方

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘要 现有的地铁设施规模设计主要是基于高峰小时客流量, 而未能有效考虑瞬时客流到达率对设施的冲击, 导致设施设计能力略显不足。为应对地铁站内设施设计能力与客流实际需求不匹配的问题, 对地铁站内设施高峰客流到达率的计算方法进行了研究。从列车到达前后两种状态分析站内设施到达客流构成及其变化规律; 以乘客泊松到达过程为基础, 推导出设施高峰客流到达率的计算公式; 以上海轨道交通陆家浜路站为案例, 对不同设施高峰客流到达率进行了计算, 并将计算最大值与实测最大值进行对比分析, 计算结果表明两者之间的误差较小且均在 6% 以内, 验证了计算方法的有效性。

关键词 地铁车站; 站内设施; 高峰客流到达率; 泊松到达
中图分类号 U293.1⁺3:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.00.017

Calculation Method of Peak Passenger Arrival Rate inside Subway Station Facilities

LI Chenlin, QIU Wanyue, XU Xingfang

Abstract The current design of subway facility scale is mainly based on the peak hour passenger flow with less attention paid to the impact of instantaneous passenger arrival rate, resulting in the slightly insufficient facility design capacity. In order to solve the mismatched problems between facility design capacity and passenger flow demands at subway stations, the method of calculating the peak passenger arrival rate is studied. According to the two states before and after the arrival of trains, the composition of passenger flow and its change rule are analyzed. Then, based on the passenger Poisson arrival process, a calculating formula for the peak passenger arrival rate is derived. Finally, taking Lujiabang Road Station of Shanghai urban rail transit as an example, the peak passenger arrival rate of different facilities is calculated, the calculated maximum value and the measured maximum value are compared and analyzed. Results show that the error between the two is less than 6%, thus the effectiveness of the proposed method is verified.

Key words subway station; facilities inside subway station; peak passenger arrival rate; Poisson arrival

Author's address State Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China

我国城市轨道交通已基本形成网络化的发展格局, 由于网络中客流量的猛增以及换乘客流主导地位的凸显, 现有地铁车站暴露出站内设施规模总体偏低, 导致设施能力与客流需求不匹配的问题。因此, 研究站内设施能力, 提高设施设计标准是当前亟待解决的问题。

根据 GB 50157—2013《地铁设计规范》, 现有设施规模主要是基于高峰小时客流量进行设计, 而未能有效考虑瞬时高峰客流到达率对设施的冲击, 导致设施能力略显不足。因此, 为了避免小时客流量平均化的不足, 研究合理的设施高峰客流到达率计算方法, 无论是对远期站内设施的扩能改造, 还是将此作为设施规模设计的新标准, 都具有重要的实践意义。

目前国内外学者在地铁大客流分析建模与站内设施优化设计方面开展了一定的研究, 但目前还未见设施客流到达率的计算研究。本文在相关研究的基础上, 通过对地铁站内设施高峰客流的构成及到达规律的分析, 给出了地铁站内设施高峰客流到达率的计算方法, 并通过实测数据进行案例计算, 验证了计算方法的有效性。

1 地铁车站站内设施高峰客流到达率分析

1.1 设施高峰客流到达率定义

设施高峰客流到达率(以下简称“到达率”)是指在客流高峰时段, 某设施处(如楼扶梯、换乘通道)单位时间内的客流到达人数。不难看出, 它是随时间连续变化的变量。

到达率不同于分时客流量, 后者的含义为地铁站内各小时内各类型客流(如换入换出、进站出站客流)的大小, 如 AFC(自动售检票)系统可以统计

每小时进出站客流量。两者区别主要有以下两点:

1) 对象不同。高峰客流到达率针对的是某个设施处各类型客流的到达强度,而分时客流量针对的是某类型客流的客流量。

2) 时间粒度不同。到达率的时间单位较小,考虑到实际需要,采用s作为单位;而分时客流量的时间单位采用的是h,对客流分析的时间粒度过粗。

1.2 稳定客流的描述

设施处的输入客流包括进出站客流和换乘客流。在列车未到站之前,设施处的客流到达相对平缓稳定,主要是进站客流(也包括少量滞后出站和换乘客流),此时的客流到达率相对平缓稳定,本文将其定义为稳定客流。而下车客流包括出站客流和换乘客流,这部分客流到达设施的到达率是随时间变化的,由于下车客流和稳定客流共同构成了设施处高峰小时客流量,因此,在计算稳定客流到达率时需要将稳定客流与下车客流加以区分,稳定客流到达率可以用高峰时段客流平均到达率 \bar{f} 来表示,计算时将高峰小时客流量中到站下车客流扣除,得到其表达式为:

$$\bar{f} = \frac{Q_{\max} - n \times Q_{\text{off}}}{3600} \quad (1)$$

式中:

\bar{f} ——高峰时段设施处的稳定客流平均到达率,人次/s;

Q_{\max} ——设施处高峰小时客流量,人次/h;

n ——高峰小时内到达列车列数,列;

Q_{off} ——每列到达列车的平均下车人数,人次/列。

1.3 下车客流的描述

当列车到站后,下车乘客进入站台,在到达设施之前,设施处平均到达率保持稳定,到达设施后,设施处到达率不断增大,在某一时刻达到最大值 f_{\max} ,显然有:

$$f_{\max} > \bar{f} \quad (2)$$

随着乘客逐一进入、通过、离开该设施,到达率不断减小,等下车乘客全部(少量乘客除外,下同)通过该设施,该设施客流到达率又恢复至稳定值 \bar{f} ,该稳定值一直持续至下一列车到站,然后到达率重复上一列车到达后的变化规律。值得注意的是,诸如楼梯设施设在站台上,上述变化规律明显。随着乘客走行距离的延长,客流到达对设施的冲击会得到一定程度的缓冲。由于换乘通道入口一般离

楼梯扶梯出口不会太远,因此可认为仍旧保有上述客流到达率特征。

因此,可以将高峰时段设施处的客流到达率变化规律概括为:在一个列车发车间隔时间内,在下车客流到达设施之前,客流到达率保持稳定;随着乘客到达服务设施,客流到达率由稳定值增加至最大值,再由最大值减小至稳定值,直至下一列车到达。

2 基于泊松到达的设施高峰客流到达率计算方法

2.1 函数形式的确定

文献[2]提出,高峰时期内客流到达率 f 均可用规则的曲线进行近似拟合,并提出3种曲线近似计算方法:①三角曲线;②抛物线曲线;③半椭圆曲线。

由于三角曲线不够平滑,抛物线曲线和半椭圆曲线较为类似,但抛物线曲线更易于表达,因此本文采用抛物线曲线确定高峰时段设施客流到达率函数关系式。根据前文分析,乘客下车到达设施处需要一段走行时间,此后设施客流到达率才会呈先增后减至稳定的变化规律,因此,用抛物线曲线描述客流到达率变化的时间跨度,应是从下车乘客到达设施开始至所有乘客通过设施的时间。该抛物线的特征为:自变量为时间 t ,因变量为客流到达率 f ,初始值为 \bar{f} ,最大值为 f_{\max} ,结束值为 \bar{f} 。若定义下车乘客步行至设施处的时刻为0时刻,所有乘客完全通过设施的时刻为 h_{pass} ,则该抛物线自变量的取值区间为 $[0, h_{\text{pass}}]$ 。到达率抛物线曲线如图1所示。

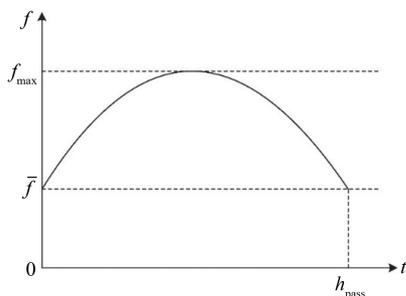


图1 设施高峰客流到达率抛物线曲线示意图

由于将列车到达之前的到达率视为稳定值 \bar{f} ,则到达率由两部分组成:列车到达之前的稳定客流到达率 \bar{f} 、列车到达之后下车乘客产生的到达率。因此,到达率抛物线曲线可以通过如下方式确定:

1) 根据列车到达后的客流到达规律,确定其客流到达率抛物线曲线;

2) 将该抛物线曲线沿纵轴向上平移 \bar{f} 个单位。

2.2 下车客流泊松到达过程的表达

文献[7-8]表明,客流单位时间内到达设施处的人数可用泊松分布进行表达。

不难发现,从下车乘客到达设施开始至所有乘客通过设施的时间段的每一秒内,到达率是不确定的变量。但是根据到达率的变化趋势可知,在该时段内,到达率呈先增后减抛物线式的变化趋势。

在采用抛物线曲线来描述客流到达率的前提下,每一秒内的设施客流到达率的变化趋势是确定的,可认为每一秒内的客流到达率服从均值不同的泊松分布,该均值反映了这一秒内客流到达率的最大概率值,而抛物线曲线表达式可以认为是各时刻客流到达率均值的表达式。

由于在该时间段的初始时刻和结束时刻下车乘客的客流到达率均为零,则随时间变化的下车乘客设施客流到达率的抛物线函数关系式为:

$$\lambda(i) = \theta i(h_{\text{pass}} - i) \quad (3)$$

式中:

i ——从下车乘客到达设施开始至所有乘客通过设施的时间段内的各个时刻;

$\lambda(i)$ ——下车乘客在第 i 时刻的设施客流到达率,该客流到达率反映了在该时刻服从泊松分布的客流到达率的均值;

θ ——抛物线关系式的系数。

若设 $X(i)$,即第 i 时刻设施客流到达率为随机变量。根据前文描述, $X(i)$ 服从均值为 $\lambda(i)$ 的泊松分布,即:

$$P(X(i) = k) = \frac{\lambda^k(i)}{k!} e^{-\lambda(i)} \quad (4)$$

由于服从泊松分布的随机变量的数学期望等于其均值,则有:

$$E(X(i)) = \lambda(i) \quad (5)$$

2.3 下车客流到达率抛物线函数关系式的确定

若定义 Q_h 为高峰时段一个列车发车间隔时间内的下车客流量,则 Q_h 也是一个随机变量,其均值可根据每列到达列车的平均下车人数 Q_{off} 来确定:

$$E(Q_h) = Q_{\text{off}} \quad (6)$$

若将客流到达的单位时间定义至每秒,则从下车乘客到达设施开始至所有乘客通过设施这一时间段的客流量等于 h_{pass} 个单位时间客流到达量之

和,即:

$$Q_h = \sum_{i=1}^{h_{\text{pass}}} X(i) \quad (7)$$

式中:

$X(i)$ ——下车乘客在第 i 时刻的设施客流到达率。

等号两边同时取数学期望,即:

$$E(Q_h) = E\left(\sum_{i=1}^{h_{\text{pass}}} X(i)\right) \quad (8)$$

由于 $E(X(i)) = \lambda(i)$,则:

$$E(Q_h) = E\left(\sum_{i=1}^{h_{\text{pass}}} X(i)\right) = \sum_{i=1}^{h_{\text{pass}}} \lambda(i) \quad (9)$$

将式(3)代入,则:

$$\sum_{i=1}^{h_{\text{pass}}} \lambda(i) = \theta \sum_{i=1}^{h_{\text{pass}}} h_{\text{pass}} i - \theta \sum_{i=1}^{h_{\text{pass}}} i^2 = Q_{\text{off}} \quad (10)$$

从而得到抛物线系数 θ 的表达式:

$$\theta = \frac{Q_{\text{off}}}{\sum_{i=1}^{h_{\text{pass}}} i(h_{\text{pass}} - i)} \quad (11)$$

则随时间变化的下车乘客到达率的抛物线函数关系式为:

$$\lambda(i) = \frac{Q_{\text{off}} i(h_{\text{pass}} - i)}{\sum_{i=1}^{h_{\text{pass}}} i(h_{\text{pass}} - i)} \quad (12)$$

2.4 最终客流到达率函数关系式的确定

将下车客流到达率抛物线曲线向上平移 \bar{f} 个单位长度,得到设施客流到达率的抛物线函数关系式:

$$f(i) = \lambda(i) + \bar{f} \quad (i = 1, 2, \dots, h_{\text{pass}}) \quad (13)$$

根据式(13),在获取设施高峰小时客流量、高峰小时内到达列车列数及1列列车平均下车人数的基础上,便可得到高峰时段从下车乘客到达设施开始至所有乘客通过设施的 h_{pass} 内的客流到达率,可为设施规模设计、设施安全评价及设施能力计算提供基础。

3 实例计算

本文以上海轨道交通陆家浜路站为例,采集站内设施高峰小时客流量、客流到达率最大观测值及下车乘客步行至设施处最短时间,应用上述方法计算到达率。并将计算结果与实测结果比较,验证计算方法的有效性。通过实际采集获得的陆家浜路站设施的相关数据如表1所示。

表1 陆家浜路站设施相关数据

设施名称	客流到达率最大观测值/(人次/s)	下车乘客步行至设施处最短时间/s	高峰小时客流量/(人次/h)
双向楼梯	9	5	18 032
双向通道	5	15	11 896

3.1 双向楼梯

在双向楼梯高峰小时客流量为 18 032 人次/h 的基础上,通过现场观察并结合车站提供的经验值,取列车发车间隔时间为 180 s,每列车平均下车人数为 200 人,所有乘客完全通过楼梯的时间设为 60 s。根据式(13)以及表 1,得到在一个列车发车间隔时间内高峰时段双向楼梯客流到达率曲线图,如图 2 所示。经计算,双向楼梯客流到达率的最大值为 8.9 人/s。

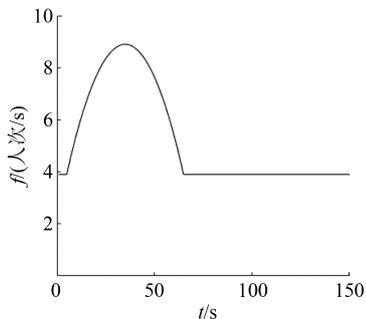


图2 高峰时段双向楼梯客流到达率曲线图

3.2 双向通道

在双向通道高峰小时客流量为 11 896 人次/h 的基础上,取列车发车间隔时间为 180 s,每列车平均下车人数为 200 人,所有乘客完全通过通道的时间设为 120 s。根据式(13)以及表 1,得到在一个列车发车间隔时间内高峰时段双向通道客流到达率曲线图,如图 3 所示。

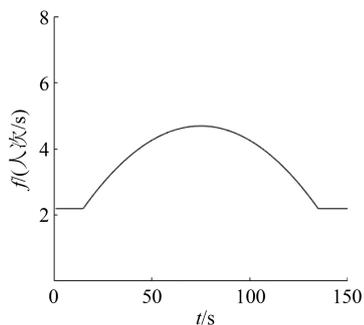


图3 高峰时段双向通道客流到达率曲线图

经计算,双向通道客流到达率的最大值为 4.7 人/s。

3.3 结果比较

根据计算结果,得到到达率计算结果与实测数据比较表,如表 2 所示。

表2 到达率计算结果与实测数据比较表

设施名称	客流到达率计算最大值/(人次/s)	客流到达率实测最大值/(人次/s)	误差/%
双向楼梯	8.9	9	1.1
双向通道	4.7	5	6.0

由表 2 可知,计算值与实测值误差均在 6% 以内,同时通道的到达率远小于楼梯的到达率。这主要是由于乘客下车先进入楼梯,受到的短时客流冲击更大,而经过一段时间的走行,客流对通道的冲击得到缓冲。计算结果与实际情况相符,可见本文提出的到达率计算方法具有一定的有效性。

4 结语

本文针对高峰时段地铁站内设施客流到达率问题展开分析,充分考虑站内设施到达客流构成及其变化规律,以泊松到达过程为基础,给出了设施高峰客流到达率的计算方法。并以上海轨道交通陆家浜路站为案例,应用所提计算方法对设施高峰客流到达率进行了计算,计算值与实测数据的对比分析表明,本文提出的计算方法具有一定的有效性。本文研究成果可将设施高峰客流到达率作为设施规模设计的新标准,使得设施能力能够更加适应瞬时客流冲击,从而有效应对客流的迅猛增长。

参考文献

- [1] 冯树民,陈勇,辛梦薇.突发大客流下地铁协调限流优化模型[J].哈尔滨工业大学报,2018(1): 1.
- [2] 赵莉.城市轨道交通枢纽交通设计理论与方法研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [3] 余杰.城市轨道交通车站客流承载力研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [4] 尹玉龙.地铁车站超大客流流线设计与优化[D].成都:西南交通大学,2013.
- [5] 张艳妮,张鹏,陈洪,等.大客流地铁车站的设施配置优化模型[J].城市轨道交通研究,2014(9): 67.
- [6] 李晓晨.考虑动态客流的地铁车站售票检票设施系统优化配置[D].成都:西南交通大学,2018.
- [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(1): 7.
- [8] 蒋阳升,胡路,卢果.基于排队论的地铁人行通道宽度取值方法[J].交通运输工程学报,2010(3): 67.

(收稿日期:2019-07-12)