

运输服务驱动下的 区域轨道交通系统总体运能计算方法研究

李文新¹ 吴 一¹ 张艺豪¹ 陈 偲¹ 周 茜² 熊 晏^{2*}

1. 湖北文理学院纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室 湖北襄阳 441053;
2. 湖北文理学院医学部 湖北襄阳 441053

摘 要:轨道交通系统总体运能作为衡量系统内旅客协同运输组织效率和运输服务水平的重要指标,其计算方法应体现出旅客运输服务质量对系统总体运能的影响。考虑到现有的系统总体运能计算方法存在模型简单、形式单一的缺点,本文提出的轨道交通系统总体运能新型计算方法能够将旅客运输服务质量对系统总体运能的影响转化为定量计算。接着结合实际调研数据,利用数据拟合函数模型对该计算模型的主要影响参数进行测定。最后通过案例研究对该计算模型的准确性进行了验证以及对该计算模型的主要影响因素进行了灵敏度分析,结果表明:该计算模型能够较好地体现出旅客运输服务质量对系统总体运能的影响。

关键词:铁路运输;总体运能;旅客运输服务;数据拟合;灵敏度分析

1 概述

近年来,随着区域轨道交通线网的不断扩张和发展,旅客出行环境和出行类型也在不断发生变化^[1]。轨道交通系统作为市域内单制式旅客和城市间跨制式旅客输送的主要方式之一,其系统总体运能计算方法的研究也一直受到专家学者的广泛关注和青睐。系统总体运能作为衡量区域内各制式轨道交通旅客协同运输组织效率和运输服务水平的重要指标,其计算方法应体现出旅客运输服务质量对系统总体运能的影响,而现有的系统总体运能计算方法存在模型简单、形式单一的缺点,难以反映出旅客运输服务质量对系统总体运能产生的动态影响。综上所述,考虑旅客运输服务质量影响的轨道交通系统总体运能计算方法研究已经迫在眉睫。目前,国内外学者对轨道交通系统运输能力的研究主要集中在单一轨道交通制式总体运输能力研究和单一评价指标或评估方法^[2-3],缺少系统的研究理论和方法。此外,对于多制式路网运输能力的评估多是从运营效益的角度来考虑,缺少从运输效率和旅客运输服务质量方面考虑的研究。

本文提出的考虑旅客运输服务质量影响的轨道交通系统总体运能计算方法,从线(旅客站间出行 OD)的研究入手,克服了传统系统总体运能计算模型中车站旅客发送量和中转量为“点”数据的缺陷,将旅客运输服务质量对系统总体运能的影响转化为定量计算。此外,本文构建的考虑旅客运输服务质量影响的轨道交通系统总体运能计算方法不仅能够根据系统旅客运输服务质量计算当前轨道交通系统的总体运能,还能对该系统总体运能弹性进行测算。

2 考虑旅客运输服务质量影响的系统总体运能计算模型

为便于后续系统总体运能计算模型的建立和描述,首先对该模型中出现的主要符号和变量做如下定义,如表 1 所示。

表 1 符号与变量

符号和变量	描述
m, r	地铁、铁路制式
$(t_0, t_d), (t_0^m, t_d^m), (t_0^r, t_d^r), (t_0^{transfer}, t_d^{transfer})$	计划时段范围
K_m, K_r	地铁、铁路列车的集合
$I_m, I_r, I_{m,r}$	地铁、铁路车站和跨制式换乘车站的集合
i_m, j_m, i_r, j_r	车站编号
$i_{m,r}$	跨制式换乘车站编号
$q(i_m, j_m)$	地铁车站 i_m 到 j_m 的单制式客流输送量,人次
$q(i_r, j_r)$	铁路车站 i_r 到 j_r 的单制式客流输送量,人次
$q(i_m, i_r)$	地铁车站 i_m 到铁路车站 i_r 的跨制式换乘客流输送量,人次
$q(i_{m,r})$	跨制式换乘车站 $i_{m,r}$ 的换乘旅客中转量,人次
$Q_{total}^{dynamic}(t_0, t_d)$	考虑旅客运输服务质量下的轨道交通系统单方向跨制式出行下的总体运能,人次
Q_{total}^{static}	轨道交通系统单方向跨制式出行下的总体运能,人次
wt_m^{cur}	当前旅客运输服务质量下地铁旅客的平均等待时间,秒
wt_m^{opt}	旅客运输服务质量提升下地铁旅客的平均等待时间,秒
$\alpha(wt_m^{opt})$	旅客运输服务质量提升下地铁旅客将再次选择地铁出行的出行率

续表

符号和变量	描述
$\alpha(wt_m^{cur})$	当前旅客运输服务质量下地铁旅客将再次选择地铁出行的出行率
$Q_{m,totol}^{cur}$	当前旅客运输服务质量下地铁的总体运能, 人次
$wt_{m,r}^{cur}$	当前旅客运输服务质量下由地铁换乘到铁路的跨制式换乘旅客平均换乘等待时间, 秒
$wt_{m,r}^{opt}$	旅客运输服务质量提升下由地铁换乘到铁路的跨制式换乘旅客平均换乘等待时间, 秒
$\alpha(wt_{m,r}^{opt})$	旅客运输服务质量提升下跨制式换乘旅客将再次选择轨道交通出行的出行率
$\alpha(wt_{m,r}^{cur})$	当前旅客运输服务质量下跨制式换乘旅客将再次选择轨道交通出行的出行率
$Q_{(m,r),total}^{cur}$	当前旅客运输服务质量下由地铁换乘铁路的跨制式换乘旅客中转量, 人次

2.1 旅客运输服务质量影响因素

站台拥挤、候车等待时间过长作为影响轨道交通运输服务质量的重要因素, 一直备受旅客的关注。本文对旅客运输服务质量调研结果表明, 超 70% 的调研对象认为乘坐轨道交通出行的过程中最令其无法忍受的就是站台拥挤造成的候车时间过长, 站台拥挤、旅客候车时间过长将造成旅客服务质量大打折扣, 降低旅客选择轨道交通出行的概率, 从而减少轨道交通旅客运输量。因此, 优化旅客候车等待时间可有效降低旅客全出行链旅行时间, 提高单位时间内轨道交通系统设施设备服务频率, 从而达到提升系统总体运能的目的。

综上, 本文将轨道交通系统内的出行旅客分为单制式旅客和跨制式换乘旅客, 将单制式旅客站台候车平均等待时间和跨制式旅客中转换乘平均等待时间作为旅客运输服务质量的主要影响因素, 以研究旅客运输服务质量对系统总体运输能力的定量影响。

2.2 模型构建

首先基于旅客站间出行 OD, 构建单方向跨制式出行下的轨道交通系统总体运能计算模型 (OTC) 如公式 (1) 所示。然后考虑单制式旅客站台候车平均等待时间 (ATWTP) 和跨制式旅客中转换乘车站平均等待时间 (ATWTTP) 对系统总体运能的定量影响, 构建考虑运输服务质量影响下的系统总体运能计算模型 (OTCSQ), 如公式 (2) 所示。

$$Q_{OTC} = \left[\sum_{i_m \in I_m} \sum_{j_m \in I_m} q(i_m, j_m) + \sum_{i_m \in I_m} \sum_{i_r \in I_r} q(i_m, i_r) + \sum_{i_r \in I_r} \sum_{j_r \in I_r} q(i_r, j_r) \right] + \sum_{i_{m,r} \in I_{m,r}} q(i_{m,r}) \quad (1)$$

$$Q_{OTCSQ}(t_o, t_d) = Q_{OTC}(t_o, t_d) + \left(\frac{\alpha(wt_{m,r}^{opt}) - \alpha(wt_m^{cur})}{\alpha(wt_m^{cur})} \right) Q_{m,totol}^{cur} + \left(\frac{\alpha(wt_{m,r}^{opt}) - \alpha(wt_{m,r}^{cur})}{\alpha(wt_{m,r}^{cur})} \right) Q_{(m,r),total}^{cur} \quad (2)$$

3 案例分析

3.1 OTCSQ 准确性验证

案例分析: 地铁线由 5 座车站构成, 命名为 $m_1 \sim m_5$, 铁路线由 3 座车站构成, 命名为 $r_1 \sim r_3$ 。两线路衔接的跨制式中转换乘车站为 m_5 和 r_1 构成的同站台换乘车站, 命名为 m_5-r_1 。系统在平峰运营时段内各车站单位时间内旅客的发送量和中转量如表 2 所示, 系统在平峰运营时段内单位时间内单方向跨制式出行旅客站间 OD 出行量 (用字母 k 表示) 如表 3 所示, 系统在平峰运营时段内单位时间内单制式旅客站间 OD 出行量 (用字母 d 表示) 如表 4 所示。利用传统区域轨道交通系统总体运能计算模型 (公式 1) 和本文构建的 OTC 模型 (公式 2) 分别计算该系统平峰运营时段下单位时间内的旅客总体运输能力, 发现两者计算结果完全相同, 如公式 (3) 和公式 (4) 所示, 证明了本文构建的 OTC 模型和基于 OTC 模型构建的 OTCSQ 模型的准确性。

$$C_{network} = \sum_{i \in V} q(i) + \sum_{k \in K} q(k) = 800 + 400 + 320 + 600 + 400 + 400 + 480 + 320 + 326 = 4046 \quad (3)$$

$$Q_{total}^{static} = \left[\sum_{i_m \in I_m} \sum_{j_m \in I_m} q(i_m, j_m) + \sum_{i_m \in I_m} \sum_{i_r \in I_r} q(i_m, i_r) + \sum_{i_r \in I_r} \sum_{j_r \in I_r} q(i_r, j_r) \right] + \sum_{i_{m,r} \in I_{m,r}} q(i_{m,r}) = (600 + 280 + 240 + 480 + 200) + (200 + 120 + 80 + 120 + 0) + (400 + 480 + 320) + 326 = 4046 \quad (4)$$

表 2 平峰运营时段内各车站单位时间内旅客的发送量和中转量

车站	发送量/人次	单方向跨制式出行中转量/人次
m_1	800	0
m_2	400	0
m_3	320	0
m_4	600	0
m_5	400	0
m_5-r_1	0	326
r_1	400	0
r_2	480	0
r_3	320	0

表 3 平峰运营时段内单位时间内单方向跨制式出行旅客站间 OD 出行量

车站	r_1	r_2	r_3	k /人次
m_1	100	40	60	200
m_2	32	60	28	120
m_3	24	32	24	80
m_4	40	40	40	120
m_5	0	0	0	0

表 4 平峰运营时段内单位时间内
单制式旅客站间 OD 出行量

车站	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	r ₁	r ₂	r ₃	d/人次
m ₁	0	140	100	160	200	0	0	0	600
m ₂	80	0	60	80	60	0	0	0	280
m ₃	80	60	0	40	60	0	0	0	240
m ₄	240	80	40	0	120	0	0	0	480
m ₅	40	60	40	60	0	0	0	0	200
r ₁	0	0	0	0	0	0	240	160	400
r ₂	0	0	0	0	0	360	0	120	480
r ₃	0	0	0	0	0	120	200	0	320

3.2 OTCSQ 灵敏度分析

为了研究不同旅客运输服务质量对 OTCSQ 的影响程度,需要对影响旅客运输服务质量的影响因素 ATWTP、ATWTTP 进行灵敏度分析。以成都地铁二号线东线(中医大省医院—犀浦)与铁路成灌线(犀浦—青城山)构成的多制式轨道交通系统作为研究案例,通过调研数据可知该系统在不同运营时期下的基本数据(平均值)如表 5 所示。其次,对模型主要参数的范围和步长进行设置。图 1~图 2 给出了不同运营时段下 ATWTP、ATWTTP 分别对 OTCSQ 的灵敏度分析,可以看出灵敏度由高到低的排序为:ATWTP>ATWTTP,意味着 ATWTP 对 OTCSQ 的影响度较大,ATWTTP 对 OTCSQ 的影响度较小。

表 5 基本运营数据

运营时段	OTC/人次		ATWTP/s	ATWTTP/s
	$Q_{m, total}^{cur}$ /人次	$Q_{(m, r), total}^{cur}$ /人次		
平峰	3195	851	198.17	280.65
高峰	4191	1388	140.13	391.05

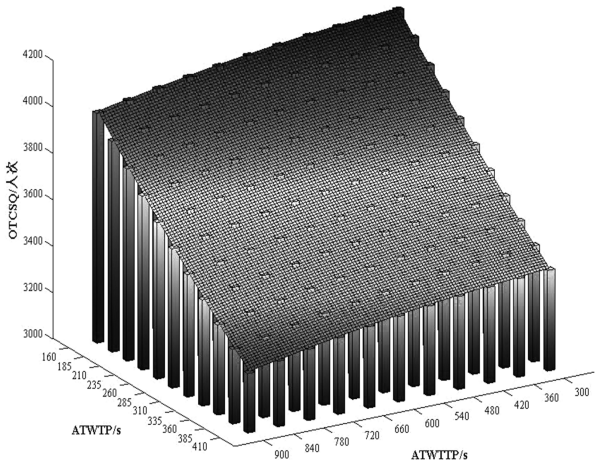


图 1 平峰运营时段下
ATWTP、ATWTTP 对 OTCSQ 的灵敏度分析

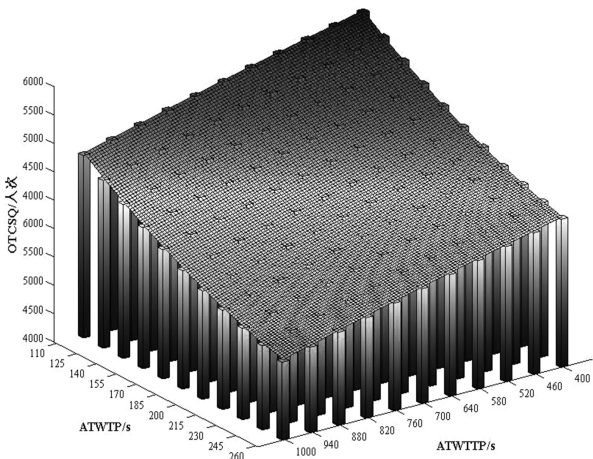


图 2 高峰运营时段下
ATWTP、ATWTTP 对 OTCSQ 的灵敏度分析

4 结论

为弥补现有研究的不足,论文构建了考虑旅客运输服务质量影响的轨道交通系统总体运能计算方法,主要得出以下结论:

- (1)本文提出的 OTC 模型是一种优于传统系统总体运能计算方法的系统总体运能计算模型。其中,依托 OTC 模型构建的 OTCSQ 模型能够有效地将旅客运输服务质量对系统总体运能的动态影响转化为定量计算。
- (2)当优化目标为系统总体运能最大化时,就优化效果而言,提升城市轨道交通(地铁、轻轨等)单制式旅客的运输服务质量比提升跨制式换乘客流的运输服务质量更加有效。

参考文献:

[1] 孙霖. 上海市轨道交通网络规划建设思考与建议[J]. 中国市政工程, 2018(01): 73-75.

[2] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. Nature[J]. 2000, 407(603): 487-490.

[3] Hoogendoorn S, Daamen W. Microscopic pedestrian traffic data collection and analysis[J]. 2003, 3(2): 89-100.

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才一般项目(Q20222606)

作者简介:李文新(1991—),男,汉族,湖南邵东人,博士,讲师,研究方向:铁路运输组织优化。

* 通讯作者:熊晏(1993—),女,汉族,重庆人,硕士,研究方向:医学数据分析和处理。