

考虑定制公交及公交专用道的混合 逐日均衡模型

常玉林^{1,2,3}, 王逸杰¹, 王建⁴, 孙超^{1,2}, 张鹏¹, 徐文倩¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 南通理工学院汽车工程学院, 江苏南通 226002;
3. 东南大学城市智能交通江苏省重点实验室, 南京 211189; 4. 东南大学交通学院, 南京 211189)

摘要:为研究小汽车、常规公交、定制公交混合交通流中出行者的逐日路径选择行为及其对路网的影响,本文首先对3种出行方式的特征进行分析,同时考虑到公交专用道这一公交优先方式,将路段分为无公交专用道的路段和有公交专用道的路段,从而构建混合交通流下的道路阻抗函数,并基于此进一步运用交通网络理论建立混合逐日均衡模型。选取含有多OD对出行需求的路网进行了数值模拟,仿真结果表明:经验依赖程度对定制公交出行者的影响大于小汽车出行者;为路径设置公交专用道会提升定制公交的路径流量,但效果的显著性具有差距;常规公交出行者比例过大时可能会增加总出行时间,而定制公交所吸引的小汽车出行者比例越大越能降低总出行时间,且设置公交专用道是否能降低总出行时间与这两项比例的大小密切相关。

关键词:交通运输系统工程;混合逐日均衡;迭代加权算法;定制公交;公交专用道

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)11-3209-11

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221644

Day-to-day equilibrium model of mixed traffic flow considering customized bus and exclusive bus lane

CHANG Yu-lin^{1,2,3}, WANG Yi-jie¹, WANG Jian⁴, SUN Chao^{1,2}, ZHANG Peng¹, XU Wen-qian¹

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. College of Automotive Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of ITS, Southeast University, Nanjing 211189, China; 4. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To study the day-to-day route choice behavior of travelers under the mixed traffic flows of cars, conventional buses and customized buses and its impact on the traffic network, the characteristics of the three travel modes were analyzed first. At the same time, considering the exclusive bus lane as the public transit priority mode, the links were divided into links without exclusive bus lanes and links with exclusive bus lanes, so as to establish the link impedance function under mixed traffic flows. Based on the link

收稿日期: 2022-12-31.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB1600100); 国家自然科学基金项目(71801115); 中国博士后科学基金项目(2021M691311).

作者简介: 常玉林(1963-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 交通运输系统规划与优化技术. E-mail: ylchang@ujs.edu.cn

通信作者: 孙超(1990-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 城市交通网络建模. E-mail: chaosun@ujs.edu.cn

impedance function, the traffic network theory was further used to establish the mixed day-to-day equilibrium model. A traffic network with multiple OD travel demand was selected for numerical simulation. The simulation results showed that the influence of experience dependence on customized bus travelers is greater than that on car travelers. Setting exclusive bus lanes can improve the route flows of customized buses, but the significance of the effect is different under different circumstances. When the proportion of conventional bus travelers is too large, the total travel time of all travelers may increase, while the larger the proportion of car travelers attracted by customized buses, the lower the total travel time, and whether the setting of exclusive bus lanes will reduce the total travel time is closely related to the size of these two proportions.

Key words: engineering of communication and transportation; mixed day-to-day equilibrium; iterative weighted algorithm; customized bus; exclusive bus lane

0 引言

随着我国城市化进程的加快,城市规模不断扩张,城市人口大幅增长,城市交通需求也急剧上升。汽车拥有率和道路面积的不平衡增长导致交通拥堵在我国逐渐常态化,成为一线甚至二、三线城市的“顽疾”^[1]。由于公共交通具有运输效率高的优势,发展公共交通是缓解交通拥堵的一项重要手段。但是,常规公交具有一定的局限性。首先,常规公交线路固定,出行者无法自由选择最短路径,造成时间延误;其次,我国人口密度高,高峰时期的常规公交车内拥挤度高,恶劣的乘车环境对采用私家车通勤的群体不具备吸引力^[2]。因此,即使在政府对公交企业进行补贴、公交车票价已经降无可降的情况下,仍有相当一部分城市居民宁愿选择承担较高的通勤费用也不会选择常规公交作为通勤的选择。

受益于互联网的快速发展,定制公交近年来在中国逐渐涌现出来。这是一种新的需求响应型交通(Demand responsive transit, DRT)服务模式,旨在满足通勤需求,缓解高峰时期的交通拥堵^[3]。其“线路灵活”“一人一座”“点对点直达”的特点吸引了不少具有通勤需求又追求出行质量的市民。其对城市公交体系是一种补充和完善,并且已逐渐引起城市出行方式的变化。不同出行方式的路径选择行为影响路网交通流的演化,因此本文研究定制公交对城市居民的出行行为及城市路网的影响。

鉴于城市居民的通勤行为是动态、逐日发生的,由于外部因素的干扰以及网络自身的变化,交通流量会不断地发生改变,静态的交通分配模型

就不足以描述交通流量的震荡演化过程^[4]。因此,为了能更科学地刻画路网流量的演化过程以及路网均衡状态的特性,在对含有定制公交的混合流的研究中引入逐日动态路网建模方法。

近几十年来,为了深入了解网络交通流量的演变过程和用户均衡状态的可达性,学者们对逐日交通流量分配模型进行了大量的研究。在针对多类出行者的研究中,一些研究者考虑了路网信息的来源,例如,Zhou等^[5]假定部分出行者配备了先进出行者信息系统(Advanced traveler information system, ATIS)从而遵循确定性用户均衡原则,其余出行者遵循随机用户均衡原则,证明了两种出行者的相互作用会使路网最终演化至混合均衡状态;Zhang等^[6]考虑了来自朋友的社交互动信息对路径选择的影响,利用累计前景理论(Cumulative prospect theory, CPT)建立了基于朋友出行信息的逐日路径选择模型并进行了实验,结果表明较大的社交互动率并不一定会给个人或系统带来更好的路径选择结果。还有一些研究者考虑了出行者异质,例如,尹子坤等^[7]聚焦于出行者的信息偏好,在实验中发现,基于完全历史信息条件下被试者可由信息偏好系数均值被聚类为“平稳震荡型”“震荡下降型”“震荡上升型”;Lou等^[8]根据出行者性格和交通信息来源,将出行者分为保守型出行者、未配备ATIS的冒险型出行者、配备ATIS的冒险型出行者,在数值模拟中发现半途中的路径切换行为对动态系统的稳定性和冒险旅行者的平均旅行时间都有影响;刘诗序等^[9]设计了不同ATIS市场占有率下的行为实验,发现未配备ATIS的出行者的个体差异性比配备ATIS的小;常玉林等^[10]考虑了车联网环境下网

联车出行者对网联信息的服从度,建立了混合流量逐日均衡模型,并在仿真中发现遵从车联网信息出行者占比和对车联网信息的遵从程度为流量演变的主要影响因素。也有部分研究者考虑了不同出行方式下的逐日交通流量分配,例如,Wu等^[11]基于随机用户均衡模型,建立了双模式网络交通流量的逐日演化模型,通过调整燃油税率和公交出发量来指导出行方式的选择,从而调节汽车出行比例,提高公交服务质量;寇钊^[12]建立了公交—小汽车双模式交通收费—补贴动态优化模型,用于降低路网中的经济、环境总成本。

综上所述,现有的针对多类出行者的混合逐日交通流分配研究大多聚焦于小汽车和常规公交,而对定制公交考虑不足。实际上,除了提供新的交通方式,合理的交通管理措施也能有效缓解交通拥堵^[13]。在过去的几十年里,公交专用道(Exclusive bus lane, EBL)得到广泛的应用^[14]。鉴于定制公交是一种特殊的公共交通形式,它可以使用公交专用道出行。因此,公交专用道会对定制公交的路段出行时间产生影响,定制公交并不能被简单地处理为一个大容量的小汽车。相较于常规公交,定制公交单车运量较小,但线路选择更为灵活,所以现有的逐日交通分配模型并不能直接解决考虑定制公交及公交专用道的混合流逐日交通分配问题。因此,本文的主要贡献有:同时考虑定制公交及公交专用道,构建了不同路段的道路阻抗函数;引入逐日动态建模方法,提出了混合逐日均衡模型,并基于仿真结果探讨了3种交通流混合下的网络流量特性。

1 道路交通组成及其特征分析

本文主要研究机动车道上的交通流,机动车道的主要出行方式包括小汽车、常规公交和定制公交3种。为了便于研究,文中的出行方式用*i*表示:*i*=1为小汽车;*i*=2为常规公交;*i*=3为定制公交。

1.1 路权特征

本文涉及的路权为公交专用道,它是为了实现“公交优先”而被发明的。在本文的研究中,定制公交被认为和常规公交一样有权使用公交专用道,而小汽车只能行驶于常规车道。

1.2 路径选择特征

小汽车出行者可以根据他们对每条路径的认

知出行时间来调整他们的出行路径。

常规公交为城市居民提供稳定的交通运输服务,为了保持其可达性,它总是有密集的站点和固定的线路。因此,乘坐常规公交的出行者无法调整他们的出行路径。

定制公交具有点对点直达的特点,它将乘客从起点处接上运送至终点,而不必像常规公交一样坚持固定线路。因此,定制公交可以像小汽车一样对OD对之间的多条路径进行自由选择。

1.3 出行需求转化特征

道路网络中的交通流量是由出行需求产生的,每种出行方式的平均载客量和当量交通量换算系数均不相同^[15]。因此,OD对*w*上每种出行方式的交通流量可以写为:

$$x_w^{(i)} = q_w^{(i)} \cdot \frac{k^{(i)}}{N^{(i)}}, i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中: $q_w^{(i)}$ 为OD对*w*上方式*i*出行者的人数; $k^{(i)}$ 为方式*i*的当量交通量换算系数,可根据相关的规范文件或实际情况确定; $N^{(i)}$ 为方式*i*的平均载客量,基于公交载客量高的特点一般有 $N^{(1)} < N^{(2)}$ 、 $N^{(1)} < N^{(3)}$ 。此外,在高峰期间定制公交保持“一人一座”,而常规公交车内往往“人多于座”,则有 $N^{(2)} < N^{(3)}$ 。

2 考虑定制公交及公交专用道的混合逐日均衡模型

考虑一个交通网络 $G(N, A)$,其中*N*表示节点集合,*A*表示路段集合。路段 $a \in A$ 表示*A*中的一个路段。记*W*为OD对的集合, L_w 为OD对 $w \in W$ 的路径集合。

2.1 道路阻抗函数

道路阻抗,即路段行程时间(或距离、费用等)与路段交通负荷之间的关系,是出行者选择路径时必须考虑的因素,而路径选择的差异会导致路网中交通量分配的差异,所以道路阻抗对出行者和整个路网的效率具有重大意义,是交通分配和路网规划的基础。BPR路阻函数模型是国际上被运用最为广泛的基础模型^[16],本文所建立的道路阻抗模型也基于此进行改进。

本文考虑了公交专用道这一公交优先权方法。因此,路段再被分为两类——没有公交专用道的I类路段和有公交专用道的II类路段。因此,路段集合*A*可细分为两个子集*A*₁和*A*₂,分别

代表 I 类路段和 II 类路段的集合。

2.1.1 I 类路段的道路阻抗函数

在 I 类路段上,3种出行方式没有路权差异。它们的道路阻抗函数均可以表示为:

$$t_a^{(1)} = t_a^{(2)} = t_a^{(3)} = t_a^{\text{free}} \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a^{(1)} + x_a^{(2)} + x_a^{(3)}}{C_a} \right)^\beta \right], a \in A_1, \forall w \in W \quad (2)$$

式中: $t_a^{(1)}$ 、 $t_a^{(2)}$ 和 $t_a^{(3)}$ 分别为小汽车、常规公交和定制公交在路段 a 的出行时间; t_a^{free} 为路段 a 的零流出行时间; $x_a^{(1)}$ 、 $x_a^{(2)}$ 和 $x_a^{(3)}$ 分别为路段 a 上小汽车、常规公交和定制公交的交通量; C_a 为路段 a 的总容量; α 和 β 为校正参数,一般取 $\alpha = 0.15, \beta = 4$ [16]。

2.1.2 II 类路段的道路阻抗函数

现有的文献[17]与文献[18]提出了有公交专用道路段的道路阻抗函数,但均假设同一路段上各个车道的容量相等,且仅划一条车道作为公交专用道。此外,它们也并未考虑到公交车道内公交通流量过大的情况。因此,本文对有公交专用道路段的道路阻抗进一步建模。

(1) 公交通流量较小的一般情况下

在 II 类路段上,小汽车行驶于普通车道,其道路阻抗函数均可以表示为:

$$t_a^{(1)} = t_a^{\text{free}} \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a^{(1)}}{C_a - C_a^{\text{Bus}}} \right)^\beta \right], a \in A_2, \forall w \in W \quad (3)$$

式中: C_a^{Bus} 为路段 a 上公交专用道的容量。

常规公交和定制公交行驶于公交专用道,因此,其道路阻抗函数均可以表示为:

$$t_a^{(2)} = t_a^{(3)} = t_a^{\text{free}} \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a^{(2)} + x_a^{(3)}}{C_a^{\text{Bus}}} \right)^\beta \right], a \in A_2, \forall w \in W \quad (4)$$

(2) 公交通流量较大的特殊情况下

在式(3)(4)中,如果路段上有公交专用道,则默认常规公交和定制公交在公交专用道上行驶,而小汽车在普通车道上行驶。但当公交专用道上常规公交和定制公交的交通流量过大时,所计算出的常规公交和定制公交在公交专用道上的出行时间比小汽车在普通车道上的出行时间更长,这与“公交优先”背道而驰,也与实际情况不符。实际上,当公交专用道更加拥堵时,部分常规公交和

定制公交会转移到普通车道行驶,达到各车道出行时间相同的均衡状态。因此,为了获得实际的出行时间,必须进行修正。

具体方法是,当常规公交和定制公交只在公交专用道行驶时,若出行时间大于未设公交专用道的混行情况,则3种出行方式的实际路段出行时间按混行状态计算,即:

$$t_a^{(1)} = t_a^{(2)} = t_a^{(3)} = t_a^{\text{free}} \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a^{(1)} + x_a^{(2)} + x_a^{(3)}}{C_a} \right)^\beta \right], a \in A_2, \forall w \in W \quad (5)$$

联立式(2)和式(4),可得到“公交通流量较大”的判断条件为:

$$\frac{x_a^{(1)} + x_a^{(2)} + x_a^{(3)}}{C_a} \leq \frac{x_a^{(2)} + x_a^{(3)}}{C_a^{\text{Bus}}} \quad (6)$$

2.2 基于路径的逐日交通流分配模型

2.2.1 交通流量统计

出行者有多出行方式可供选择,不同出行方式的出行需求应转化为交通网络中的交通流。对于 OD 对 w ,若出行者中选择常规公交的比例为 λ_w ,剩余小汽车出行者中被定制公交所吸引的比例为 μ_w ,则每种出行方式的交通流量可以表示为:

$$x_w^{(1)} = Q_w (1 - \lambda_w) (1 - \mu_w) \frac{k^{(1)}}{N^{(1)}}, \forall w \in W \quad (7)$$

$$x_w^{(2)} = Q_w \lambda_w \frac{k^{(2)}}{N^{(2)}}, \forall w \in W \quad (8)$$

$$x_w^{(3)} = Q_w (1 - \lambda_w) \mu_w \frac{k^{(3)}}{N^{(3)}}, \forall w \in W \quad (9)$$

式中: $x_w^{(1)}$ 、 $x_w^{(2)}$ 和 $x_w^{(3)}$ 分别为 OD 对 w 上小汽车、常规公交、定制公交的当量交通量; Q_w 为 OD 对 w 上所有出行者的总人数。

2.2.2 路径选择模型

出行者根据路径出行时间选择路径,但在现实中,有一些不确定因素在出行中难以量化(如天气和连接条件)。此外,出行者所知道的关于整个交通网络的信息是不完整的,他们对路段时间的认知会出现一些错误。因此,出行者通常无法准确得知实际的路径出行时间,只能根据认知的路径出行时间选择出行路径。然而,实际路径出行时间与认知路径出行时间之间存在一定偏差。因此,第 t 天方式 i 出行者对路径 l 的认知出行时间可以表示为:

$\tilde{C}_{l,w}^{(i),t} = C_{l,w}^{(i),t} + \varepsilon, i = 1, 2, 3, \forall l \in l_w, \forall w \in W$ (10)
 式中: $C_{l,w}^{(i),t}$ 为第 t 天方式 i 出行者对路径 l 的认知出行时间确定项,也称为期望出行时间; ε 为认知出行时间的随机误差参数。

当路网中出行者的 ε 相互独立且服从平均值为 0 的 Gumbel 分布,方式 i 出行者在 OD 对 w 上有 n 条路径,基于选择具有最小出行时间的路径的原则,在第 t 天方式 i 出行者选择路径 l 的概率可表示为:

$$p_{l,w}^{(i)} = \frac{\exp(-\theta C_{l,w}^{(i),t})}{\sum_{k=1}^n \exp(-\theta C_{k,w}^{(i),t})}, i = 1, 3, \forall l \in l_w, \forall w \in W$$
 (11)

式中: θ 为衡量出行者对路径出行时间敏感性的参数。 θ 越大,出行者对路径出行时间的认知越精准,且路径选择的随机性越小。对应地, θ 越小,出行者对路径出行时间的认知越不精准,其路径选择的随机性越大。

2.2.3 期望出行时间逐日更新模型

出行者在第 t 天的期望出行时间可以通过其昨日的期望出行时间和实际出行时间进行更新^[19],前者可以写成后两者的加权和:

$$C_w^{(i),t} = \varphi C_w^{(i),t-1} + (1 - \varphi) \bar{C}_w^{(i),t-1} \quad (12)$$

$i = 1, 2, 3, \forall l \in l_w, \forall w \in W$

$$\bar{C}_w^{(i),t-1} = \delta_w^T c_w^{(i),t-1}, i = 1, 2, 3, \forall w \in W \quad (13)$$

式中: $C_w^{(i),t}$ 为第 t 天方式 i 出行者的路径期望出行时间集合; $C_w^{(i),t-1}$ 为第 $t-1$ 天方式 i 出行者的路径期望出行时间集合; φ 为出行者对自己过去经验的依赖程度, $0 < \varphi \leq 1$, 对应地, $(1 - \varphi)$ 为出行者对昨天实际出行时间的信任程度, φ 越大,出行者越依赖于自己过去的经验,相反, φ 越小,表示出行者越相信昨天的实际路径出行时间; $\bar{C}_w^{(i),t-1}$ 为昨日方式 i 出行者的实际路径出行时间集合; δ_w^T 为路径-路段相关系数矩阵的转置,路径与其经过的路段之间的相关系数为 1,路径与其不经过的路段之间的相关系数为 0; $c_w^{(i),t-1}$ 为昨日方式 i 出行者的路段实际出行时间集合。

综上所述,本文考虑定制公交及公交专用道的混合逐日均衡模型由式(2)~(13)组成。

2.3 求解算法

路径认知出行时间是路径选择的关键,因此本文采用基于路径的迭代加权算法进行求解,计算步骤如下:

步骤 1 初始化。设置 $t=1$ 以及迭代精度 σ ,当认知出行时间为自由流出行时间时,执行一次交通流量分配,由此获得小汽车和定制公交的初始路径流量集合 $f_w^{(1),1}$ 和 $f_w^{(3),1}$,并给出不随天数变化的常规公交路径流量集合 $f_w^{(2),1}$ 。

步骤 2 期望出行时间更新。令 $t=t+1$,计算昨天所有出行方式的实际出行时间 $\bar{C}_w^{(i),t-1}$,更新今天所有出行方式的期望出行时间集合 $C_w^{(i),t}$ 。

步骤 3 确定搜索方向。计算小汽车和定制公交的辅助路径流量 $\bar{f}_w^{(1),t}$ 和 $\bar{f}_w^{(3),t}$,并确定搜索方向 $\bar{f}_w^{(1),t} - \bar{f}_w^{(1),t-1}$ 和 $\bar{f}_w^{(3),t} - \bar{f}_w^{(3),t-1}$ 。

步骤 4 更新流量。计算今天新的实际交通流量 $f_w^{(1),t} = f_w^{(1),t-1} + (1/t) \bar{f}_w^{(1),t} - \bar{f}_w^{(1),t-1}$ 和 $f_w^{(3),t} = f_w^{(3),t-1} + (1/t) \bar{f}_w^{(3),t} - \bar{f}_w^{(3),t-1}$ 。

步骤 5 收敛性测试。若 $\| (f_w^{(1),t} - f_w^{(1),t-1}) / f_w^{(1),t-1} \| \leq \sigma$ 且 $\| (f_w^{(3),t} - f_w^{(3),t-1}) / f_w^{(3),t-1} \| \leq \sigma$, 则结束迭代; 否则, 返回到步骤 2。

3 数值模拟

3.1 网络简介

数值模拟采用如图 1 所示的 Nguyen-Dupuis 网络,该网络由 4 个 OD 对, 13 个节点, 19 个路段和 25 条路径组成。各 OD 对的路径及路段如表 1 所示,其中路径 5 和路径 20 为公交线路,沿线所有路段均设置公交专用道。各路段的特性数据如表 2 所示。

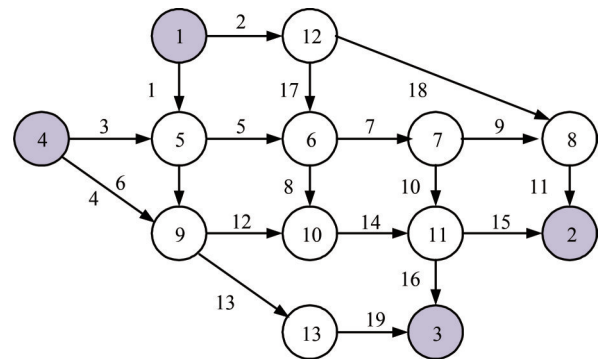


图 1 Nguyen-Dupuis 网络

Fig. 1 Nguyen-Dupuis network

3.2 结果分析

利用 Matlab2018b 进行仿真研究,道路阻抗函数参数取 $(\alpha, \beta) = (0.15, 4)$; 各方式平均载容量取 $(N^{(1)}, N^{(2)}, N^{(3)}) = (1.5, 30, 20)$; 同时根据

表 1 OD对路径-路段关系

Table 1 Association of OD pair-route-link

OD对	路径	路段
(1,2)	1	2-18-11
	2	1-5-7-9-11
	3	1-5-7-10-15
	4	1-5-8-14-15
	5	1-6-12-14-15
	6	2-17-7-9-11
	7	2-7-10-15-17
	8	2-17-8-14-15
(1,3)	9	1-5-7-10-16
	10	1-5-8-14-16
	11	1-6-12-14-16
	12	2-17-7-10-16
	13	1-6-13-19
	14	3-5-7-9-11
(4,2)	15	3-5-7-10-15
	16	3-5-8-14-15
	17	4-12-14-15
	18	4-12-14-15
	19	3-6-12-14-15
(4,3)	20	3-5-7-10-16
	21	3-5-8-14-16
	22	3-6-12-14-16
	23	4-13-19
	24	3-6-13-19
	25	4-12-14-16

表 2 路段特性数据

Table 2 Data of attributes of links

路段 编号	路段总容量 /(pcu·h ⁻¹)	公交专用道容量/ (pcu·h ⁻¹)	零流出行时间 /min
1	900	300	7
2	700	0	8
3	700	200	9
4	900	0	14
5	800	250	5
6	600	200	9
7	900	300	5
8	500	0	13
9	300	0	5
10	400	100	9
11	700	0	10
12	700	200	10
13	600	0	9
14	700	200	8
15	700	200	9
16	700	200	8
17	300	0	7
18	700	0	15
19	700	0	11

表 3 出行需求数据

Table 3 Data of travel demand

w	$Q_w/(人·h^{-1})$	λ_w	μ_w
(1,2)	3 200	0.4	0.3
(1,3)	800	0	0.2
(4,2)	600	0	0.2
(4,3)	2 000	0.4	0.3

《城市道路工程设计规范》^[20],取当量交通量转化系数($k^{(1)}, k^{(2)}, k^{(3)}$)=(1, 1.5, 1.5);取路径出行时间敏感性参数 $\theta = 0.9^{[10]}$ 。另外,仿真过程中的出行需求数据如表 3 所示。

3.2.1 φ 对实际路径出行时间的影响分析

基于本文所述模型,分析 φ 对实际路径出行时间的影响。同时测试 $\varphi = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 这 5 种情况下小汽车和定制公交在路径 20 的实际出行时间演化过程,如图 2 所示。

分别观察图 2(a)和 2(b)可知,随着 φ 的增大,曲线的波动逐渐放缓,这表明出行者越来越依赖自己的经验,调整路径的意愿越来越低。

对比图 2(a)和 2(b)可知, φ 的不同取值下,路网达到均衡状态时定制公交的实际路径出行时间具有明显差异,而小汽车的实际路径出行时间的差异相对较小。

观察图 2(b)可以进一步发现,当 $\varphi = 0.9$ 时,曲线在中后期的单调性与其他的曲线不一致,这

说明, φ 的取值能够改变实际路径出行时间演化的方向。

综上, φ 的取值对实际路径出行时间的演化频率、方向和均衡状态下的结果均具有影响,且对定制公交的影响大于小汽车。因此,选取适中的值 $\varphi = 0.5$ 进行下一步研究。

3.2.2 公交专用道对路径流量的影响分析

公交专用道的设置会带来小汽车与定制公交的路权差异,对两种方式出行者的路径选择产生影响,从而导致路径流量发生变化,现聚焦于 OD 对(1,2)和(4,3)研究公交专用道对路径流量的影响。

首先对 OD 对(1,2)进行研究,图 3 和图 4 展示了 OD 对(1,2)的部分路径上小汽车和定制公交流量演化过程。路径 5 是公交专用道所在路径,路径 1、2、3 是 OD 对(1,2)上流量主要所在路径。

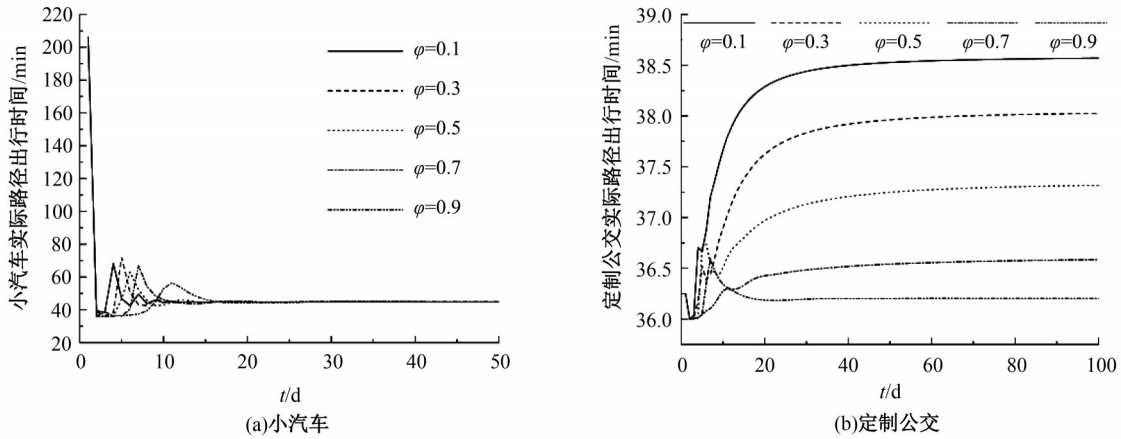


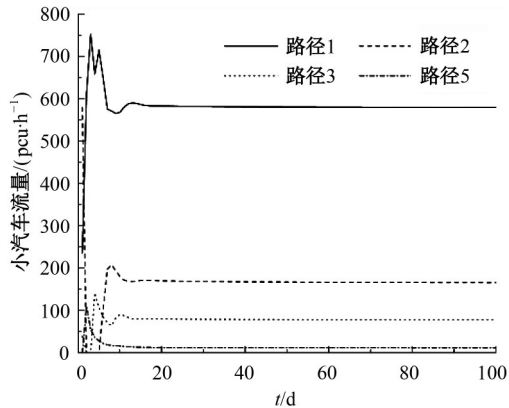
图 2 路径 20 的实际出行时间演化过程

Fig. 2 Evolution process of actual travel time on link 20

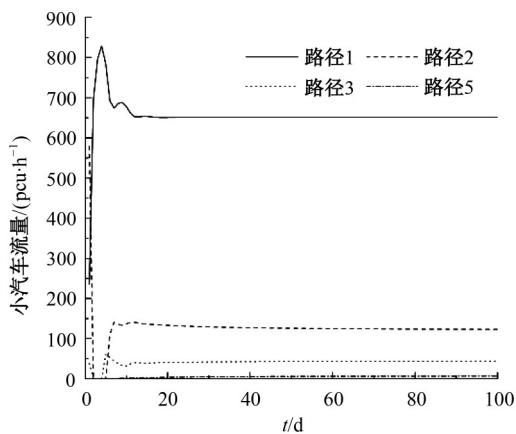
由图 3 和图 4 可知,小汽车与定制公交在路径 5 的流量总是极小的,这表明出行者都不愿意选择路径 5,设置公交专用道仍不能显著提升路径 5 对定制公交出行者的吸引力。

对比图 3(a) 和 3(b),可以发现这 4 条路径的

小汽车流量发生了变化,但排名顺序并未改变。而在图 4(a) 和 4(b) 中,设置公交专用道后路径 2 和路径 3 上的定制公交流量均超过路径 1。尤其是路径 3,其定制公交流量排名甚至从第三跃居第一。



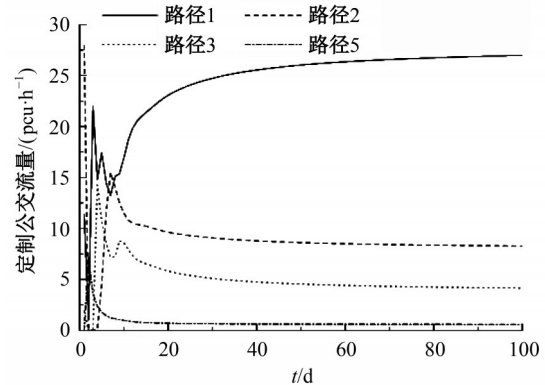
(a) 无公交专用道



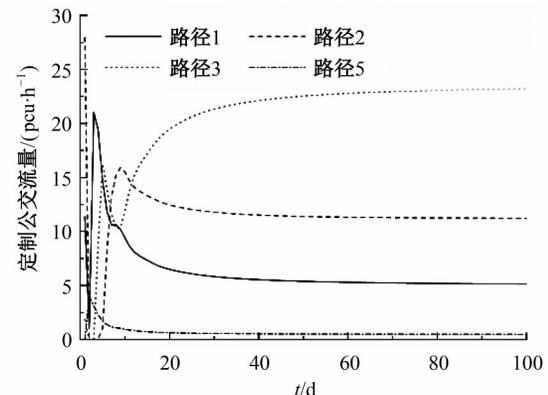
(b) 有公交专用道

图 3 OD 对 (1,2) 的部分路径小汽车流量演化过程

Fig. 3 Evolution process of car flows on partial routes of OD pair (1,2)



(a) 无公交专用道



(b) 有公交专用道

图 4 OD 对 (1,2) 的部分路径定制公交流量演化过程

Fig. 4 Evolution process of customized bus flows on partial routes of OD pair (1,2)

接着对 OD 对(4,3)进行研究,图 5 和图 6 展示了 OD 对(4,3)的部分路径上小汽车和定制公交流量演化过程。路径 20 是公交专用道所在路径,路径 23 是 OD 对(4,3)上流量主要所在路径。

由图 5 和图 6 可知,小汽车与定制公交在路径 20 的流量相对较小,而在路径 23 的流量相对较大,这表明路径 20 对出行者的吸引力小于路径 23。

对比图 5(a)和 5(b)可以发现,设置公交专用道对小汽车的路径流量曲线的改变主要在前期,演化至稳定状态后区别不大。然而对比图 6(a)和 6(b)可以发现,在未设置公交专用道之前,绝大部分定制公交出行者更倾向于选择路径 23,但在设置公交专用道后,部分定制公交出行者逐渐转移至路径 20,两条路径之间的定制公交流量差距明显缩小。

综上,公交专用道对定制公交路径流量的影响明显大于小汽车。此外,公交专用道能增加其

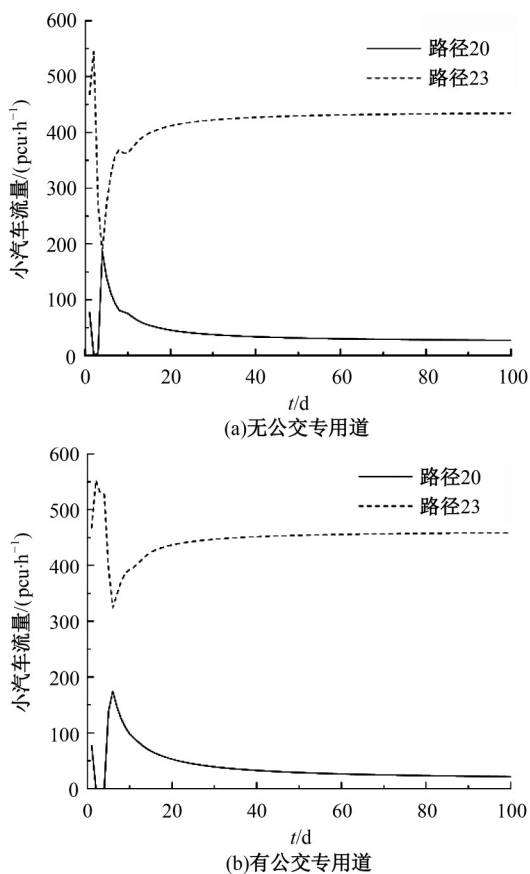


图 5 OD 对(4,3)的部分路径小汽车流量演化过程
Fig. 5 Evolution process of car flows on partial routes of OD pair (4,3)

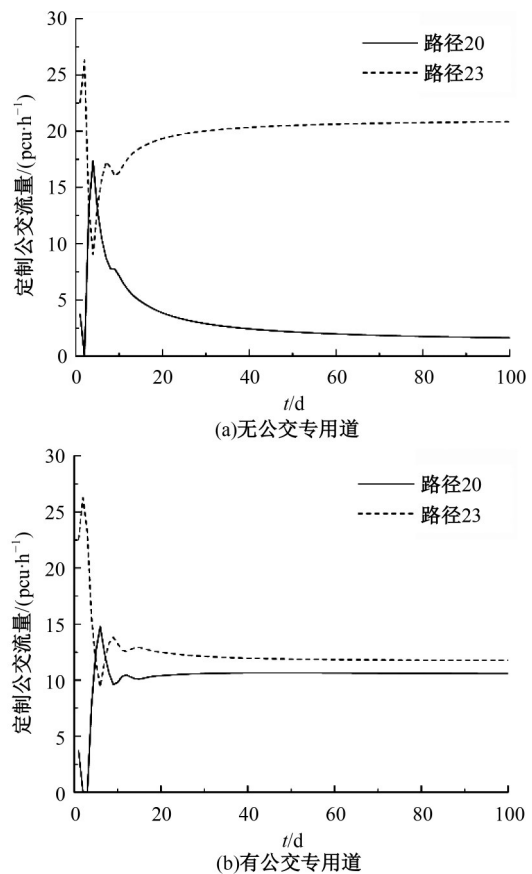


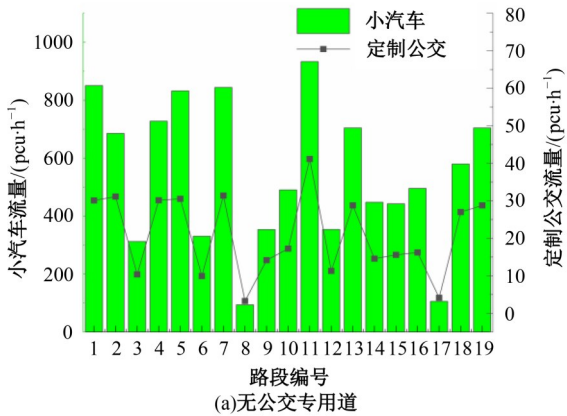
图 6 OD 对(4,3)的部分路径定制公交流量演化过程
Fig. 6 Evolution process of customized bus flows on partial routes of OD pair (4,3)

所在路径的定制公交流量,但效果的显著性是有差距的。对原本吸引力适中的路径(如路径 20)效果较好,能缩小定制公交在该路径上流量与最短路径上流量的差距,而对本身吸引力极低的路径(如路径 5)则效果不明显。

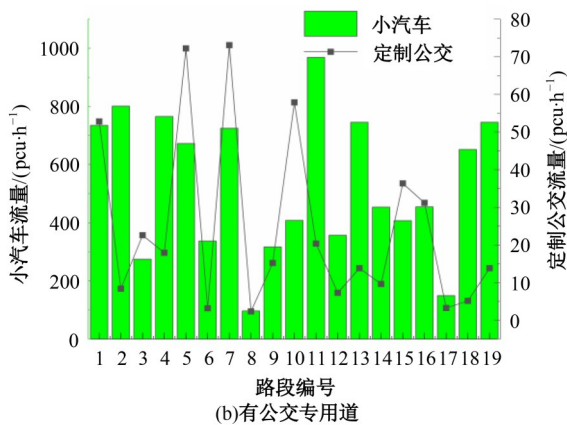
3.2.3 公交专用道对路段流量分配的影响分析

当出行者完成逐日的路径选择之后,图 7 展示了在第 100 天均衡状态下的小汽车和定制公交流量在各路段的分配结果。

比较图 7(a)和 7(b)可以发现,当路段 1、6、12、14、15(路径 5)和路段 3、5、7、10、16(路径 20)设置了公交专用道后,路段 1、3、5、7、9、10、15、16 上小汽车流量降低、定制公交流量升高,其余路段则相反。虽然路段 6、12、14、16 被设置了公交专用道,但是这些路段上的定制公交流量并未提升。这说明,当多个路段同时设置公交专用道时,由于各个路段的相互作用,其中部分路段的定制公交流量可能不增反降,而小汽车流量不降反增。因



(a)无公交专用道



(b)有公交专用道

图 7 均衡状态下各路段的流量

Fig. 7 Flows of each link under equilibrium status

此,在实际的交通管理中若碰到类似的情况,应对整个路网进行综合考虑,提前预测出有可能拥堵的路段。

3.2.4 λ 、 μ 和公交专用道对总出行时间的影响分析

公交专用道的设置,能够通过人为制造路权差距,牺牲小汽车出行者的出行时间来实现公交优先,但最终目标是提升路网的总运输效率。因此,只看部分路径或者部分出行者是片面的。现尝试探索不同取值的 λ 、 μ 以及是否设置公交专用道对路网中出行者总出行时间的影响。

图 8 展示了有、无公交专用道两种状态下,基于不同 $\lambda_{(1,2)}$ 和 $\mu_{(1,2)}$ 值到达第 100 日均衡状态时路网中出行者的总出行时间,曲面图为有公交专用道状态,柱状图为无公交专用道状态。可以发现, $\mu_{(1,2)}$ 的大小会影响最低点处 $\lambda_{(1,2)}$ 的值。随着 $\mu_{(1,2)}$ 从 0 增大,最低点时 $\lambda_{(1,2)}$ 的值从 1 逐渐转移至 0。这说明,常规公交具有运输效率高的特点,但由于其路径固定,不能很好地利用路网的道路资源,有

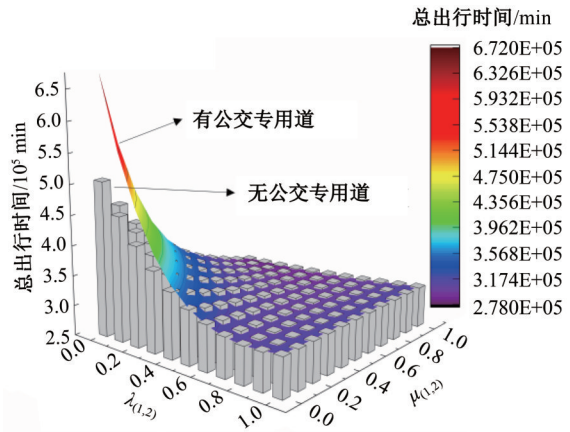


图 8 不同 $\lambda_{(1,2)}$ 和 $\mu_{(1,2)}$ 值下第 100 天时路网中出行者的总出行时间

Fig. 8 Total travel time of travelers in the traffic network under different values of $\lambda_{(1,2)}$ and $\mu_{(1,2)}$ on day 100

时 $\lambda_{(1,2)}$ 过大反而会对增加总出行时间,而不管 $\lambda_{(1,2)}$ 为何值,随着 $\mu_{(1,2)}$ 的增大,总出行时间总是下降的。这说明,由于定制公交单车运输效率高,小汽车又可以自由选择路径,其吸引的小汽车出行者的比例越高对降低路网中出行者的总出行时间总是有益的。

同时,通过比较有无公交专用道时曲面图与柱状图的高低,可以发现,当 $\lambda_{(1,2)}$ 和 $\mu_{(1,2)}$ 较小时,柱状图在下方,设置公交专用道对降低总出行时间具有负面效果,不适合设置;当 $\lambda_{(1,2)}$ 和 $\mu_{(1,2)}$ 较大时,曲面图在下方,设置公交专用道对降低总出行时间具有正面效果,适合设置。这说明,从整个交通网络的角度来看,公交专用道的设置并非在任何情况下总是有益的, λ 和 μ 的不同值对是否适合设置公交专用道具有影响。

平均载客量是体现公交运输效率高的重要参数,公交的高平均载客量是国家发展公交优先的重要原因。实际生活中,公交车辆的座位数并不统一,不同情境下公交对乘客的吸引力也具有差异。因此,为了加强算例结果的可信性,对图 8 中常规公交和定制公交的平均载客量进行调整,取 $N^{(2)} = 25$ 、 $N^{(3)} = 15$,重新仿真并绘制成图 9。比较图 8 和图 9 可以发现,当常规公交和定制公交的平均载客量降低后,本节之前所述的结论依然成立,但曲面图在部分 $\lambda_{(1,2)}$ 和 $\mu_{(1,2)}$ 值时反超柱状图,适合设置公交专用道的范围变得更窄。

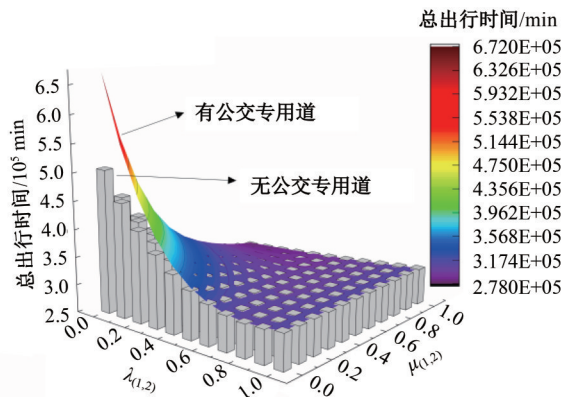


图9 不同 $\lambda_{(1,2)}$ 和 $\mu_{(1,2)}$ 值下第100天时路网中出行者的总出行时间($N^{(2)} = 25, N^{(3)} = 15$)

Fig. 9 Total travel time of travelers in the traffic network under different values of $\lambda_{(1,2)}$ and $\mu_{(1,2)}$ on day 100 ($N^{(2)} = 25, N^{(3)} = 15$)

4 结论

(1) 经验依赖程度的取值对各方式实际路径出行时间的演化方向和均衡状态下的结果均具有影响,且对定制公交的影响大于小汽车。

(2) 公交专用道能增加其所在路径的定制公交流量,但效果的显著性具有差距。对原本吸引力适中的路径效果较好,而对本身吸引力极低的路径则效果不明显。公交专用道对定制公交路径流量的影响大于小汽车。

(3) 当多个路段同时设置公交专用道时,其中部分路段上的定制公交流量可能不增反降,而小汽车流量不降反增。

(4) 常规公交出行者比例过大时总出行时间可能会增加,而定制公交所吸引的小汽车出行者比例增大时总出行时间总是减少,当这两项比例较大时,设置公交专用道对减少交通网络中所有出行者的总出行时间具有积极作用,反之则会产生负面效果。

(5) 本文研究表明,考虑定制公交及公交专用道的混合逐日均衡模型可用于研究路权差异下混合交通流的逐日演化特性及均衡状态下的分配结果,并可进一步为路段是否设置公交专用道提供参考依据。

参考文献:

[1] 卢文慧. 基于多视角的城市交通拥堵问题研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2019.
Lu Wen-hui. A multi-perspective study of urban traffic congestion[D]. Nanjing: School of Transporta-

tion, Southeast University, 2019.

[2] 李彬. 定制公交与定制公交客车的研究[D]. 西安: 长安大学汽车学院, 2013.

Li Bin. The study of customized city bus service[D]. Xi'an: School of Automobile, Chang'an University, 2013.

[3] Liu K J, Liu J M, Zhang J W. Heuristic approach for the multiobjective optimization of the customized bus scheduling problem[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2022, 16(3): 277-291.

[4] 沈旻宇. 随机用户均衡下考虑学习行为的逐日动态模型研究[D]. 成都: 西南交通大学交通运输与物流学院, 2016.

Shen Min-yu. Day-to-day flow dynamics with user learning under stochastic user equilibrium[D]. Chengdu: School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, 2016.

[5] Zhou B, Xu M, Meng Q, et al. A day-to-day route flow evolution process towards the mixed equilibria [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 82: 210-228.

[6] Zhang C, Liu T L, Huang H J, et al. A cumulative prospect theory approach to commuters' day-to-day route-choice modeling with friends' travel information [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 86: 527-548.

[7] 尹子坤, 关宏志, 李涛. 逐日路径演化中出行者信息偏好的实验分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(4): 234-240.

Yin Zi-kun, Guan Hong-zhi, Li Tao. Experimental analysis of diver's information preference under day-to-day traffic dynamics[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(4): 234-240.

[8] Lou X M, Cheng L, Chu Z M. Modelling travellers' en-route path switching in a day-to-day dynamical system[J]. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2017, 5(1): 15-37.

[9] 刘诗序, 王智煜, 关宏志, 等. 不同信息下的逐日路径选择行为实验与模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(6): 106-113.

Liu Shi-xu, Wang Zhi-yu, Guan Hong-zhi, et al. Experiment and model of day-to-day route-choice behavior under different information[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(6): 106-113.

[10] 常玉林, 徐文倩, 孙超, 等. 车联网环境下考虑遵从程度的混合流量逐日均衡[J]. 吉林大学学报: 工学

- 版, 2023, 53(4): 1085-1093.
- Chang Yu-lin, Xu Wen-qian, Sun Chao, et al. Day-to-day equilibrium of hybrid traffic considering obedience degree under internet of vehicles environment [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(4): 1085-1093.
- [11] Wu J, Ji Y, Sun X, et al. Guidance optimization of travelers' travel mode choice based on fuel tax rate and bus departure quantity in two-mode transportation system[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020(10): 1-10.
- [12] 寇钊. 双模式交通逐日演化模型和逐周干预策略研究[D]. 北京: 北京交通大学交通运输学院, 2021.
- Kou Zhao. Day-to-day traffic evolution model and week-to-week intervention strategies for bi-modal networks[D]. Beijing: School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, 2021.
- [13] Yao J, Shi F, Shi A, et al. Evaluation of exclusive bus lanes in a bi-modal degradable road network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 60: 36-51.
- [14] Zheng F, Chen J, Wang H, et al. Developing a dynamic utilisation scheme for exclusive bus lanes on urban expressways: an enhanced CTM-based approach versus a microsimulation-based approach[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(12): 1657-1664.
- [15] 四兵锋, 钟鸣, 高自友. 城市混合交通条件下路段阻抗函数的研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 35(1): 68-73.
- Si Bing-feng, Zhong Ming, Gao Zi-you. A link resistance function of urban mixed traffic network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 35(1): 68-73.
- [16] 陈旭, 陆丽丽, 曹祖平, 等. 道路阻抗函数研究综述[J]. 交通运输研究, 2020, 6(2): 30-39.
- Chen Xu, Lu Li-li, Cao Zu-ping, et al. Review of studies on road impedance functions[J]. Transport Research, 2020, 6(2): 30-39.
- [17] 陈芳, 龙建成. 基于双层规划的城市公交专用道优化设计[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2016, 39(3): 296-302.
- Chen Fang, Long Jian-cheng. Optimum design of city bus lane based on bi-level programming[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 39(3): 296-302.
- [18] 四兵锋, 杨小宝, 高亮. 基于系统最优的城市公交专用道网络设计模型及算法[J]. 中国管理科学, 2016, 24(6): 106-114.
- Si Bing-feng, Yang Xiao-bao, Gao Liang. System optimization based bus-lane network design model and algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(6): 106-114.
- [19] 刘诗序, 陈文思, 池其源, 等. 弹性需求下的网络交通流逐日动态演化[J]. 物理学报, 2017, 66(6): 12-26.
- Liu Shi-xu, Chen Wen-si, Chi Qi-yuan, et al. Day-to-day dynamical evolution of network traffic flow with elastic demand[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(6): 12-26.
- [20] CJJ 37—2012. 城市道路工程设计规范[S].