

城市交通拥堵的街区缓冲定价模型及其仿真^{*}

程铁信^{**} 潘菲 王海杰 陈敬柱
(天津工业大学管理学院,天津 300387)

摘要:随着城市机动车保有量的不断增长,城市主干路网供给能力出现严重不足,适当开放一些封闭街区并进行拥堵收费可以作为缓解主干路网交通压力的一项重要措施。针对城市主干路的交通拥堵问题,以区域路网车辆整体运行时间最短为优化目标,以缓冲街区的拥堵收费价格为决策变量,以交通弹性需求和动态分配以及缓冲街区路网饱和度等为限制条件,建立了缓冲街区定价优化模型,并给出了基于 VISSIM 软件的仿真求解流程。通过实例仿真结果表明,开放附近街区缓冲并采用模型给出的最优定价方案,既可以分担主干路部分车流从而保障了主干路通畅运行,又不超过缓冲区容量限制,提高了整体路网的运行效率。

关键词:城市交通;街区;交通拥堵;拥堵定价;VISSIM 仿真

中图分类号:U491 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2014.03.001

Congestion Charging Model for Traffic Buffer Block and Its Simulation Algorithm^{*}

CHENG Tiexin^{**} PAN Fei WANG Haijie CHEN Jingzhu
(College of Management, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387)

Abstract: Since the rapid rise of the automobile number, the city main road network capacity becomes more and more insufficient to satisfy the traffic demand. Therefore, some closed blocks should be opened and charged, which is used as the traffic buffer of the main road networks. A congestion charging model for the traffic buffer block was set up, in which the travel time of the vehicles in the selected road network was taken as the objective, congestion charge as the variable, and the demand elasticity, traffic flow dynamic distribution and buffer's road capacity as the constrained conditions. Then, the simulation algorithm based on VISSIM was given and applied to one case, which illustrated that the traffic buffer block can share the part traffic flow of the main roads effectively.

Key words: urban traffic; block; traffic jam; congestion charging; VISSIM simulation

1 引言

随着城市规模日益扩大,交通拥堵问题已成为城市管理者 and 人民群众心中亟待解决的关键问题。目前,让交通管理者较为尴尬的是,城市道路拓宽越多、道路桥梁修建越多,拥堵问题反而越严重。这一方面是由于汽车保有量的持续增加;另一方面也是由于驾驶员路径选择趋于一致性,缺少可替代的路径选择,从而造成大量车辆涌入主干路网导致交通拥堵。因此,提出开放街区缓冲的交通拥堵改善措施,即在不改变现存路网的前提下,通过使用街区穿行来达到交通分流的目的。这不仅可以缓解主干路网的交通压力,还能使街区的道路得以充分利用。这里的街区是指相对封闭的城市区域,如大学城、城

市广场等。倘若免费开放街区缓冲,势必吸引大量主干路车流穿行,破坏街区环境,因此开放缓冲区并进行合理定价收费,具有重要的现实意义。

虽然国内外很少有专家、学者明确提出针对街区缓冲定价的模型方法,但是在城市道路拥挤收费领域的研究中,却有很丰富的研究成果。学者们多使用双层规划模型进行交通拥堵定价研究,以便明确表示不同层次优化过程或不同决策系统之间相互作用的能力。在双层规划模型中,每层都有自身的目标函数,先由高层决策者确定决策变量值后,再由下层对自己能控制的决策变量进行优化,以达到最优目的^[1]。Wichiensin^[2]、韦增欣^[3]、李迪杰^[4]、郝生凤^[5]等学者均采用了双层规划模型进行路段定价,但模型中各层的优化目标以及求解算法不尽相同。Wichiensin 等在模型上层以社会剩余最大化为目标,下层以公共交通与私人交通的用户均衡为目标;韦增欣与李迪杰等以路网系统出行总成本最低为上层模型目标函数,下层以用户平衡分配条件下

2013-12-24 收稿,2014-02-14 接受

^{*} 国家社科基金重点项目(13ASH003),教育部人文社科青年基金项目(10YJC630031,11YJC630017)资助

^{**} 通讯作者,E-mail:tiexincheng@vip.sina.com;Tel:13920735605

的交通流量最优为目标,并分别采用了直接搜索法、相继平均值法对模型进行求解;郝生凤则基于用户剩余的角度,上层将整个系统的用户剩余最大作为目标函数,下层为用户的弹性需求 SUE 模型,认为出行需求是随着阻抗的变化而变化的,并设计了求解双层规划模型的遗传算法。

除此之外,还有许多学者从道路容量、博弈论等方面研究了定价方法。郭仁拥^[6]、肖海燕^[7]等建立了一个交通流量动态演化、收费水平和路段通行能力联合决策的最优控制理论模型,旨在使系统的总收益最大。但是此研究涉及到路网拓扑结构的改变,而改变路网结构需要大量道路修建经费。朱广芹^[8]等针对用户之间的出行、管理者和用户之间的拥挤收费进行了博弈分析,设计了基于博弈模型的拥挤收费算法。Dušan Teodorović^[9]、Hong K Lo 等^[10]建立了车流量与收费价格的关系模型,从动态的角度以神经网络等方法求解。根据出行需求是否确定,Meng Qiang 等^[11]提出了考虑弹性需求、非对称路段行程时间等变量的基于概率的随机用户平衡定价模型。Yang Hai 等^[12]建立了一个在路段行程时间和出行需求不确定的情况下的定价模型,总目标为使道路流量达到期望水平。

综上,本文以路网车辆整体运行时间最短为优化目标,以弹性需求和交通流动态分配以及缓冲区路网饱和度等为限制条件,进行城市交通街区缓冲定价。

2 缓冲区定价优化模型

缓冲区收费的目的是在路网中的主干路出现拥堵时,通过进入缓冲区来缓解拥堵。但由于缓冲区的容量有限,需要通过合理定价来控制进入缓冲区的车流量。采取缓冲区开放收费策略既能分担拥堵主干路上的部分交通流量,又不会影响缓冲区出行环境,从而实现流量均衡及路网整体运行时间最短的优化目标。

2.1 模型目标

缓冲区收费定价优化模型的目标函数如下:

min T = \sum_l t_l = \sum_l t_0 [1 + \alpha (\frac{q_l}{C_a})^\beta] \tag{1}

其中, T 为路网车辆行驶时间; t_l 为 l 路段上的车辆行程时间,包括路段上自由行驶时间和拥堵状况下的排队时间; t_0 为路段自由行使时间; \alpha, \beta 为模型参数,建议取值分别为 0.15 和 4.0; q_l 为 l 路段的车流

量; C_a 为路段实际通行能力,可查表获得。

2.2 决策变量

缓冲区收费定价优化模型的决策变量为 x_l, 表示 l 路段上的行驶费用,即模型要确定出的缓冲区收费价格。目标函数中 q_l 是关于 x_l 的函数,具体关系在模型约束条件中给出。

2.3 模型约束条件

对于城市交通路网,模型约束条件如下:

st. \begin{cases} d_l = \frac{q_l}{C_a} & \text{①} \\ q_l = Q \times P(R_l) & \text{②} \\ P(R_l) = \frac{e^{-r \log c_l}}{\sum_p e^{-r \log c_l}} & \text{③} \\ c_l = a s_l + b x_l & \text{④} \\ d_l \leq \psi & \text{⑤} \\ \bar{d} \leq \mu & \text{⑥} \\ S \leq \sigma & \text{⑦} \\ x_l \geq 0 & \text{⑧} \end{cases} \tag{2}

约束条件中,

1) d_l 为 l 路段的饱和度; q_l 为 l 路段的车流量; C_a 为路段实际通行能力。

2) Q 为 OD 总出行需求量,可通过实测或预测获得; P(R_l) 为出行者选择路段 l 的概率。

3) c_l 为 l 路段上的路阻函数; r 为敏感系数(一般城市路网 3.5 左右); 用 p 表示一条以 O 为起点, D 为终点的路径, p 由 l_1, l_2, \dots, l_m 连接而成得到。该公式为改进的 Logit 模型——Kirchhoff 分布模型。此模型相比传统的 Logit 模型,更适用于解决交通流动态分配问题。

4) s_l 为 l 路段上的行驶距离; x_l 为 l 路段上的行驶费用; a、b 为参数。

5) d_l 含义同上; \psi 为饱和度阈值。一般来讲,主干路取 \psi = 0.85, 这是因为饱和度超过 0.85 后服务质量很差。缓冲区内路段取 \psi = 0.65, 因为车辆进入缓冲区不能影响缓冲区出行环境。

6) \bar{d} 为路网平均饱和度,即 \bar{d} = \frac{1}{n} \sum_l d_l; \mu 为路网饱和度阈值,建议取值 0.4; 全局路网饱和度也需要达到可接受范围。

7) S 为饱和度方差,即 S = \frac{1}{n} \sum_l (d_l - \bar{d})^2; \sigma

为路网饱和度方差阈值,建议取值 0.05。

8) x_l 含义同上,表示缓冲区收费价格。

3 仿真求解步骤

鉴于本文所建立模型为非线性规划,采用 VIS-SIM 软件进行仿真求解。由于研究对象是离散的、随机的、非线性的,仿真求解虽然精确度有所降低,但结果完全可以满足精度要求,且求解过程大大简化。在 VISSIM 仿真中,被仿真事件在时间上是离散的、随机的,通常以机动车流为研究对象,以时间驱动来描述每一步长值内所有车辆的动态状况,用来逼近描述研究者所关注的仿真评价参数。本文所建模型的 VISSIM 仿真求解具体步骤如图 1 所示。

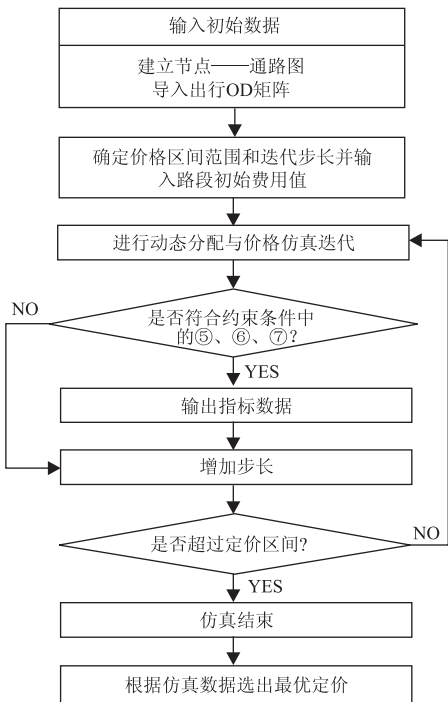


图 1 VISSIM 仿真求解流程
Figure 1 The flow chart of the VISSIM simulation

4 实例分析

4.1 路网仿真模型建立

天津大学和南开大学处于由鞍山西道、卫津路、复康路、白堤路四条城市主干路组成的相对封闭的城市区域内(其路网如图 2 所示),其内部路网与各条城市主干路连接通畅,可以作为街区缓冲区进行交通分流。本文以该缓冲区为仿真对象,通过模拟开放该缓冲区,收取适当的费用,以在保障缓冲区内正常出行环境的同时,分担干路上部分车流量,缓解交通压力。

4.2 高峰时间封闭缓冲区的交通仿真分析与评价

由于在交通流高峰时间下发生交通拥堵的几率大,故此本文选取交通流高峰状态时间内的一个小时进行交通模拟仿真,仿真模拟输出如图 2 所示,输出数据详见表 1。

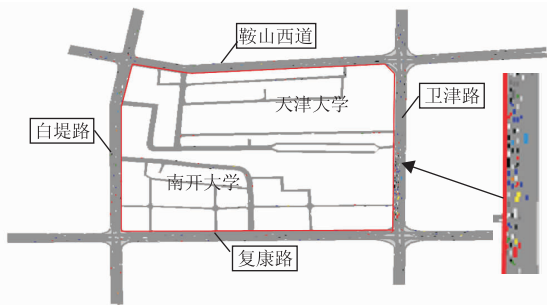


图 2 高峰时段封闭缓冲区交通仿真模拟图
Figure 2 The traffic simulation diagram of buffer closed during a peak time

表 1 高峰时间封闭缓冲区仿真输出数据

OD 名称	运行时间 (S)	平均行驶速度 (km/h)
鞍山西道 - 卫津路	913.4	13.4
鞍山西道 - 复康路	1 285.7	11.2
鞍山西道 - 白堤路	1 318.8	10.1
卫津路 - 复康路	1 345.8	10.7
卫津路 - 白堤路	1 189.3	11.2
复康路 - 白堤路	1 268.6	10.5
整体路网	5 321.6	11.4

由图 2 可看出,在上下班高峰时段,缓冲区周围路网的拥堵现象十分明显,以卫津路最为突出。

由表 1 可知主干路网的平均速度为 11.4 km/h,远远低于车辆行驶的正常速度,处于路网服务水平的最低级别 F 水平(可参阅表 3),影响了出行者的正常通行。

4.3 高峰时段开放缓冲区的交通仿真分析与评价

鞍山西道、卫津路、复康路以及白堤路是天津市交通路网的主要组成部分,高峰时段发生交通拥堵很容易导致该区域路网的不畅通甚至堵塞。为了缓解这一区域高峰时段的交通拥堵状况,应实行开放缓冲区并制定合理收费策略。关于定价收费策略,可从实际情况和方便收费的角度出发,对于车辆进入缓冲区的收费价格进行取整数处理。因此,采用 VISSIM 软件分别从 1 元起始,每次步长为 1 逐步累加作为收费价格进行仿真模拟,发现当缓冲区收费为 1 元时,大量主干路上的车流进入缓冲区,造成缓冲区的拥堵。虽然缓解了主干路上的交通拥堵状况,但是造成缓冲区内的拥堵是不可取的。当收费

为 5 元时,很少有车辆选择进入缓冲区,主干路上出现严重拥堵,缓冲区没有起到分担主干路车流的作用,故 5 元之后的收费方案均舍去。因此,下文将主要探讨对比定价分别为 2、3、4 元时候的路网整体运行时间。分别在 VISSIM 中改变路段价格,输出运行时间、平均行驶速度、路网整体运行时间和路网平均行驶速度四个指标数据。定价方案分别为 2、3、4 元时,进行仿真模拟的输出数据如表 2 所示,其中定价为 3 元的交通仿真模拟如图 3 所示。

表 2 高峰时间开放缓冲区不同收费价格仿真输出数据

Table 2 The simulation output data of buffer charging in three different price during a peak time

定价方案 OD 名称	2 元		3 元		4 元	
	运行 时间 (S)	平均行 驶速度 (km/h)	运行 时间 (S)	平均行 驶速度 (km/h)	运行 时间 (S)	平均行 驶速度 (km/h)
鞍山西道 - 卫津路	210.3	47	221.5	39.2	658.4	18.1
鞍山西道 - 复康路	304.2	46	359.2	37	967.8	16.4
鞍山西道 - 白堤路	169.8	49	198.2	41.5	874.2	19.2
卫津路 - 复康路	279.3	48	268.6	36.1	804.2	18.3
卫津路 - 白堤路	245.1	47	374.3	35.7	918.1	17.3
复康路 - 白堤路	267.9	52	328.1	40.6	625.9	21.4
整体路网	2 184.8	28.2	1 779.9	38.4	4 848.6	19.5

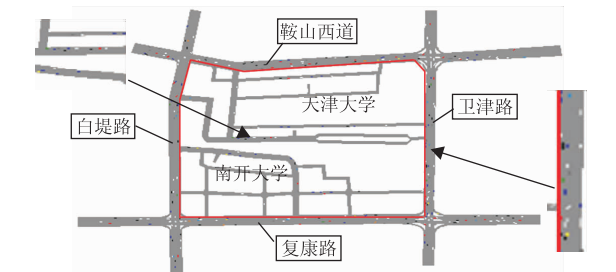


图 3 高峰时间开放缓冲区定价为 3 元时交通仿真模拟图

Figure 3 The traffic simulation diagram of buffer charging for 3 yuan during a peak time

由图 3 可看出,在上下班高峰时段,缓冲区明显起到了分担主干路车流的作用,缓冲区内内部路网车流量适当增加,整体路网车流量运行均衡,没有产生拥堵现象。

4.4 结果分析

从表 2 中得知,定价为 2 元时,主干路速度明显提升,但整个路网平均行驶速度却有所下降,这是由于缓冲区内部造成了拥堵,导致路网行驶速度缓慢,故不是合理定价;定价为 3 元时,整体路网流量均衡,速度提升到 38 km/h,服务水平由原来的 F 级提升到 C 级(服务水平等级可参照表 3),此定价方案较为满意;定价为 4 元时,部分车辆不愿意进入缓冲区,选择在主干路上等待,速度虽然较封闭缓冲区时提升了 8 km/h,但整体路网服务水平没有提升一个

级别,因此该定价方案无实际意义。故而,缓冲区定价选择 3 元。

表 3 城市道路服务水平分级速度表

Table 3 Classification of urban road service level

城市街道等级 服务水平	平均行程速度/(km/h)			
	快速路	主干路	次路	支路
A	>72	>59	>50	>41
B	>56 - - 72	>46 - - 59	>39 - - 50	>32 - - 41
C	>40 - - 56	>33 - - 46	>28 - - 39	>23 - - 32
D	>32 - - 40	>26 - - 33	>22 - - 28	>18 - - 23
E	>26 - - 32	>21 - - 26	>17 - - 22	>14 - - 18
F	≤26	≤21	≤17	≤14

5 结论

本文建立了街区缓冲定价优化模型,在考虑交通弹性需求和缓冲区饱和度的基础上,通过对交通流高峰状态下的拥堵区开放缓冲区,并模拟缓冲区定价收费,从而达到分担主干路车流,均衡整体路网车流量的目的,解决了主干路交通拥堵问题,同时使缓冲街区的道路得到充分利用。通过实际数据分析可以发现,虽然该仿真结果精度有待提高,但已能满足当前需求,且仿真技术的应用不仅降低了模型求解的难度,而且增加了可操作性,具有图形化、可视化的优点,能够直观、方便地为交通管理部门制定决策方案提供依据,具有良好的实际应用价值。

参考文献

[1]王平.城市交通拥挤收费的关键问题研究[D].成都:西南交通大学,2010.

[2]WICHIENSIN M,BELL M G H,YANG H. Impact of congestion charging on the transit market: An inter-modal equilibrium model[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice,2007,41(7): 703-713.

[3]韦增欣,陈进来,赵秋梅.弹性需求下广义用户均衡分配的拥挤收费定价模型[J].统计与决策,2011,(11):19-22.

[4]李迪杰.城市道路拥挤收费模型研究[D].西安:长安大学,2010.

[5]郝生凤,董庆庆.基于用户剩余的双层拥挤收费模型及算法[J].交通标准化,2009,(17):72-75.

[6]郭仁拥,黄海军.道路收费和通行能力的联合最优控制理论模型[J].交通运输系统工程与信息,2007,(6):61-66.

[7]肖海燕,度巍.基于Logit模型的动态道路收费最优控制模型[J].交通科技,2011,(5):89-92.

[8]朱广芹,佟光霁,代磊磊.城市道路交通拥挤收费的博弈分析[J].系统工程理论与实践,2009,(7):147-152.

[9]TEODOROVIC D,EDARA P. A real-time road pricing system: The case of a two-link parallel network[J]. Computers & Operations Research,2007,34(1):2-27.

[10]LO H K,SZETO W Y. Road pricing modeling for hyper-congestion[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice,2005,39(7-9):705-722.

(下转第 225 页)

应力最大值为 5.42×10^2 kPa。

由图 5 可以看出,在坝体内部的竖向应力 S22 均显示为负值,初期坝 1~3 点的应力值分别为 50.9 kPa、20.6 kPa 和 32 kPa,在初期坝坝趾处出现较大压力,由于上游坡面水平推力的作用,坝踵压应力值有所下降,在初期坝下游坡面附近形成抗压条状区域。初期坝底面竖向最大应力值处于基底中部,达到 9.39×10^2 kPa,仍然满足地基抗压强度要求。图 6 中坝体内部的剪应力在 3、4 点出现应力集中,分别为 189 kPa 和 394 kPa,小于岩体的内聚力 600 kPa,满足抗剪强度要求。

4 结论

- 1) 无水工况和满水工况的静止土压力分别为 11 177.43 kN/m 和 5 588.71 kN/m,库仑主动土压力分别为 6 515.74 kN/m 和 2 824.36 kN/m。
- 2) 无水工况和满水工况下的静止土压力坝基面抗滑稳定安全系数 K' 分别为 3.80 和 2.32,库仑主动土压力基面抗滑稳定安全系数 K 分别为 4.47 和 3.82,皆大于规范规定的按抗剪断强度和按抗剪强度公式计算要求的安全系数。
- 3) 采用 ABAQUS 有限元软件计算得到的初期

坝最大水平应力为 3.26×10^2 kPa(堆石坝)~ 4.08×10^2 kPa(天然坝),在初期坝坝趾处出现较大的竖向压应力,坝体内部的剪应力在 3、4 点出现引力集中,分别为 189 kPa 和 394 kPa,皆小于岩体的抗压强度和内聚力,初期坝是稳定的。

参考文献

[1] 于斯滢,邵龙潭,刘士乙. 基于有限元极限平衡法的尾矿坝坝体稳定分析[J]. 岩土力学,2012,34(04):1 185-1 190.

[2] 王启耀,何仕朝,谢孔金. 御驾泉尾矿坝稳定性计算与分析[J]. 金属矿山,2012,(1):55-57.

[3] 王立彬,袁子有,侯攀,等. 某尾矿坝边坡稳定性计算与安全分析[J]. 有色金属(矿山部分),2012,63(5):52-56.

[4] 司悦彤,侯克鹏,梁强. 某尾矿库坝体稳定性分析[J]. 黄金,2013,(3):64-67.

[5] 王洪,盛建龙,邓静. 芙蓉坡尾矿库坝体稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分),2012,64(1):39-44.

[6] 楼建东,李庆耀,陈宝. 某尾矿坝数值模拟与稳定性分析[J]. 湖南科技大学学报,2005,20(2):58-61.

[7] 尹光志,魏作安,许江. 细粒尾矿及其堆坝稳定性分析[M]. 重庆大学出版社,2004.

[8] 魏宁,茜平一,张波,等. 软基处理工程的有限元数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(2):5 789-5 794.

[9] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京:中国建材工业出版社,2005.

(上接第 220 页)

[11] MENG Q, LIU Z, WANG S. Optimal distance tolls under congestion pricing and continuously distributed value of time[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48

(5): 937-957.

[12] YANG H, XU W, HE B, et al. Road pricing for congestion control with unknown demand and cost functions[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(2): 157-175.

作者简介

程铁信(1973-),男,教授,博士,主要研究方向:项目管理,城市交通组织;
潘 菲(1990-),女,硕士研究生,主要研究方向:城市交通组织;
王海杰(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向:城市交通组织;
陈敬柱(1973-),男,博士,讲师,主要研究方向:城市交通,地理信息系统开发。