

考虑碳排放成本的差异化停车券管理研究^①

于璐伊, 郑煜, 张小宁

(同济大学经济与管理学院, 上海 200092)

摘要: 给定允许公交车和轿车两种交通模式出行的双模式单起讫点的交通系统, 以瓶颈模型为基础, 考虑停车位的空间位置分布, 提出了两种停车券管理策略: 一是指定车位停车券策略; 另一是不定车位停车券策略. 两种形式均可以确保持券用户在停车场停车的权利, 但前者进一步限定了轿车停车的位置. 结合动态拥挤收费机制, 以最小化系统出行成本和交通系统碳排放成本为目标进行策略优化研究, 研究表明停车券管理策略可以消除停车位供给不足导致的停车竞争, 降低轿车出行成本. 此外, 指定车位停车券和动态拥挤收费的综合实施可以实现系统最优. 为了便于实施, 并考虑公众的可接受性, 只发放不定车位停车券也可以成为效率比较高的次优方案.

关键词: 差异化停车券; 碳排放成本; 瓶颈模型; 双模式交通系统

中图分类号: U491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2020)11-0047-12

0 引言

近年来, 城市私家车保有量快速增长, 然而土地资源的限制使得很多大城市都面临严重的停车位供给不足问题^[1]. 截至2015年底, 我国大城市的机动车保有量与停车位的平均比例约为1:0.8, 远低于发达国家的1:1.3, 停车位缺口超过5000万个^[2]. 解决“停车难”问题的传统办法是增加停车位的供给, 这种手段明显是不符合可持续发展要求的, 它不仅会牺牲更多的公用空间, 甚至会诱发更多新的机动车出行需求^[3,4]. “停车难”问题日益突出, 不仅会加重道路拥堵, 还会引发更严重的大气污染问题^[5]. 目前交通出行的碳排放量已经成为全球第二大碳排放源, 尤其当交通拥堵时, 车辆频繁制动和起动车会释放更多的二氧化碳^[6,7]. 为此, 人们考虑利用经济手段调节机动车的出行和停车需求, 这种手段可以将部分机动车出行需求转化为其他交通方式出行的需求,

对交通成本进行内部化处理, 从而缓解交通拥堵^[8,9].

在停车需求管理手段研究方面, 国内外学者主要提出了两种方法: 一是研究起步较早的停车收费, 它被学术界普遍认为是当下最简单有效的交通管理方法之一^[10,11]. Qian等^[12]考虑了包含两个停车场的交通网络模型, 提出根据停车场到目的地的通行时间计费的停车收费模式; Zhang和Zhu^[13]引入了用户可接受的停车费阈值概念, 并进而提出了考虑停车费阈值的路边停车收费机制. Lin和Yuan^[14]考虑了出行者们的动态学习效果, 基于进化博弈行为对用户出行模式选择的影响, 提出了动态停车收费控制模型.

Verhoef等^[15]将许可证的概念引入交通领域, 随后学者们开始了停车券管理研究. 通过给有轿车出行需求的通勤者们分配停车券, 提前确保出行者们在停车场停车的权利, 由此完全消除关于停车位的无谓竞争, 实现降低系统成本、缓解通

① 收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2020-01-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71890970; 71531011)

作者简介: 于璐伊(1995—), 陕西宝鸡人, 硕士生. Email: luyiyu13@163.com

勤者出行压力的目的. Zhang 等^[16]研究了多对一路网模型下的停车券管理问题,并提出可交易停车券对缓解交通拥堵和停车位竞争有积极影响; Yang 等^[17]重点考虑了停车券发放数量的优化问题,并认为当停车位供给水平超过某一阈值时,公开一部分停车位给未分配到停车券的用户的做法可以实现系统最优; Liu 等^[18]考虑了停车券的预留有效期,并证明对停车券设置合理的预留时长,可有效降低早高峰的排队延迟及用户出行成本.

现有的关于停车券管理的优化研究很少考虑交通系统对空气质量的影响,一般仅考虑最大化降低交通出行成本.其次,大部分研究一般会忽略停车位空间位置对用户停车行为及出行选择的影响,这无形中降低了策略优化结果的科学性.

本文在经典瓶颈模型的基础上,同时考虑轿车出行者从停车位到工作地的步行时间成本,提出了两种停车券管理策略:一是指定车位停车券策略;二是不定车位停车券策略.二者均可以保证持券用户在停车场停车的权利,但前者限定了轿车停车的具体位置.同时结合动态拥挤收费机制,以同时最小化交通出行成本和碳排放成本作为策略优化的目标函数,给出了4种交通管理策略的最优定价方案及用户均衡出行模式,为停车券管理的科学实施提供决策依据和理论支持,从而有效改善当下交通管理水

平,进一步提升社会效益.

1 模型建立

考虑单起讫点(单 OD)的交通系统,如图 1 所示.居民区 O 与工作地 D 之间允许公交和轿车两种出行方式,其中轿车行驶路径上有一处瓶颈路段,靠近工作地有一个包含 $n(n = 1, \dots, M)$ 个停车位的公共停车场.参照 Arnott 等^[19]关于停车场线性分布的假定,设停车位编号为 $1 \sim M$,且越靠近工作地,编号 n 越小.出行者每走过 1 个停车位所需时间为 w ,因此从停车位 n 步行到工作地的总时间为 wn .设 OD 之间总的出行需求为 D ,其中有车族总人数为 N_c ,则无车族总人数为 $D - N_c$.模型中时间价值的相关参数沿用了已有论文的假定.参照王景鹏和黄海军^[20]的研究,设有车族和无车族的单位时间价值(VOT)分别是 α_c 和 α_b ,根据实证经验存在 $\alpha_c > \alpha_b$.人们基于最小化自身交通成本,选择公交出行或驾车出行. T^c 和 T^b 分别表示轿车和公交的自由流通行时间 ($T^c < T^b$), $D(t)$ 表示瓶颈处的排队长度, s 表示瓶颈处的通行能力.系统中所有出行者的共同预期到达时间为 t^* .出行者的出行选择遵循用户均衡原则,即在达到用户均衡时,没有任何一个出行者能通过单方面改变某出行路径选择决策降低其出行成本.

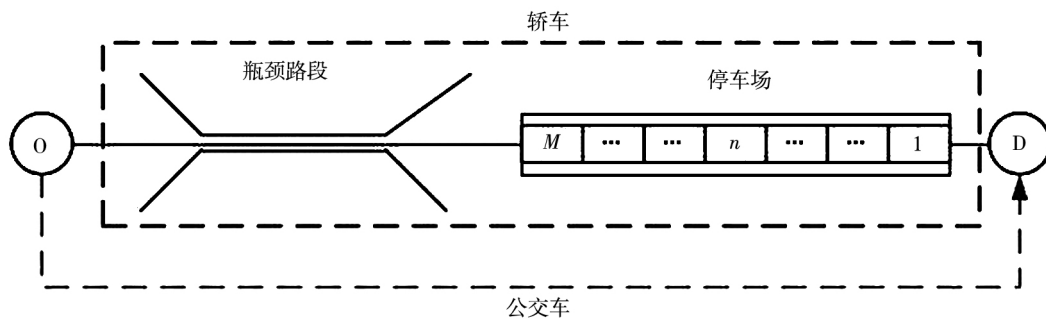


图1 双模式单 OD 交通系统

Fig. 1 One-to-one bi-modal transportation system

1.1 目标函数

假定交通管理的目标是同时降低系统出行总成本和碳排放成本.其中系统出行总成本应该表示为出行者们实际的通勤成本与政府通过交通管理(停车收费或道路拥挤收费等)获得的收入之差,因为这部分收入还可以通过其他方式重新分

配到社会中.策略优化的目标函数如下式

$$\begin{aligned} \min TC &= TTC + E \\ &= (D - N_c) P^T(D - N_c) + \\ &\quad N_c P^A(N_c) - TR + E \end{aligned} \tag{1}$$

式中 TC 表示社会总成本; TTC 和 E 分别表示系统出行总成本和碳排放成本; $P^T(\cdot)$ 和 $P^A(\cdot)$ 分

别表示公交和轿车的人均出行成本, TR 表示政府通过交通管理得到的总收入.

1.2 两种交通出行成本函数

参照图 1 的交通网络模型, 轿车出行费用包括行驶时间费用、瓶颈处排队费用、延迟时间费用和从停车位到工作地的步行时间费用, 函数表达式为

$$C(t) = \alpha_c T(t) + \lambda wn + \beta \max\{0, t^* - t - T(t) - wn\} + \gamma \max\{0, t + T(t) + wn - t^*\} \quad (2)$$

式中 $T(t)$ 表示 t 时刻从家出发到停车场的总行驶时间, 包括自由流通行时间和瓶颈路段的排队时间 $Q(t)$, 即 $T(t) = T^c + Q(t) = T^c + D(t)/s$; λ 是从停车场到工作地的单位步行成本; β 和 γ 分别是提前到达工作地和迟到的单位惩罚费用. 考虑到车速远远大于步行速度, 则用户开车进入停车场停车所花费的时间成本忽略不计. 为了保证模型的稳定性, 存在 $\gamma > \alpha_c > \beta > 0$; 此外 Zhang 等^[21]的研究指出相比于步行人们通常更愿意开车, 因此假定 $\lambda > \alpha_c$.

考虑公交出行的拥挤效应, 则公交出行费用函数表示为关于出行人数的增函数

$$P_i^T(\cdot) = p_b + \alpha_i T^b + \varphi N_i, i = c, b \quad (3)$$

式中 p_b 是公交票价, φ 是拥挤系数 ($\varphi > 0$). 表示 i 属性出行者中乘坐公交的总人数, 这是由于系统中有车族的出行需求可能无法都得到满足, 因此存在一定数量的有车族不得不乘坐公共交通. 另外假定公交车道的通行能力足够大, 因此乘坐公共交通的出行者不需要考虑计划延迟成本;

1.3 系统碳排放成本

参照 Wang 等^[22]的研究, 瓶颈模型的碳排放估算主要考虑两个时间段: 自由流通行时段和在瓶颈处的排队时段. 设 μ_c 和 μ_q 分别表示轿车自由流行驶和排队等待时的单位碳排放成本, 且存在 $\mu_q > \mu_c$; μ_b 表示公交车自由流通行时的单位碳排放成本, 且存在 $\mu_b > \mu_c$. 因此系统中轿车和公交车的碳排放成本可分别表示为

$$E_c = \mu_c N_c T^c + \mu_q TQ \quad (4)$$

$$E_b = \mu_b \frac{(D - N_c)}{\theta C} T^b \quad (5)$$

式中 TQ 为瓶颈路段总的排队时间, C 是公交车的容量; θ 是公交车上的平均占用率.

2 无停车管理策略下的双模式用户均衡研究

2.1 停车容量充足

停车容量充足时, 系统内所有机动车的停车需求均可以得到满足. 设第一辆轿车到达瓶颈处、停车场和工作地的时间分别为 t_1, t_3, t_5 , 最后一辆轿车对应的的时间分别为 t_2, t_4 和 t_6 . \hat{t} 表示恰好准时到达工作地的出行者到达瓶颈处的时间. 对式(2)关于停车位置 n 求导得到

$$\frac{dC}{dn} = \begin{cases} (\lambda - \beta)w > 0 \\ (\lambda + \gamma)w > 0 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知, 出行成本是关于停车位到工作地距离的增函数, 因此轿车出行者总是会选择距离工作地最近的停车位停车, 由此呈现出“顺序”的停车模式(即停车位按照编号由小到大的顺序被占满). 则 t 时刻到达瓶颈处的轿车的停车位置可表示为

$$n(t) = s(t - t_1), t_1 \leq t \leq t_2 \quad (7)$$

第一位和最后一位到达停车场的出行者分别在编号为 1 和 M 的停车位停车, 由此得到驾车出行者从停车场到工作地的到达率为 $r_3 = s/(1 + ws)$. 结合式(2)和式(7)进一步求得早到和晚到轿车出行者的出发率分别为 $r_1 = \alpha_c s / [\alpha_c - \beta + (\lambda - \beta)ws]$ 和 $r_2 = \alpha_c s / [\alpha_c + \gamma + (\lambda + \gamma)ws]$. 注意由于瓶颈处的拥堵排队长度一定会呈现先增加后减小的情况, 因此 $\lambda ws < \beta(1 + ws)$ 恒成立. 表示用户均衡条件下的轿车人均出行成本的表达式为

$$P^A(N_c) = \alpha_c T^c + \frac{\beta(\lambda + \gamma)}{\beta + \gamma} w N_c + \delta \frac{N_c}{s} \quad (8)$$

式中 $\delta = \beta\lambda / (\beta + \gamma)$.

此时人均公交车出行成本表示为

$$P^T(D - N_c) = p_b + \alpha_b T^b + \varphi(D - N_c) \quad (9)$$

设 $P^A(D) > P^T(0)$ 且 $P^A(0) < P^T(D)$, 此时均衡状态下系统中才可能同时存在选择轿车和公交车出行的通勤者, 避免资源浪费. 令 \bar{N}_c 表示

$P^A(N_c) = P^T(D - N_c)$ 的方程解,则在停车容量充足时,选择轿车出行和公交车出行的人数分别为 \bar{N}_c 和 $\bar{N}_b = D - \bar{N}_c$. 图2是轿车用户均衡出行

分布模式,其中 $\hat{N}_c = \frac{[\gamma + (\lambda + \gamma)ws]N_c}{(\beta + \gamma)(1 + ws)}$,表示

未迟到的轿车出行者总人数.

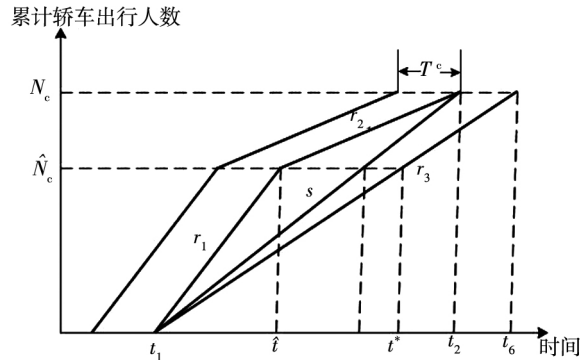


图2 停车容量充足时的轿车用户均衡出行分布模式

Fig.2 Passenger car equilibrium without parking space constraints

由图2可知,瓶颈处的总排队时间 TQ 为

$$TQ = \frac{1}{2} \frac{\bar{N}_c^2 [\beta - (\lambda - \beta)ws] [\gamma + (\lambda + \gamma)ws]}{2\alpha_c s (\beta + \gamma)(1 + ws)} \quad (10)$$

此时社会总成本为

$$TC = DP(D - \bar{N}_c) + \frac{\mu_q \bar{N}_c^2 [\beta - (\lambda - \beta)ws] [\gamma + (\lambda + \gamma)ws]}{2\alpha_c s (\beta + \gamma)(1 + ws)} + \mu_c \bar{N}_c T^c + \mu_b \frac{(D - \bar{N}_c)}{\theta C} T^b \quad (11)$$

2.2 停车容量不足

当停车位供给不足时,一部分有车族则不得不选择乘坐公共交通,此时公交车成本函数表示为

$$P^T(D - M) = p_b + \varphi(D - M) + \frac{\alpha_c(N_c - M) + \alpha_b(D - N_c)}{D - M} T^b \quad (12)$$

由于 $P^T(\cdot)$ 是严格递增函数,因此 $P^T(D - M) > P^T(D - \bar{N}_c)$,这意味着停车容量有限时,双模式用户均衡下的人均出行成本会增大. 设 $M^\#$ 表示当最后一个轿车出行者恰好准时到达工作地(即 $t_6 = t^*$)时,其对应的均衡状态下的停车位供给总数,该临界值可由下式求得

$$P^A(M) = \alpha_c T^c + \beta \frac{M}{s} + \beta w M = P^T(D - M) \quad (13)$$

图3展示了停车位供给不足时可能出现的轿车用户均衡出行模式,此时所有的轿车出行

者都会为了争抢停车位而不得不将出发时间提前.

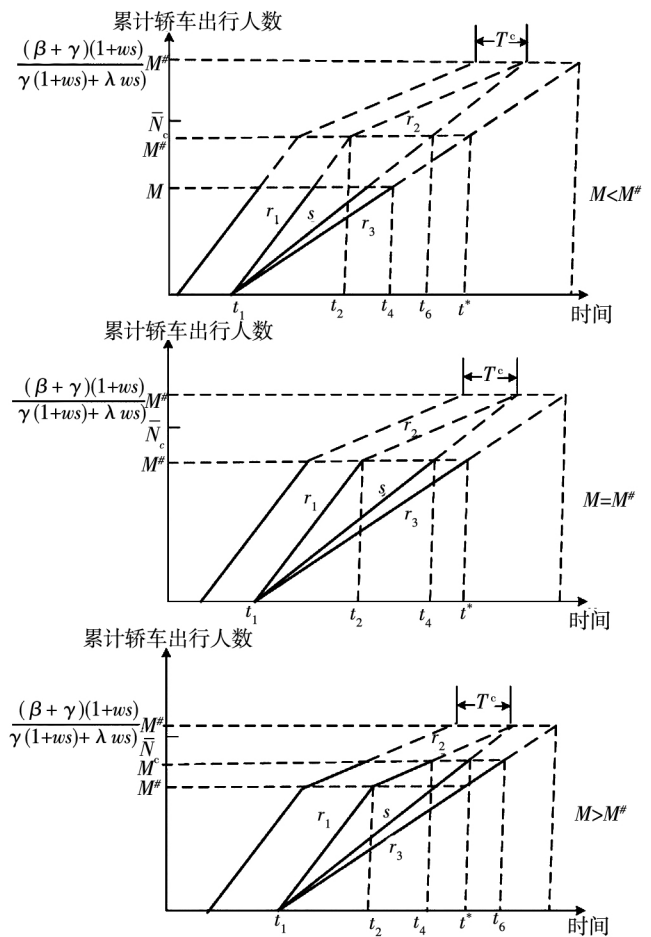


图3 停车容量不足时的轿车用户均衡分布模式

Fig.3 Possible scenarios of the passenger car equilibrium with parking space constraints

3 停车券管理策略研究

为了降低早高峰通勤者们的出行压力,使用户均衡出行分布趋于合理化,政府可以实行停车券策略严格控制路网上的轿车出行需求,缓解停车竞争.假定政府每天将 M 张停车券均等分配给系统中所有具有轿车出行需求的出行者 \bar{N}_c ,则每人每天平均分配到 M/\bar{N}_c 张停车券.政府通过发放停车券获得的收益可以被再次分配到社会中,从而进一步降低系统成本,实现效益最大化.

3.1 指定车位停车券策略

指定车位停车券对应某一具体停车位的使用权,拥有指定车位停车券的出行者必须将轿车停在规定的停车位.停车券的价格被设定为关于停车位位置的减函数,即 $\rho = f(n)$.考虑出行成本最小化,被分配到停车位编号越大,该持券用户出发时间越早,即停车位最远(M)的出行者最早出发.随着停车位(n)逐渐减小,人们从家出发的时间逐渐推后,整体表现出“逆序”(inwards)的停车顺序.停车位最近(1)的出行者最后出发.此时驾车出行者从停车场到工作地的到达率为 $r_4 = s/(1 - ws)$.

此时,在 t 时刻从家出发,且在停车位 n 处停车的停车券用户的个人出行成本为

$$C(t, n) = \rho(n) + \alpha_c T(t) + \lambda wn + \beta \max\{0, t^* - t - T(t) - wn\} + \gamma \max\{0, t + T(t) + wn - t^*\} \quad (14)$$

3.1.1 无拥挤收费情形下的用户均衡研究(方案 f)

图 4 是实行指定车位停车券策略时,轿车用户均衡出行分布情况(其中 $\hat{M}^f = \gamma M / (\beta + \gamma)$,表示在期望时间之前到达工作地的轿车出行者总人数).

对式(14)关于出发时刻 t 求导,得到指定停车券策略下早到和晚到的轿车出行者到达瓶颈路段的速率分别为 $r_1^f = \alpha_c s / (\alpha_c - \beta)$ 和 $r_2^f = \alpha_c s / (\alpha_c + \gamma)$.

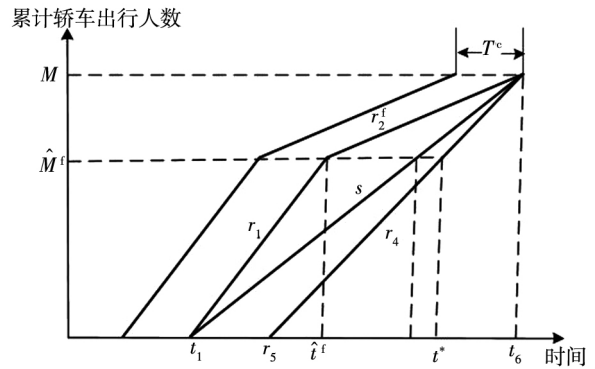


图 4 方案 f 对应的轿车用户均衡出行模式

Fig. 4 Passenger car equilibrium of regime f

对式(14)关于停车位置 n 求导,得到

$$\frac{dC}{dn} = \begin{cases} \frac{d\rho}{dn} + (\lambda - \beta)w, & \text{早到者} \\ \frac{d\rho}{dn} + (\lambda + \gamma)w, & \text{晚到者} \end{cases} \quad (15)$$

为了保证用户均衡,不同位置停车的出行者的个人出行成本相等,因此令 $dC/dn = 0$,则有

$$\frac{d\rho}{dn} = \begin{cases} -(\lambda + \gamma)w, & 0 \leq n \leq M - \hat{M}^f = \frac{\beta}{\beta + \gamma}M \\ -(\lambda - \beta)w, & \frac{\beta}{\beta + \gamma}M < n \leq M \end{cases} \quad (16)$$

假定 $\rho(M) = 0$,即分配到编号为 M 车位的停车券用户可以免费停车,由此得到指定车位停车券策略的最优定价方案(图 5)为

$$\rho(n) = \begin{cases} -(\lambda + \gamma)wn + \lambda wM, & 0 \leq n \leq \frac{\beta}{\beta + \gamma}M \\ -(\lambda - \beta)w(n - M), & \frac{\beta}{\beta + \gamma}M < n \leq M \end{cases} \quad (17)$$

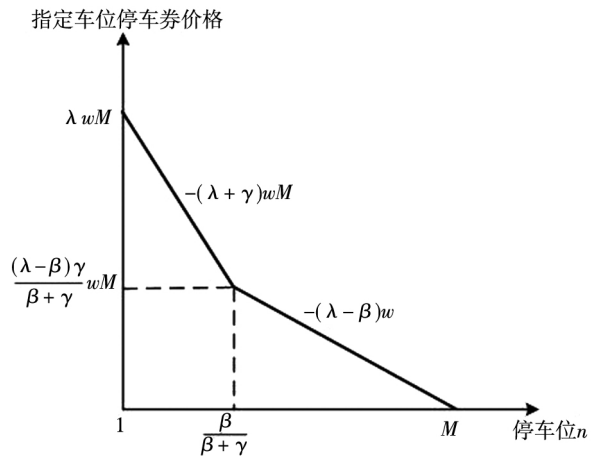


图 5 指定车位停车券策略的最优定价方案

Fig. 5 Optimal price schedule of the designated scheme

以在 \hat{t}^f 时刻到达瓶颈路段,在编号 \hat{M}^f 处停车,且准时到达工作地的轿车出行者为参照,计算轿车的人均出行成本,具体为

$$P_t^A(\hat{t}^f) = \alpha_c T^c + \frac{\delta M(1 - ws)}{s} + \lambda w M \quad (18)$$

减去通过停车券管理获得的总收入得到系统实际的出行总成本为

$$TTC^f = (D - M)P^T(D - M) + M\alpha_c T^c + \frac{\delta M^2}{s} + \frac{wM^2(\lambda - \delta)}{2} \quad (19)$$

根据图5得到瓶颈路段的排队时长为

$$TQ^f = \frac{\delta}{2} \frac{M^2}{\alpha_c s} \quad (20)$$

则系统碳排放成本为

$$E^f = \mu_c M T^c + \mu_b \frac{(D - M)}{\theta C} T^b + \mu_q \frac{\delta}{2} \frac{M^2}{\alpha_c s} \quad (21)$$

由此得到无拥挤收费时,指定车位停车券策略对应的系统总成本为

$$TC^f = TTC^f = (D - M)P^T(D - M) + M\alpha_c T^c + \frac{\delta M^2}{s} + \frac{wM^2(\lambda - \delta)}{2} + \mu_c M T^c + \mu_b \frac{(D - M)}{\theta C} T^b + \mu_q \frac{\delta}{2} \frac{M^2}{\alpha_c s} \quad (22)$$

3.1.2 动态拥挤收费下的用户均衡研究(方案r)

瓶颈处的排队延迟事实上是种无谓损失^[23]. 动态拥挤收费机制是针对不同时刻通过瓶颈路段的停车券用户收取不同水平的拥挤费,这种管理机制可以完全消除瓶颈路段的排队延迟成本. 设 $\tau(t)$ 表示 t 时刻通过瓶颈处的轿车用户被征收的拥挤费用,则轿车个人出行成本表示为

$$C^r(t, n) = \rho(n) + \alpha_c T^c + \tau^r(t) + \lambda w n + \beta(t^* - t - T(t) - wn) + \gamma \max\{0, t + T(t) + wn - t^*\} \quad (23)$$

图6是方案r下持有指定车位停车券的轿车用户的均衡出行分布模式.

不同时刻通过瓶颈路段被征收的动态拥挤费用如下式所示

$$\tau^r(t) = \begin{cases} \beta(\hat{t}^r - t_1) & t_1 \leq t \leq \hat{t}^r \\ -\gamma(t_2 - \hat{t}^r) & \hat{t}^r < t \leq t_2 \end{cases} \quad (24)$$

图7反映了方案r对应的动态拥挤收费策

略. \hat{t}^r 时刻为恰好准时到达工作地的轿车到达瓶颈路段的时间,由于拥挤排队被消除,因此也等于其通过瓶颈路段的时间.

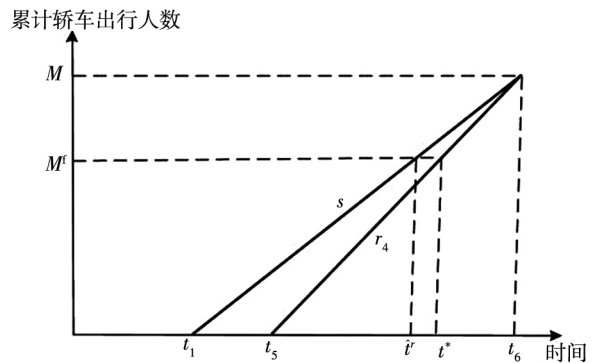


图6 方案r对应的轿车用户均衡出行模式

Fig. 6 Passenger car equilibrium of regime r

方案r下的拥挤收费水平

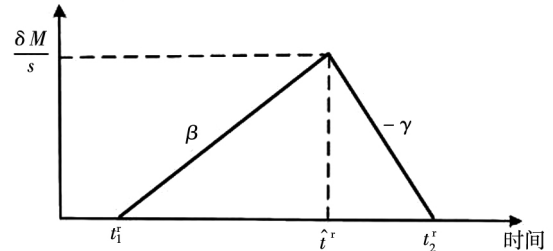


图7 方案r下的动态拥挤收费机制的定价策略

Fig. 7 Optimal road toll schedule of regime r

此时政府的交通管理收益来源于两部分,一是道路拥挤收费,二是停车券费用.因此社会出行总成本 TTC^r 会进一步降低,具体为

$$TTC^r = (D - M)P^T(D - M) + M\alpha_c T^c + \frac{\delta M^2}{2s} + \frac{wM^2(\lambda - \delta)}{2} \quad (25)$$

由于瓶颈路段的排队延迟被消除,即 $TQ^r = 0$,则该方案下系统总成本 TC^r 为

$$TC^r = (D - M)P^T(D - M) + M\alpha_c T^c + \frac{\delta M^2}{2s} + \frac{wM^2(\lambda - \delta)}{2} + \mu_c M T^c + \mu_b \frac{(D - M)}{\theta C} T^b \quad (26)$$

3.2 不定车位停车券策略

不定车位停车券赋予了用户在停车场停车的权利,但并不限定用户停车的位置;因此不定车位停车券的价格可设为某一常量 ρ ,停车位置 n 需要根据轿车出行者到达停车场的确定.为了保证双模式用户均衡,不定车位停车券的合理定价水平应该等于人均公交车出行成本与轿车实际

行驶产生的成本之差,它反映了相比于乘坐公交车出行或不得不争抢停车位这两种情况,停车券策略给轿车出行者们带来的效益。

不定车位停车券策略下的轿车出行成本为

$$C(t) = \rho + \alpha_c T(t) + \lambda wn + \beta \max\{0, t^* - t - T(t) - ws(t - t_1)\} + \gamma \max\{0, t + T(t) + ws(t - t_1) - t^*\} \quad (27)$$

3.2.1 无拥挤收费下的用户均衡研究(方案 u)

图 8 是不定车位停车券策略下轿车用户均衡出行分布模式,其中转折点 $\hat{M}^u = \frac{[\gamma + (\lambda + \gamma)ws]M}{(\beta + \gamma)(1 + ws)}$ 。

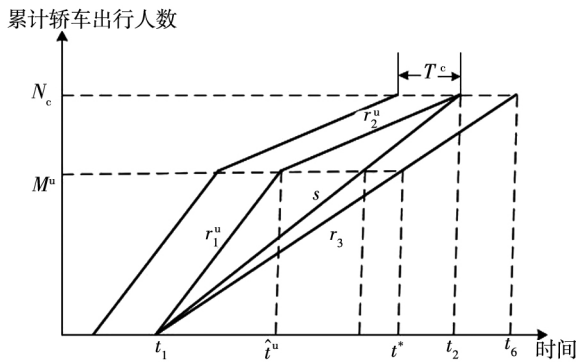


图 8 方案 u 下的轿车用户均衡出行模式

Fig. 8 Passenger car equilibrium of regime u

但这种停车券管理方法并不会改变轿车出行者们的出行时间和停车行为选择,即早到和晚到的轿车出行者到达瓶颈路段的速率分别为 $r_1^u = \alpha_c s / [\alpha_c - \beta + (\lambda - \beta)ws]$ 和 $r_2^u = \alpha_c s / [\alpha_c + \gamma + (\lambda + \gamma)ws]$,从停车场步行到达工作地的速率表示为 $r_3 = s / (1 + ws)$ 。

如图 8 所示,方案 u 下轿车出行者的人均出行成本为

$$P_u^A(M) = \alpha_c T^c + \frac{\delta M}{s} + \delta wM + \frac{\lambda \beta wM}{\beta + \gamma} + \rho^u \quad (28)$$

由此得到不定车位停车券的最优定价为

$$\rho^u = P^T(D - M) - \left[\alpha_c T^c + \frac{\delta M}{s} + \delta wM + \frac{\lambda \beta wM}{\beta + \gamma} \right] \quad (29)$$

则方案 u 下的社会出行总成本 TTC^u 为

$$TTC^u = DP^T(D - M) - M\rho^u = (D - M)P^T(D - M) + M \left[\alpha_c T^c + \frac{\delta M}{s} + \delta wM + \frac{\lambda \beta wM}{\beta + \gamma} \right] \quad (30)$$

图 8 中瓶颈路段的排队总时长 TQ^u 为

$$TQ^u = \frac{M^2}{2\alpha_c s} \left[\delta(1 + ws) - \frac{(\lambda ws)^2}{(\beta + \gamma)(1 + ws)} - \frac{\lambda ws(\gamma - \beta)}{(\beta + \gamma)} \right] \quad (31)$$

此时系统总成本 TC^u 为

$$TC^u = (D - M)P^T(D - M) + M\alpha_c T^c + \delta wM^2 + \frac{\lambda \beta wM^2}{\beta + \gamma} + \frac{\delta M^2}{s} + \frac{\mu_q M^2}{2\alpha_c s} \delta(1 + ws) - \frac{\mu_q M^2}{2\alpha_c s} \left[\frac{(\lambda ws)^2}{(\beta + \gamma)(1 + ws)} + \frac{\lambda ws(\gamma - \beta)}{(\beta + \gamma)} \right] + \mu_c MT^c + \mu_b \frac{(D - M)}{\theta C} T^b \quad (32)$$

3.2.2 动态拥挤收费下的用户均衡研究(方案 o)

在动态拥挤收费机制下,轿车出行者们不用承受瓶颈处的排队延迟,则在 t 时刻通过瓶颈路段,且在停车位 n 处停车的个人出行成本函数表示为

$$C^o(t) = \begin{cases} \rho^o + \alpha_c T^c + \lambda ws(t - t_1) + \tau^o(t) + \beta \max\{0, t^* - t - T(t) - ws(t - t_1)\}, & \text{早到者} \\ \rho^o + \alpha_c T^c + \lambda ws(t - t_1) + \tau^o(t) + \gamma \max\{0, t + T(t) + ws(t - t_1) - t^*\}, & \text{晚到者} \end{cases} \quad (33)$$

图 9 是方案 o 下持有不定车位停车券的轿车用户的均衡出行分布图。

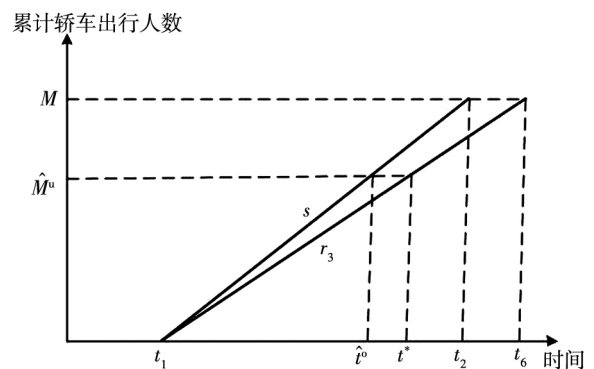


图 9 方案 o 下的轿车用户均衡出行模式

Fig. 9 Passenger car equilibrium of regime o

不定车位停车券策略下的拥挤收费函数如下式所示

$$\tau^o(t) = \begin{cases} [\beta - (\lambda - \beta)ws](\hat{t}^o - t_1^o), & t_1^o \leq t \leq \hat{t}^o \\ [-\gamma - (\lambda + \gamma)ws](t_2^o - \hat{t}^o), & \hat{t}^o \leq t \leq t_2^o \end{cases} \quad (34)$$

对比式(24)和式(34)可知,相比于指定车位停车券策略,政府发放不定车位停车券时,可获得的动态拥挤收费收益总额相对较少.

此时社会出行总成本 TTC^o 为

$$TTC^o = (D-M)P^T(D-M) + M\alpha_c T^c + \frac{\lambda w M^2}{2} + \frac{M^2}{2s} \left[\delta(1+ws) + \frac{(\lambda ws)^2}{(\beta + \gamma)(1+ws)} \right] \quad (35)$$

由于 $TQ^o = 0$ 则系统总成本 TC^o 为

$$TC^o = (D-M)P^T(D-M) + M\alpha_c T^c + \frac{M^2}{2s} \left[\delta(1+ws) + \frac{(\lambda ws)^2}{(\beta + \gamma)(1+ws)} \right] \times \frac{\lambda w M^2}{2} + \mu_c M T^c + \mu_b \frac{(D-M)}{\theta C} T^b \quad (36)$$

停车券策略研究中涉及到的相关时间参数(图4和图8)如表1所示,方案r和方案o的时间参数没有特别说明,因为拥挤收费机制并不影响第一个和最后一个到达瓶颈处的轿车出行者的相关时间参数.

表1 不同停车券策略对应的相关时间参数

Table 1 Time points for two parking permit schemes

停车券策略	t_1	t_3	t_5
指定车位停车券	$t^* - \frac{(\gamma + \beta ws)M}{(\beta + \gamma)s}$	$t^* - \frac{(\gamma + \beta ws)M}{(\beta + \gamma)s}$	$t^* - \frac{\gamma(1 - ws)M}{(\beta + \gamma)s}$
不定车位停车券	$t^* - \frac{[\gamma + (\lambda + \gamma)ws]M}{(\beta + \gamma)s}$	$t^* - \frac{[\gamma + (\lambda + \gamma)ws]M}{(\beta + \gamma)s}$	$t^* - \frac{[\gamma + (\lambda + \gamma)ws]M}{(\beta + \gamma)s}$
停车券策略	t_2	t_4	t_6
指定车位停车券	$t^* + \frac{\beta(1 - ws)M}{(\beta + \gamma)s}$	$t^* + \frac{\beta(1 - ws)M}{(\beta + \gamma)s}$	$t^* + \frac{\beta(1 - ws)M}{(\beta + \gamma)s}$
不定车位停车券	$t^* + \frac{[\beta - (\lambda + \gamma)ws]M}{(\beta + \gamma)s}$	$t^* + \frac{[\beta - (\lambda + \gamma)ws]M}{(\beta + \gamma)s}$	$t^* + \frac{[\beta - (\lambda - \beta)ws]M}{(\beta + \gamma)s}$

4 交通管理方案效用评估

借助一些必要的参数假定,从轿车用户均衡出行分布模式的合理性及成本优化两个角度,进一步评估4种交通管理方案的系统表现.参照Small^[24]和Arnott等^[19]的研究,假设系统中的参数满足以下条件: $\beta/\alpha = 0.61$, $\gamma/\alpha = 2.4$, $\lambda/\alpha = 3$.

4.1 轿车用户均衡出行分布模式合理性

图10展示了无拥挤收费机制下,两种停车券策略对应的用户均衡出行分布情况,其中实线和虚线分别代表指定车位停车券和不定车位停车券

策略.表2从4个方面对比了两种停车券策略在优化用户出行分布上的效果.

累计轿车出行人数

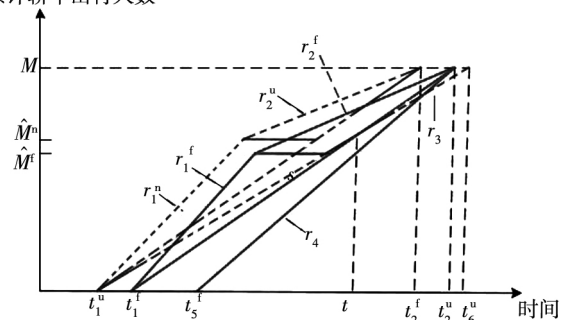


图10 两种停车券策略下轿车用户出行分布模式对比

Fig. 10 Comparison of passenger car travel patterns between two parking permit policies

表 2 两种轿车用户均衡出行模式合理性评估
Table 2 The evaluation on effectiveness of two passenger car travel patterns

评估标准	停车券策略	
	指定车位停车券	不定车位停车券
用户到达工作地的 时间分布长度	$\frac{M}{s} - wM$	$\frac{M}{s} + wM$
早高峰的起点	$t^* - \frac{(\gamma + \beta ws)M}{(\beta + \gamma)s}$	$t^* - \frac{[\gamma + (\lambda + \gamma)ws]M}{(\beta + \gamma)s}$
瓶颈处的排队 延迟时间	$\frac{\delta}{2} \frac{M^2}{\alpha_c s}$	$\frac{M^2}{2\alpha_c s} \left[\delta(1 + ws) - \frac{(\lambda ws)^2}{(\beta + \gamma)(1 + ws)} - \frac{\lambda ws(\gamma - \beta)}{(\beta + \gamma)} \right]$
未迟到的出行者 人数	$\frac{\gamma}{\beta + \gamma} M$	$\frac{[\gamma + (\lambda + \gamma)ws]M}{(\beta + \gamma)(1 + ws)}$

根据表 2 的分析结果发现,两种停车券策略在合理化用户出行分布模式方面各有优劣。指定车位停车券策略的优越性表现在两个方面: 1) 用户到达工作地的时间分布长度更短。这种停车券策略诱导用户们遵循“逆序”停车模式,即到达停车场越早的用户耗费的步行时间越短,这缩短了不同时刻到达工作地的用户之间的时间差距,此时轿车出行的总延迟成本会更低,使得系统出行成本降低幅度更大。2) 早高峰时段的起点相对推后。这种停车券策略的实施使得步行成本在用户出发前已经确定,这将帮助出行者们选择更加合理的出发时间,而不定车位停车券策略尽管降低了人们对于停车权利的竞争,但还存在一定程度关于停车位置的竞争,因此早高峰通勤者们还需要相对提前自身的出发时间,这削弱了其在系统出行成本上的优化效果。

不定车位停车券策略也有两方面的优势: 1) 瓶颈路段的排队延迟时间缩短。相比于指定车位停车券策略,此时早到和晚到者的出发率都明显降低,减轻了瓶颈处的排队延迟压力。排队延迟成本降低不仅有利于降低系统出行总成本,对提高环境效益也有显著的积极影响。2) 未迟到的出行

者人数更多。考虑到企业总是不期望员工迟到,这种停车券管理策略会得到更多企业管理者的支持。

4.2 成本优化效果分析

从成本优化的角度评估不同交通管理方法的效果。表 3 展示了不同方案对应的系统总成本。注意碳排放成本的大小会受到瓶颈处的排队时间和两种交通方式出行分担量的制约。但由于本文假定停车券数量固定为 M ,即环境成本这部分的变动将全部来源于瓶颈处的排队时间,这与轿车出行成本中的拥挤成本一致,因此即使不考虑碳排放成本也不会影响成本优化分析的结果。但本文还是将该部分成本纳入成本控制的目标函数中。加入碳排放成本的考量反映了拥挤排队的叠加效应,最终得到的结果是不同方案间的成本差异更大,这使得成本较低的方案体现出更大的优越性。事实上很多出行者的出行选择几乎不会考虑环境效应,但更加显著的成本对比会激发更多出行者对最优交通管理方案的支持,例如出行者们一般不愿意支持动态拥挤收费机制,但成本差异的刺激或许会使部分出行者改变想法。

表3 不同方案对应的系统总成本
Table 3 Total system costs of four regimes

停车券管理策略	拥挤收费机制	方案	系统总成本 $TC = TTC + E$
指定车位 停车券	无拥挤收费	f	$(D - M)P^T(D - M) + M\alpha_c T^c + \frac{\delta M^2}{s} + \frac{(\lambda - \delta)wM^2}{2} + \mu_c MT^c + \mu_b \frac{(D - M)}{\theta C} T^b + \mu_q \frac{\delta}{2} \frac{M^2}{\alpha_c s}$
	动态拥挤收费	r	$(D - M)P^T(D - M) + M\alpha_c T^c + \frac{\delta M^2}{2s} + \frac{(\lambda - \delta)wM^2}{2} + \mu_c MT^c + \mu_b \frac{(D - M)}{\theta C} T^b$
不定车位 停车券	无拥挤收费	u	$(D - M)P^T(D - M) + M\alpha_c T^c + \frac{\delta M^2}{s} + \delta wM^2 + \frac{\lambda\beta wM^2}{\beta + \gamma} + \mu_c MT^c + \mu_b \frac{(D - M)}{\theta C} T^b + \frac{\mu_q M^2}{2\alpha_c s} \left[\delta(1 + ws) - \frac{(\lambda ws)^2}{(\beta + \gamma)(1 + ws)} - \frac{\lambda ws(\gamma - \beta)}{(\beta + \gamma)} \right]$
	动态拥挤收费	o	$(D - M)P^T(D - M) + M\alpha_c T^c + \frac{\delta M^2(1 + ws)}{2s} + \frac{\lambda wM^2}{2} + \frac{(\lambda ws)^2 M^2}{2s(\beta + \gamma)(1 + ws)} + \mu_c MT^c + \mu_b \frac{(D - M)}{\theta C} T^b$

根据表3可得 $TC^r < TC^o < TC^u < TC^f$ 。因此指定车位停车券策略和动态拥挤收费机制的综合实施(方案r)可实现系统最优,即交通出行成本和环境成本总和最小。进一步分析发现:首先动态拥挤收费机制有效调整了轿车到达瓶颈路段的速率,即排队延迟成本降为0,这对降低人均出行成本和碳排放成本都有明显的积极作用;其次,系统出行总成本的比较结果显示 $TTC^f > TTC^u$ 且 $TTC^r < TTC^o$ 。参照4.1节的研究可知,指定车位停车券策略和不定车位停车券策略分别有助于降低轿车用户的计划延迟成本和排队延迟成本。前者说明无拥挤收费机制下,两种停车券策略间的排队成本差异大于计划延迟成本差异,此时不定车位停车券策略会带来更大的社会效益。后者的结果则反映了当动态拥挤收费机制消除了排队延迟成本的影响时,指定车位停车券策略会带来更低的系统出行成本。碳排放成本的比较结果显示 $E^f > E^u$,这说明不定车位停车券策略对降低系统碳排放成本有更显著的效果。此处本文假定政府对交通出行成本和碳排放成本的重视程度一致,但可以推测,当政府对碳排放成本设定更大的权重考量时,不定车位停车券策略的成本优势会更加明显。

综上所述,本文认为指定车位停车券策略下,

由于轿车出行分布更加集中,可以带来更低的延迟成本;动态拥挤收费可以消除瓶颈处的排队,二者取长补短,综合实施可以实现系统最优。但如果政府考虑公众对拥挤收费实施还存在争议,不定车位停车券策略可以成为次优方案。

5 结束语

面对当下“停车难”的现状,本文针对允许公交车和轿车出行的双模式单OD交通网络系统,提出了指定车位和不定车位两种停车券管理策略。同时结合动态拥挤收费机制,以同时降低系统出行总成本和碳排放成本作为优化目标,通过分析不同交通管理方案下的用户均衡出行模式,进行策略优化研究;并从用户均衡出行分布的合理性和成本优化两个角度,评估了4种管理方案的系统表现。研究结果发现:1)国内停车位供给紧张,若不采取任何停车管理策略,所有出行者的人均出行成本必然会增加。停车券策略有利于调节轿车出行者的出行时间分布,消除停车竞争,降低系统出行成本。2)指定车位停车券策略下,人们按照“逆序”模式占满停车位;不定车位停车券策略则会诱导轿车按照“顺序”模式停车。前者对应的轿车出行时间分布更加集中,计划延迟成本更

低,且早高峰起点推后,早起出行压力较小。后者对应的轿车出发率较小,因此瓶颈处的排队延迟时间较低,这不仅会降低人均出行成本,对提高环境效益也有积极影响;同时早到出行者人数更多,因此企业会更倾向于支持这种停车券策略。3) 两种停车券策略各有优劣: 指定车位停车券策略对应的计划延迟成本更低,不定车位停车券对应的排队延迟成本更低,其中排队延迟成本差异大于计划延迟成本差异。当无拥挤收费机制时,不定车位停车券策略可实现系统成本最低;但当引入动态拥挤收费后,轿车出行者不需要面临瓶颈处的排队延迟,此时指定车位停车券策略会表现出更大的优越性。4) 指定车位停车券策略和动态拥挤收费的综合实施可以实现系统最优,但若考虑到

当下拥挤收费实施的争议性,不定车位停车券策略可以成为次优方案。注意当政府对碳排放成本的重视程度越来越大时,前者的优越性将更加明显,且在成本差异越来越大的刺激下前者也可能会赢得更多出行者的支持。

目前本文研究的停车券策略仅限于单 OD 的简单网络中,且停车券数量也是固定的,如何将其扩展到包含多个起讫点的更大规模的出行网络,并且加入停车券发放数量的优化研究是下一步的研究难题。同时本文仅考虑了有车族与无车族之间时间价值的差异,实际生活中出行者们的时间价值差异更为复杂,进一步探究用户异质性对出行选择及停车管理策略的影响也是接下来的研究重点。

参 考 文 献:

- [1] Qian Z S, Xiao F E, Zhang H M. The economics of parking provision for the morning commute [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2011, 45(9): 861–879.
- [2] 曹晶瑞. 停车之痛 [N]. *北京晨报*, 2015.
Cao Jingrui. The Difficulty of Parking [N]. *Beijing Morning Post*, 2015. (in Chinese)
- [3] 田琼, 黄海军, 杨海. 瓶颈处停车换乘 logit 随机均衡选择模型 [J]. *管理科学学报*, 2005, 8(1): 4–9.
Tian Qiong, Huang Haijun, Yang Hai. Mode choice models based on logit stochastic equilibrium with park-and-ride option [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2005, 8(1): 4–9. (in Chinese)
- [4] 王广民, 高自友, 徐猛, 等. 弹性需求下网络设计问题和电子路票问题研究 [J]. *管理科学学报*, 2015, 18(4): 38–48.
Wang Guangmin, Gao Ziyou, Xu Meng, et al. The combined model and relaxation algorithm for continuous network design problem with the second-best credits charging under elastic demand [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2015, 18(4): 38–48. (in Chinese)
- [5] 田琼, 罗婷, 杨丽. 考虑延误时间成本的最优路边停车策略研究 [J]. *管理科学学报*, 2016, 19(7): 50–59.
Tian Qiong, Luo Ting, Yang Li. The optimal curbside parking strategies with schedule delay [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(7): 50–59. (in Chinese)
- [6] Jiang Y Q, Ma P J, Zhou S G. Macroscopic modeling approach to estimate traffic-related emissions in urban areas [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 60: 41–55.
- [7] Nocera S, Ruiz-Alarcón-Quintero C, Cavallaro F. Assessing carbon emissions from road transport through traffic flow estimators [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 125–148.
- [8] 李玉涛, 周江评. 重新定位停车政策: 优化出行的重要工具 [J]. *城市规划*, 2015, (4): 71–75.
Li Yutao, Zhou Jiangping. Parking policy as an effective tool to optimize travel [J]. *Urban Transport*, 2015, (4): 71–75. (in Chinese)
- [9] Qian Z S, Rajagopal R. Optimal occupancy-driven parking pricing under demand uncertainties and traveler heterogeneity: A stochastic control approach [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 67: 144–165.
- [10] Chaniotakis E, Pel A J. Drivers' parking location choice under uncertain parking availability and search times: A stated preference experiment [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 82: 228–239.
- [11] Simićević J, Vukanović S, Milosavljević N. The effect of parking charges and time limit to car usage and parking behavior [J]. *Transport Policy*, 2013, 30: 125–131.
- [12] Qian Z S, Xiao F E, Zhang H M. Managing morning commute traffic with parking [J]. *Transportation Research Part B*, 2012, 46(7): 894–916.

- [13]Zhang R , Zhu L. Curbside parking pricing in a city centre using a threshold [J]. *Transport Policy* ,2016 ,52: 16 – 27.
- [14]Lin X X , Yuan P C. A dynamic parking charge optimal control model under perspective of commuters' evolutionary game behavior [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* ,2018 ,490: 1096 – 1110.
- [15]Verhoef E , Nijkamp P , Rietveld P. Tradeable permits: Their potential in the regulation of road transport externalities [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design* ,1997 ,24(4) : 527 – 548.
- [16]Zhang X , Yang H , Huang H J. Improving travel efficiency by parking permits distribution and trading [J]. *Transportation Research Part B: Methodological* ,2011 ,45(7) : 1018 – 1034.
- [17]Yang H , Liu W , Wang X , et al. On the morning commute problem with bottleneck congestion and parking space constraints [J]. *Transportation Research Part B: Methodological* ,2013 ,58: 106 – 118.
- [18]Liu W , Yang H , Yin Y , et al. A novel permit scheme for managing parking competition and bottleneck congestion [J]. *Transportation Research Part C* ,2014 ,44(4) : 265 – 281.
- [19]Arnott R , Palma A D , Lindsey R. A temporal and spatial equilibrium analysis of commuter parking [J]. *Journal of Public Economics* ,1991 ,45(3) : 301 – 335.
- [20]王景鹏 , 黄海军. 用于异质用户出行管理的可交易许可证研究 [J]. *系统工程理论与实践* ,2017 ,37(5) : 1331 – 1338.
Wang Jingpeng , Huang Haijun. Tradable permits for traffic management with user heterogeneity [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice* ,2017 ,37(5) : 1311 – 1388. (in Chinese)
- [21]Zhang X , Huang H J , Zhang H M. Integrated daily commuting patterns and optimal road tolls and parking fees in a linear city [J]. *Transportation Research Part B: Methodological* ,2008 ,42(1) : 38 – 56.
- [22]Wang J , Zhang X , Zhang H M. Parking permits management and optimal parking supply considering traffic emission cost [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* ,2018 ,60: 92 – 103.
- [23]李志纯 , 丁 晶. 基于活动方法的瓶颈模型与拥挤收费问题研究 [J]. *管理科学学报* ,2017 ,20(8) : 93 – 101.
Li Zhichun , Ding Jing. Activity-based bottleneck model and congestion toll pricing issues [J]. *Journal of Management Sciences in China* ,2017 ,20(8) : 93 – 101. (in Chinese)
- [24]Small K A. The scheduling of consumer activities: Work trips [J]. *The American Economic Review* ,1982 ,72(3) : 467 – 479.

Differentiated parking permits for traffic management considering traffic emission costs

YU Lu-yi , ZHENG Yu , ZHANG Xiao-ning

School of Economics and Management , Tongji University , Shanghai 200092 , China

Abstract: Given a one-to-one bi-modal transportation network , the origin and the destination is connected by a highway with a bottleneck and a parallel transit line. Based on the bottleneck model , this paper considers the spatial distribution of parking spots and develops two novel parking permit schemes: one is a parking permit scheme with a designated spot (i. e. , the designated scheme) ; the other is a parking permit scheme with a non-designated spot (i. e. , the non-designated scheme) . Both of them can help commuters with permits to reserve parking spaces , but the former predetermines a spot for the auto-commuter. By introducing a time-varying road toll , four traffic management schemes are proposed and the strategy optimization is investigated. The objective is to minimize the system travel cost and traffic emission costs simultaneously. It is found that the practice of parking permit scheme eliminates the competition for parking spots and the individual travel cost of drivers is thus reduced. Besides , the system performance reaches the optimum when both time-varying road tolls and the designated scheme are applied. However , the practice of roadway charge might be controversial. The non-designated scheme can be considered as a sub-optimal solution.

Key words: differentiated parking permits; traffic emission cost; bottleneck model; bi-modal traffic system