

考虑客货分离的城市公路运输通道拥挤 收费策略及福利效应

谢超达,王喜富

(北京交通大学 交通运输学院,北京 100044)

摘要:客运与货运用户的异质性影响着他们的出发时间选择,进而影响着容量有限的城市道路各时段的拥挤程度.本文考虑了边际时间效用具有异质性的客运和货运用户,解释了他们在全车道及部分车道收费策略下的排队特性,并对不同收费车道策略相对于全车道最优收费的效率进行了探讨.结果表明,针对以货运用户为主的具有较高边际时间效用增长率的用户进行收费,并将收费收入均等返还给全体用户,可以实现帕累托改进.同时,部分收费车道相对于全车道收费的效率会随着用户异质性水平的上升而降低.而对收费车道采取补贴的方式,虽然可以吸引更多用户使用收费车道并提高用户获得的时间效用,但与无补贴的收费车道相比效率较低.

关键词:交通运输;福利效应;瓶颈模型;异质性;客货分离;收费车道

中图分类号:F540.4;U491;U121 **文献标志码:**A

Congestion pricing and welfare effects of separating passenger and freight traffic in an urban bottleneck

XIE Chaoda, WANG Xifu

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The heterogeneity of freight and passenger user affects their choice of departure times, and therefore relates to the congestion profile of capacity restrained urban road. We take into account the heterogeneity of freight and passenger users in terms of marginal utility of time, identify the properties of their congesting queuing under the whole road and the pay-lane tolling policy, and examine the efficiency of different pay-lane policies relative to the social optimal tolling. The results suggest that tolling the users with higher marginal utility increasing rates and equally returning the revenue to all the users can be a Pareto improvement. The efficiency of pay-lane, relative to the first-best whole road pricing, is found to be decreasing with the increase of user heterogeneity. A subsidy to the pay-lane users can increase the usage of pay-lane and increase users' indirect utility, but achieves lower efficiency than the pay-lane scheme without subsidy.

Keywords: transportation; welfare effect; bottleneck model; heterogeneity; separating passenger and freight traffic; pay-lane

收稿日期:2017-02-21

基金项目:国家自然科学基金(T16A800030)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(T16A800030)

第一作者:谢超达(1983—),男,壮族,北京市人,博士生.研究方向为运输与物流.email:11114247@bjtu.edu.cn.

引用格式:谢超达,王喜富.考虑客货分离的城市公路运输通道拥挤收费策略及福利效应[J].北京交通大学学报,2017,41(3):7—14.

XIE Chaoda, WANG Xifu. Congestion pricing and welfare effects of separating passenger and freight traffic in an urban bottleneck[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(3): 7—14. (in Chinese)

道路交通的拥挤源于道路使用者在空间和时间上的同时聚集.在城市经济领域,包括文献[1-2]在内的众多研究对于空间聚集的来源及影响已经进行了全面细致的讨论,但关于时间聚集这一交通拥挤成因的研究仍然非常有限.这种时间上的聚集效应对于道路使用者而言,体现在他们在出行前后所花费的时间及获取的效用^[3-4].一方面,通勤使用者在到达目的地后,在不同时间与不同数量的人群互动,会获得不同的效用^[5].另一方面,货物运送者通常将多个邻近收件人的货物集中配送,以降低运输的边际成本^[6].因此,收件人在单位时间内的聚集程度也会影响货运用户在目的地获得的边际时间效用及其时间价值.英国和日本的城市交通旅行时间价值估算数据均表明,即便是轻型货物车辆的单车时间价值仍然高于小汽车通勤的使用者^[7-8],这种用户属性不同的现象被称为用户的异质性.那么在制定拥挤收费政策时,如何针对时间价值不同的用户进行定价,便成为交通管理者必须面对的问题.

针对客运和货运用户的道路使用权进行区别管理的措施由来已久,也有很多文献对分离这两种用户的益处进行了探讨^[9-12],但这些研究仅侧重于货车对环境的影响,以及由于货车的物理特性(例如尺寸、加减速性能及操控性能)给客运用户带来的外部成本.文献[13]考虑了货运用户与客运用户间时间价值的区别,然而由于其使用了静态的流量拥挤模型,无法反映用户对出发时间进行的选择行为,也就无法讨论拥挤收费对于高峰的分散作用.

文献[14]提出的动态排队模型则描述了用户根据自身偏好选择出发时间的行为,即瓶颈模型.该模型被后续大量文献通过数据所验证,如文献[15-16]等.然而文献[14]的模型中仍然限制了用户的边际时间效用为常数,无法描述用户边际时间效用随时间变化的情况.同时,该模型对于用户期待的到达时间也设定为给定的外生变量,没有给出其形成机制.文献[17]则使用上述恒定边际效用模型,讨论了具有不同时间价值用户,即异质性用户,在部分车道收费策略下的福利效应.而文献[3]则将用户的出发时间选择与他在出发地和目的地的边际时间效用联系起来.该模型不但考虑了边际时间效用更一般的形式,即允许边际效用随时间改变,而且解释了用户对于期待到达时间的选择行为.在此之后,文献[18-20]对时变边际效用模型进行了实证研究,然而均没有考虑用户的异质性.

文献[21]基于时变边际效用模型,讨论了不同出行距离的用户在到达市中心瓶颈时的排队特性,

并讨论了社会最优收费的福利效应.本文作者对文献[21]的讨论进一步扩展,对该研究讨论的一般形式的边际效用函数进行了参数化,使得讨论边际效用的增长率具有异质性的情况成为可能.正如前文所述,实证数据表明,货运车辆与通勤车辆相比通常具有更高的时间价值.此现象有两种可能的成因,其一是在各个时段内货运车辆的时间价值都较高,其二是货运车辆的时间价值增长率较高.由于第一种情形对出发时间选择没有影响,本文选取第二种情形进行讨论.针对货运用户的时间价值普遍高于客运用户的现象,讨论具有这种异质性的道路使用者在出发时间上的选择行为,并对客货分离车道收费的效率及福利效应进行分析.在后续的讨论中,假设货运用户的边际时间效用增长率更高,并认为全体用户的其他属性相同.同时,运输通道内的车辆类型仅为与小客车物理尺寸相近的轻型货车,忽略车辆在物理特性上的区别对交通流带来的影响.在这些条件下,以一条连接市郊和市中心的运输通道为对象,分别将无补贴和有补贴收费车道策略与全车道最优收费进行对比,分析了收费车道策略给客货运用户带来的福利效应,并考察了边际时间效用增长率的分 布及收费车道容量对收费效率的影响.

1 无收费均衡及全车道社会最优收费

考虑包含货运和通勤目的的 N 个用户由郊区通过唯一的道路运输通道前往城市中心.其中每个货运用户驾驶轻型货车装载多个收件人的包裹,由配送站出发,前往市中心进行终端配送,而每个通勤用户单独驾驶小型客车由家中前往位于市中心的工作地.全体用户经过相同的自由流时间 T 之后,到达位于市中心的瓶颈路段.将用户到达瓶颈路段的时刻计为 a ,当用户到达瓶颈路段的瞬时到达率 $\rho(a)$ 大于瓶颈的通过能力 φ 时,产生队列.在队列长度为 0,即 $\rho(a) \leq \varphi$ 时,通过瓶颈花费的时间也为 0.遵循瓶颈模型的假设条件(如文献[14,22]),队列排队方式为点排队,即队列长度对用户到达瓶颈前的旅行时间,以及瓶颈的通过能力没有影响.在通过瓶颈路段时,用户遵循“先入先出”原则,即不允许超车.设第一个和最后一个到达瓶颈路段的用户分别在时刻 a_0 和 a_1 到达,那么瓶颈路段在时刻 a 的累计到达率为

$$R(a) = \int_{a_0}^a \rho(a) ds \quad (1)$$

在通过瓶颈路段后,用户无需额外旅行时间,立刻到达目的地.货运用户的收件人位于很小的范围

内,货运用户在多个收件人之间进行配送所花费的时间忽略不计.通勤用户在工作地与其他相关人互动时,也无需花费额外旅行时间.

用户通过将一天中的某段时间 D 花费在出发地和目的地来获取效用,而在旅行途中无法获取效用.在此不考虑用户通过其他方式获取或损失的效用.那么用户在将出发时刻和到达时刻分别记为 d 和 t ,根据文献[4]提出的形式,用户在出行前后取得的效用可以表示为

$$u(d, t) = \int_{T_1}^d h(s) ds + \int_t^{T_2} w(s) ds \quad (2)$$

这里 $T_1, T_2 \in D$ 为常数; $h(s)$ 和 $w(s)$ 分别为用户在出发地和目的地的边际时间效用 (Marginal Utility of Time, MUT) 或即时效用.为方便后续讨论,设 $h(d) = \beta_0 + \beta_1 d > 0$, $w(t) = \gamma_0 + \gamma_1 t > 0$, 其中 β_0 及 γ_0 分别为 0 时刻用户在出发地和目的地的效用, β_1 及 γ_1 分别为 MUT 在出发地和到达地的增长率.由于用户必须完成出行,而且实证数据表明目的地 MUT 增长速度比出发地 MUT 下降速度更快^[20], 因此设定 $\gamma_1 > -\beta_1 > 0$. 每个用户都试图在时间段 D 上最大化自己取得的效用 $u(d, t)$, 在瓶颈路段全部车道被允许征收通行费, 收费费率记为 τ 个效用单位, 那么在收费的条件下, 单用户获得的效用可记为 $u(d, t) - \tau$. 假设全体用户的需求固定, 那么在通行费收入不返还给用户时, 我们可将社会福利定义为全体用户获得的效用之和.

客运和货运用户的异质性, 假设其仅来源于其在目的地 MUT 增长率的不同, 即 $w(t)$ 的系数 γ_1 . 不同 MUT 增长率用户对出发时间选择的直观图解如图 1 所示. 设 γ_1 为分布在 $\Gamma = [\gamma_L, \gamma_H]$ 上的连续随机变量, 其概率密度函数为 $f(\gamma_1)$, 累积分布函数为 $F(\gamma_1)$. 由于货运用户的时间价值普遍高于客运用户, 本文假设 γ_1 较高的用户以货运用户为主.

当没有队列存在时, 用户的全部出行时间仅包

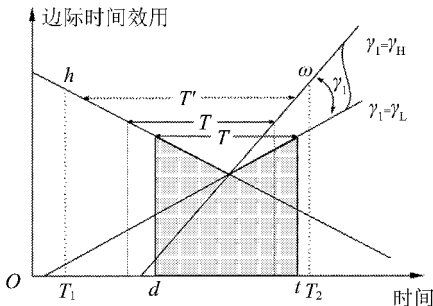


图 1 MUT 增长率不同的用户的效用最大化问题图解
Fig.1 Graphical solution to the utility maximization problem of users with different MUT increasing rates

含自由流时间 T , 用户根据各自在出行前后两地的 MUT 选择其最优到达时间, 即无约束最优化问题 $\max_a u(a - T, a)$, 将此问题的解记为 $a_*(\gamma_1)$. 此时, γ_1 较低的用户会选择较晚出发并较晚到达, 他们在出行途中所失去的效用, 即出行成本, 如图 1 中 h 及 w 下阴影面积所示. 在图 1 中我们还可以观察到, γ_1 较高的用户出发和到达时间都更早, 因此得到 $a'_*(\gamma_1) < 0$.

需要说明的是, 文献[21]同样用时变 MUT 解释了用户的排队行为, 并证明了不同出行距离的用户会根据其到达瓶颈路段的距离排列其到达时间. 根据文献[21]的定理 1~4, 以及定理 6, 易于证明, 用户在无收费用户均衡及社会最优收费状态下, 具有以上 MUT 且到达瓶颈路段的距离相同的用户, 都会根据其目的地 MUT 的增长率 γ_1 排列其到达瓶颈路段的时间, 较高 γ_1 的用户会选择较早出发并较早到达. 由于证明方法相同, 在此不再赘述其证明过程. 为方便后文的讨论, 下面给出各状态下的性质, 及主要推导依据. 在后续的讨论中我们仅考虑 $f(\gamma_1) > \varphi$, 即用户密度足够高, 使得在无收费状态下队列持续存在的情况.

1.1 无收费均衡

当到达率 $\rho(a) > \varphi$ 时, 用户在瓶颈入口处产生队列. 将包含排队时间的出行总时间记为 T' . 如图 1 所示, 当 $T' > T$ 时, 用户选择的个人最优出发和到达时间会分别早于和晚于无队列状态. 根据文献[21]的定理 3, 队列中的用户在无收费的状态下可以达到唯一的均衡状态, γ_1 较高的用户较早到达瓶颈路段的性质也仍然存在, 即 $a'_*(\gamma_1) < 0$. 均衡状态下, 单用户获得的效用为

$$u\left(a - T, \frac{R(a)}{\varphi} + a_0\right) = \int_0^{a-T} (\beta_0 + \beta_1 s) ds + \int_{\frac{R(a)}{\varphi} + a_0}^0 (\gamma_0 + \gamma_1 s) ds \quad (3)$$

以上式为目标函数的最优化问题的一阶条件为

$$\beta_1 (a - T) + \beta_0 - \left[\gamma_0 + \gamma_1 \left(\frac{R(a)}{\varphi} + a_0 \right) \right] \frac{\rho(a)}{\varphi} = 0 \quad (4)$$

由于 $a'_*(\gamma_1) < 0$, 时刻 a 的累积到达率 $R(a)$ 满足

$$R(a) = N - F(\gamma_1) \quad (5)$$

将式(5)对 a 求导可得

$$\rho(a) = -\frac{f(\gamma_1)}{a'(\gamma_1)} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(4)得到

$$a'(\gamma_1) = -\frac{f(\gamma_1)}{\varphi} \cdot \frac{\gamma_0 + \gamma_1 \left(a_0 + \frac{N - F(\gamma_1)}{\varphi} \right)}{\beta_0 + \beta_1 (a - T)} < 0 \quad (7)$$

由于全部用户均在 $[a_0, a_1]$ 内到达目的地, 则 a_0 满足

$$a_1 - a_0 = N/\varphi \quad (8)$$

将式(5)代入式(3)得到用户均衡下单用户取得的效用为

$$u \left(a - T, a_0 + \frac{N - F(\gamma_1)}{\varphi} \right) = \int_0^{a-T} (\beta_0 + \beta_1 s) ds + \int_{\frac{N-F(\gamma_1)}{\varphi} + a_0}^0 (\gamma_0 + \gamma_1 s) ds \quad (9)$$

将上式对 γ_1 求导可得

$$\frac{\partial u \left(a - T, a_0 + \frac{N - F(\gamma_1)}{\varphi} \right)}{\partial \gamma_1} = -\frac{1}{2} \left(\frac{N - F(\gamma_1)}{\varphi} + a_0 \right)^2 < 0 \quad (10)$$

即在均衡状态下, 用户获得的效用随 γ_1 升高而降低.

1.2 全车道社会最优收费

在有收费的情况下, 设收费费率为到达瓶颈时刻 a 的函数, 记为 $\tau(a)$. 根据文献[21]的定理 5, 可知完全消除排队的社会最优收费一定存在. 社会最优收费状态下用户到达瓶颈路段的时刻 $a_\tau(\gamma_1)$ 仍然按照 γ_1 水平高低进行排序, 即满足 $a'_\tau(\gamma_1) < 0$. $\tau(a)$ 满足最优化问题 $\max_a u(a_\tau - T, a_\tau) - \tau(a_\tau)$ 的一阶条件, 即

$$\tau'(a_\tau(\gamma_1)) = \beta_1 (a_\tau(\gamma_1) - T) + \beta_0 - \gamma_1 a_\tau(\gamma_1) - \gamma_0 \quad (11)$$

由于队列被完全消除, 每个用户到达瓶颈路段的时刻等于其到达目的地的时刻. 设第一位用户到达的时间为 a_{τ_0} , 则 MUT 增长率为 γ_1 的用户到达时刻 a_τ 为

$$a_\tau(\gamma_1) = a_{\tau_0} + \frac{N - F(\gamma_1)}{\varphi} \quad (12)$$

该用户取得的效用为

$$u(a_\tau - T, a_\tau) = \int_0^{a_\tau - T} (\beta_0 + \beta_1 s) ds + \int_{a_\tau}^0 (\gamma_0 + \gamma_1 s) ds \quad (13)$$

将全体用户的效用之和对 a_{τ_0} 求导, 可知唯一存在 a_{τ_0} 使得用户总效用最大, 并使得下式成立

$$\int_{a_{\tau_0}}^{a_{\tau_0} + \frac{N}{\varphi}} [\beta_0 + \beta_1 (a - T) - \gamma_0 - \gamma_1 a] da = 0 \quad (14)$$

将式(13)对 γ_1 求导可得

$$\frac{\partial u(a_\tau - T, a_\tau)}{\partial \gamma_1} = -\frac{1}{2} \left(\frac{N - F(\gamma_1)}{\varphi} + a_{\tau_0} \right)^2 < 0 \quad (15)$$

即在社会最优收费状态下, 用户取得的效用仍然随 γ_1 升高而降低. 由于每个用户支付的社会最优收费等于无收费均衡时花费的出行成本, 同时, 根据文献[21]定理 6 的证明方法, 易于证明 $a_0 = a_{\tau_0}$. 因此, 在社会最优收费条件下, 全体用户到达目的地的时间与无收费均衡状态相同. 说明当社会最优收费不返还给用户时, 用户的福利水平不会发生改变.

2 考虑客货分离的收费车道策略

在现实情况下, 往往由于种种因素的限制, 无法对全部车道进行收费, 这就需要将部分车道收费的策略与全车道最优收费对比, 来确认这些策略相对于最优收费的效率, 即两种策略带来的社会福利变化量之比. 根据 1.2 节中对全车道最优收费的讨论, 已知用户在通过瓶颈路段时, 会根据其 γ_1 水平选择到达时间. 那么最直接的部分用户收费策略便是根据 γ_1 水平对用户进行区分. 本节将全车道最优收费的讨论扩展至部分车道收费的情况, 并通过数值算例的展示, 对比了无补贴和有补贴的两种收费车道策略的福利分布及其相对于最优收费的效率. 这种相对效率的对比, 能够直接反映不同收费策略的福利效应, 即对于提升社会福利水平的作用.

2.1 无补贴的收费车道

由于完全消除排队的最优收费策略不改变用户的间接效用(个人成本), 因此, 在不限制收费车道的用户类型的条件下, 收费车道策略相对于最优收费的效率, 将等于收费车道的容量占全部车道容量的比例.

下面, 我们考察当管理者选择一个用户类型的临界值 γ_1^* , 并限定 γ_1 高于 γ_1^* 的用户必须在收费车道内行驶的情况. 在这种管制措施下, 两种车道的用户分别根据自身 γ_1 水平在该车道用户内的排位来选择各自的到达时间. 因此, 收费与免费车道上用户所取得的效用的解析形式, 分别与社会最优收费状态及用户均衡状态相同. 设 $a_{\tau s_0}$ 为收费车道首位用户到达时间. 相应的, a_{es_0} 为免费车道首位用户到达时间, a_{es_1} 为免费车道最后一位用户到达时间. 收费车道与免费车道通行能力分别为 φ_1, φ_2 , 且 $\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi$. 那么收费车道用户在取得的效用为

$$U_{\tau s}(\gamma_1) = u \left(a_{\tau s_0} + \frac{N - F(\gamma_1)}{\varphi_1} - T, a_{\tau s_0} + \frac{N - F(\gamma_1)}{\varphi_1} \right) =$$

$$\int_{T_1}^{a_{\tau s0} + \frac{N-F(\gamma_1)}{\varphi_1} - T} (\beta_0 + \beta_1 s) ds + \int_{a_{\tau s0} + \frac{N-F(\gamma_1)}{\varphi_1}}^{T_2} (\gamma_0 + \gamma_1 s) ds \quad (16)$$

免费车道用户取得的效用为

$$U_{es}(\gamma_1) = u\left(a_{es}(\gamma_1) - T, a_{es0} + \frac{F(\gamma_1^*) - F(\gamma_1)}{\varphi_2}\right) = \int_{T_1}^{a_{es} - T} (\beta_0 + \beta_1 s) ds + \int_{a_{es0} + \frac{F(\gamma_1^*) - F(\gamma_1)}{\varphi_2}}^{T_2} (\gamma_0 + \gamma_1 s) ds \quad (17)$$

当管理者以消除收费车道排队为目标最大化社会效用,且不考虑补贴时, γ_1^* 应为如下有约束最优化问题的解

$$\begin{aligned} \max_{\gamma_1 \in \Gamma} & \int_{\gamma_L}^{\gamma_1} U_{es}(\gamma_1) f(\gamma_1) d\gamma_1 + \int_{\gamma_1}^{\gamma_H} (U_{\tau s}(\gamma_1) - \tau_s(\gamma_1)) f(\gamma_1) d\gamma_1 \\ \text{s.t.} & \tau_s(\gamma_1) \geq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

根据目标函数的形式,该函数可能在 $\tau_s(\gamma_1^*) \leq 0$ 时取得最优解.考虑到最优化问题式(18)的约束条件,最优解 γ_1^* 可能在 $\tau_s(\gamma_1^*) = 0$ 时取到.该问题的一阶条件为

$$U_{es}(\gamma_1) - U_{\tau s}(\gamma_1) + \tau_s(\gamma_1) = 0 \quad (19)$$

由式(11)可得,目标函数的二阶条件小于 0,即

$$U'_{es}(\gamma_1) - U'_{\tau s}(\gamma_1) + \tau'_s(\gamma_1) < 0 \quad (20)$$

因此,该最优化问题只可能在 $\tau_s(\gamma_1^*) = 0$ 时取得唯一最优解,此时 $U_{es}(\gamma_1) = U_{\tau s}(\gamma_1)$.

与 a_0 和 $a_{\tau 0}$ 类似,部分车道收费条件下的 a_{es0} 应满足

$$a_{es1} - a_{es0} = \frac{F(\gamma_1^*)}{\varphi_2} \quad (21)$$

$a_{\tau s0}$ 应为下式的解

$$\int_{a_{\tau s0}}^{a_{\tau s0} + \frac{N-F(\gamma_1^*)}{\varphi_1}} [\beta_0 + \beta_1(a - T) - \gamma_0 - \gamma_1 a] da = 0 \quad (22)$$

2.2 考虑补贴的收费车道

根据 2.1 节的讨论,我们发现由于无补贴条件下最优化问题式(18)的约束条件影响了目标函数的取值.因此,如果允许 $\tau_s(\gamma_1) < 0$,那么不计入收费或补贴的社会福利仍然可以提高.由于完全消除排队的 $\tau_s(\gamma_1) < 0$ 始终满足式(11),那么考虑补贴,就相当于对收费车道征收的随时间变化的最优收费的导数不变的基础上,在收费车道高峰开始前后进行补贴,吸引更多用户使用收费车道,这与文献[17]

中的设定类似.此时管理者选择的 MUT 增长率临界值 γ_1^* 应为如下无约束最优化问题的解.

$$\begin{aligned} \max_{\gamma_1 \in \Gamma} & \int_{\gamma_L}^{\gamma_1} U_{es}(\gamma_1) f(\gamma_1) d\gamma_1 + \int_{\gamma_1}^{\gamma_H} (U_{\tau s}(\gamma_1) - \tau_s(\gamma_1)) f(\gamma_1) d\gamma_1 \end{aligned} \quad (23)$$

根据有约束最优化问题的一阶条件式(19)及二阶条件式(20),此问题的最优解一定唯一存在,并在 $U_{es}(\gamma_1) - U_{\tau s}(\gamma_1) + \tau_s(\gamma_1) = 0$ 时取到,区别在于此时 $\tau_s(\gamma_1) < 0$.下面我们通过数值算例说明两种收费车道策略的临界值及相应的福利效应.

2.3 数值算例

在本算例中,我们将收费车道的比例设定为总通行能力的 1/4.根据第 1 节中的设定,当各参数满足 $h(d) = \beta_0 + \beta_1 d > 0$, $w(t) = \gamma_0 + \gamma_1 t > 0$,以及 $\gamma_1 > -\beta_1 > 0$ 这 3 个条件时,上文的结论均成立.因此,可以不失一般性地对参数进行如下设定:令 $T_1 = T_2 = 0$, $\beta_0 = \gamma_0 = 15$ 效用单位/h, $\beta_1 = -1.0$ 效用单位/h², γ_1 的密度函数如图 2 所示.其中 $T_1 = T_2 = 0$ 及 $\beta_0 = \gamma_0$ 的设定不影响数值算例的性质,也不影响后续讨论.用户总数 $N = 1\,000$ 辆,瓶颈的总通行能力 $\varphi = 1\,200$ 辆/h,各用户到达瓶颈路段前自由流行驶时间 $T = 10$ min.由于上述最优化问题具有良好的凹性,均可通过一阶条件确定最优解的解析形式,无需数值算法,其中首位用户到达时间 a_0 , $a_{\tau 0}$ 可通过搜索式(8)和式(14)的解得到, a_{es0} 和 $a_{\tau s0}$ 可分别通过搜索式(21)和式(22)的解得到.本文的数值算例使用 python 语言实现.

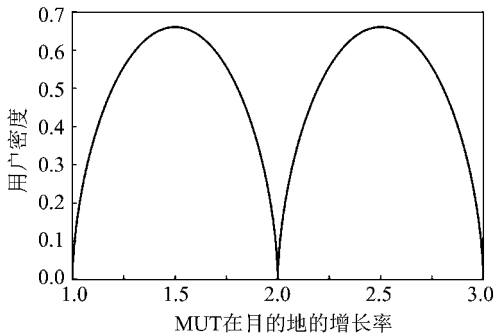


图 2 目的地 MUT 增长率的分布

Fig.2 Density of marginal utility increasing rates at the destination

根据以上基本算例的设定,得到如下数值计算结果.图 3 为无补贴时各 MUT 增长率水平用户取得的效用,体现了不同收费策略的福利效应在用户中的分布.其中曲线 2 为全车道最优收费时用户取得的时间效用,实线 1 为用户均衡状态取得的时间效用,与这条线重合的虚线 3 为全车道最优收费时

用户的间接效用,即时间效用减去支付的通行费.可以确认全车道最优收费没有改变用户的间接效用.出现跳动的曲线 4 和曲线 5 分别为针对较高 γ_1 水平的用户收费时,免费车道及收费车道用户获得的时间效用.出现跳动的点即为 γ_1 的临界值 $\gamma_1^* = 2.54$,点实线 6 为收费车道用户的间接效用,可以看到在不返还收费车道的收入时,全体用户的间接效用均出现了下降,远离 γ_1 平均水平的用户下降较多.而曲线 7 为将收费车道的收入均等返还给全体用户后的间接效用,全体用户的效用均高于无收费用户均衡状态取得的效用,这一策略实现了帕累托改进.图 3 中曲线 5 和曲线 6 之间包络的面积和曲线 2 和 3 之间包络的面积分别为部分车道收费和全车道收费的收入,将两种策略的收入相比,可得在上述设定下收费车道效率约为全车道最优收费的 18.5%.

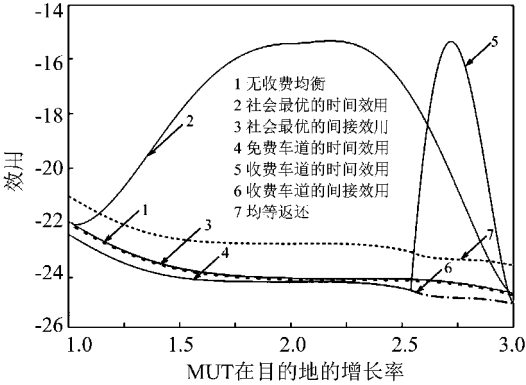


图 3 无补贴时用户取得的效用

Fig.3 Utilities achieved without subsidy

与图 3 相对照,有补贴的情况下各 MUT 增长率水平用户取得的效用如图 4 所示,其中曲线 4 和曲线 5 为分别为用户在免费和收费车道上获得的时间效用.

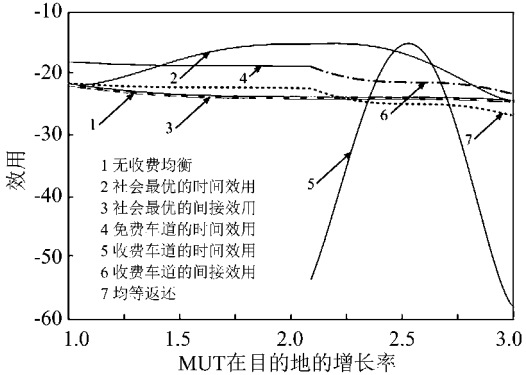


图 4 存在补贴时用户取得的效用

Fig.4 Utilities achieved with subsidy

由于补贴的存在,临界值 γ_1^* 相比无补贴状态

大幅度向左移动,此时 $\gamma_1^* = 2.09$.虽然收费车道的容量仍为全路的 1/4,与图 3 的设定相同,但使用收费车道的用户数量接近 1/2.曲线 6 为收费车道用户的间接效用,可见,在有补贴的条件下,全体用户获得的间接效用均得到了提升,然而将补贴总额减去收费收入,并均摊给全体用户负担时,绝大部分收费车道用户的间接效用均出现了下降,如图 4 中的曲线 7 所示,因此无法实现帕累托改进,此时有补贴情况下的收费效率仅为全车道最优收费的 3.5%.

3 敏感度分析

3.1 不同 MUT 增长率分布

在第 2 节的讨论中,注意到 γ_1^* 的取值和 $U_{ts}(\gamma_1^*)$ 与 $U_{es}(\gamma_1^*)$ 的差值有关,而 $U_{ts}(\gamma_1^*)$ 与 $F(\gamma_1^*)$ 的大小有关.因此,能够推测 MUT 增长率 γ_1 的分布会影响 γ_1 的取值,进而影响收费车道的相对效率.为了验证以上推测,我们将 γ_1 的分布改为与基本算例具有相同均值,但分布范围不同的均匀分布.在这些 γ_1 分布条件下分别得到的无补贴和有补贴收费车道相对效率如图 5 所示.

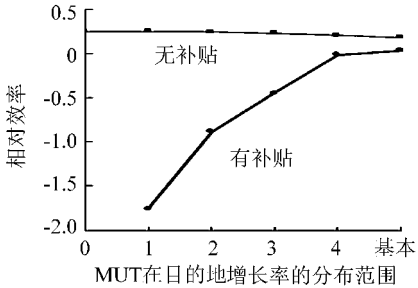


图 5 不同 MUT 增长率分布对相对效率的影响

Fig.5 Effect of different MUT increasing rate distributions on the relative efficiency

图 5 中上下 2 条折线分别为无补贴和有补贴时的相对效用.其中横轴为 0 的点代表 γ_1 没有异质性的情况.在用户均质的条件下,由于使用收费车道的用户种类没有区分,无补贴收费车道的相对效率一定等于收费车道通行能力的占全车道通行能力的比例,即 25%.同时,在此条件下用户的 MUT 相同,无法针对不同用户获得效用的差值进行补贴,因此有补贴的情况不适用.最右侧的点为 2.3 节基础算例中 γ_1 的分布形态.各分布的均值均为 2,中间 4 个为均匀分布,分布范围由 1 至 4 依次为 $[1.75, 2.25]$, $[1.5, 2.5]$, $[1.25, 2.75]$ 及 $[1, 3]$,而各分布的用户总数仍保持与基本算例相同.

从图 5 中我们观察到无补贴收费车道的相对效率随异质性水平上升而下降.其中最为紧凑的分布 1

达到了与均质用户条件下相同的效率,该效率与收费车道通行能力占比相同,为 25%,而分布 4 则降低到 20.8%.基础算例中 γ_1 的分布在上限附近的用户密度较为稀疏,因此我们得到在该分布下,收费车道的相对效率仅为 18.5%.对于有补贴存在的情况,收费效率随用户异质性水平升高而升高,但明显低于无补贴的情况.在 4 种均匀分布下有补贴收费车道的相对效率均为负值,无法实现社会福利水平的提高.对于基础算例,有补贴时的收费效率为 3.5%,远低于无补贴情况.

3.2 收费车道效率随异质性水平变动的原因

根据直观判断,行驶在收费车道上的用户 MUT 越高,减少的拥堵应该越有价值,收费的相对效率也应当更高.由 3.1 节结果可见,在无补贴的情况下,收费车道的效率随用户的异质性水平上升而降低.下面对这一现象产生的原因进行分析.

首先假设在各个分布下 γ_1^* 以及用户总数均不改变.当 γ_1 的分布范围扩大时,会有新的用户类型出现,这些新用户的 γ_1 大于旧用户中 γ_1 最高的用户,或者低于旧用户中 γ_1 最低的用户.同时,由于用户总数不变,那么维持旧有 γ_1 水平不变(下称旧类型)用户数量必然减少.此时,MUT 增长率为 γ_1^* 的用户在旧类型用户中的相对数量保持不变,且 γ_1^* 在旧类型用户的 γ_1 分布中排位也不改变,因此 γ_1^* 用户对于全体旧用户的外部成本应保持不变.然而,由于此时旧用户类型的总数降低,那么每个 γ_1^* 用户对旧用户类型的总外部成本会降低.同时,在免费车道的全体用户中,新类型用户具有比旧类型用户更低的 γ_1 ,也就是说 γ_1^* 用户对这部分新用户的外部成本要低于旧类型用户.因此,免费车道的全体用户效用都将升高.

由此可见,如果用户数量和 γ_1^* 保持不变,免费车道全体用户取得的效用会随异质性水平的上升而升高.然而,此时最优化问题式(18)的一阶条件式(19)不再满足, γ_1^* 必须向增大的方向移动才能最大化式(18)的目标函数,即免费车道用户数量增加,收费车道用户数量降低.在免费车道上,更多的用户数量使得高峰持续时间更长,排在队列最前的用户 γ_1^* 以及队列末尾的用户 γ_L 取得的效用相比 γ_1^* 增大前都会降低.根据式(10)和式(15),在收费车道上用户的间接效用一定小于等于用户 γ_1^* 的间接效用,因此全体用户的间接效用都随 γ_1^* 分布范围的扩大而降低.因此,收费车道的相对效率被降低了.

而在允许补贴的情况下,收费车道的效率虽然随用户的异质性水平上升而上升,但这是源于补贴

的减少.与无补贴情况相同,在异质性水平升高时, γ_1^* 会增大,收费车道的用户数量降低,同时免费车道用户数量增加.由于收费车道用户总数量减少,造成补贴额减少,抵消了因免费车道拥挤增加而降低的福利水平.因此补贴越少,相对效率也就越高.

3.3 不同收费车道容量及收费对象

由于收费车道容量很大程度决定了收费车道的收入高低,为了明确收费车道容量对收费效率的影响,以下对基本算例中的收费车道容量进行调整,并与对较低 γ_1 用户进行收费的情形对比.

不同收费车道容量及收费对象的相对效率如表 1 所示,其中,设收费车道容量占比为 p .收费效率随收费车道通行能力占比的增加而升高,同时由于针对较高 γ_1 用户收费可以带来更高的收入,因此收费效率始终高于对低 γ_1 用户收费.在现实中,货运用户一定会与客运用户的 MUT 增长率水平出现一定程度的重叠,因此在设置客货分离车道进行差别化收费时,使用 MUT 增长率水平区分用户能够让管理者对临界值进行选择,允许具有类似 MUT 增长率水平的其他车型进入收费车道行驶,使得收费车道的容量始终被有效利用.例如,当货运用户密度较低时,允许前往机场等具有较高 MUT 增长率的客运用户进入收费车道.这虽然涉及用户 MUT 数据的实际获取方式,但由于物联网技术及个人移动设备的普及,管理者获取的用户 MUT 数据变得越来越可靠.因此,这样的收费车道策略能够消除根据车型类别进行差别化收费时^[11]所遇到的难以充分利用车道容量的困难.

表 1 不同收费车道容量及收费对象的相对效率

Tab.1 Relative efficiency of pay-lane with different shares of capacities and users

收费对象	相对效率				
	$p=1$	$p=0.75$	$p=0.50$	$p=0.25$	$p=0$
低 MUT 增长率用户	1	0.729 7	0.427 2	0.175 3	0
高 MUT 增长率用户	1	0.730 1	0.443 9	0.185 2	0

4 结论

根据货运用户时间价值高于客运用户的现象,使用时变边际效用模型对具有异质性的用户在部分车道收费策略下的福利效应进行了研究,对比了全车道最优收费与部分车道收费策略的效率,并讨论了用户异质性水平及车道容量对收费车道相对效率的影响,主要结论如下.

1)在不对用户进行补贴,且将收费车道的收入返还给全体用户时,能够实现帕累托改进.

2)对收费车道用户进行补贴虽然可以提高用户的间接效用,然而将补贴均摊给全体用户后无法实现帕累托改进。

3)无补贴收费车道的相对效率随着用户异质性水平的升高而降低,而有补贴收费车道的相对效率随用户异质性水平升高而升高。

4)针对边际时间效用增长率较高的用户进行收费可以获得较高的相对效率。

参考文献(References):

- [1] DURANTON G, PUGA D. Micro-foundations of urban agglomeration economies[M/OL]// Handbook of Regional and Urban Economics, Elsevier, 2004: 2063—2117. [2016-02-09]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574008004800051>.
- [2] ROSENTHAL S S, STRANGE W C. Evidence on the nature and sources of agglomeration economies [M/OL]// Handbook of Regional and Urban Economics, Elsevier, 2004: 2119—2171. [2016-02-09]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574008004800063>.
- [3] VICKREY W. Pricing, metering, and efficiently using urban transportation facilities[J]. Highway Research Record, 1973(476): 36—48.
- [4] FOSGERAU M, SMALL K. Endogenous scheduling preferences and congestion[R/OL]. University of California-Irvine, Department of Economics, 2014. [2015-05-26]. <https://ideas.repec.org/p/irv/wpaper/131403.html>.
- [5] WILSON A G. Land-use/transport interaction models: past and future[J]. Journal of Transport Economics and Policy, 1998, 32(1): 3—26.
- [6] HOLGUÍN-VERAS J. Necessary conditions for off-hour deliveries and the effectiveness of urban freight road pricing and alternative financial policies in competitive markets[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2008, 42(2): 392—413.
- [7] WebTAG: TAGdata book[R/OL]. Department for Transport, UK, 2015. [2016-02-09]. <https://www.gov.uk/government/publications/webtag-tag-data-book-december-2015>.
- [8] Technical guideline for cost and benefit analysis of public utilities (common part)[R/OL]. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan, 2009. [2015-12-25]. https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kasen_hyouka/dai001kai/dai001kai_ref4.pdf. (in Japanese)
- [9] VERHOEF E T, ROUWENDAL J, RIETVELD P. Congestion caused by speed differences[J]. Journal of Urban Economics, 1999, 45(3): 533—556.
- [10] PITFIELD D, WATSON R. High-occupancy routes and truck lanes[M/OL]// Handbook of Transport Systems and Traffic Control, Emerald Group Publishing Limited, 2001: 413—423. [2016-12-21]. <http://www.emerald-insight.com/doi/pdfplus/10.1108/9781615832460-027>.
- [11] DOUGLAS J. Planning truck facilities on urban highways[C/CD]// 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Conference CD Paper, 2005.
- [12] YANG C H, REGAN A C. Evaluation of general truck management strategies based on integrated simulation studies: Case study of truck lane restriction on I—710 in Southern California[C/CD]// 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Conference CD Paper, 2007.
- [13] DE PALMA A, KILANI M, LINDSEY R. The merits of separating cars and trucks[J]. Journal of Urban Economics, 2008, 64(2): 340—361.
- [14] VICKREY W S. Congestion theory and transport investment[J]. The American Economic Review, 1969, 59(2): 251—260.
- [15] SMALL K A. The scheduling of consumer activities: work trips[J]. The American Economic Review, 1982, 72(3): 467—479.
- [16] BÖRJESSON M. Joint RP-SP data in a mixed logit analysis of trip timing decisions[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(6): 1025—1038.
- [17] VAN-DEN-BERG V, VERHOEF E T. Congestion tolling in the bottleneck model with heterogeneous values of time[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(1): 60—78.
- [18] TSENG Y Y, VERHOEF E T. Value of time by time of day: a stated-preference study[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2008, 42(7/8): 607—618.
- [19] BÖRJESSON M, ELIASSON J, FRANKLIN J P. Valuations of travel time variability in scheduling versus mean-variance models[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(7): 855—873.
- [20] HJORTH K, BÖRJESSON M, ENGELSON L, et al. Estimating exponential scheduling preferences[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 81(1): 230—251.
- [21] FOSGERAU M, DE-PALMA A. Congestion in a city with a central bottleneck[J]. Journal of Urban Economics, 2012, 71(3): 269—277.
- [22] ARNOTT R, DE-PALMA A, LINDSEY R. Economics of a bottleneck[J]. Journal of Urban Economics, 1990, 27(1): 111—130.