Open Journal of Transportation Technologies 交通技术, 2019, 8(6), 417-425
Published Online November 2019 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ojtt
https://doi.org/10.12677/ojtt.2019.86050

Network Equilibrium Considering the Impact of Ride-Sourcing Services

Fangfang Yuan[1*], Han Deng[2], Zhipeng Chen[3]

[1]Division of Engineering and Computer Science, NYU Shanghai, Shanghai
[2]Institute for Transportation & Development Policy, Beijing
[3]Times China Hold, Huizhou Guangdong
Email: *yuanff73@gmail.com

Received: Nov. 4th, 2019; accepted: Nov. 18th, 2019; published: Nov. 25th, 2019

Abstract

With the popularization of smartphones and the ride-sourcing market, ride-sourcing services have become a major transportation mode for the public. Undoubtedly, as the ride-sourcing market keeps growing, the operating behaviors of ride-sourcing vehicles will yield a great impact on the traffic flow distribution across road networks, and further impact future transportation planning. Different from the private passenger vehicles, the routing behaviors of ride-sourcing vehicles are heavily affected by the travel demand of ride-sourcing customers. As a result, the traditional network equilibrium model cannot be directly applied to the ride-sourcing vehicles. In this study, a variational inequality model is developed to capture the impact of travel demands on ride-sourcing vehicles' searching and routing choices, and further to delineate the resultant network equilibrium flow distribution. Numerical examples are conducted to demonstrate the viability and the performance of the proposed model.

Keywords

Ride-Sourcing Vehicles, Network Equilibrium, Routing Behavior, Variational Inequality

考虑网约车影响的网络均衡模型

袁芳芳[1*]，邓　涵[2]，陈志鹏[3]

[1]上海纽约大学工程与计算机科学部，上海
[2]交通与发展政策研究所(美国)北京代表处，北京
[3]时代中国控股有限公司，广东 惠州
Email: *yuanff73@gmail.com

*通讯作者。

文章引用: 袁芳芳, 邓涵, 陈志鹏. 考虑网约车影响的网络均衡模型[J]. 交通技术, 2019, 8(6): 417-425.
DOI: 10.12677/ojtt.2019.86050

收稿日期：2019年11月4日；录用日期：2019年11月18日；发布日期：2019年11月25日

摘　要

随着智能手机的广泛普及以及网约车市场的兴起，网约车服务已经成为了大众出行的重要交通方式。随着网约车市场的快速增长，网约车用户的出行将对路网中交通流的分配造成极大的影响，进而影响未来的交通规划。不同于传统的私家车出行，网约车司机的路径选择行为取决于用户的出行需求，因此，传统的私家车用户均衡模型并不适用于网约车。本文提出了一个新的数学模型来捕捉乘客需求对网约车司机的寻客策略和路径选择行为的影响，进而刻画出考虑网约车的路网均衡模型。该模型通过变分不等式进行描述，并通过一个简单的算例来突出其可行性和合理性。

关键词

网约车，路网均衡，路径选择，变分不等式

1. 引言

截止至 2018 年第二季度末，全国的移动电话用户达到 15.1 亿户。如此庞大的移动手机用户团体以及移动通信技术的发展带来了点对点共享出行交通行业的蓬勃发展。作为一个典型的例子，时至今日，网约车的便捷性已使其成为公众出行的重要交通工具。滴滴平台的 2018 年第二季度城市运行报告显示，该平台用户规模已超过 5.5 亿，每日为全国 400 多个城市的用户提供 3000 万次的出行服务[1]。在为用户出行带来便利的同时，网约车的出现有可能会增加交通拥堵。具体的，由于网约车市场在空间的供求关系并不均衡，网约车司机通常无法在下客的区域成功载客，因此他们需要空车驾驶到别的区域寻找客源，而该部分空载的行程增加了交通拥堵和环境污染。Crammer 和 Krueger [2]在对 5 个美国大城市(波士顿、洛杉矶、纽约、三藩市和西雅图)的 2000 个网约车司机的调查中，发现其空载率高达 45%至 57%。而在 2017 年的一份三藩市的网约车数据分析中，三藩市的空载率为 20%，而该空载行为导致车辆里程数增加了 6.5%至 10% [3]。

鉴于此，考虑网约车行为对交通路网流量分布的影响非常重要。Ban 等[4]建立变分不等式来描述网约车的运营路径选择行为。在他们的模型中，所有的网约车的运营行为均被假设统一服从平台的调度，以最优化平台的总收益。该假设与实际的网约车运营模式有较大的出入，后者的运营通常以最优化网约车司机个人收入为原则。Xu 等[5]通过一系列的不等式方程组建立了能够捕捉网约车空载和寻客行为的用户均衡模型，以反映网约车的真实运营行为，并且通过该模型刻画了网约车空载行为对路网交通流的影响。国内学者也针对网约车做了许多研究，但主要聚焦于网约车使用特征与选择偏好[6] [7]、定价[8] [9]、停车行为[10]等。本研究提出一个简单的变分不等式模型来刻画乘客需求对网约车司机的寻客策略和路径选择行为的影响，进而描述考虑网约车运营行为在内的路网均衡模型。这一变分不等式模型可用于相关部门的交通规划。

2. 网约车司机的用户均衡模型

2.1. 简介及符号

我们用 $G(A,N)$ 来表示一个交通路网，其中 A 和 N 分别是路网的路段和结点的集合。符号 R 和 S 分别表示路网上的所有 OD 对的起点和终点集合，其中 $R \subseteq N, S \subseteq N$。符号 $\bar{P}_{rs}$ 表示连接 OD 对 $r \in R$ 和 $s \in S$ 的路径集合；P_{rs}^k 表示连接 OD 对 $r \in R$ 和 $s \in S$ 并且经过结点 $k \in N$ 的路径集合。定义 q_{rs} 和 d_{rs} 分别为从起点 $r \in R$ 到终点 $s \in S$ 的总私家车流量和网约车乘客需求。B_{ks} 定义为从结点 k 载客并在结点 s 卸客的网约车收入，φ 为驾驶员的时间价值。表 1 定义了模型的变量符号。

Table 1. Variable definition
表 1. 变量定义

符号	含义
$\bar{f}_{rs}^p$	从起点 r 出发到终点 s 并选择路径 $p \in \bar{P}_{rs}$ 的私家车车流
$\bar{C}_{rs}^p$	选择路径 $p \in \bar{P}_{rs}$ 的私家车的出行成本
m_r	在起点 r 产生的网约车总流量
m_{rs}^k	从结点 r 出发选择到结点 k 载客并在结点 s 卸客的网约车流量
$f_{rs,p}^k$	从结点 r 出发选择到结点 k 载客然后在结点 s 卸客，并选择路径 $p \in P_{rs}^k$ 的网约车流量
v_a	路段 a 的总流量
$C_{rs,p}^k$	选择路径 $p \in P_{rs}^k$ 的网约车的出行成本

2.2. 网络均衡模型

对于私家车而言，当网络达到均衡状态时，每个 OD 对的各条被使用的路径具有相等且最小的驾驶成本；没有被使用的路径的驾驶时间大于或等于最小行驶时间。因此，以下四个公式描述了私家车的用户均衡状态。

$$\sum_{p \in \bar{P}_{rs}} \bar{f}_{rs}^p = q_{rs}, \ \forall r \in R, s \in S$$

$$\bar{f}_{rs}^p \ge 0, \quad \forall r \in R, s \in S, p \in \bar{P}_{rs}$$

$$\bar{C}_{rs}^p - \bar{C}_{rs} \ge 0, \ \forall r \in R, s \in S, p \in \bar{P}_{rs}$$

$$\bar{f}_{rs}^p \left(\bar{C}_{rs}^p - \bar{C}_{rs} \right) = 0, \ \forall r \in R, s \in S, p \in \bar{P}_{rs}$$

其中，$\bar{C}_{rs}^p = \varphi \sum_{a \in p} t_a(v_a)$，$\bar{C}_{rs}$ 表示 OD 对 rs 之间的最小行程成本。

而对于网约车，由于网约车司机对客源的分布估计是不完全准确的，因此，他们的寻客策略(载客点和卸客点，即 (k,s))需要通过随机选择模型来描述。具体的，我们考虑连接 OD 对 r 和 s 并且经过结点k的路径 $p \in P_{rs}^k$ 的网约车出行成本为：

$$C_{rs,p}^k = \varphi \sum_{a \in p} t_a(v_a) + E_k(\boldsymbol{m}^k) - B_{ks}, \quad \forall r \in R, s \in S, k \in N, p \in P_{rs}^k$$

其中 $\boldsymbol{m}^k = \left\{ m_{rs}^k ; \forall r \in R, s \in S \right\}$，$E_k(\boldsymbol{m}^k) = \zeta \dfrac{\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} m_{rs}^k}{\sum_{s \in S} d_{ks}}$ 为在结点 k 的竞争成本函数，与在该结点产生的网约车用户总需求量 $\sum_{s \in S} d_{ks}$ 成反比，而与在该结点寻客的网约车司机总量 $\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} m_{rs}^k$ 成正比；ζ 为

参数。

假设网约车对出行成本或收益的理解误差是服从 Gumbel 分布相互独立的随机变量，那么网约车对各种寻客策略(k,s)的选择概率为：

$$\frac{m_{rs}^{k}}{m_r}=\frac{\exp\left(-\theta C_{rs}^{k}\right)}{\sum_{k'\in N,s'\in S}\exp\left(-\theta C_{rs'}^{k'}\right)},\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N$$

其中θ为与理解出行成本的方差成反比的参数。

根据上述选择概率，我们可以得到从起点r出发的网约车的期望最小理解出行成本为：

$$\eta_r=-\frac{1}{\theta}\ln\left(\sum_{s\in S}\sum_{k\in N}\exp\left(-\theta C_{rs}^{k}\right)\right),\quad \forall r\in R$$

由于网约车在结点r的供给量将受到该结点的期望最小理解出行成本η_r的影响，我们将该函数定义为$M_r(\cdot)$，即

$$m_r=M_r\left(\eta_r\right),\quad \forall r\in R$$

对于相同起点和寻客策略的网约车，它们在路径的选择上会遵循传统的用户均衡模型，即选择出行时间最短的路径。因此，他们的路径流量分配可由下述公式表达：

$$C_{rs,p}^{k}-C_{rs}^{k}\ge 0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^{k}$$

$$f_{rs,p}^{k}\left(C_{rs,p}^{k}-C_{rs}^{k}\right)=0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^{k}$$

$$\sum_{p\in P_{rs}^{k}}f_{rs,p}^{k}=m_{rs}^{k},\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N$$

$$f_{rs,p}^{k}\ge 0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N$$

其中C_{rs}^{k}为相同起点r和寻客策略(k,s)的最小出行成本，即时间成本减去收入。由于这些网约车的寻客策略(k,s)相同，所以他们的竞争成本E_k和载客收入B_{ks}也相同。因此，C_{rs}^{k}可理解为最短路径的驾驶成本。

为方便读者，我们将上述的路网均衡充要条件归纳如下：

$$\sum_{p\in \bar{P}_{rs}}\bar{f}_{rs}^{p}=q_{rs},\quad \forall r\in R,s\in S \tag{1}$$

$$\bar{f}_{rs}^{p}\ge 0,\quad \forall r\in R,s\in S,p\in \bar{P}_{rs} \tag{2}$$

$$\bar{C}_{rs}^{p}-\bar{C}_{rs}\ge 0,\quad \forall r\in R,s\in S,p\in \bar{P}_{rs} \tag{3}$$

$$\bar{f}_{rs}^{p}\left(\bar{C}_{rs}^{p}-\bar{C}_{rs}\right)=0,\quad \forall r\in R,s\in S,p\in \bar{P}_{rs} \tag{4}$$

$$\sum_{p\in P_{rs}^{k}}f_{rs,p}^{k}=m_{rs}^{k},\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N \tag{5}$$

$$\sum_{s\in S}\sum_{k\in N}m_{rs}^{k}=m_r,\quad \forall r\in R \tag{6}$$

$$f_{rs,p}^{k}\ge 0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N \tag{7}$$

$$v_a=\sum_{k\in N}\sum_{r\in R,s\in S}\sum_{p\in P_{rs}^{k}}f_{rs,p}^{k}\delta_p^a+\sum_{p\in P_{rs}}\bar{f}_{rs}^{p}\bar{\delta}_p^a,\quad \forall a\in A \tag{8}$$

$$C_{rs,p}^{k}=\varphi\sum_{a\in p}t_a\left(v_a\right)+E_k\left(\boldsymbol{m}^k\right)-B_{ks},\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^{k} \tag{9}$$

$$C_{rs,p}^{k}-C_{rs}^{k}\geq 0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^{k} \tag{10}$$

$$f_{rs,p}^{k}\left(C_{rs,p}^{k}-C_{rs}^{k}\right)=0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^{k} \tag{11}$$

$$\frac{m_{rs}^{k}}{m_r}=\frac{\exp\left(-\theta C_{rs}^{k}\right)}{\sum_{k'\in N,s'\in S}\exp\left(-\theta C_{rs'}^{k'}\right)},\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N \tag{12}$$

$$\eta_r=-\frac{1}{\theta}\ln\left(\sum_{s\in S}\sum_{k\in N}\exp\left(-\theta C_{rs}^{k}\right)\right),\quad \forall r\in R \tag{13}$$

$$m_r=M_r\left(\eta_r\right),\quad \forall r\in R \tag{14}$$

定义 $\Phi=\left\{\left(\bar{\boldsymbol{f}},\boldsymbol{f},\boldsymbol{m},\boldsymbol{v}\right)|(1),(2),(5)\text{-}(8)\right\}$，那么(1)~(14)等价为下列变分不等式问题：

$$\sum_{rs}\sum_{k}\sum_{p}\left(E_k\left(\boldsymbol{m}^{k*}\right)-B_{ks}\right)\left(f_{i,p}^{js}-f_{i,p}^{js*}\right)+\sum_{rs}\sum_{k}\frac{1}{\theta}\ln m_{rs}^{k*}\left(m_{rs}^{k}-m_{rs}^{k*}\right)$$
$$-\sum_{r}\left(\frac{1}{\theta}\ln m_r^{*}+M_r^{-1}\left(m_r^{*}\right)\right)\left(m_r-m_r^{*}\right)+\varphi\sum_{a}t_a\left(v_a^{*}\right)\left(v_a-v_a^{*}\right)\geq 0,\forall\left(\bar{\boldsymbol{f}},\boldsymbol{f},\boldsymbol{m},\boldsymbol{v}\right)\in\Phi$$

为证明其等价性，下列式子描述了该变分不等式的最优性条件

(1)，(2)，(5)~(8)

$$\sum_{a\in p}\lambda_a-\bar{\mu}_{rs}-\bar{\gamma}_{rs}^{p}=0,\quad \forall r\in R,s\in S,p\in\bar{P}_{rs} \tag{15}$$

$$\bar{f}_{rs}^{p}\bar{\gamma}_{rs}^{p}=0,\quad \forall r\in R,s\in S,p\in\bar{P}_{rs} \tag{16}$$

$$\bar{\gamma}_{rs}^{p}\geq 0,\quad \forall r\in R,s\in S,p\in\bar{P}_{rs} \tag{17}$$

$$\sum_{a\in p}\lambda_a+E_k\left(\boldsymbol{m}^k\right)-B_{ks}-\mu_{rs}^{k}-\gamma_{rs,p}^{k}=0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^{k} \tag{18}$$

$$\frac{1}{\theta}\ln m_{rs}^{k}+\mu_{rs}^{k}-\alpha_r=0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N \tag{19}$$

$$-\left(\frac{1}{\theta}\ln m_r+M_r^{-1}\left(m_r\right)\right)+\alpha_r=0,\quad \forall r\in R \tag{20}$$

$$\varphi t_a\left(v_a\right)-\lambda_a=0,\quad \forall a\in A \tag{21}$$

$$f_{rs,p}^{k}\gamma_{rs,p}^{k}=0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^{k} \tag{22}$$

$$\gamma_{rs,p}^{k}\geq 0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^{k} \tag{23}$$

其中 $\bar{\mu}_{rs}$，$\bar{\gamma}_{rs}^{p}$，μ_{rs}^{k}，α_r，$\gamma_{rs,p}^{k}$ 和 λ_a 分别为式(1)，(2)，(5)~(8)的拉格朗日因子。

结合(15)~(17)以及(21)，我们可以得到

$$\varphi\sum_{a\in p}t_a\left(v_a\right)-\bar{\mu}_{rs}\geq 0,\ \forall r\in R,s\in S,p\in\bar{P}_{rs}$$

$$\bar{f}_{rs}^{p}\left(\varphi\sum_{a\in p}t_a\left(v_a\right)-\bar{\mu}_{rs}\right)=0,\quad \forall r\in R,s\in S,p\in\bar{P}_{rs}$$

上述两式与(1)和(2)式共同描述了私家车的用户均衡状态。

结合(18)和(21)~(23)式，可以推导出

$$\varphi\sum_{a\in p}t_a+E_k\left(\boldsymbol{m}^k\right)-B_{ks}-\mu_{rs}^k\ge 0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^k$$

$$f_{rs,p}^k\left(\varphi\sum_{a\in p}t_a+E_k\left(\boldsymbol{m}^k\right)-B_{ks}-\mu_{rs}^k\right)=0,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N,p\in P_{rs}^k$$

与(5)、(7)式共同描述了网约车的路径选择行为。

(19)式可转化为

$$m_{rs}^k=\exp\left(-\theta\left(\mu_{rs}^k-\alpha_r\right)\right),\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N$$

结合(5)式，我们得到

$$m_r=\sum_{k,s}m_{rs}^k=\sum_{k,s}\exp\left(-\theta\left(\mu_{rs}^k-\alpha_r\right)\right),\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N$$

因此，我们可以推导出

$$\frac{m_{rs}^k}{m_r}=\frac{\exp\left(-\theta\mu_{rs}^k\right)}{\sum_{k's'}\exp\left(-\theta\mu_{rs'}^{k'}\right)},\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N$$

上式正是网约车寻客策略的概率函数。

另外，通过(20)可以推导出

$$M_r^{-1}\left(m_r\right)=\frac{1}{\theta}\ln m_r-\alpha_r=-\frac{1}{\theta}\ln\sum_{s\in S}\sum_{k\in N}\exp\left(-\theta\mu_{rs}^k\right),\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N$$

即，

$$m_r=M_r\left(\mu_r\right)=M_r\left(-\frac{1}{\theta}\ln\sum_{s\in S}\sum_{k\in N}\exp\left(-\theta\mu_{rs}^k\right)\right),\quad \forall r\in R$$

该式描述了网约车的供给流量与期望最小出行成本的关系。综上所述，我们所构造的变分不等式与路网均衡状态(1)~(14)完全等价。

由于该变分不等式的可行域为凸且有界，而各个函数均为连续可导。因此，该变分不等式必然存在至少一个解。

2.3. 算法求解

为求解该变分不等式，我们采用 Aghassi 等人[11]提出的方法，将其转化为以下非线性最优化问题

$$\min_{\bar{f},\boldsymbol{f},\boldsymbol{m},\boldsymbol{v},\boldsymbol{\beta}}\sum_{rs}\sum_{k}\sum_{p}\left(E_k\left(\boldsymbol{m}^k\right)-B_{ks}\right)f_{rs,p}^k+\sum_{rs}\sum_{k}\frac{1}{\theta}\ln m_{rs}^k m_{rs}^k$$
$$-\sum_{r}\left(\frac{1}{\theta}\ln m_r+M_r^{-1}\left(m_r\right)\right)m_r+\varphi\sum_{a\in A}t_a\left(v_a\right)v_a-\sum_{rs}q_{rs}\beta_{rs}$$

s.t.

$$\sum_{p\in\bar{P}_{rs}}\bar{f}_{rs}^p=q_{rs},\quad \forall r\in R,s\in S$$

$$\bar{f}_{rs}^p\ge 0,\quad \forall r\in R,s\in S,p\in\bar{P}_{rs}$$

$$\sum_{p\in P_{rs}^k}f_{rs,p}^k=m_{rs}^k,\quad \forall r\in R,s\in S,k\in N$$

$$\sum_{s\in S}\sum_{k\in N} m_{rs}^{k} = m_r,\quad \forall r\in R$$

$$f_{rs,p}^{k} \ge 0,\quad \forall r\in R, s\in S, k\in N$$

$$v_a = \sum_{k\in N}\sum_{r\in R,s\in S}\sum_{p\in P_{rs}^{k}} f_{rs,p}^{k}\delta_p^a + \sum_{r\in R,s\in S}\sum_{p\in P_{rs}} \bar{f}_{rs}^{p}\bar{\delta}_p^a,\quad \forall a\in A$$

$$\beta_{rs} - \varphi\sum_{a\in p} t_a \le 0,\quad \forall r\in R, s\in S, p\in \bar{p}_{rs}$$

$$\frac{1}{\theta}\ln m_r + M_r^{-1}(m_r) - \frac{1}{\theta}\ln m_{rs}^{k} \le \varphi\sum_{a\in p} t_a + E_k\left(\boldsymbol{m}^k\right) - B_{ks},\quad \forall r\in R, s\in S, k\in N,\ p\in P_{rs}^{k}$$

其中 $\boldsymbol{\beta}$ 为新增的变量。

该非线性问题可通过商业求解器(如 CONOPT)求解，当最优目标值为 0 时，其最优解即为变分不等式的最优解。

3. 算例分析

我们基于图 1 中的路网进行算例分析。其中，路网的路段参数如表 2 所示。路段的行程时间服从 BPR 函数，即 $t_a = t_a^0\left(1+0.15\left(\frac{v_a}{C_a}\right)^4\right)$。该路网包含了 2 个私家车的 OD 对以及 2 个网约车乘客的 OD 对，表 3 列举了具体的出行需求矩阵。$\varphi = ¥1/\text{min}$；$B_{43} = ¥48$，$B_{53} = ¥40$；$\zeta = ¥1$；$\theta = 0.5$；$M_r(\eta_r) = \frac{70}{1+\exp\theta\eta_r}$。

表 4 描述了路网均衡下的路段交通流分布，而表 5 和表 6 则显示了私家车和网约车的路径流量分布。根据表 5 和表 6 观察可以发现，私家车和网约车只会使用行程成本最小的路径(加下划线)，即遵循 Wardrop 第一原则。表 7 分析了在路网均衡状态下的不同寻客策略所带来的不同收益(即 C_{rs}^{k} 的相反数)，并且由此而形成的网约车选择概率。具体的，我们可以验证该选择概率服从式(12)所阐述的概率函数。

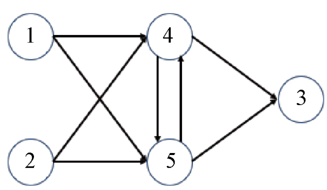

Figure 1. Road network
图 1. 路网图

Table 2. Link parameters
表 2. 路段参数

路段序号	起点	终点	C_a (veh/h)	t_a^0 (min)
1	1	4	12	5
2	1	5	18	2
3	2	4	35	3
4	2	5	35	9
5	4	5	20	9
6	4	3	45	8
7	5	4	11	4
8	5	3	60	7

Table 3. Demand matrix of passenger cars and ride-sourcing users
表 3. 私家车和网约车乘客出行需求矩阵

私家车		网约车	
O\D	3	O\D	3
1	10	3	5
2	30	4	15

Table 4. Link flow distribution under the network equilibrium
表 4. 路网均衡下的路段交通流分布

路段 ID	私家车流量(veh/h)	网约车流量(veh/h)	总流量(veh/h)	时间(min)
(1, 4)	0	25.41	25.41	20.09
(1, 5)	10	40.74	50.74	20.94
(2, 4)	0	58.64	58.64	6.55
(2, 5)	30	11.35	41.35	11.63
(4, 5)	0	0.83	0.83	9.00
(4, 3)	0	83.22	83.22	20.04
(5, 4)	0	0	0	4.00
(5, 3)	40	52.92	92.92	13.04

Table 5. Path flow distribution of passenger cars under the network equilibrium
表 5. 路网均衡状态下的私家车路径流量分布

私家车 OD	路径	路径行程成本(￥)	路径流量(veh/h)
(1, 3)	1-4-3	42.12	0
	1-4-5-3	42.12	0
	1-5-3	33.98	10
	1-5-4-3	46.98	0
(2, 3)	2-4-3	28.59	0
	2-4-5-3	28.59	0
	2-5-3	24.67	30
	2-5-4-3	37.67	0

Table 6. Path flow distribution of ride-sourcing vehicles under the network equilibrium
表 6. 路网均衡状态下的网约车路径流量分布

网约车出发点及寻客策略	路径	路径行程成本(￥)	路径流量(veh/h)
(1, 3, 4)	1-4-3	42.12	24.58
	1-4-5-3	42.12	0.83
	1-5-4-3	46.98	0
(1, 3, 5)	1-5-3	33.98	40.74
	1-5-4-3	46.98	0
	1-4-5-3	42.12	0
(2, 3, 4)	2-4-3	28.59	58.64
	2-4-5-3	28.59	0
	2-5-4-3	37.67	0
(2, 3, 5)	2-5-3	24.67	11.35
	2-5-4-3	37.67	0
	2-4-5-3	28.59	0

Table 7. Revenues of different customer-search strategies and the corresponding adoption percentages under the network equilibrium

表 7. 路网均衡状态下的不同寻客策略收益及网约车的选择概率

出发点	寻客策略	收益(￥)	网约车选择概率(%)
1	(4, 3)	3.78	38.40
	(5, 3)	4.72	61.60
2	(4, 3)	17.31	83.80
	(5, 3)	14.03	16.20

4. 结论

本文提出了一种新的考虑网约车运营的交通路网用户均衡模型。不同于传统的私家车出行，网约车司机的路径选择行为取决于用户的出行需求以及各自的寻客策略。例如，网约车司机倾向于前往需求热点(如市区)以及收益较大的区域(如机场)进行寻客，然后再开往乘客的目的地。本文先通过建立不等式组描述私家车的路径选择和网约车的路径和寻客策略的选择行为，再经过严密的推导，设计了一个等价的变分不等式。最后将该变分不等式转化为最优化问题进行求解。模型的合理性通过简单的算例进行论证。本文的模型为研究网约车的运营对交通流的影响提供了重要的研究手段。

参考文献

[1] 滴滴. 滴滴出行城市交通运行报告: 2018 年第二季度[Z]. 2018.
https://sts.didistatic.com/official-website/reports/2018 年 Q2 城市运行报告-finally.pdf

[2] Cramer, J. and Krueger, A.B. (2016) Disruptive Change in the Taxi Business: The Case of Uber. *American Economic Review*, **106**, 177-82. https://doi.org/10.1257/aer.p20161002

[3] Castiglione, J., Chang, T., Cooper, D., Hobson, J., Logan, W., Young, E., Charlton, B., Wilson, C., Mislove, A., Chen, L. and Jiang, S. (2016) TNCs Today: A Profile of San Francisco Transportation Network Company Activity. San Francisco County Transportation Authority (June 2016).

[4] Ban, J.X., Dessouky, M., Pang, J.-S. and Fan, R. (2018) A General Equilibrium Model for Transportation Systems with e-Hailing Services and Flow Congestion. Working Manuscript, University of Washington, Seattle, WA.

[5] Xu, Z., Chen, Z. and Yin, Y. (2019) Equilibrium Analysis of Urban Traffic Networks with Ride-Sourcing Services. SSRN 3422294. https://doi.org/10.2139/ssrn.3422294

[6] 唐立, 邹彤, 罗霞, 等. 基于混合 Logit 模型的网约车选择行为研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 18(1): 108-114.

[7] 袁亮, 吴佩勋. 城市居民对网约车与出租车的选择意愿及影响因素研究——基于江苏省调查数据的 Logistic 分析[J]. 软科学, 2018, 32(4): 120-123.

[8] 卢珂, 周晶, 林小围. 考虑交叉网络外部性的网约车平台市场定价研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(7): 169-178.

[9] 李亚. 基于双边市场理论的网约车平台定价策略研究[D]:[硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.

[10] 徐志勋, 严海. 枢纽网约车停车选择行为与管理策略研究[J]. 交通技术, 2019, 8(3): 155-165.

[11] Aghassi, M., Bertsimas, D. and Perakis, G. (2006) Solving Asymmetric Variational Inequalities via Convex Optimization. *Operations Research Letters*, **34**, 481-490. https://doi.org/10.1016/j.orl.2005.09.006