

文章编号:1672-9331(2018)04-0045-07

考虑无人驾驶车辆影响的道路网络容量模型

黄中祥, 覃定明, 况爱武

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为了研究未来无人驾驶车辆对道路网络容量的影响, 将路网上的车辆分为无人驾驶车辆和普通车辆两类, 根据两类车辆的不同路径选择行为, 构建考虑无人驾驶车辆影响的道路网络容量双层规划模型。上层模型为满足路段容量约束条件下的最大交通需求, 其中各 OD 之间的交通需求采用均一的增长乘子; 下层模型为考虑无人驾驶车辆影响的混合路径选择行为模型, 其中普通车辆以极小化个体的出行成本为目标, 而无人驾驶车辆以系统最优为目标。基于迭代平衡思想设计求解双层规划的启发式算法, 并通过算例验证了模型和算法的有效性和可行性。研究结果表明: ①当无人驾驶车辆的市场渗透率较低时, 无人驾驶车辆对普通车辆的路径选择影响不大, 道路网络混合均衡流量波动很小, 道路网络容量增加不明显; ②随着市场渗透率的增加, 道路网络容量首先呈现缓慢增加的趋势, 当无人驾驶车辆占据主导地位后, 可利用的路径数量增多, 流量在不同路段上分布更加均衡, 道路网络容量快速增长, 当网络中的车辆都是无人驾驶车辆时, 整个系统处于最优运行状态, 算例结果表明道路网络容量显著增加; ③随着道路网络容量的增加, 交通网络系统总阻抗也会增加, 但每辆车的平均出行成本变化不大。

关键词: 交通工程; 道路网络容量; 混合均衡; 无人驾驶车辆; 市场渗透率; 双层规划

中图分类号: U491.1

文献标识码: A

Capacity model of road network considering the impact of the autonomous vehicles

HUANG Zhong-xiang, QIN Ding-ming, KUANG Ai-wu

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to study the impact of future autonomous vehicles on the road network capacity, the vehicles on the road network were divided into two types: autonomous vehicles and ordinary vehicles. According to the different path selection behaviors of the two types of vehicles, a bi-level programming model of the road network capacity was constructed considering the influence of driverless vehicles. The upper layer model was the maximum demand under the condition of road capacity constraint. The traffic demand between different OD used a uniform growth multiplier. The lower model was a mixed routing behavior model considering the influence of the autonomous vehicles. Among them, traditional vehicles aimed at minimizing individual travel cost. Autonomous vehicles pursued the optimal systems goal. The heuristic algorithm for the bi-level programming was designed

收稿日期: 2018-09-04

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51338002)

通讯作者: 况爱武(1979—), 男, 江西高安人, 长沙理工大学副教授, 博士, 主要从事交通运输规划方面的研究。E-mail: jxgakaw@126.com。

based on the idea of iterative balance. The validity and feasibility of the model and algorithm were verified by a simple urban road network. The result indicates that: ① When the market penetration of the autonomous vehicles is low, the autonomous vehicles have little effect on the path selection of the ordinary vehicles. The fluctuation of the road network of the mixed equilibrium flow is small, and the road network capacity increase is not obvious. ② As the market penetration rate increasing, the road network capacity firstly shows a slowly enhancing state. The autonomous vehicles will take over while reaching a certain proportion. The total numbers of available routes are increasing. Therefore, the traffic volumes are more evenly distributed on different road segments. The road network capacity growth trend increases rapidly. The whole system is in the optimal state and the road network capacity is maximized if only autonomous vehicles exist in the network. ③ Although the total network impedance increased due to the increase of the road network capacity, the average travel cost of the network traveler does not change too much.

Key words: traffic engineering; road network capacity; mixed equilibrium; autonomous vehicle; market penetration; bi-level programming

科学把握道路网络容量是开展交通供求分析的基础,提高道路网络容量是缓解交通拥挤的有效措施。道路网络容量处于何种水平,影响因素有哪些,国内外学者从不同角度采用不同方法对其开展了广泛而深入的研究,提出了多种分析道路网络容量的方法,包括时空消耗法、割集法、交通分配模拟法和双层规划法等^[1-2]。Wang等^[3]研究了随机用户均衡下的容量问题,并采用灵敏度分析方法求解。随着先进出行者信息系统(Advanced Traveler Information Systems,简称ATIS)的快速发展,信息质量和市场渗透率成为了影响道路网络容量的重要因素并倍受关注。方文彬等^[4]构建了ATIS环境下的道路网络储备容量双层规划模型,研究了ATIS对道路网络容量的影响。最近,Bifulco等^[5]研究了ATIS环境下出行信息的变化对道路网络均衡稳定性的影响。目前,已有的研究考虑的是普通车辆对道路网络容量的影响,尚缺乏对未来无人驾驶车辆路径的选择行为的研究。

近年来,无人驾驶技术迅猛发展,未来无人驾驶车辆必将逐步进入道路网络,并对普通车辆的出行路径选择产生重要影响。从市场渗透率角度,Lavasani等^[6]考虑风险承受能力和文化、生活方式偏好等因素,根据已有的技术应用数据构建了无人驾驶车辆的市场渗透率模型,并对市场规模和无人驾驶车辆的价格进行了灵敏度分析;

Chen等^[7]将交通网络出行车辆分为普通车辆和无人驾驶车辆两类,根据网络均衡模型和内生市场渗透率模型,研究了无人驾驶车辆专用车道的最优调度问题,提出了实时可变车道调度方案。在路径选择方面,Levin^[8]研究了无人驾驶对出行行为和网络拥挤的影响,基于Greenshields模型改进路段容量函数,提出了考虑无人驾驶行为的四阶段规划模型。此外,Levin^[9]还考虑了拥挤条件下共享自动驾驶汽车系统最优路径选择问题,构建了包含共享车辆出行和等待时间的系统动态最优交通分配模型;Bagloee等^[10]分析了网联汽车协作运行遵循系统最优路径的可行性问题,研究了网联汽车与普通车辆的混合均衡问题,考虑容量约束、多用户类、非对称阻抗函数和可变需求等,构建了混合状态下的非线性互补模型;Chen等^[11]将出行用户分为普通车辆和无人驾驶车辆两类,无人驾驶专用区域外的车辆遵循用户最优路径,无人驾驶专用区域内车辆遵循系统最优路径,基于混合驾驶路径选择行为研究了无人驾驶车辆专用区域的最优设计问题。

在交通智能化时代下,无人驾驶车辆的加入对道路网络容量同样会产生重要影响。目前,无人驾驶车辆路径选择行为,尤其是混合路径选择行为对道路网络容量的影响已倍受关注。因此,作者将道路网络车辆划分为普通车辆和无人驾驶车辆两类,通过建立双层规划模型,研究无人驾驶

车辆市场渗透率及其路径选择行为对道路网络容量的影响。

1 车辆路径选择假设

无人驾驶车辆装备传感器、雷达、陀螺仪和摄像机等,通过传感器收集环境周围的人、车、道路设施等信息,通过智能算法程序能够指挥车辆进行换道、加速、超车等行为。Bagloee^[12]指出,未来乘坐无人驾驶车辆的用户只需要输入出行终点,即可自动将出行者送达目的地;基于互联网技术和通讯技术等,无人驾驶车辆可形成协作运行的车队形式,服从控制中心的统一调度。传统车辆一般按照自身经验或者导航地图进行路径选择,难以准确获知道路交通信息。而无人驾驶车辆由于自身配备的传感器系统和定位导航系统等,可根据实时的道路交通状况进行路径调整。随着智慧城市系统的发展,未来无人驾驶车辆可实现车与车通讯和车与路侧设施通讯,实时感知和获取已有的路径出行信息。无人驾驶车辆的出现,为控制中心诱导车辆合作行驶、均衡道路网络流量分布、降低道路网络总出行费用和提高道路网络出行效率等提供了可能。

对于道路的管理者而言,考虑无人驾驶车辆遵循系统最优路径,不仅能便于管理无人驾驶车辆的出行模式,而且有助于改善网络的拥挤状况。对于道路网络的出行者而言,前期无人驾驶车辆遵循系统最优路径可能会损害其出行利益,出行路径不一定是最短路径,但是随着无人驾驶车辆市场渗透率的增加,这种损失会逐渐减小,转换为净收益。换言之,无人驾驶车辆遵循系统最优路径可以有效避免过度集中到某几条瓶颈路段,进一步提升道路网络的容量,从中受益的是整个网络的出行用户。

本研究假设道路网络中存在两类用户:一类是普通车辆,另一类是无人驾驶车辆。假设普通车辆按照出行费用最小原则,遵循用户最优选择路径;无人驾驶车辆服从控制中心的调度,完全遵循系统最优选择路径。普通车辆与无人驾驶车辆在相同的城市道路网络中混合行驶,假设短期内 OD(Origin-Destination,简称 OD)出行需求不会发生很大变动,拥有稳定的 OD 结构。每个 OD

对之间的两类出行用户只能通过变更路径降低出行成本,路径选择遵循混合用户均衡原则,路段上所分配的混合交通流量满足容量约束条件。

2 道路网络容量模型

2.1 变量说明

用 $G=(N,A)$ 表示一个交通道路网络,其中, N 为节点集合; A 为路段集; a 表示某一具体路段。OD 对的集合记为 W ,其中, R 为 OD 对起点; S 为 OD 对终点; (r,s) 为某一个 OD 对。用 C_a 表示路段 a 的容量; μ 表示交通需求增长乘子; λ 表示无人驾驶车辆的市场渗透率。

道路网络中的基础出行需求记为 q_{rs} ,普通车辆在 (r,s) 间的出行需求为 \bar{q}_{rs} ,无人驾驶车辆在 (r,s) 间的出行需求为 \hat{q}_{rs} 。OD 对 (r,s) 间, \bar{K} 表示普通车辆的路径集合; \bar{k} 表示某一具体路径; \hat{K} 表示无人驾驶车辆的路径集合; \hat{k} 表示某一具体路径。用 \bar{f}_k^{rs} 表示 OD 对 (r,s) 间第 \bar{k} 条路径上普通车辆的流量; \hat{f}_k^{rs} 表示第 \hat{k} 条路径上无人驾驶车辆的流量;用 \bar{x}_a, \hat{x}_a 分别表示路段 a 上普通车辆和无人驾驶车辆的流量;用 x_a 表示路段 a 上的总流量;用 $\delta_{a,k}^{rs}$ 表示路段路径关联变量,如果 OD 对 (r,s) 间的路径 k 利用到了路段 a ,其取值为 1,否则取值为 0。

2.2 道路网络容量双层规划模型

上层规划为路段容量限制下的道路网络储备容量最大化模型,下层规划为无人驾驶车辆影响下的混合均衡分配模型,其中,无人驾驶车辆遵循系统最优(System Optimum,简称 SO)选择策略,普通车辆遵循用户最优(User Equilibrium,简称 UE)选择路径。

上层模型:

$$\max \mu \sum_{r,s} q_{rs} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } x_a(\mu) \leq C_a, \forall a \in A. \quad (2)$$

下层模型:

考虑将无人驾驶车流量 \hat{x}_a 作为背景流量,按照 UE 分配模型构造普通车辆的非线性规划模型^[13]:

$$\min \bar{Z}(\bar{X}) = \sum_{a \in A} \int_0^{\bar{x}_a} t_a(\hat{x}_a + x) dx. \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \bar{q}_{rs} = (1 - \lambda) \mu q_{rs}. \quad (4)$$

$$\sum_k \bar{f}_k^{rs} = \bar{q}_{rs}, \forall (r, s) \in W. \quad (5)$$

$$\bar{x}_a = \sum_r \sum_s \sum_k (\bar{f}_k^{rs}) \delta_{a,k}^{rs}, \forall a \in A. \quad (6)$$

$$\bar{f}_k^{rs} \geq 0, \forall (r, s) \in W, k \in \bar{K}. \quad (7)$$

同理,将普通车分配流量 \bar{x}_a 作为背景流量,按照 SO 分配模型构造无人驾驶车辆的非线性规划模型:

$$\min \hat{Z}(\hat{X}) = \sum_{a \in A} \hat{x}_a t_a(\bar{x}_a + \hat{x}_a). \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \hat{q}_{rs} = \lambda \mu q_{rs}. \quad (9)$$

$$\sum_k \hat{f}_k^{rs} = \hat{q}_{rs}, \forall (r, s) \in W. \quad (10)$$

$$\hat{x}_a = \sum_r \sum_s \sum_k (\hat{f}_k^{rs}) \delta_{a,k}^{rs}, \forall a \in A. \quad (11)$$

$$\hat{f}_k^{rs} \geq 0, \forall (r, s) \in W, k \in \hat{K}. \quad (12)$$

式(3)中, $\bar{Z}(\bar{X})$ 为 UE 的目标函数;式(8)

中, $\bar{Z}(\bar{X})$ 为 SO 的目标函数。与 UE 模型不同, SO 配流采用的是边际行驶时间函数,即 $\hat{t}_a(x_a) = t_a(\bar{x}_a + \hat{x}_a) + \hat{x}_a \frac{\partial t_a(\bar{x}_a + \hat{x}_a)}{\partial \hat{x}_a}$ 进行系统最优配流。

无人驾驶车辆和普通车辆在道路网络中按照不同的路径选择规则进行混合行驶,通过阻抗反映彼此间的影响,最终形成道路网络混合均衡状态。对于普通车辆,所有使用的路径具有相等且最短的走行时间;而对于无人驾驶车辆,所有使用的路径具有相等且最短的边际走行时间。

引理 1 假设路段费用函数 $t_a(x_a)$ 是严格递增的凸函数,寻找解向量 (\bar{x}^*, \hat{x}^*) ,使得 UE-SO 混合均衡模型式(12)满足下列变分不等式:

$$\sum_{a \in A} \{t_a(x_a)(\bar{x}_a - \bar{x}_a^*) + \sum_{a \in A} [t_a(x_a) + \hat{x}_a t'_a(x_a)](\hat{x}_a - \hat{x}_a^*)\} \geq 0. \quad (13)$$

式中: $x_a = \bar{x}_a^* + \hat{x}_a^*$, $t'_a(x_a) = \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a}$, $\forall a \in A$ 。

因为 $t_a(x_a)$ 是严格单调递增的凸函数,变分不等式(13)有至少一个解。对于 $\forall a \in A$,可以得到路段费用函数为:

$$c_a(x_a) = [t_a(x_a), t_a(x_a) + \hat{x}_a t'_a(x_a)]. \quad (14)$$

这里,只要 $\{[c_a(x_a) - c_a(\tilde{x}_a)]^T, x_a - \tilde{x}_a\} > 0$ 成立,

$\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积,任意路段流量 $x_a \neq \tilde{x}_a$,由此可

知,变分不等式(13)最多有一个解。显然,如果 $t_a(x_a)$ 是仿射的,并且任意路段 a 是严格单调函数,则变分不等式(13)有唯一的解。当路段费用函数是多项式函数时,UE-SO 混合均衡模型具有唯一解集。

3 模型求解算法

对于所建立的双层规划模型,本研究采用增量法和连续平均法(MSA)来求解。具体算法如下。

步骤 1: 给定基础 OD 矩阵 q_{rs} , $\forall rs \in RS$, 设定需求乘子步长 $\Delta\mu$, 初始化 μ_0 , 令 $\mu(1) = \mu_0$, $n=1$ 。

步骤 2: 对于给定的 $\mu(n)$, 普通车辆出行量为 $\bar{q}_{rs} = (1 - \lambda) \mu q_{rs}$, 无人驾驶车辆出行量为 $\hat{q}_{rs} = \lambda \mu q_{rs}$, $\forall rs \in RS$ 。针对两类用户求解下层 UE-SO 混合均衡模型,获得路段流量。混合均衡模型的求解步骤为:

①初始化。令各路段流量为 0, 得到各路段零流走行时间 $t_a^{(0)} = t_a(0)$, 分别对 \bar{q}_{rs} 和 \hat{q}_{rs} 进行全有全无分配, 得到普通车辆流量集合 $\bar{x}_a^{(m)}$ 和无人驾驶车辆流量集合 $\hat{x}_a^{(m)}$, 令 $x_a^{(m)} = \bar{x}_a^{(m)} + \hat{x}_a^{(m)}$, 令迭代次数 $m=1$ 。

②更新。计算 $t_a^{(m)} = t_a(\bar{x}_a^{(m)} + \hat{x}_a^{(m)})$, $\forall a \in A$, 得到路段新的实际走行时间。

③普通车辆路段流量更新。根据②计算出的路段走行时间 $t_a^{(m)}$, 对 \bar{q}_{rs} 进行道路网络流量分配, 获得各路段的附加交通流量 $\{\bar{y}_a^{(m)}\}$, 进而得到搜索方向 $\bar{d}_a^{(m)} = \bar{y}_a^{(m)} - \bar{x}_a^{(m)}$ 。用加权平均的方法更新路段流量, $\bar{x}_a^{(m+1)} = \bar{x}_a^{(m)} + \frac{1}{m} (\bar{y}_a^{(m)} - \bar{x}_a^{(m)})$, $\forall a \in A$ 。

④无人驾驶车辆路段流量更新。根据边际费用函数, 计算出路段走行时间为: $\hat{t}_a^{(m)} = t_a^{(m)} + \hat{x}_a^{(m)} \frac{\partial t_a^{(m)}}{\partial \hat{x}_a^{(m)}}$ 。对 \hat{q}_{rs} 进行道路网络流量分配, 获得各路段的附加交通流量 $\{\hat{y}_a^{(m)}\}$, 进而得到搜索方向 $\hat{d}_a^{(m)} = \hat{y}_a^{(m)} - \hat{x}_a^{(m)}$ 。用加权平均方法更新路段流量, $\hat{x}_a^{(m+1)} = \hat{x}_a^{(m)} + \frac{1}{m} (\hat{y}_a^{(m)} - \hat{x}_a^{(m)})$, $\forall a \in A$ 。

⑤混合流量更新。 $x_a^{(m+1)} = \bar{x}_a^{(m)} + \hat{x}_a^{(m)}$ 。

⑥判断是否满足收敛条件。若 $\sqrt{\sum_a (x_a^{(m+1)} - x_a^{(m)})^2} / \sum_a x_a^{(m)} \leq \varepsilon$ (ε 是事先给定的迭代精度), 则停止循环; 否则, 令 $m = m + 1$, 返回②。

步骤 3: 如果 $\forall a \in A$, 均有 $x_a[\mu(n)] \leq C_a$, 则令 $\mu(n+1) = \mu(n) + \Delta\mu$, $n = n + 1$, 返回步骤 2; 否则输出结果, 算法停止。

4 算例分析

4.1 道路网络描述

测试道路网络如图 1 所示, 该道路网络由 7 个节点和 11 条有向路段组成, 各路段编号标示于图中。道路网络路径编号如表 1 所示。假定有 2 个 OD 对, 初始需求量分别为 $q_{16} = 1\,200$ 辆/h, $q_{27} = 1\,000$ 辆/h, 采用 BPR (Bureau of Public Roads, 简称 BPR) 函数作为路段阻抗函数, 路段 a 的出行时间记为 $t_a(x_a) = t_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right]$, t_a^0 表示路段 a 的自由流时间。BPR 函数的参数取值为 $\alpha = 0.15$, $\beta = 4$, 初始交通需求增长乘子 $\mu = 1$, 递增因子 $\Delta\mu = 0.01$, 收敛精度 $\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$ 。

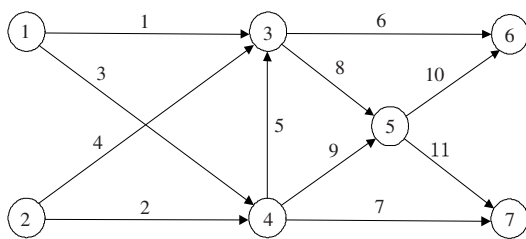


图 1 道路网络算例

Fig. 1 Traffic road network example

表 1 道路网络路径编号

Table 1 The index of traffic network path

序号	包含路段	序号	包含路段
k_1	1, 6	k_6	2, 7
k_2	1, 8, 10	k_7	4, 8, 11
k_3	3, 5, 6	k_8	2, 9, 11
k_4	3, 9, 10	k_9	2, 5, 8, 11
k_5	3, 5, 8, 10		

测试道路网络路段自由行驶时间和容量如表 2 所示。

表 2 设定的路段参数

Table 2 Characteristic parameters of each link

路段 编号	自由流行 驶时间/h	通行能力/ (辆 · h ⁻¹)	路段 编号	自由流行 驶时间/h	通行能力/ (辆 · h ⁻¹)
1	0.25	1 500	7	0.20	1 000
2	0.20	1 300	8	0.12	900
3	0.15	1 700	9	0.16	1 200
4	0.15	1 200	10	0.20	1 000
5	0.10	800	11	0.16	1 600
6	0.30	1 200			

4.2 结果分析

根据上述的算法流程, 通过计算机软件编程, 得到道路网络容量计算结果如图 2 所示。

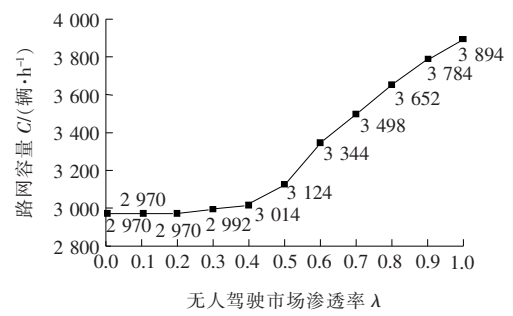


图 2 路网容量随市场渗透率的变化图

Fig. 2 Changing diagram of road network capacity in different market penetration

通过分析图 2, 可将无人驾驶车辆市场划为四个阶段。

1) 第一阶段。

无人驾驶车辆市场渗透为 0~0.2 时, 道路网络上主要为普通车辆, 遵循最短路出行原则, OD 对(1,6)达到均衡状态时两类车出行路径为 k_1 和 k_4 , OD 对(2,7)出行路径为 k_6 和 k_7 , 二者路径出行时间差别不大。此时, 无人驾驶车辆对普通车辆的影响较小, 均衡时路段总流量波动很小, 道路网络容量增加不明显。

2) 第二个阶段。

无人驾驶车辆市场渗透为 0.2~0.5 时, 道路网络容量呈缓慢增加的趋势。此时普通车辆在 OD 对(1,6)之间的流量逐渐转移到路径 k_4 , OD 对(2,7)的选择路径逐渐转移到路径 k_6 , 无人驾驶车辆在 OD 对(1,6)间增加路径 k_3 , 路段 5 的流量也从 0 增加到 63 辆/h, 说明此时在无人驾驶车辆

市场渗透率达到 0.3 时,道路网络可利用的路径数量增加,但效果还不是很明显。当无人驾驶车辆市场渗透率达到 0.5 时,道路网络容量相比其渗透率为 0 时增加了 5.19%,增加幅度不大。

3) 第三阶段。

无人驾驶车辆市场渗透率从 0.5 开始,道路网络容量呈近线性快速增长的趋势。这主要是因为无人驾驶车辆占据主导地位,而普通车辆仍然选择最短路径 k_4 和 k_6 。无人驾驶车辆在边际最短路的行驶规则下,逐渐增加路径 k_1 、 k_3 和 k_7 的利用率,使得路段 1,4,6,8,11 的通过流量快速增加。无人驾驶车辆市场渗透率达到 1 时,这些路段的流量相比最初状态分别增加了 49.97%、106.99%、80.72%、106.99% 和 106.99%。可以看出,道路网络容量的增加主要得益于可利用路径的增多,并且改变了原有的路段流量均衡状态。与 ATIS 环境下市场渗透率达到 0.2~0.3 时会引起道路网络运行效率降低相比,无人驾驶车辆选择系统最优路径出行,不仅不会引起道路网络容量的恶化,反而会促进路径、路段的均衡使用,调节由于最短路径行为导致的拥挤。

4) 第四阶段。

无人驾驶车辆市场渗透率为 1 时,即道路网络上的车辆全部为无人驾驶车辆,其路径选择全部按照边际最短路出行,没有普通车辆的干扰,这是一种非常理想的状态。此时道路网络容量达到最大,计算结果为 3 894 辆/h,相比初始状态提高了 31.11%。虽然从短期看,执行 SO 规则的车辆利益部分受损,但从长远来看,随着无人驾驶车辆市场渗透率的提高,道路网络上可容纳的车辆数量显著增加,不会出现大部分车辆全部集中在最短路径 k_4 和 k_6 ,可有效缓解道路资源的空间分布不均衡状态,从而降低道路网络的拥挤水平,并使所有车辆受益。无人驾驶车辆市场渗透率为 0 和 1 时,道路网络中单个车辆的平均出行时间分别为 0.498 h 和 0.516 h,二者变化不大,大部分路段的通行能力得到了充分利用。

5 结论

1) 通过将道路网络中的车辆分为普通车辆和无人驾驶车辆两类,考虑不同的择路规则,构建了

混合均衡状态下的道路网络容量模型,给出了求解模型的有效算法,得到了道路网络容量的分段变化过程。由于无人驾驶车辆按照边际最短路规则出行,考虑了自身增加交通量对其他车辆的影响,达到均衡状态时,利用了原来出行时间比较大的路段,弥补了传统用户均衡路径选择的不足,提高了整个道路网络容量水平。

2) 随着智能导航系统的发展,现实生活中可能出现的情况是大部分人按照自身经验或者导航地图寻找最短路,出现了某些道路异常拥挤的现象,而其他道路的时间、空间资源无法得到有效利用,造成道路资源的时空分布不均衡。而未来无人驾驶车辆的加入为充分利用这种时空资源提供了可能,无人驾驶车辆市场渗透率较低时(算例结果为 0~0.2),道路网络容量增加不明显;市场渗透率达到一定水平时(算例结果为 0.2~0.5),道路网络容量呈缓慢增加的趋势;市场渗透率较高时(算例结果为超过 0.5),道路网络容量快速增加;当网络中的车辆全部是无人驾驶车辆时,道路网络容量达到最大。

下一步的研究工作是考虑不同 OD 需求结构下的道路网络容量模型,将研究在一定的路段服务水平下的容量最大化,并进一步考虑应用道路网络均衡流的灵敏度分析路段自由流时间和路段容量变化对道路网络容量的影响。

〔参考文献〕

- [1] Cheng L, Du M Q, Jiang X W, et al. Modeling and estimating the capacity of urban transportation network with rapid transit[J]. Transport, 2014, 29(2): 165-174.
- [2] 秦进, 贺钰昕. 量化交通网络效率评价方法比较[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 111-119.
QIN Jin, HE Yu-xin. Evaluation methods comparison of quantitative transportation network efficiency[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 111-119.
- [3] Wang J, Deng W, Zhao J B. Road network reserve capacity with stochastic user equilibrium[J]. Transport, 2015, 30(1): 103-116.
- [4] 方文彬, 单良慈, 黄中祥. ATIS 对道路网络容量的影响[J]. 系统工程, 2015, 33(10): 155-158.
FANG Wen-bin, SHAN Liang-ci, HUANG Zhong-

- xiang. The impact of ATIS on road network capacity [J]. Systems Engineering, 2015, 33(10): 155-158.
- [5] Bifulco G N, Cantarella G E, Simonelli F, et al. Advanced traveller information systems under recurrent traffic conditions: network equilibrium and stability [J]. Transportation Research Part B, 2016(92): 73-87.
- [6] Lavasani M, Jin Xia, Du Yi-Man. Market penetration model for autonomous vehicles based on previous technology adoption experiences [J]. Transportation Research Board, 2016, 2597(16): 67-74.
- [7] Chen Z B, He F, Zhang L H, et al. Optimal deployment of autonomous vehicle lanes with endogenous market penetration [J]. Transportation Research Part C, 2016(72): 143-156.
- [8] Levin M W, Kockelman K M, Boyles S D, et al. A general framework for modeling shared autonomous vehicles with dynamic network-loading and dynamic ride-sharing application [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2017(64): 373-383.
- [9] Levin M W. Congestion-aware system optimal route choice for shared autonomous vehicles [J]. Transportation Research Part C, 2017(82): 229-247.
- [10] Bagloee S A, Sarvi M, Patriksson M, et al. A mixed user-equilibrium and system-optimal traffic flow for connected vehicles stated as a complementarity problem [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(7): 562-580.
- [11] Chen Z B, He F, Zhang L H, et al. Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks [J]. Transportation Research Part B, 2016(99): 44-61.
- [12] Bagloee S A, Tavana M, Asadi M, et al. Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies [J]. Transport, 2016, 24(4): 284-303.
- [13] Wang H, Zhang X N. Joint implementation of tradable credit and road pricing in public-private partnership networks considering mixed equilibrium behaviors [J]. Transportation Research Part E, 2016(94): 158-170.

(上接第 8 页)

- [11] 李宏亮, 刘涛, 谢海巍. 新疆乌尔禾岩沥青改性沥青的试验研究 [J]. 公路工程, 2009, 34(6): 58-63.
LI Hong-liang, LIU Tao, XIE Hai-wei. Xinjiang Wuerhe rock asphalt modified asphalt experimental study [J]. Highway Engineering, 2009, 34(6): 58-63.
- [12] 查旭东, 胡锦涛, 刘安辉, 等. 布敦岩沥青材料性质试验分析 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2017, 14(4): 10-17.
ZHA Xu-dong, HU Jin-xiang, LIU An-hui, et al. Experimental analysis on material properties for Buton rock asphalt [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2017, 14(4): 10-17.
- [13] 辛星, 刘明, 张新农, 等. 不同品种岩沥青对沥青混合料性能的影响研究 [J]. 石油沥青, 2012, 26(2): 11-16.
XIN Xing, LIU Ming, ZHANG Xin-nong. Influence of different kinds of rock asphalt on the performance of asphalt mixture [J]. Petroleum Asphalt, 2012, 26(2): 11-16.
- [14] 宋国森. 不同掺配工艺对天然岩沥青改性沥青混合料路用性能的影响 [J]. 现代交通技术, 2007, 4(3): 12-14.
SONG Guo-sen. Effects of manufacturing process of different modified asphalt on mixture properties [J]. Modern Transportation Technology, 2007, 4(3): 12-14.
- [15] 查旭东, 钱光耀, 张云帆. BRA 改性沥青混合料 AC-13C 适宜掺量的研究 [J]. 交通科学与工程, 2015, 31(2): 1-5, 33.
ZHA Xu-dong, QIAN Guang-yao, ZHANG Yun-fan. Research on suitable mixing amount for BRA modified asphalt mixture AC-13C [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31(2): 1-5, 33.
- [16] 宋亮亮, 姚晓光. 天然沥青混合料路用性能研究 [J]. 石油沥青, 2017, 31(1): 7-13.
SONG Liang-liang, YAO Xiao-guang. Research on pavement performance of natural asphalt mixture [J]. Petroleum Asphalt, 2017, 31(1): 7-13.
- [17] 邓杰元. 委内瑞拉岩沥青(VRA)改性沥青及其混合料性能研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
DENG Jie-yuan. Research on performances of modified asphalt and its mixture for Venezuela rock asphalt (VRA) [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018.