

## 自动驾驶汽车连通专用道网络设计问题研究\*

韩凌辉, 张相宇, 史慧倩

(大连海事大学 航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**【目的】现有自动驾驶汽车专用道设计模型不能保证设立的专用道彼此相互连通,将导致自动驾驶汽车频繁驶入驶出专用道。这不仅增加自动驾驶汽车的走行时间,也会增加与有人驾驶车辆的相互干扰,降低整个交通系统的性能。基于此建立了一个自动驾驶汽车连通专用道网络设计模型,用于设计连通的自动驾驶汽车专用道网络,保证无人驾驶汽车只使用专用道即可完成出行。【方法】提出的自动驾驶汽车连通专用道网络设计模型是一个离散双层规划模型,上层问题以系统总出行时间最小为目标,决策在哪些路径上设置自动驾驶汽车专用道;下层问题描述自动驾驶汽车连通专用道条件下有人驾驶汽车与自动驾驶汽车的均衡配流问题。由于所提模型的特点,基于模拟退火算法设计了求解算法,并通过数值试验验证了算法的有效性。【结果】通过数值分析发现即使在自动驾驶汽车的市场占有率较低时,所提连通专用道方案仍然可以有效减少系统总出行时间。【结论】当自动驾驶汽车在市场占有绝对份额后,应设立有人驾驶汽车的连通专用道,允许自动驾驶汽车自由使用剩余车道。这样既能保证有人驾驶汽车的路权,也能充分发挥自动驾驶汽车提高道路通行能力及减少系统总出行时间的潜力。

**关键词:** 离散网络设计;自动驾驶汽车专用道;模拟退火算法

**中图分类号:** O221.6;U268.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6693(2023)01-0044-09

自动驾驶汽车是信息技术与交通运输工具相融合的产物。自动驾驶汽车基于车与车或车与路之间的通讯技术,能够即时对周围交通条件的变化作出反应,提高交通系统的安全性,减少交通事故的发生。与传统的有人驾驶汽车相比,自动驾驶汽车可以采用较小的车头时距,因此具有提高道路通行能力的潜力<sup>[1-2]</sup>。然而在向自动驾驶时代转变的过程中,有人驾驶汽车与自动驾驶汽车在相当长的时期内将共用道路,构成新型混合交通系统<sup>[3]</sup>。

现有研究表明,若有人驾驶汽车与自动驾驶汽车共用车道,将增加交通系统的不确定性,减弱自动驾驶汽车提高道路通行能力的潜力<sup>[4]</sup>。为此,在现有路网中,选定某些路段的车道,设立自动驾驶汽车专用道逐渐受到重视<sup>[5]</sup>。与其他针对自动驾驶汽车的基础设施相比,自动驾驶汽车专用道对现有路网的改造较小,并能够减少有人驾驶汽车对自动驾驶汽车的干扰<sup>[5]</sup>。现有自动驾驶汽车专用道的研究可以分为基于仿真模型的仿值分析和基于分析模型的优化设计两类。现有仿真分析研究主要分析了在自动驾驶汽车不同市场占有率条件下,自动驾驶汽车专用道对通勤廊道、高速路段、高速路网等系统的性能影响<sup>[5]</sup>。

现有自动驾驶汽车专用道分析模型主要用于求解自动驾驶汽车专用道的优化设计问题。如Chen等人<sup>[6]</sup>基于多类用户交通均衡配流模型和描述自动驾驶汽车市场占有率随时间演化的扩散模型,给出了规划期内每个时间段的自动驾驶汽车专用道设计方案。Rad等人<sup>[7]</sup>在对有关自动驾驶汽车专用道研究进行分析总结后,基于高速公路现有车道,给出了一个如何设计及运营自动驾驶汽车专用道的概念框架。该框架包含了影响自动驾驶汽车专用道安全与效率的多种因素。Tani等人<sup>[8]</sup>考虑了由自动驾驶汽车和有人驾驶汽车的车头时距波动导致的道路通行能力波动的问题,在交通需求与道路通行能力都随机的情况下,设计了以出行时间可靠性为目标的自动驾驶汽车专用道规划模型。Chakraborty等人<sup>[9]</sup>基于系统最优动态配流模型设计了一个混合整数规划模型决定高速路网中哪些车道用于自动驾驶汽车专用道。此外,基于与自动驾驶专用道相似的路权概念,一些学者设计了自动驾驶汽车专用区<sup>[10]</sup>、自动驾驶汽车道路子网络<sup>[11]</sup>等规划模型。虽然自动驾驶汽车专用道能够放大自动驾驶车提高道路通行能力的潜力,但有学者也指出,当自动驾驶汽车市场占有率较低时,设置自动驾驶汽车专

\* 收稿日期:2022-02-13 修回日期:2022-07-25 网络出版时间:2023-02-23 08:44

资助项目:国家自然科学基金(No. 72171033)

第一作者简介:韩凌辉,男,副教授,博士,研究方向为城市交通管理相关的运筹优化与控制,E-mail: lhhan@dlnu.edu.cn

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20230222.1347.022.html

用道可能会降低交通系统的整体性能<sup>[12]</sup>。为此,一些学者提出了自动驾驶汽车专用道的运营策略,如允许有人驾驶汽车付费使用自动驾驶汽车专用道<sup>[12]</sup>等。

自动驾驶汽车专用道网络设计与离散交通网络设计相似,常被表示成离散双层数学规划模型。现有自动驾驶汽车专用道规划模型使用 0-1 变量,在候选路段集中选择设立自动驾驶汽车专用道的路段,不能保证自动驾驶汽车专用道彼此相互连通。当自动驾驶汽车专用道不连通时,自动驾驶汽车不得不频繁驶入及驶出专用道。这不仅增加自动驾驶汽车的走行时间,也会增加与有人驾驶车辆的相互干扰,降低整个交通系统的性能<sup>[13]</sup>。而连通的自动驾驶汽车专用道网络,则可以保证自动驾驶汽车只使用专用道即可完成出行,减少自动驾驶汽车与有人驾驶汽车、自动驾驶汽车与行人之间的冲突。因此,本文将设计一个自动驾驶汽车连通专用道网络设计模型,保证自动驾驶汽车只使用专用道即可完成出行。与现有自动驾驶汽车专用道设计模型相比,本文的自动驾驶汽车连通专用道设计模型使用 0-1 变量,确定在每个出行起讫点对 (Original-destination, OD) 间的哪些路径上设立自动驾驶汽车专用道,从而保证设立的自动驾驶汽车专用道的连通性。具体而言,本文使用离散双层数学规划模型描述自动驾驶汽车连通专用道网络的设计问题:上层问题以系统总出行时间最小为目标,决策在每个 OD 对的候选路径集的那些路径上设置自动驾驶汽车专用道;下层问题描述自动驾驶汽车连通专用道条件下,有人驾驶汽车与自动驾驶汽车路径选择产生的交通均衡流量分布问题。

## 1 问题描述与建模

### 1.1 现有自动驾驶汽车专用道设计模型存在的问题示例

如上文所述,现有自动驾驶汽车专用道规划模型通过 0-1 变量在候选路段集中决策是否设立专用道,不能保证自动驾驶汽车专用道的连通性。如 Liu 等人<sup>[12]</sup>在使用 Nguyen-Dupuis 网络(图 1)进行数值试验时,所有路段都属于候选路段集。他们的规划模型所得到自动驾驶汽车专用/收费车道网络如图 2 所示。由图 1 和图 2 可以看到,虽然网络中所有路段都可以作为设置专用道的候选集,但最终得到的专用道彼此并不连通。图 1 和图 2 中 AV 与 AVT 分别表示自动驾驶汽车专用车道和收费车道。

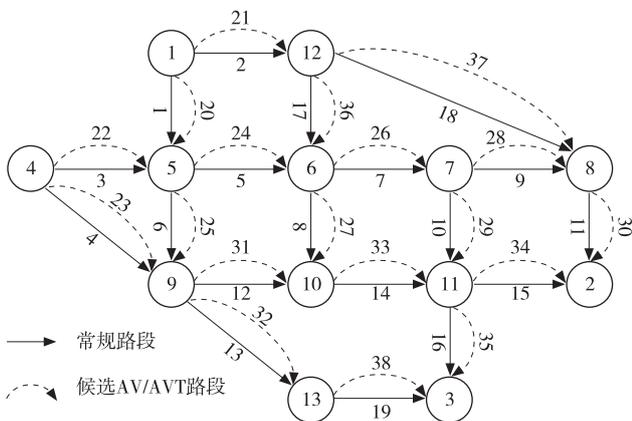


图 1 文献[12]中使用的 Nguyen-Dupuis 网络

Fig. 1 The Nguyen-Dupuis network in literature [12]

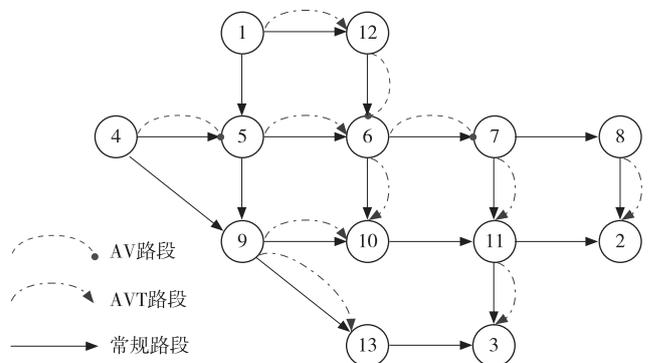


图 2 文献[12]中在 Nguyen-Dupuis 网络中设立的 AV/AVT 车道

Fig. 2 The AV/AVT lane network in the Nguyen-Dupuis network of literature [12]

### 1.2 符号与假设

令  $G(N, A)$  表示规划自动驾驶汽车专用道的连通交通网络,其中  $N$  和  $A$  分别是网络中节点和路段的集合,  $W$  表示网络中 OD 对集合。网络中存在两种交通方式:有人驾驶汽车和自动驾驶汽车。令  $M(m \in M)$  表示出行方式集合,  $m=1$  为有人驾驶汽车,  $m=2$  表示自动驾驶汽车。令  $d^w$  和  $d^{w,m}$  分别表示 OD 对  $w \in W$  的交通总需求及交通方式  $m$  的需求。其中,  $d^w$  为固定值,  $d^{w,m}$  的值由方式  $m$  的市场占有率确定。令  $P^w$  表示 OD 对  $w$  间的路径集,  $f_p^{w,m}$  表示路径  $p$  上的方式  $m$  的交通量,  $x_a^m$  表示路段  $a$  上的方式  $m$  的交通量。则

$$x_a^m = \sum_{w \in W} \sum_{p \in P^w} f_p^{w,m} \delta_a^{w,p,m}。$$

其中:  $\delta_a^{w,p,m} = 1$  表示路径  $p \in P^w$  经过路段  $a$ ; 否则路径  $p \in P^w$  不经过路段  $a$ 。

本文假设自动驾驶汽车只使用专用道完成出行, 有人驾驶汽车仅使用常规车道完成出行。自动驾驶汽车与有人驾驶汽车都遵循用户最优原则进行路径选择。

### 1.3 自动驾驶汽车连通专用道网络设计模型

本文使用离散双层数学规划模型表述自动驾驶汽车连通专用道路网络设计问题。上层问题的决策变量  $\lambda_p^w \in \{0, 1\}$  表示 OD 对  $w \in W$  间路径  $p \in P^w$  是否设置自动驾驶汽车专用道,  $\lambda$  表示  $\lambda_p^w (w \in W, p \in P^w)$  的向量。若  $\lambda_p^w = 1$ , 表示路径  $p \in P^w$  设置专用道; 否则  $\lambda_p^w = 0$ , 表示路径  $p \in P^w$  不设置专用道。上层问题的目标函数为最小化系统总出行时间  $Z(\lambda)$ , 下层问题是一个多类用户最优的交通均衡配流问题。上层问题的具体表达式为:

$$\min_{\lambda} Z(\lambda) = \sum_a t_a^1 x_a^1(\lambda) + t_a^2 x_a^2(\lambda), \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \lambda_p^w = 0, 1, \forall w \in W, p \in P^w, \quad (2)$$

$$\sum_{p \in P^w} \lambda_p^w = N^w. \quad (3)$$

其中:  $N^w$  是 OD 对  $w$  间设立自动驾驶汽车专用道的路径个数;  $t_a^1$  是有人驾驶汽车在路段  $a$  时的出行时间:

$$t_a^1 = t_a^0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{x_a^1(\lambda)}{C_a^1(\lambda)} \right)^\beta \right]. \quad (4)$$

$C_a^1(\lambda)$  是有人驾驶汽车在路段  $a$  上的实际通行能力, 与在该路段设置的专用车道的个数有关。令  $C_a$  表示路段  $a$  的通行能力, 有  $m_a$  条车道。  $n_p^w$  表示路径  $p \in P^w$  设置自动驾驶汽车专用道的车道数 (即路径  $p \in P^w$  上所有路段的自动驾驶汽车专用道的个数是相同的), 它是外生参数。路段  $a$  分配给自动驾驶汽车专用道的通行能力为:

$$C_a^2(\lambda) = \frac{\max_{w \in W, p \in P^w} \{n_p^w \lambda_p^w \delta_a^{w,p}\}}{m_a} C_a, \quad (5)$$

而路段  $a$  上有人驾驶汽车使用的通行能力  $C_a^1(\lambda)$  可以表述为:

$$C_a^1(\lambda) = C_a - C_a^2(\lambda). \quad (6)$$

由于自动驾驶汽车在专用道可以采用编队等策略提高道路的通行能力, 本文根据现有相关研究, 假设自动驾驶汽车在专用道的实际通行能力为所分配通行能力的 3 倍<sup>[14]</sup>。本文的自动驾驶汽车在使用路段  $a$  时的出行时间函数为:

$$t_a^2 = t_a^0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{x_a^2(\lambda)}{3C_a^2(\lambda)} \right)^\beta \right]. \quad (7)$$

由于本文假设自动驾驶汽车和有人驾驶汽车分别只使用各自的车道出行, 不存在共用车道的情形。因此, 本文的自动驾驶汽车连通专用道网络设计模型的下层问题 (交通均衡配流) 不会出现 Liu 等人<sup>[12]</sup> 讨论的多交通均衡问题, 可以使用 Beckman 模型<sup>[15]</sup> 表述。下层问题的具体表达式如下:

$$\min \sum_a \sum_{m \in M} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\lambda, \omega) d\omega, \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \sum_{p \in P^w} f_p^{w,1} = d^{w,1}, \forall w \in W; \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P^w} f_p^{w,2} \lambda_p^w = d^{w,2}, \forall w \in W; \quad (10)$$

$$x_a^m = \sum_{w \in W} \sum_{p \in P^w} f_p^{w,m} \delta_a^{w,p,m}, \forall m \in M; \quad (11)$$

$$f^{w,m} \geq 0, \forall w \in W, m \in M. \quad (12)$$

## 2 求解算法

如上文所述, 现有自动驾驶汽车专用道设计模型是在候选路段集中, 确定在哪些路段设立自动驾驶汽车专用道。而本文的自动驾驶汽车连通专用道设计模型是在每个 OD 的候选路径集中, 确定在哪些路径上设立自动驾驶汽车专用道, 保证自动驾驶汽车专用道的连通性。模型的求解涉及两个问题: 第一, 在每个 OD 对间如何选择设置专用道的候选路径集; 第二, 由于 OD 对  $w \in W$  用于设置自动驾驶汽车连通专用道的路径数量  $N^w$  是给

定的,因此要求每次产生的新解包含 OD 对  $w \in W$  的  $N^w$  条路径。针对第一个问题,虽然实际道路网络中每个 OD 对间的路径数量远大于路段数量。但由于自动驾驶汽车可以进行集中调控,交通管理者可以指定自动驾驶汽车的行驶路径。因此并不需要道路网络的所有路径作为本文模型的候选路径集,可以由交通管理者设定一些路径用于设置自动驾驶汽车连通专用道。本文将使用 Yen's 算法<sup>[16]</sup>获取 OD 对  $w \in W$  的  $k^w$  短路作为该起讫点对的候选路径集,其中  $k^w > N^w$  由交通管理者给定。而对第二个问题,现有自动驾驶汽车专用道设计模型或一般离散交通网络设计问题的求解算法均是在候选路段集中产生新解,该新解产生机制无法适用于本文模型。本文将使用模拟退火算法求解模型。为了保证每次产生的新解包含每个 OD 对  $w \in W$  的间  $N^w$  条路径,对每个 OD 对  $w \in W$  每次在  $1 \sim k^w$  中产生  $N^w$  个整数随机数,表示被选择的路径编号。被选择路径对应的 0-1 变量取值为 1,其余变量取值为 0。本文使用 Frank-Wolf 算法<sup>[17]</sup>求解由(8)~(12)式所示的多类用户最优交通均衡配流问题,获取每个上层问题决策变量对应的交通均衡流量分布。具体的算法流程如下:

步骤 0:初始化参数设置。设置初始温度  $T_0$ ,终止温度  $T_{end}$ ,不同温度下的迭代次数  $L$ ,温度下降比例  $\varphi$ ;由 K 短路算法得到的每个 OD 对  $w \in W$  间的可行路径集合  $P^w$ ;路径  $p \in P^w$  设置自动驾驶汽车专用道的条数  $n_p^w$ ;令  $\lambda^{best}$  存储当前最好解;

步骤 1:生成初始解  $\lambda^0 = \{\lambda_p^{w,0}, w \in W, p \in P^w\}$ ,  $\lambda^{best} = \lambda^0$ 。根据(5)~(6)式分别计算路段  $a$  上有人驾驶汽车和自动驾驶汽车各自分配的路段通行能力  $C_a^1(\lambda^0)$  和  $C_a^2(\lambda^0)$ 。

步骤 2:使用 Frank-Wolf 算法求解下层问题(8)~(12),得到多类用户最优交通均衡时各路段的流量分布  $\{x_a^m(\lambda^0), a \in A, m \in M\}$ ,计算上层目标函数值  $Z(\lambda^0)$ ;

步骤 3:循环  $L$  次步骤 4~6;

步骤 4:产生新解  $\lambda'$ 。根据(5)~(6)式分别计算路段  $a$  上有人驾驶汽车和自动驾驶汽车各自分配的路段通行能力  $C_a^1(\lambda')$  和  $C_a^2(\lambda')$ ,使用 Frank-Wolf 算法求解下层问题(8)~(12),得到均衡流量分布  $\{x_a^m(\lambda'), a \in A, m \in M\}$ ,计算新的上层目标函数值  $Z(\lambda')$ 。设置内循环迭代次数为  $l=1$ ;

步骤 5:计算目标函数值差值  $\Delta Z = Z(\lambda') - Z(\lambda^{best})$ ;

步骤 6:根据 Metropolis 准则判断是否接受新解。若  $\Delta Z < 0$ ,则  $\lambda^{best} = \lambda'$ ;否则,随机产生区间(0,1)上的均匀分布随机数  $\tau$ 。若  $\exp(-\Delta Z/T) > \tau$ ,则  $\lambda^{best} = \lambda'$ ;反之,不改变  $\lambda^{best}$ 。令  $l=l+1$ ;

步骤 7:温度是否小于终止温度。若满足终止条件,输出当前最好解  $\lambda^{best}$ ,得到自动驾驶汽车专用道的部署方案,结束算法;否则,温度衰减,跳至步骤 3。

### 3 数值试验与分析

本文使用 Nguyen-Dupuis 网络(图 3)进行数值试验与分析。该网络由 13 个节点,19 条路段和 4 个 OD 对组成。各路段的自由流出行时间、通行能力和 OD 对的交通需求分别在表 1 和表 2 中给出。在出行时间函数((7)式)中,参数  $\alpha=0.15$  和  $\beta=4$ 。设路段中每个车道的通行能力为每小时 2 000 辆(单位:辆·h<sup>-1</sup>),每条路段对应的车道数在表 1 中给出。在数值试验中,模拟退火算法的初始温度为  $T_0=100$ ,终止温度  $T_{end}=0.01$ ,温度下降比例  $\varphi=0.9$ ,不同温度下的迭代次数  $L=200$ 。

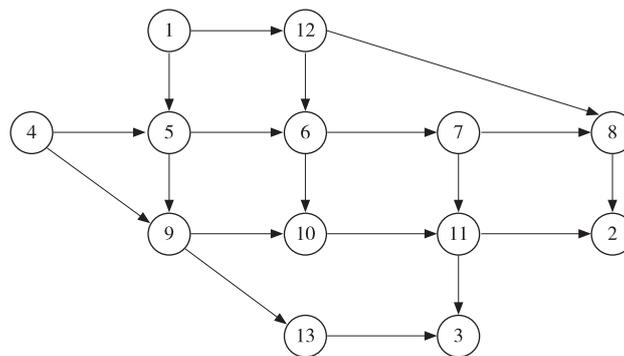


图 3 Nguyen-Dupuis 网络

Fig. 3 The Nguyen-Dupuis network

表 1 Nguyen-Dupuis 网络的路段特性

Tab.1 The characteristics of links in the Nguyen-Dupuis network

路段	$t_a^0/\text{min}$	$C_a/(\text{辆} \cdot \text{h}^{-1})$	车道数	路段	$t_a^0/\text{min}$	$C_a/(\text{辆} \cdot \text{h}^{-1})$	车道数
1-5	7	6 000	3	8-2	9	8 000	4
1-12	9	8 000	4	9-10	10	8 000	4
4-5	9	6 000	3	9-13	9	6 000	3
4-9	12	6 000	3	10-11	6	8 000	4
5-6	3	6 000	3	11-2	7	6 000	3
5-9	9	6 000	3	11-3	8	8 000	4
6-7	5	6 000	3	12-6	7	8 000	4
6-10	13	8 000	4	12-8	14	6 000	3
7-8	5	6 000	3	13-3	11	6 000	3
7-11	9	8 000	4				

表 2 OD 交通需求

Tab.2 The OD demand

OD 对	出行需求/(辆 · h <sup>-1</sup> )
1-2	9 600
1-3	19 200
4-2	14 400
4-3	4 800

由于设计自立自动驾驶汽车专用道将减少有人驾驶汽车的路权。因此在本文的数值实验中,每个 OD 对间只使用 1 条路径设立自动驾驶汽车专用道,并且每条路径最多使用两条车道设置自动驾驶汽车专用道,即  $n_p^w=1$  或  $n_p^w=2$ 。图 4 和图 5 分别给出了,在自动驾驶汽车市场占有率 0.4 时  $n_p^w=1$  与  $n_p^w=2$  对应的本文模拟退火算法的迭代求解过程。可以看到本文设计的模拟退火能够较快收敛。

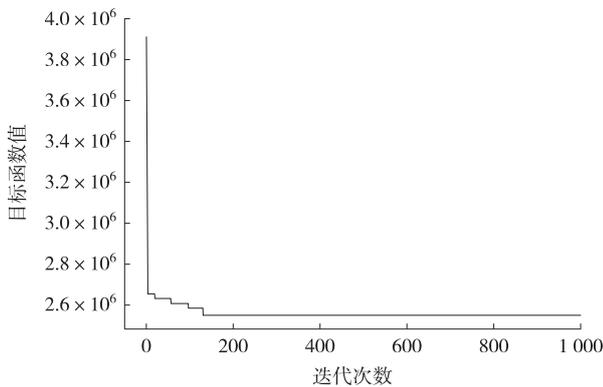


图 4  $n_p^w=1$  时算法的迭代过程

Fig.4 Iterative process of the algorithm when  $n_p^w=1$

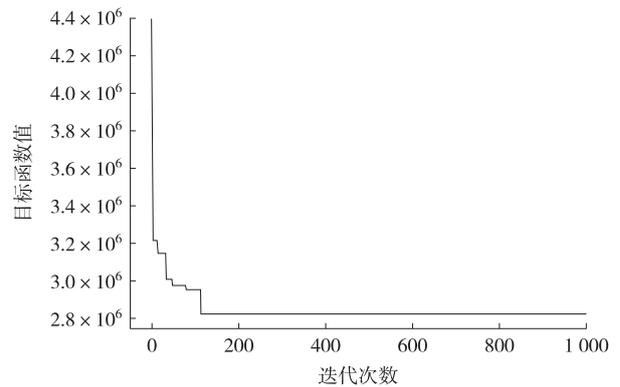


图 5  $n_p^w=2$  时算法的迭代过程

Fig.5 Iterative process of the algorithm when  $n_p^w=2$

为了比较分析本文的自动驾驶汽车连通专用道方案对混合交通系统性能的影响,本文基于 Liu 等人<sup>[12]</sup>设计的混合交通均衡配流模型,计算了不同自动驾驶汽车市场占有率条件下,没有自动驾驶汽车专用道时混合交通系统的总出行时间。系统总出行时间随自动驾驶汽车市场占有率变化的结果在图 6 中给出,相应的自动驾驶汽车连通专用道所在的路径由表 3 给出。

表 3 不同市场占有率下 AV 设置方案

Tab. 3 The plans of connected AV dedicated lane with different AV MPR

市场占有率	OD 对			
	1-2	1-3	4-2	4-3
0.05	[1, 5, 6, 10, 11, 2]	[1, 5, 6, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 10, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.10	[1, 5, 6, 10, 11, 2]	[1, 5, 6, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 10, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.15(1 AV lane)	[1, 5, 6, 10, 11, 2]	[1, 5, 6, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 10, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.20(1 AV lane)	[1, 5, 6, 7, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 8, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.25(1 AV lane)	[1, 5, 6, 10, 11, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 5, 9, 10, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.30(1 AV lane)	[1, 5, 6, 10, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 7, 11, 3]
0.35(1 AV lane)	[1, 5, 6, 10, 11, 2]	[1, 5, 9, 13, 3]	[4, 5, 6, 10, 11, 2]	[4, 5, 9, 13, 3]
0.40(1 AV lane)	[1, 12, 6, 7, 8, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.45(1 AV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 9, 13, 3]	[4, 5, 6, 7, 8, 2]	[4, 5, 6, 7, 11, 3]
0.50(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 8, 2]	[1, 5, 6, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 8, 2]	[4, 5, 6, 7, 11, 3]
0.55(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 10, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.60(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.65(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.70(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.75(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.80(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.85(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.90(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
0.95(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]
1.00(2 AV lanes)	[1, 5, 6, 7, 11, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 5, 6, 10, 11, 3]

由图 6 可以看出,当自动驾驶汽车的市场占有率低于 15%时,设置由 1 条车道构成的自动驾驶汽车连通专用道的系统总出行时间高于不设置自动驾驶汽车专用道的混合交通系统的总出行时间。当自动驾驶汽车的市场占有率在 15%时至 55%之间时,设置由 1 条车道构成的自动驾驶汽车连通专用道能有效减少混合交通系统的总出行时间。但当自动驾驶汽车的市场占有率高于 55%时,由 1 条车道构成自动驾驶汽车连通专用道已不能满足自动驾驶汽车的交通需求,需要增加自动驾驶汽车连通专用道的车道数。

从图 6 所示的结果可以看到,在自动驾驶汽车市场占有率在 45%至 90%之间时,具有两条车道的自动驾驶汽车连通专用道能够有效地减少系统总出行时间。而当自动驾驶汽车的市场占有率高于 90%后,由两条车道构成的自动驾驶汽车连通专用道对应的系统总出行时间高于不设置专用道的混合交通系统的总出行时间。这是因为在此阶段自动驾驶汽车市场占有率条件下,两条车道构成的连通专用道无法满足自动驾驶汽车的交通需求。为此本文尝试在自动驾驶汽车市场占有率高于某一水平后,设置由 1 条车道构成的有人驾驶汽车连通专用道,保障有人驾驶汽车的路权,而路网剩余的车道由自动驾驶汽车自由使用。

图 7 给出了自动驾驶汽车市场占有率在 50%至 99%之间时,为有人驾驶汽车保留 1 条连通专用道的系统总出行时间的变化情况。可以看到,当自动驾驶汽车市场占有率处于 75%至 85%之间时,设置由 1 条车道构成的有人驾驶汽车连通专用道后,系统的总出行时间小于不设置任何专用道的混合交通系统的总出行时间,但大于由两条车道构成的自动驾驶汽车连通专用道对应的系统总出行时间。当自动驾驶汽车的市场占有率高于 85%时,由 1 条车道构成的有人驾驶汽车连通专用道对应的系统总出行时间是三者中最小的。图 7 中有人驾驶汽车连通专用道所在的路径在表 4 中给出。图 7 中 HV 表示有人驾驶汽车。

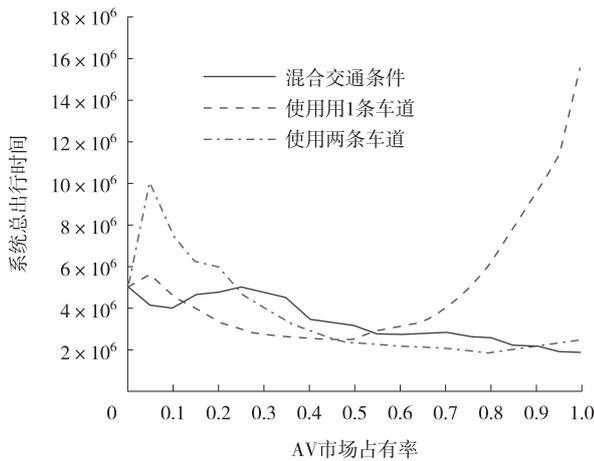


图 6 系统总出行时间随 AV 市场占有率的变化  
Fig. 6 The total travel time with different AV MPR

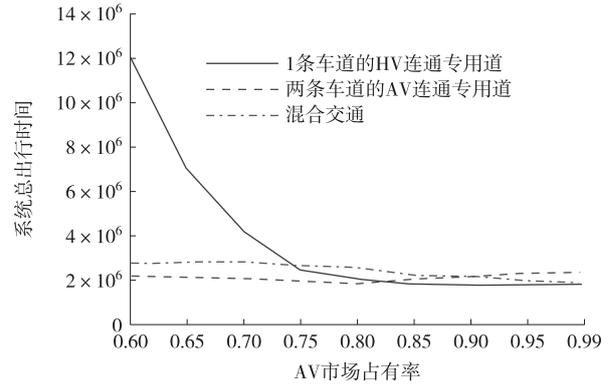


图 7 不同 AV 市场占有率下 HV 连通专用道方案对应的系统总出行时间  
Fig. 7 The system total travel time of the connected HV dedicated lane plans with different AV MPR

表 4 不同 AV 市场占有率下 HV 专用道设立方案

Tab. 4 The plans of connected HV dedicated lane with different AV MPR

市场占有率	OD 对			
	1-2	1-3	4-2	4-3
0.50(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 9, 10, 11, 2]	[4, 5, 9, 13, 3]
0.55(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 9, 10, 11, 2]	[4, 5, 9, 13, 3]
0.60(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 9, 10, 11, 2]	[4, 5, 9, 13, 3]
0.65(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 9, 10, 11, 2]	[4, 5, 9, 13, 3]
0.70(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 9, 10, 11, 2]	[4, 5, 9, 13, 3]
0.75(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 9, 10, 11, 2]	[4, 5, 9, 13, 3]
0.80(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 9, 10, 11, 2]	[4, 9, 13, 3]
0.85(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 9, 10, 11, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 9, 13, 3]
0.90(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 9, 13, 3]	[4, 5, 6, 7, 11, 2]	[4, 9, 13, 3]
0.95(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 9, 10, 11, 2]	[4, 5, 9, 13, 3]
0.99(1 HV lane)	[1, 12, 8, 2]	[1, 5, 6, 7, 11, 3]	[4, 9, 10, 11, 2]	[4, 5, 9, 13, 3]

由本文的数值实验可以得出,在自动驾驶汽车的市场占有率到达一定水平后(如图 6 中的 15%),设置由 1 条车道构成的自动驾驶汽车连通专用道,并随市场占有率的升高(如图 6 中 50%)增加连通专用道占用的车道数,可以有效减少系统总出行时间。此外,当自动驾驶汽车在市场占有率有绝对份额时(如图 7 中 85%),将有人驾驶汽车限定在专用车道,允许自动驾驶汽车自由使用剩余车道,则更能发挥自动驾驶汽车提高道路能行能力减少系统总出行时间的潜力。

### 4 结论

本文得到的主要结论如下:

- 1) 本文设计的自动驾驶汽车连通专用道规划模型,可以保证设计的自动驾驶汽车专用道的连通性。

2) 本文设计的模拟退火算法可以有效求解自动驾驶汽车连通专用道规划模型。

3) 基于数值试验发现,在自动驾驶汽车的市场占有率较低时(15%),本文的自动驾驶汽车连通专用道方案仍可以有效减少系统的总出行时间。

4) 当自动驾驶汽车在市场占有绝对份额(85%)后,应设立有人驾驶汽车的连通专用车道,允许自动驾驶汽车自由使用剩余车道。这样既能保证有人驾驶汽车的路权,又能发挥自动驾驶汽车提高道路通行能力减少系统总出行时间的潜力。

#### 参考文献:

- [1] FAGNANT D J, KOCKELMAN K. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 77: 167-181.
- [2] 田丽君, 刘会楠, 许岩. 共享自动驾驶汽车经营策略优化分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(3): 6-13.  
TIAN L, LIU H, XU Y. Optimization and analysis on operating strategies of shared autonomous vehicles[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(3): 6-13.
- [3] WANG J, PEETA S, HE X. Multiclass traffic assignment model for mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 126: 139-168.
- [4] LI Y, CHEN Z, YIN Y, et al. Deployment of roadside units to overcome connectivity gap in transportation networks with mixed traffic[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 111: 496-512.
- [5] YE L, YAMAMOTO T. Impact of dedicated lanes for connected and autonomous vehicle on traffic flow throughput[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, 512: 588-597.
- [6] CHEN Z, HE F, ZHANG L, et al. Optimal deployment of autonomous vehicle lanes with endogenous market penetration[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 72: 143-156.
- [7] RAD S R, FARAH H, TAALE H, et al. Design and operation of dedicated lanes for connected and automated vehicles on motorways: a conceptual framework and research agenda[J]. *Transportation research part C: emerging technologies*, 2020, 117: 102664.
- [8] TANI R, SUMALEE A, UCHIDA K. Travel time reliability-based optimization problem for CAVs dedicated lanes[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2021: 1-32.
- [9] CHAKRABORTY S, REY D, LEVIN M W, et al. Freeway network design with exclusive lanes for automated vehicles under endogenous mobility demand[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 133: 103440.
- [10] CHEN Z, HE F, YIN Y, et al. Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, 99: 44-61.
- [11] MADADI B, VAN NES R, SNELDER M, et al. Multi-stage optimal design of road networks for automated vehicles with elastic multi-class demand[J]. *Computers & Operations Research*, 2021, 136: 105483.
- [12] LIU Z, SONG Z. Strategic planning of dedicated autonomous vehicle lanes and autonomous vehicle/toll lanes in transportation networks[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 106: 381-403.
- [13] LIU Z, CHEN Z, HE Y, et al. Network user equilibrium problems with infrastructure-enabled autonomy[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2021, 154: 207-241.
- [14] TIENRAKOOL P, HO Y C, MAXEMCHUK N F. Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance[C]//2011 IEEE Vehicular Technology Conference. San Francisco: IEEE, 2011: 12407267.
- [15] BECKMANN M, Mc GUIRE C B, WINSTEN C B. Studies in the economics of transportation[EB/OL]. [2022-02-13]. [https://www.rand.org/pubs/research\\_memoranda/RM1488.html](https://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM1488.html).
- [16] YEN J Y. Finding the k shortest loopless paths in a network[J]. *Management Science*, 1971, 17(11): 712-716.
- [17] SHEFFI Y. *Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods*[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.

**Operations Research and Cybernetics****The Connected Autonomous Vehicle Dedicated Lane Network Design**

HAN Linghui, ZHANG Xiangyu, SHI Huiqian

(School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

**Abstract:** [Purposes] Because the existing planning models choose road links from the candidate road link set to build the dedicated lanes for autonomous vehicles, they cannot guarantee the connectivity of the established dedicated lanes for the autonomous vehicle. With the unconnected dedicated lanes, autonomous vehicles have to frequently enter and exit dedicated lanes increasing the probability of accidents and the travel time of autonomous vehicles. To address these issues, it presents a planning model to build the connected dedicated lanes for autonomous vehicles. [Methods] The model is a two-level programming model, in which the upper problem is to minimize the system total travel time, and the lower problem describes the equilibrium assignment problem of the human-driven and autonomous vehicles under the traffic network with the connected autonomous vehicle dedicated lanes. Existing algorithms cannot solve the model since the candidate set to build the dedicated lanes is a path set. Thus, it developed an algorithm based on the simulated annealing algorithm to solve this model. [Findings] By the numerical tests, one can find that the connected dedicated lane planning model can guarantee the connectivity of the dedicated lanes for autonomous vehicles. When the market penetration rate of the autonomous vehicle is low, the connected dedicated lane scheme can still effectively reduce the system total travel time. [Conclusions] When autonomous vehicles have a high market penetration rate, human-driven vehicles should be only allowed to drive on the connected dedicated lanes for human-driven vehicles. This scheme can guarantee the right of way for human-driven vehicles, and the autonomous vehicles can also effectively take advantage of their potential to improve road performance and reduce the system total travel time.

**Keywords:** operations research and control; discrete network design; autonomous vehicle dedicated lane; simulated annealing algorithm

(责任编辑 许 甲)