

CAV 专用车道与收费车道多目标协同布局优化

历莉¹, 詹鹏宇¹, 钱振², 刘晨淏², 陈艳艳², 李同飞²

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 2. 北京工业大学 城市交通学院, 北京 100124)

摘要:为降低人工驾驶车辆(HV)与网联自动驾驶车辆(CAV)混行环境下城市交通系统的总体出行时间和车辆空气污染物排放,从城市交通网络规划者的角度出发,构建了CAV专用车道与收费车道协同布局的多目标优化模型并求解。首先,基于HV与CAV行驶特性分析,构建混合交通分配模型;其次,以交通系统出行时间最短和车辆空气污染物排放最少为目标,将混合交通流模型融合到CAV专用车道与收费车道协同布局优化模型,采用了非支配排序遗传算法进行求解,并将其与基于分解的多目标进化算法和改进的强度帕累托进化算法进行对比。最后,选取Nguyen-Dupuis网络作为案例验证方法有效性,并研究了CAV渗透率对协同布局优化方案的影响。实验结果表明:在城市路网中进行CAV专用车道与收费车道的空间协同布局优化,可实现出行时间平均降低5.75%,车辆空气污染物排放平均降低3.01%。值得注意的是,当CAV渗透率约为0.4时,出行时间与车辆空气污染物排放的降低效果均达到峰值,分别为10.48%和4.48%。此外,在更大规模的Sioux-Falls网络上的验证结果表明,所提方法能在约9.6 h内获得有效的协同布局方案,进一步证实了其泛化能力与实用性。

关键词:城市交通;车道协同布局;非支配排序遗传算法;专用车道;收费车道;车辆空气污染物排放

中图分类号: U491;U495

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.04.018

随着自动驾驶技术和无线通信技术的快速发展,网联自动驾驶车辆(CAV)正逐步迈向开放道路自由驾驶场景。受基础设施、车辆售价、公众认同等因素限制,CAV短期内难以完全替代人类驾驶车辆(HV),HV与CAV长期共存将成为常态。如何在混合交通背景下充分发挥CAV技术优势以缓解交通拥堵问题显得更加重要。

为了充分发挥CAV在混合交通场景下提高交通效率的优势,部署专用车道被视为解决混合交通问题的有效策略^[1-4]。目前,有关专用车道部署的研究主要分为三大方向:一是针对路段层面专用车道的部署进行研究,专用车道又分为CAV专用车道和收费车道两种类型;二是针对交通网络上专用车道的分配问题,构建基于遗传算法、混合整数线性规划等多种优化算法的宏观网络双层规划模型进行优化求解;三是评估专用车道部署的环境效益,研究者通过构建交通流模型,探究CAV专用车道对环境的

潜在影响。

在路段专用车道部署研究方面,现有研究主要聚焦于高速公路、城市道路两大场景。针对高速公路基本路段,王正武等^[5]针对低CAV比例环境下专用车道闲置问题,提出优先车道管理策略。针对高速公路分合流区,Di等^[6]与Zhang等^[7]分别从协同控制与动态收费角度研究了分合流区与专用车道共享策略。针对城市交叉口,王小霞等^[8]发现专用车道设置数量应随CAV渗透率动态调整。上述研究多聚焦于特定路段的单一专用车道部署策略,专门针对CAV设计的收费车道(即允许CAV免费通行,HV需付费)的研究相对较少,与CAV专用车道的协同部署策略更是鲜有探讨。如何系统优化CAV专用车道与收费车道的协同部署方案,仍需深入探索。

在宏观网络优化方面,针对不同优化目标有如下研究。在减少出行时间方面,Hu等^[9]构建了兼

收稿日期:2026-03-24;修订日期:2026-04-26

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金项目(24YJAZH068)

作者简介:历莉(1981—),女,北京市人,北京市市政工程设计研究总院有限公司正高级工程师,主要从事智慧交通、智慧城市、自动驾驶、控制工程、数字信息化研究,E-mail:lili@bmedi.cn。

通信作者:陈艳艳(1970—),女,河南郑州人,北京工业大学教授,主要从事交通大数据、交通规划与管理、智能交通、系统仿真、路网优化、交通节能减排研究,E-mail:cdyan@bjut.edu.cn。

顾安全与效率的 CAV 专用车道网络优化模型;Liu 等^[10]提出了允许 CAV 通行而 HV 付费的混合车道方案;Li 等^[11]研究了混合交通流环境下车道和交叉口的协同管理问题。在降低交通事故率方面,王连震等^[12]针对城市网络中 HV 与 CAV 混合交通流环境下的路权冲突问题,建立了双层规划模型。在提升道路容量方面,Ngoduy 等^[13]提出了基于动态系统最优交通分配框架的混合整数线性规划模型。然而,目前在宏观层面上同时考虑出行时间与车辆空气污染物排放的研究相对较少,亟待进一步探索。

增设专用车道将对交通效率、油耗及排放均有显著影响。在提升交通效率方面,马峻岩等^[14]提出了粒流协同专用车道策略可提升通行能力 18.1%,减少事故延误 336 s。在降低油耗方面,Wang 等^[15]与 Seilabi 等^[16]分别从油耗与排放角度研究了车道管理策略的宏观影响。然而,现有研究多聚焦于微观层面,针对宏观层面交通效率与车辆空气污染物排放的研究则相对匮乏,尤其是探讨收费车道的最优布局及其与 CAV 专用车道协同布局优化对宏观系统效率、排放的综合影响的研究更为欠缺。

针对上述不足,本文从城市交通网络规划者视角出发,旨在确定混合交通网络中 CAV 专用车道与收费车道的空间协同布局优化方案,以在宏观网络层面协同提升交通效率并显著降低车辆空气污染物排放。

1 问题描述

本文聚焦于包含 HV 与 CAV 的混合交通网络。部署 CAV 专用车道和收费车道后,路段车道有 3 种类型:常规车道、CAV 专用车道以及收费车道。为明确区分 3 类车道,在扩展网络中采用不同链路符号:常规车道对应常规链路,待确定车道属性的待改造路段则由候选链路表示。原始网络、扩展网络以及实施优化方案后的扩展网络如图 1 所示。

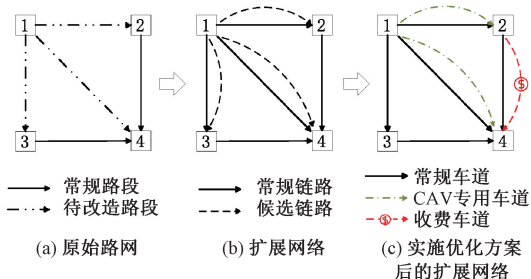


图 1 原始网络、扩展网络、实施优化方案后的扩展网络

Figure 1 Original network, expanded network, and the expanded network after implementing optimization scheme

扩展网络由 G 表示, $A = \bar{A} \cup \hat{A}$, 其中 A 为扩展网络中所有链路的集合, $\bar{A}$ 表示原始网络中与常规路段对应的常规链路集; $\hat{A}$ 表示与待改造路段对应的候选链路集。考虑到 HV 与 CAV 的混合交通特性, 本文采用上标 HV 与 CAV 区分两类车辆相关变量。

2 新型混合通行能力计算

在混合交通条件下, 跟驰行为分为 CAV 跟随 CAV、CAV 跟随 HV、HV 跟随 HV 及 HV 跟随 CAV 这 4 种模式, 各跟车模式对应的不同最小车头时距如图 2 所示。

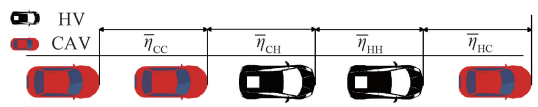


图 2 不同跟车模式对应不同最小车头时距

Figure 2 Different following modes correspond to different front minimum time distances

在混合交通系统中, 4 种跟车模式的最小车头时距存在差异, 车道通行能力随 CAV 渗透率及车辆空间分布动态变化。设 p_{ij} 表示链路 (i, j) 上的 CAV 渗透率, 可根据该车道上的 HV 与 CAV 流量计算:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}^{CAV}}{x_{ij}^{HV} + x_{ij}^{CAV}}, \forall (i, j) \in A. \quad (1)$$

式中: p_{ij} 为链路 (i, j) 上 CAV 的比例; x_{ij}^{CAV} 为链路 (i, j) 上 CAV 的流量; x_{ij}^{HV} 为链路 (i, j) 上 HV 的流量。

假设车道上车辆类型的出现服从伯努利过程^[17-18], 可以推导出 4 种跟车模式 (CAV 跟随 CAV、CAV 跟随 HV、HV 跟随 HV 及 HV 跟随 CAV) 的概率分别为 p_{ij}^2 、 $(1-p_{ij})p_{ij}$ 、 $(1-p_{ij})^2$ 、 $p_{ij}(1-p_{ij})$ 。通行能力^[18-19]计算公式如下所示:

$$c_{ij}(p_{ij}) = y_{ij} / [\bar{\eta}_{cc}(p_{ij})^2 + \bar{\eta}_{hc}p_{ij}(1-p_{ij}) + \bar{\eta}_{hh}(1-p_{ij})^2 + \bar{\eta}_{ch}p_{ij}(1-p_{ij})], \forall (i, j) \in A. \quad (2)$$

式中: $c_{ij}(p_{ij})$ 为链路 (i, j) 的通行能力; y_{ij} 为链路 (i, j) 上车道数。

3 广义出行成本计算

广义出行成本包括出行时间、车辆空气污染物排放成本、道路收费成本 3 部分。

3.1 常规车道车辆出行时间

HV 与 CAV 均可以在常规车道上行驶, 因此两种类型的车辆在链路上的行驶时间可以使用美国联邦公路局函数 (BPR 函数) 进行计算:

$$t_{ij}^m = t_{ij}^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_{ij}^{HV} + x_{ij}^{CAV}}{c_{ij}(p_{ij})} \right)^\beta \right],$$

$$\forall (i,j) \in \bar{A}, m \in \{HV, CAV\}。 \quad (3)$$

式中: t_{ij}^m 为常规链路上车辆 m 的出行时间; t_{ij}^0 为常规链路上自由流的出行时间; x_{ij}^{HV} 为常规链路上 HV 的流量; x_{ij}^{CAV} 为常规链路上 CAV 的流量; $c_{ij}(p_{ij})$ 为常规链路上的通行能力; α, β 均为 BPR 函数中的正参数, $\alpha=0.15, \beta=4$ 。

3.2 CAV 专用车道车辆出行时间

由于 HV 被禁止进入 CAV 专用车道, 因此可以得出 HV 在 CAV 专用车道上的出行时间为无穷大。HV 在 CAV 专用车道上的出行时间 t_{ij}^{HV} 可表示为

$$t_{ij}^{HV} = M, \forall (i,j) \in \hat{A}。 \quad (4)$$

式中: M 为足够大的正数常量。

候选链路上 CAV 车辆的出行时间计算公式为

$$t_{ij}^{CAV} = t_{ij}^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_{ij}^{HV} + x_{ij}^{CAV}}{c_{ij}(p_{ij}) + 1 - \lambda_{ij}} \right)^\beta \right] + M(1 - \lambda_{ij}), \forall (i,j) \in \hat{A}。 \quad (5)$$

式中: t_{ij}^{CAV} 为候选链路上 CAV 车辆的出行时间; t_{ij}^0 为候选链路上自由流的出行时间; x_{ij}^{HV} 为候选链路上 HV 的流量; x_{ij}^{CAV} 为候选链路上 CAV 的流量; $c_{ij}(p_{ij})$ 为候选链路的通行能力; λ_{ij} 为二进制变量, $\lambda_{ij} = 0$ 表示候选链路上没有部署 CAV 专用车道, $\lambda_{ij} = 1$ 表示候选链路上部署了 CAV 专用车道。

3.3 收费车道 HV 通行成本计算

收费车道 HV 通行成本计算公式为

$$Q_{ij}^{HV} = (t_{ij}^{HV} + \tau_{ij}E)b_{ij} + M(1 - b_{ij}), \forall (i,j) \in \hat{A}。 \quad (6)$$

式中: Q_{ij}^{HV} 为 CAV 收费车道上 HV 的通行费用; t_{ij} 为 HV 在候选链路 (i,j) 上的出行时间; τ_{ij} 为一个连续变量, 表示向候选链路上的 HV 收取的通行费用; E 为转换系数, 表示一个单位通行费的等效行驶时间; b_{ij} 为二进制变量, $b_{ij} = 0$ 表示部署了 CAV 专用车道, $b_{ij} = 1$ 表示部署了收费车道。

3.4 车辆污染物排放计算

本文在 Li 等^[20]提出的指数型排放模型基础上, 将其形式调整为基于平均速度与出行时间的幂函数关系, 并进一步引入车型排放系数, 从而更细致地刻画 CAV 与 HV 在排放特性的差异:

$$e_{ij}^m = \delta_1 t_{ij}^m \exp\left(\delta_2 \frac{L_{ij}}{t_{ij}^m}\right), \quad (7)$$

$$\forall (i,j) \in A, m \in \{HV, CAV\}。$$

式中: e_{ij}^m 为链路 (i,j) 上车辆空气污染物排放; δ_1 、 δ_2 为模型的参数, 用于调整旅行时间和链路长度对旅行成本的影响; t_{ij}^m 为链路 (i,j) 上车辆的出行时间;

$\frac{L_{ij}}{t_{ij}^m}$ 为链路 (i,j) 上车辆的平均速度。

4 用户均衡约束

为准确描述混合交通网络中 HV 与 CAV 的路径选择行为, 本文采用用户均衡模型刻画交通流量在扩展网络中的分配状态。

链路上的流量与每个起点节点相关联, 而不是在不同 OD 对之间引入路径流。例如 $x_{ij}^{r,m}$ 为链路 (i,j) 上属于 m 类型的车辆流出节点 r , 即

$$x_{ij}^m = \sum_{r \in R} x_{ij}^{r,m}, \forall (i,j) \in A, m \in \{HV, CAV\}。 \quad (8)$$

式中: R 为起点集合; r 为起点集合的节点; x_{ij}^m 为链路 (i,j) 上车辆的流量; $x_{ij}^{r,m}$ 为链路 (i,j) 上从起点 r 出发的车辆流量。

然后, 每条链路上的交通流应满足由非负约束和流量守恒约束组成的基本可行约束。非负约束意味着与每个目的地相关的链路流量应该是非负的:

$$x_{ij}^{r,m} \geq 0, \forall (i,j) \in A, r \in R, m \in \{HV, CAV\}。 \quad (9)$$

式中: $x_{ij}^{r,m}$ 为链路 (i,j) 上从起点 r 出发的车辆流量, 其值不小于 0。

根据节点在网络中的位置, 可以在以下 3 种情况下分别表示流量守恒约束:

$$\sum_{j: (k,j) \in A} x_{kj}^{r,m} - \sum_{i: (i,k) \in A} x_{ik}^{r,m} = \begin{cases} \sum_{s \in S} q_s^{r,m}, k = r; \\ -q_s^{r,m}, k = s; \\ 0, \text{其他}。 \end{cases} \quad (10)$$

式中: k 为网络中的任意节点; m 代表车辆类型; s 为终点集合的节点; j 为与节点 k 相连的下游节点; i 为与节点 k 相连的上游节点; $x_{kj}^{r,m}$ 为链路 (k,j) 上从起点 r 出发的车辆流量; $x_{ik}^{r,m}$ 为链路 (i,k) 上从起点 r 出发的车辆流量; $q_s^{r,m}$ 为从起点 r 到终点 s 的类型为 m 的车辆交通需求。

$$(t_{ij}^m + \pi_i^{r,m} - \pi_j^{r,m})x_{ij}^{r,m} = 0, \quad (11)$$

$$\forall (i,j) \in A, r \in R, m \in \{HV, CAV\}。$$

式中: t_{ij}^m 为链路 (i,j) 上车辆出行时间; $\pi_i^{r,m}$ 为节点 i 处起点为 r 的 m 类型车辆的节点势能; $\pi_j^{r,m}$ 为节点 j 处起点为 r 的 m 类型车辆的节点势能。

$$t_{ij}^m + \pi_i^{r,m} - \pi_j^{r,m} \geq 0, \quad (12)$$

$$\forall (i,j) \in A, r \in R, m \in \{HV, CAV\}。$$

5 CAV 专用车道与收费车道多目标协同布局优化模型

5.1 目标函数

$$\min_y T = \sum_{(i,j) \in A} t_{ij} (x_{ij}^{HV} + x_{ij}^{CAV})。 \quad (13)$$

式中: T 为交通系统总出行时间; y 为决策变量, 表示专用道部署方案。

$$\min_y E = \sum_{(i,j) \in A} e_{ij}(x_{ij}^{HV} + x_{ij}^{CAV}). \quad (14)$$

式中: E 为交通系统总车辆空气污染物排放。

5.2 车道约束

无论是否部署 CAV 专用车道或者收费车道,也无论部署多少条,常规车道数、专用车道数与收费车道数之和必须始终等于该链路上的总车道数,可表示为

$$y_{ij} + \sum_{(i',j') \in \hat{A}} y_{i'j'} \Phi_{i'j'}^{ij} = Y_{ij}, \forall (i,j) \in \hat{A}. \quad (15)$$

式中: y_{ij} 为常规链路 (i,j) 上的车道数; $y_{i'j'}$ 为候选链路上 CAV 专用车道与 CAV 收费车道数; $\Phi_{i'j'}^{ij}$ 为二进制变量,若候选链路 (i',j') 与常规链路 (i,j) 属于同一候选道路,则取值为 1,否则取值为 0; Y_{ij} 表示原始网络上的总车道数。

如式(16)所示,在决策变量体系中,候选链路的车道数量需设定为非负整数型变量。其取值范围下限为零,上限由对应待改造路段的车道总数决定,公式如式(17)所示。

$$y_{ij} \in \{0, 1, \dots, Y_{ij} - 1\}, \forall (i,j) \in \hat{A}. \quad (16)$$

$$\frac{y_{ij}}{Y_{ij}} \leq \lambda_{ij} \leq y_{ij}, \forall (i,j) \in \hat{A}. \quad (17)$$

式中:二进制部署变量 λ_{ij} 与专用车道数之间需满足逻辑关联,当 $y_{ij} \geq 1$ 时, $\lambda_{ij} = 1$ 表示已部署专用车道,当 $y_{ij} = 0$ 时, $\lambda_{ij} = 0$ 表示未部署。

5.3 模型构成

本文提出的 CAV 专用车道与收费车道协同布局优化模型由 3 部分构成:目标函数式(13)、(14)实现出行时间与排放最小化;车道约束式(15)~(17)确保决策方案的空间可行性;其他约束中,式(1)、(3)~(7)为广义出行成本计算方法,式(8)~(12)为用户均衡约束。上述内容共同构成了带用户均衡约束的多目标优化模型。

5.4 模型拓展

为提升优化方案的实际可操作性与社会可接受度,本文在核心双目标模型基础上,进一步将实施成本约束与用户公平性约束纳入优化框架^[21],如式(18)、(19)所示:

$$\sum_{(i,j) \in A} u_{ij}(y_{ij} + b_{ij}) \leq B. \quad (18)$$

$$\frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K |T_k - T_l|}{2K^2 \bar{T}} \leq \gamma. \quad (19)$$

式中: u_{ij} 为单位车道部署成本; B 为总预算上限; K 为用户群体的总数; $\bar{T}$ 为系统整体平均出行时间; γ 为公平性阈值; T_k 为第 k 个用户群体的平均出行时

间; T_l 为第 l 个用户群体的平均出行时间。

为提升排放评估的准确性并体现 CAV 与 HV 在排放特性上的差异,本文在原有排放计算基础上,引入车型排放系数与平均加速度修正因子,构建更贴合宏观规划层级的排放成本计算模型^[22]:

$$e_{ij,m} = w_m(1 + \eta \bar{a}_{ij}) \left[k_1 t_{ij} + k_2 L_{ij} \left(\frac{1}{v_{ij}} \right) \right], \quad (20)$$

$$\forall (i,j) \in A.$$

式中: w_m 为车型排放系数; η 为敏感系数,体现单位加速度增加对排放的放大效应; $\bar{a}_{ij}$ 为链路上车辆的平均加速度; v_{ij} 为链路上车辆的平均速度; k_1 、 k_2 均为排放模型参数。

6 求解算法

本文采用带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)^[23]求解多目标优化问题,基本流程^[24-25]如图 3 所示。

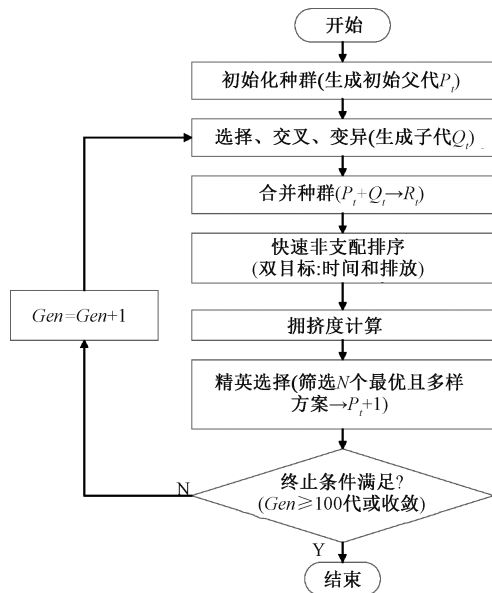


图 3 NSGA-II 流程

Figure 3 Flowchart of NSGA-II

7 案例分析

本文选取经典的 Nguyen-Dupuis 网络进行案例分析,如图 4 所示。

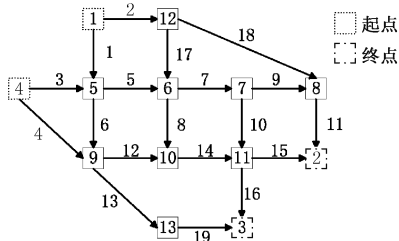


图 4 Nguyen-Dupuis 网络

Figure 4 Nguyen-Dupuis network

模型求解在配置为 Intel Core i9-13980HX CPU、16 GB 内存、Windows 10 (64 位) 操作系统的计算机上完成。Nguyen-Dupuis 网络参数汇总如表 1 所示。

表 1 Nguyen-Dupuis 网络参数汇总表

Table 1 Nguyen-Dupuis network parameter summary table

类别	参数项	参数值
网络拓扑	节点数量	13
	路段数量	19
	OD 对数量/对	4
OD 对	OD 对 1	1→2
	OD 对 2	1→3
	OD 对 3	4→2
	OD 对 4	4→3
BPR 函数参数	α	0.15
	β	4
车辆动力学参数	HV 驾驶员反应时间/s	1.5
	CAV 反应时间/s	0.6
遗传算法参数	交叉概率	0.8
	变异概率	0.3
	种群规模	1 500
	最大进化代数	200

图 5 展示了 NSGA-II 在 Nguyen-Dupuis 网络上的收敛过程。随着迭代的进行,两个目标函数值均显著下降,第 100 代形成帕累托前沿。

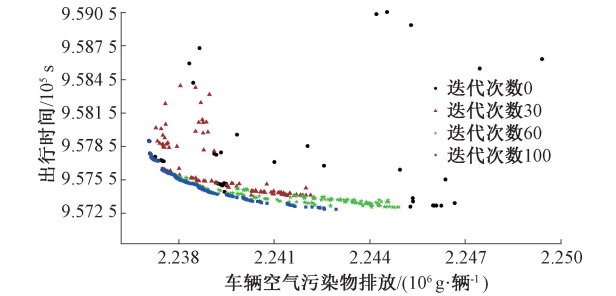


图 5 Nguyen-Dupuis 网络优化迭代曲线图
Figure 5 Iterative plot of Nguyen-Dupuis network optimization

为验证 NSGA-II 性能,将其与基于分解的多目标进化算法 (MOEA/D) 和改进的强度帕累托进化算法 (SPEA2) 进行对比。相同参数设置下,各算法独立运行 5 次取平均值。由表 2 可知,NSGA-II 在求解速度与目标函数值上均最优,综合性能最佳。

表 2 算法性能比较

Table 2 Performance comparison of different algorithms

算法	车辆空气污染物排放目标值/g	出行时间目标值/s	运行时间/h
NSGA-II	2.673 701 7e+06	1.054 669 8e+06	3.05
MOEA/D	2.941 021 3e+06	1.215 336 8e+06	3.21
SPEA2	2.684 101 0e+06	1.055 768 8e+06	4.25

CAV 专用车道与收费车道协同布局优化前后对比曲线图如图 6 所示。随着 CAV 渗透率的增加,优化前后的出行时间和车辆空气污染物排放均呈下降趋势,不同渗透率下平均降幅分别为 5.75% 和 3.01%;改善效果随渗透率呈先增加后降低的趋势,在渗透率约 0.4 时降幅最大,分别达 10.48% 和 4.48%。

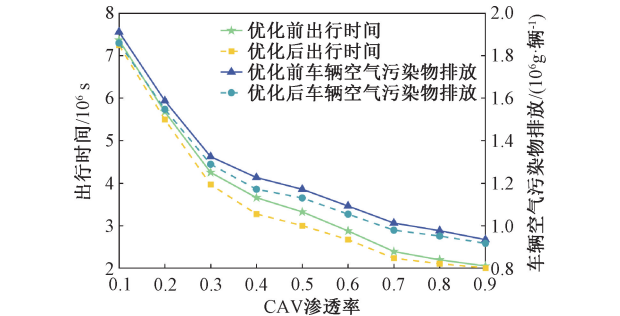


图 6 CAV 专用车道与收费车道协同布局优化前后对比曲线图
Figure 6 Comparative curves before and after coordinated layout scheme optimization for CAV-dedicated lanes and toll lanes

为深入探究关键参数的敏感性,本文进一步分析了收费转化系数与 CAV 专用车道数量上限对出行时间和车辆空气污染物排放的影响。图 7 为收费转化系数与 CAV 专用车道数量上限对出行时间和车辆空气污染物排放的影响。随着收费转化系数 E 增大,出行时间和车辆空气污染物排放均呈先降后升趋势,且在 $E = 23$ 附近污染物排放最低;相比之下,增加 CAV 专用车道数量虽可缩短出行时间,但会使污染物排放略有上升,因此需结合 CAV 渗透率合理确定专用车道规模。

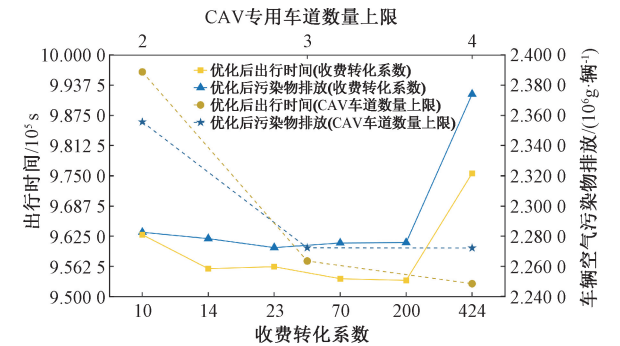


图 7 收费转化系数和 CAV 专用车道数量上限对出行时间和车辆空气污染物排放的影响
Figure 7 Impact of toll conversion factor and CAV-dedicated lanes factor on travel time and vehicle air pollutant emissions

不同 CAV 渗透率下,Nguyen-Dupuis 网络 CAV 专用车道与收费车道协同布局方案如图 8、9 所示。

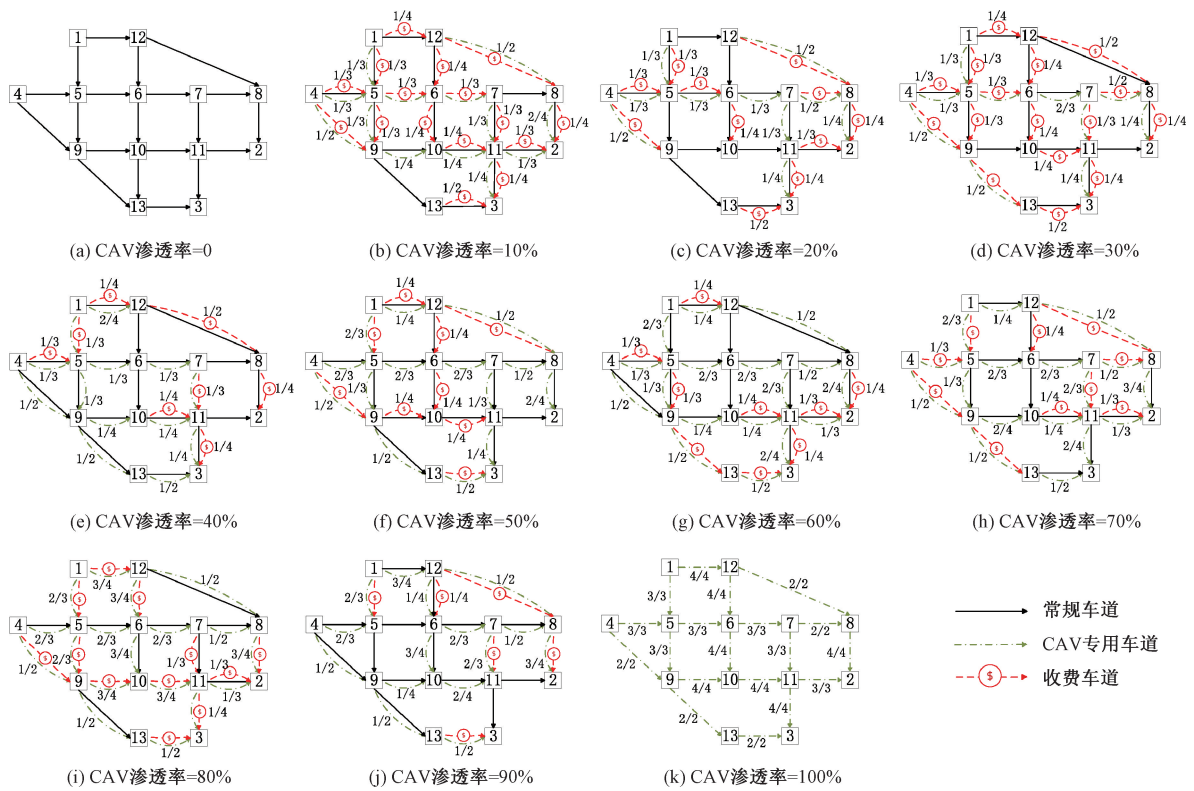


图 8 CAV 专用车道与收费车道协同布局方案 (出行时间最短)

Figure 8 Coordinated layout scheme for CAV-dedicated lanes and toll lanes(minimum travel time)

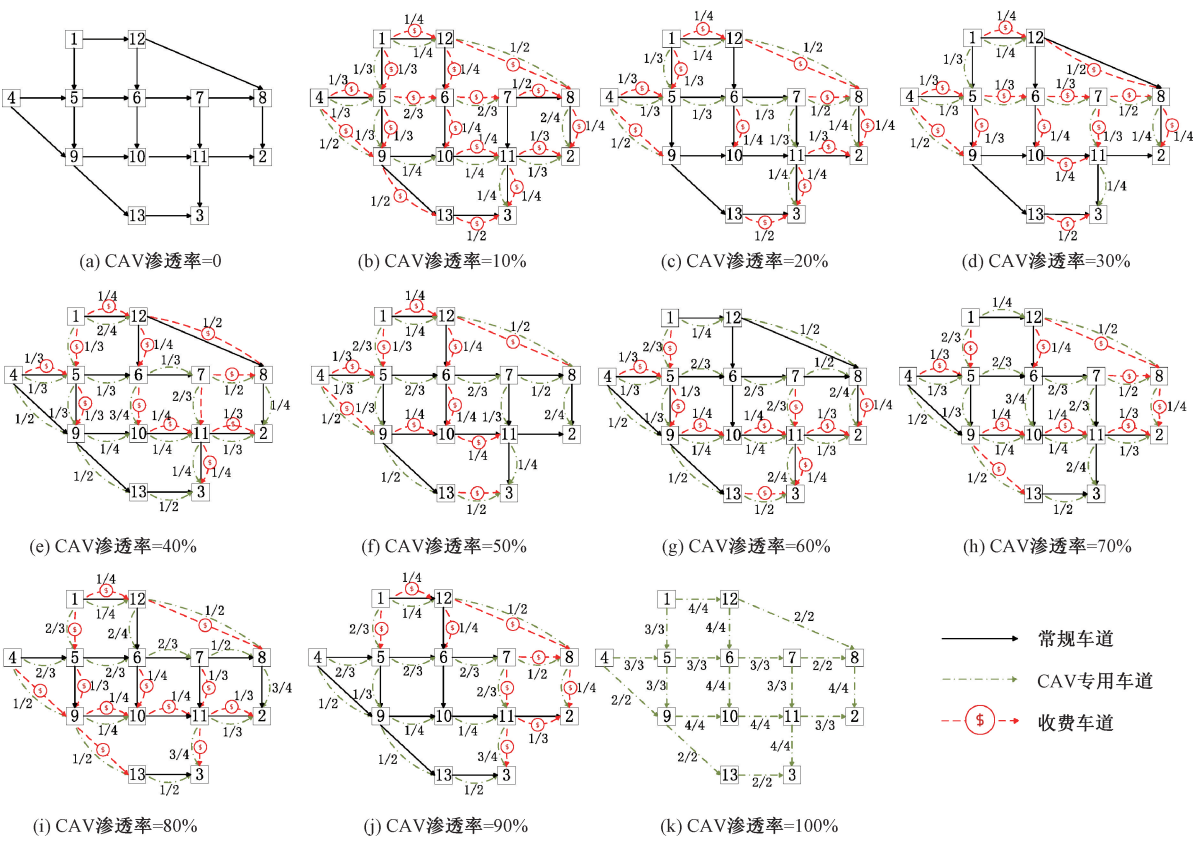


图 9 CAV 专用车道与收费车道协同布局方案 (车辆空气污染物排放最少)

Figure 9 Coordinated layout scheme for CAV-dedicated lanes and toll lanes(minimum vehicle air pollutant emissions)

图 8 的方案更侧重于优化出行时间,而图 9 则更侧重于减少车辆空气污染物排放。

为验证模型与算法在大规模路网中的泛化能力,选用 Sioux-Falls(SF)网络(24 节点、76 路段)进行实验,如图 10 所示。实验中,设定起点集 $R = \{8, 9, 10, 16, 17\}$, 终点集为全部节点 $S = N$, 据此生成 5×24 个 OD 对,候选改造路段参考 Wang 等^[26]的做法,选取链路 29、30、48、49、51、52、53 及 58。其余参数同表 1。算法运行 9.6 h 后收敛并得到最优解。

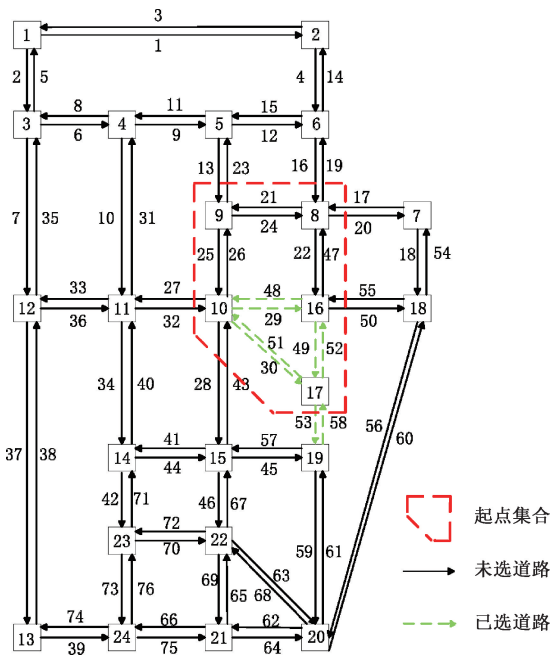


图 10 Sioux-Falls 路网
Figure 10 Sioux-Falls network

表 3 和表 4 分别给出了 SF 网络中以出行时间最短和车辆空气污染物排放最少为目标时的车道协同布局方案,具体列出了各候选链路的车道类型、车道数配置及对应收费水平,反映了不同优化目标下车道布局与收费策略的差异。

表 3 车道协同布局方案(出行时间最短)

Table 3 Optimal lane coordination layout scheme (minimum travel time)

候选链路	车道类型	车道数/最大车道数	收费/¥
29	CAV/收费车道	2/3	1.57
30	CAV/收费车道	1/2	0.33
48	CAV/收费车道	2/3	0.87
49	CAV/收费车道	1/3	1.72
51		0/2	7.73
52	CAV/收费车道	1/3	6.72
53	CAV/收费车道	1/2	2.30
58		0/4	9.68

表 4 车道协同布局方案(车辆空气污染物排放最少)

Table 4 Optimal lane coordination layout scheme (minimum vehicle air pollutant emissions)

候选链路	车道类型	车道数/最大车道数	收费/¥
29	CAV/收费车道	2/3	1.57
30		0/2	7.93
48	CAV/收费车道	2/3	0.87
49	CAV/收费车道	1/3	1.72
51		0/2	9.77
52	CAV/收费车道	1/3	6.72
53	CAV/收费车道	1/2	2.40
58	CAV/收费车道	1/4	7.23

8 结论

本文构建了混合交通环境下 CAV 专用车道与收费车道协同布局的多目标优化模型,并采用 NSGA-II 算法进行了求解。通过案例分析,得到如下结论。

(1)CAV 专用车道与收费车道协同布局能够同时降低交通系统总出行时间和车辆空气污染物排放。与未实施协同布局方案时相比,各 CAV 渗透率下出行时间平均降低 5.75%,车辆空气污染物排放平均降低 3.01%。

(2)CAV 渗透率对协同布局效果影响显著。随着 CAV 渗透率增加,出行时间与车辆空气污染物排放总体呈下降趋势,且在 CAV 渗透率约为 0.4 时优化效果最佳,二者降幅分别达到 10.48%和 4.48%。

(3)收费转化系数与专用车道规模均会影响优化结果。随着收费转化系数 E 增大,出行时间和车辆空气污染物排放均呈先降后升趋势,且在 $E = 23$ 附近污染物排放最低;增加 CAV 专用车道数量虽可缩短出行时间,但会使车辆空气污染物排放略有上升。

(4)所提方法具有较好的适用性。NSGA-II 在 Nguyen-Dupuis 网络上的求解效果优于 MOEA/D 和 SPEA2,并可在 Sioux-Falls 网络上能在约 9.6 h 内获得有效的协同布局方案。

本文目前将 CAV 渗透率视为外生参数,未来可进一步探讨其随时间或政策演化的动态性,通过将渗透率内生化,增强方案对 CAV 不同普及阶段的适应性与决策指导价值。

参考文献:

[1] Yun J, Oh S, Lee J. Optimal dedicated lane management for mixed traffic with connected and autonomous vehicles accounting for heterogeneous headways and speeds[J].

- Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2026, 207: 104588.
- [2] Kamjoo E, Rostami A, Fakhrmoosavi F, et al. A simulation-based approach for optimizing the placement of dedicated lanes for autonomous vehicles in large-scale networks[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2024, 39(20): 3011-3029.
- [3] Zheng Yuan, Yao Zhihong, Xu Yueru, et al. Lane management for mixed traffic flow on roadways considering the car-following behaviors of human-driven vehicles to follow connected and automated vehicles[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2024, 635: 129503.
- [4] Cheng Guozhu, Wang Wenzhi, Yang Zihan, et al. Review of connected and autonomous vehicle dedicated lane setup[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(5): 25-39. [程国柱, 王文志, 杨子涵, 等. 网联自动驾驶车辆专用车道设置研究综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(5): 25-39.]
- [5] Wang Zhengwu, Chen Tao, Xiang Jian, et al. Expressway lane management and traffic capacity analysis under mixed flow and connected environment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(2): 191-202. [王正武, 陈涛, 向健, 等. 网联混合流高速公路车道管理及通行能力分析[J]. 公路交通科技, 2024, 41(2): 191-202.]
- [6] Di Yunran, Zhang Weihua, Ding Heng, et al. Cooperative control of dynamic CAV dedicated lanes and vehicle active lane changing in expressway bottleneck areas[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2024, 638: 129623.
- [7] Zhang Weihua, Zhang Haiyang, Ding Huanyu, et al. CAV-dedicated lane sharing strategy of expressway in mixed traffic environment: a novel dynamic lane-level tolling method[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2025, 199: 104567.
- [8] Wang Xiaoxia, Pan Zhicheng, Huang Chen, et al. Configuration method of autonomous driving vehicles dedicated lane at urban road intersections in intelligent vehicle-road environment[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2026, 46(1): 175-188. [王小霞, 潘智成, 黄琛, 等. 智能车路环境下城市道路交叉路口自动驾驶车辆专用道配置方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2026, 46(1): 175-188.]
- [9] Hu Cheng, Han Chunyang, Pervez A, et al. Optimal deployment of connected and autonomous vehicle dedicated lanes: a trade-off between safety and efficiency[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(10): 13744-13766.
- [10] Liu Zhaocai, Song Ziqi. 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.
- [11] Li Tongfei, Qian Zhen, Fan Bo, et al. Integrated optimal planning of multi-type lanes and intersections in a transportation network with mixed HVs and CAVs[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 192: 103814.
- [12] Wang Lianzhen, Ma Zhifei, Cheng Guozhu, et al. Urban road dedicated lane for connected and automated vehicles[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2025, 25(1): 56-66. [王连震, 马志飞, 程国柱, 等. 城市道路智能网联汽车专用车道设置研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2025, 25(1): 56-66.]
- [13] Ngoduy D, Nguyen C H P, Lee S, et al. A dynamic system optimal dedicated lane design for connected and autonomous vehicles in a heterogeneous urban transport network[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 186: 103562.
- [14] Ma Junyan, Liu Chenying, Liu Youquan, et al. Dedicated lanes enabling granule-flow cooperation for mixed traffic of human-driven vehicles and connected and automated vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(8): 70-82. [马峻岩, 刘晨颖, 柳有权, 等. 智能网联车辆粒流协同专用车道管控方法研究[J]. 中国公路学报, 2025, 38(8): 70-82.]
- [15] Wang Yi, Li Le, Wu Yunxia, et al. Efficiency and fuel consumption of mixed traffic flow with lane management of CAVs[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2024, 652: 130049.
- [16] Seilabi S E, Pourgholamali M, Homem de Almeida Correia G, et al. Robust design of CAV-dedicated lanes considering CAV demand uncertainty and lane reallocation policy[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2023, 121: 103827.
- [17] Brackstone M, McDonald M. Car-following: a historical review[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 1999, 2(4): 181-196.
- [18] Chen Shukai, Wang Hua, Xiao Ling, et al. Random capacity for a single lane with mixed autonomous and human-driven vehicles: bounds, mean gaps and probability distributions[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 160: 102650.
- [19] Li Tongfei, Zhu Hongfei, Xiong Jie, et al. Analysis method for the rationality of dedicated CAV lane planning

schemes under different usage rules[J]. *Transport Research*, 2025, 11(1): 58–66. [李同飞, 朱宏菲, 熊杰, 等. 不同使用规则下 CAV 专用道规划方案合理性分析方法[J]. *交通运输研究*, 2025, 11(1): 58–66.]

[20] Li Tongfei, Xu Min, Sun Huijun, et al. Stochastic ride-sharing equilibrium problem with compensation optimization[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 170: 102999.

[21] Lin Yu, Zou Bo, Noruzoliaee M. Preserving equity: multi-objective connected and automated vehicle (CAV) lane deployment in mixed traffic[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2025: 1–42.

[22] Zhang Wenhui, Ye Meiru, Xi Cong, et al. Vehicle formation and carbon emission characteristics in mixed traffic flow environment[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2026, 56(2): 416–430. [张文会, 叶梅茹, 席聪, 等. 混合交通流环境下车辆编队与碳排放特性[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2026, 56(2): 416–430.]

[23] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182–197.

[24] Wang Dan, Fan Qi, Rang Guifang. Traffic structure optimization based on improved NSGA-II Algorithm [J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2024, 36(5): 391–400. [王丹, 樊琪, 让桂芳. 基于改进的 NSGA-II 算法的交通运输结构优化[J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2024, 36(5): 391–400.]

[25] Zhang Maoqing, Wang Lei, Cui Zhihua, et al. Fast non-dominated sorting genetic algorithm II based on hybrid strategies[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2020, 41(4): 23–27. [张茂清, 汪镭, 崔志华, 等. 基于混合策略的快速非支配排序算法II[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2020, 41(4): 23–27.]

[26] Wang Jian, Lu Lili, Peeta S, et al. Optimal toll design problems under mixed traffic flow of human-driven vehicles and connected and autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 125: 102952.

Multi-objective Coordinated Layout Optimization of CAV-dedicated Lanes and Toll Lanes

LI Li¹, ZHAN Pengyu¹, QIAN Zhen², LIU Chenhao², CHEN Yanyan², LI Tongfei²

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China; 2. College of Metropolitan Transportation, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To reduce total travel time and vehicle pollutant emissions in urban transportation systems under mixed traffic conditions with human-driven vehicles (HVs) and connected and autonomous vehicles (CAVs), a multi-objective optimization model for the coordinated layout of CAV-dedicated lanes and toll lanes from the perspective of urban transportation network planners was proposed and solved. Firstly, a mixed traffic assignment model was developed based on the driving characteristics of HV and CAV. Secondly, with the objectives of minimizing transportation system travel time and vehicle air pollutant emissions, the mixed traffic flow model was integrated into the coordinated layout optimization model. The non-dominated sorting genetic algorithm was employed to solve the model, and its performance was compared with the multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition and the improved strength Pareto evolutionary algorithm. Finally the proposed method was validated on the Nguyen-Dupuis network, and the impact of CAV penetration rates on the optimization schemes was analyzed. Experimental results showed that the spatial coordinated layout optimization of CAV-dedicated lanes and toll lanes reduced average travel time by 5.75% and average vehicle air pollutant emissions by 3.01%. Notably, both the reductions in travel time and vehicle air pollutant emissions peaked at a CAV penetration rate of approximately 0.4, with decreases of 10.48% and 4.48%, respectively. Furthermore, validation on the larger Sioux-Falls network demonstrated that the proposed method yielded effective coordinated layout schemes within approximately 9.6 hours, confirming its generalizability and practicality.

Keywords: urban traffic; lane coordinated layout; non-dominated sorting genetic algorithm; dedicated lane; toll lane; vehicle air pollutant emissions