

自动驾驶车流对区域规划路网密度的影响分析

李子辉¹, 李美玲¹, 冉晋², 朱香敏³

(1. 山东建筑大学 山东高校重点实验室道路与交通工程实验室, 山东 济南 250101;

2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102; 3. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 自动驾驶车流的出现会对区域规划路网密度产生影响。文中基于供需平衡思想, 构建考虑自动驾驶车流的路网密度模型, 对自动驾驶车辆平均载客数、自动驾驶车辆出行方式占比和道路通行能力进行分析; 以济南市某高密度、高强度开发区域地块为基础标定计算参数, 分析合理的道路网密度与等级结构。结果表明, 在自动驾驶车辆平均载客数不变的情况下, 随着自动驾驶车辆占比和道路通行能力的增大, 次干路密度增大, 主干路和支路密度基本不变, 整体路网密度呈递增趋势; 在自动驾驶车辆出行方式占比和道路通行能力不变的情况下, 随着自动驾驶车辆平均载客数的增大, 次干路密度减小, 主干路和支路网密度基本不变, 整体路网密度呈递减趋势。

关键词: 城市交通; 自动驾驶车流; 区域规划路网; 路网密度

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0018-04

自动驾驶汽车与人工驾驶汽车混合行驶, 若不考虑自动驾驶汽车的影响, 不仅会对交通安全造成威胁, 还会带来交通拥堵、能源及环境等问题。Ioannou P. 对自动驾驶车辆、半自动驾驶车辆和手动驾驶车辆对道路交通安全和效率的影响进行了分析; Bose A. 等分析了自动驾驶、手动驾驶车辆行驶在同一车道时对交通流特性及环境的影响; 马丽娜运用元胞自动机对不同交通条件下无人驾驶、手动驾驶交通流特点进行了分析; 陈广宇等基于元胞自动机交通流模型构建人工驾驶汽车及配有自动巡航系统(ACC)车辆的运动规则, 研究混合 ACC 车辆与人工驾驶汽车的交通流模型; 陈丽烨对自动驾驶汽车规模化运营后城市道路规划与基础设施设计面临的问题和挑战进行了分析。

在路网规划阶段, 表征交通供给的主要有路网形式、路网密度和路网级配, 其中路网密度是最重要的量化指标。在进行区域路网规划时, 可将自动驾驶车流的影响转化为自动驾驶车流的加入对路网密度的影响。该文基于供需平衡思想构建考虑自动驾驶车流的路网密度模型, 针对具体场景进行参数标定, 分析自动驾驶车流对区域规划路网密度的影响。

1 模型构建

自动驾驶汽车的运行机理与人工驾驶汽车存在较大差异, 主要表现在环境感知、规划决策和应急避险等方面(见表 1)。

表 1 自动驾驶与人工驾驶汽车运行机理的差异

驾驶方式	环境感知	规划决策	应急避险
人工驾驶	根据视觉与驾驶经验判断周围环境	根据驾驶经验和情景意识开展行为决策	应急反应时间长等受生理因素的限制
自动驾驶	通过多源传感器进行感知识别	采用系统决策算法进行实时规划	应急反应时间短

1.1 模型引入

确定合理路网规划密度的方法有经验类比法、指标算法、供需平衡法和交通仿真法。这里选用供需平衡法, 参考文献[10], 考虑土地资源利用、城市规模及城市人口标准、工作岗位经营规模和车辆拥有量, 构建以交通供需平衡、道路用地面积控制、干道网密度约束、支路密度约束、路网等级结构和路网各等级周转量为约束条件, 以路网周转量最大及道路建设投资最少为目标的道路网密度模型。为提高城市交通服务水平, 在该模型的基础上加入自动驾驶车流, 改变部分参数取值, 同时考虑过境交通比例, 构建考虑自动驾驶车流的路网密度模型。

1.2 目标函数

路网密度模型中的目标函数是使所研究区域内部各级道路的交通供应总量最大, 即道路网各等级道路周转量总和最大, 表达式如下:

$$\max V = \sum_{i=1}^4 Q_i = \sum_{i=1}^4 C_i \alpha_i \beta_i \gamma_i N_i L_i \quad (1)$$

式中: V 为道路网总周转量 ($\text{pcu} \cdot \text{km}/\text{h}$); Q_i 为第 i 类道路的周转量 ($\text{pcu} \cdot \text{km}/\text{h}$); i 表示城市道路种类, 分别为快速路、主干路、次干路和支路; C_i 为第 i 类道路单条车道的可能通行能力 (pcu/h); α_i 为第 i 类道路的平均饱和度; β_i 为第 i 类道路的交叉口折减系数; γ_i 为第 i 类道路的车道综合折减系数; N_i 为第 i 类道路的平均机动车车道数; L_i 为第 i 类道路的里程 (km)。

1.3 约束条件

道路交通供给应高于或等于城市交通需求, 其平衡条件为:

$$0.95 \leq \frac{V}{D_1 + D_2} \leq 1.05 \quad (2)$$

式中: D_1 为区域内交通需求 ($\text{pcu} \cdot \text{km}/\text{h}$); D_2 为过境交通需求 ($\text{pcu} \cdot \text{km}/\text{h}$)。

区域路网规划中还需考虑城市道路面积控制、合理干路网密度和各级道路合理级配等条件, 参考文献[7], 依据研究区域实际位置确定各种约束条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^4 d_i L_i}{S} \leq A_{\max} \\ \frac{L_2 + L_3}{S} \geq \epsilon_g \\ \frac{L_4}{S} \geq \epsilon_z \\ L_1 \leq L_2 \leq L_3 \leq L_4 \\ Q_1 \geq Q_2 \geq Q_3 \geq Q_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中: d_i 为各等级道路宽度 (km); L_i 为各等级道路长度 (km); S 为研究区域面积 (km^2); A_{\max} 为区域道路面积率上限值 (%); L_2 、 L_3 分别为研究区域内主干路、次干路长度 (km); ϵ_g 为合理干路网密度 (km/km^2); L_4 为研究区域内支路长度 (km); ϵ_z 为合理支路网密度 (km/km^2)。

2 自动驾驶车流对模型参数的影响分析

2.1 可能通行能力

可能通行能力是指在实际道路和交通条件下, 1 条车道或 1 条道路某一路段的通行能力。在交通流中未加入自动驾驶车流 (自动驾驶车流占比 = 0) 时, 根据 CJJ 37—2012《城市道路工程设计规范》, 单条车道的可能通行能力见表 2。加入自动驾驶车流后, 在单车道通行能力影响因素中, 交通条件 (指交通特征,

包括交通流的交通组成、交通量及车道分布、方向分布等) 发生变化。不同自动驾驶车辆占比下单条车道的可能通行能力 C_i 见表 2。自动驾驶车辆占比为 20% 时对通行能力影响不大, 不予考虑。

表 2 单条车道的可能通行能力

自动驾驶 车流占比/%	各级道路单条车道的通行能力/($\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$)			
	快速路	主干路	次干路	支路
0	1 800	1 730	1 640	1 380
40	1 929	1 854	1 757	1 479
60	1 957	1 881	1 783	1 500
80	2 001	1 923	1 823	1 534
100	2 025	1 946	1 845	1 553

2.2 出行方式占比

出行方式占比通过研究区域所在城市的出行调查获得, 若为新规划区域, 则根据该区域的交通发展模式确定。

根据济南市 2018 年居民出行调查结果, 公交车、小汽车、出租车的出行占比分别为 21.16%、15.74%、1.08%。将自动驾驶车辆在私家车和出租车中所占比例从 0~100% 每隔 20% 取一个值, 由于出行方式占比与各级道路通行能力存在联系, 不考虑自动驾驶车辆占比 20% 时各类交通方式的划分, 只研究 0、40%、60%、80%、100% 自动驾驶车辆占比下的情况 (见表 3)。

表 3 不同自动驾驶车辆占比下各出行方式的占比 %

自动驾驶 车辆 占比	各出行方式的占比				
	公交 车	私家车		出租车	
		自动驾驶	手动驾驶	自动驾驶	手动驾驶
0	21.16	0.000	15.740	0.000	1.080
40	21.16	6.296	9.444	0.432	0.648
60	21.16	9.444	6.296	0.648	0.432
80	21.16	12.590	3.148	0.864	0.216
100	21.16	15.740	0.000	1.080	0.000

2.3 平均载客数

区域内的主要交通工具具有自动驾驶汽车、非机动车、公交车、私家车、出租车和单位班车, 根据 CJJ 37—2012《城市道路工程设计规范》中换算系数参考值, 假定自动驾驶车辆作为私家车和出租车使用, 公交车、私家车 (自动驾驶)、私家车 (手动驾驶)、出租车 (自动驾驶)、出租车 (手动驾驶) 的换算系数为 3: 1: 1: 1: 1。

车型的平均载客数通过所在城市交通调查获得, 公交车、私家车、出租车的平均载客数分别为

30、1.67、2.2 人/车,平均载客数取私家车 2 人/车、出租车 2 人/车。

3 研究场景构建与参数标定

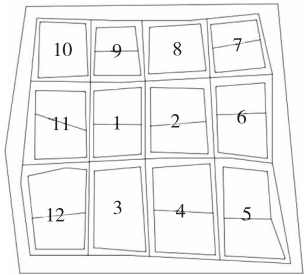
选取济南市某区域作为研究场景标定计算参数,分析加入自动驾驶车流后合理道路网密度与等级结构。

3.1 场景简介

图 1 为济南市某区域地块原型。选取 1 km² 作为研究范围,区域内采用方格网状布局,地块功能分为商业金融、商务办公、行政服务及配套的居住和公共设施,主干路布置在区域外围,次干路布置在区域中心和外围,支路布置在区域内部。抽象处理后得到的高密度开发布局形式见图 2。



图 1 济南市某区域用地原型



1~12 为区域编号

图 2 研究场景开发布局形式示意图

3.2 研究场景参数标定

研究场景参数分为路网密度原模型中的参数,加入自动驾驶车流后改变的 3 个参数,分别为自动驾驶车辆平均载客数、不同自动驾驶车辆占比下出行方式占比和道路通行能力作用下部分参数取值发生的变化。针对该算例,各可变参数的初始值如下:道路面积率上限值 A_{max} 取 25%;主干路、次干路、支路的宽度分别为 40、20、17 m;干路网密度不小于 3 km/km²;支路网密度不小于 6 km/km²;各出行方式的占比见表 3;研究区域范围为 1 km²,各车型平均出行距离约为 0.6 km。

运用考虑自动驾驶车流的路网密度模型计算高密度开发区域的合理路网密度。首先计算区域交通出行总量,结果见表 4;然后以自动驾驶车流占比为 40%时通行能力为例,将所标定的参数带入模型进行计算,得到合理路网密度与等级结构。

表 4 各功能区域交通需求计算结果

区域编号	划分区域	用地面积/km ²	容积率	建筑面 积/km ²	人高峰小时出行率/ [次·(h·100 m ²) ⁻¹]	交通出行总量 E/ [10 ⁴ (人次·h ⁻¹)]
1	商业金融、办公	0.075	2.6	0.350×2.6	12.25	11.154
2		0.075				
3		0.100				
4		0.100				
5	居住与服务	0.130	2.0	0.175×2.0	8.30	2.905
6		0.045				
7	商业、公共设施	0.070	2.9	0.290×2.9	10.50	8.831
8		0.080				
9		0.070				
10	商业办公、服务	0.070	2.5	0.185×2.5	9.50	4.394
11		0.085				
12		0.100				

研究区域的出行总量 $E = 27.284 \times 10^4$ 人次/h, 该区域为高密度、高强度开发的商务、金融服务区,

在高峰小时会吸引大量交通流,区域内道路主要是服务于出行起终点为商务区的交通量,该模型计算

时只考虑区域内交通,不考虑跨境交通,即 $D=D_1$ 。将上述参数代入式(1),得到该区域的交通需求总量 $D=66\,725\text{ pcu}\cdot\text{km/h}$ 。路网密度模型的目标函数及约束条件为:

$$\begin{aligned} \max V &= 3\,274.54L_2 + 1\,288.06L_3 + 463.68L_4 \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} 0.04L_2 + 0.02L_3 + 0.017L_4 \leq 0.25 \\ L_2 + L_3 \leq 3 \\ L_4 \geq 6 \\ L_2 \leq L_3 \leq L_4 \\ 3\,274.54L_2 \geq 1\,288.06L_3 \geq 463.68L_4 \end{cases} \end{aligned}$$

利用 MATLAB 工具箱里的 linprog 函数对模型进行求解,结果见表 5。

表 5 路网密度模型的运算结果

参数	运算结果
主干路长度/km	1.831
次干路长度/km	3.303
支路长度/km	6.508
路网密度/($\text{km}\cdot\text{km}^{-2}$)	11.642
道路面积率/%	24.9
等级结构	1:1.8:3.55

4 参数改变时路网密度变化规律分析

根据模型的初值运算结果,分析路网密度对自动驾驶车辆平均载客数、不同自动驾驶车辆占比下出行方式占比和道路通行能力 3 个参数变化的敏感性。在各级道路服务水平下,道路通行能力随着自动驾驶车辆出行方式占比的变化而改变,可把它们放在一起考虑。以自动驾驶车辆平均载客数作为第一组参数,自动驾驶车辆出行方式占比和各级道路通行能力作为第二组参数,分别固定这 2 组参数,探究另一组参数变化时路网密度的变化规律。

4.1 不同自动驾驶车辆出行方式占比和道路通行能力时路网密度的变化

固定自动驾驶车辆平均载客数,分析自动驾驶车辆不同出行方式占比和道路通行能力对路网密度的影响。公交车、私家车(自动驾驶)、私家车(手动驾驶)、出租车(自动驾驶)、出租车(手动驾驶)的平均载客数分别取 30、1.17、1.67、1.7、2.2 人/车,即取私家车(自动驾驶)1 人/车、私家车(手动驾驶)2 人/车、出租车 2 人/车,不同自动驾驶车辆占比下各级道路通行能力和各出行方式占比的变化分别见表 3、表 2,模型运算结果见表 6。

表 6 不同自动驾驶车辆出行方式占比下

自动驾驶车辆出行方式占比/%	各级道路和路网密度			km/km ²
	主干路密度	次干路密度	支路密度	
0	4.028	2.143	5.949	12.120
40	3.775	3.702	5.931	13.408
60	3.982	3.895	5.923	13.800
80	4.137	4.044	5.913	14.094
100	4.338	4.234	5.904	14.476

由表 6 可知:在自动驾驶车辆平均载客数不变的情况下,随着自动驾驶车辆出行方式占比和各级道路通行能力的增大,次干路密度增大,主干路和支路密度基本不变,路网密度呈递增趋势。

4.2 不同自动驾驶车辆平均载客数时路网密度的变化

固定自动驾驶车辆出行方式占比和各级道路通行能力,分析不同自动驾驶车辆平均载客数对路网密度的影响,探究自动驾驶车辆平均载客数如何取值更有利于区域路网规划和城市发展。

由于不确定未来自动驾驶车辆的规格及政府会采取何种管理政策,对平均载客数设定以下 3 种情况:工况 1 为自动驾驶车辆平均载客数小于手动驾驶车辆平均载客数;工况 2 为自动驾驶车辆平均载客数与手动驾驶车辆平均载客数相同;工况 3 为自动驾驶车辆平均载客数大于手动驾驶车辆平均载客数。

固定自动驾驶车辆出行方式占比为 40%时各类车辆出行占比和各级道路通行能力及服务水平,分析自动驾驶车辆平均载客数发生变化时路网密度,结果见表 7。

表 7 不同自动驾驶车辆平均载客数下

工况	各级道路和路网密度			km/km ²
	主干路密度	次干路密度	支路密度	
工况 1	3.775	3.702	5.931	13.408
工况 2	3.234	3.191	5.959	12.384
工况 3	3.237	2.153	5.977	11.367

由表 7 可知:在自动驾驶车辆出行方式占比和各级道路通行能力不变、各级道路交通服务水平一致的条件下,随着自动驾驶车辆平均载客数的增大,次干路密度减小,主干路和支路网密度基本不变,路网密度呈递减趋势。

(下转第 26 页)

78—90.

- [9] ZHANG H M, RECKER W W. On optimal freeway ramp control policies for congested traffic corridors[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1999, 33(6): 417—436.
- [10] HASAN M, JHA M, BEN-AKIVA M. Evaluation of ramp control algorithms using microscopic traffic simulation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2002, 10(3): 229—256.
- [11] PAPAGEORGIOU M, PAPAMICHAIL I. Overview of traffic signal operation policies for ramp metering[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2047(1): 28—36.
- [12] WONG C K, HEYDECKER B G. Optimal allocation of turns to lanes at an isolated signal-controlled junction[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(4): 667—681.
- [13] 刘伟, 陈科全, 田宗忠, 等. 干道交织区通行能力最大

化的合流车道控制[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(1): 55—61.

- [14] KNOOP V L, DURET A, BUISSON C, et al. Lane distribution of traffic near merging zones influence of variable speed limits[C]//International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2010.
- [15] PAPAGEORGIOU M, KOSMATOPOULOS E, PAPAMICHAIL L, et al. ALINEA maximises motorway throughput: An answer to flawed criticism[J]. Traffic Engineering and Control, 2007, 48(6): 271—276.
- [16] WATTLEWORTH J A. Peak period analysis and control of a freeway system with discussion[J]. Highway Research Record, 1965, 89: 1—25.
- [17] 张亚平, 汪建鸽. 基于流量—车道占有率模型的高速公路路段通行能力分析[J]. 中南公路工程, 2000, 25(1): 63—65.

收稿日期: 2021—06—21

(上接第 21 页)

5 结论

(1) 影响区域路网密度的主要参数为自动驾驶车辆平均载客数、自动驾驶车辆出行方式占比和道路通行能力。

(2) 在自动驾驶车辆平均载客数不变的情况下, 随着自动驾驶车辆出行方式占比和各级道路通行能力的增大, 次干路密度增大, 主干路和支路密度基本不变, 路网密度呈递增趋势。

(3) 在自动驾驶车辆出行方式占比和各级道路通行能力不变、道路交通服务水平一致条件下, 随着自动驾驶车辆平均载客数的增大, 次干路密度减小, 主干路和支路密度基本不变, 路网密度呈递减趋势。

参考文献:

- [1] IOANNOU P. Evaluation of mixed automated manual traffic[R]. California PATH Research Report, 1998.
- [2] BOSE A, IOANNOU P. Analysis of traffic flow with mixed manual and semi-automated vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2003, 4(4): 173—188.
- [3] 马丽娜. 基于元胞自动机的自动驾驶—手动驾驶交通流特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [4] 陈广宇, 祝会兵, 范悦悦. 混合 ACC 车辆与人工驾驶车

辆的交通流数值模拟[J]. 宁波大学学报(理工版), 2018, 31(2): 101—107.

- [5] 陈丽烨. 面向自动驾驶汽车规模化应用的道路交通系统规划与设计若干思考[J]. 交通与运输, 2020, 33(增刊 1): 205—208+218.
- [6] 陆建, 王炜. 城市道路网规划指标体系[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 62—67.
- [7] 杨佩昆. 重议城市干道网密度: 对修改《城市道路交通规划设计规范》的建议[J]. 城市交通, 2003, 1(1): 52—54.
- [8] 李柏, 张友民, 邵之江. 自动驾驶车辆运动规划方法综述[J]. 控制与信息技术, 2018(6): 1—6.
- [9] 张亚倩. 基于地块容积率的路网密度研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
- [10] 陈雷进. 基于供需平衡的高密度开发区域道路网密度研究[J]. 交通标准化, 2010(2): 113—117.
- [11] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 城市道路工程设计规范: CJJ 37—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] ORFEUIL Jean-Pierre, MIREILLE Apel-Muller, 祖源源. 自动驾驶与未来城市发展[J]. 上海城市规划, 2018(2): 11—17.
- [13] 王文, 汤文蕴, 庄宇, 等. 基于元胞自动机的自动驾驶技术对交通运行的影响研究[J]. 现代交通技术, 2018, 15(1): 71—74.

收稿日期: 2021—08—03