

自动驾驶场景下的城市街道分类与规划设计策略

李光红, 黄伟, 冯晓玲, 张辉, 孙娜

[摘要] 自动驾驶正在走进人们的生活, 随着越来越多的商业化应用场景落地, 自动驾驶将促使城市出行模式发生深刻变化, 城市街道的空间利用和组织模式也将随之改变。作为自动驾驶主要载体的城市道路, 其与自动驾驶车辆的适应程度或匹配关系至关重要, 但相关研究却相对较少。对未来自动驾驶时代的城市道路规划设计进行探索性研究, 在新的出行模式下, 提出新的街道等级分类, 并对街道空间构成、复合功能设施带、车道宽度、路缘石转弯半径、人行过街设施、道路交通组织和管等方面的设计提出优化策略, 为城市街道更好地适应自动驾驶时代提供相应的技术和管理支撑。

[关键词] 自动驾驶; 车路协同; 复合功能设施带; 自动驾驶汽车; 街道空间; 规划设计

[文章编号] 1006-0022(2024)11-0064-07 **[中图分类号]** TU984 **[文献标识码]** B

[引文格式] 李光红, 黄伟, 冯晓玲, 等. 自动驾驶场景下的城市街道分类与规划设计策略 [J]. 规划师, 2024(11): 64-70.

Classification and Planning and Design Strategies of Urban Streets in the Autonomous Driving Scenario/
LI Guanghong, HUANG Wei, FENG Xiaoling, ZHANG Hui, SUN Na

[Abstract] Autonomous driving has emerged in daily life with increasing application in commercial scenarios, which will prompt profound changes in urban travel, as well as spatial organization of streets. Urban roads are the basic carrier of autopilot vehicles, and their matching degree or relationship is crucial yet has been rarely studied. An exploratory research on street planning and design for autopilot vehicles is carried out in this paper, putting forward streets classification in the new travelling context, and design optimization strategies such as street space composition, composite functional facilities belt, lane width, turning radius of curbs, pedestrian crossing facilities, road traffic organization and management, etc. It helps city streets better adapt to the arrival of the autonomous driving era with corresponding technical and management preparations.

[Keywords] autonomous driving; vehicle-road cooperation; composite functional facilities belt; autopilot vehicle; street space; planning and design

自动驾驶是当前体现新质生产力的代表性新兴技术, 其发展会对未来的城市出行产生颠覆性影响, 不仅会改变市民的交通工具和出行模式, 也会对城市道路的规划和组织管理产生深远影响。自动驾驶是典型的多学科交叉应用技术, 达到商用级别的自动驾驶将是“车路云图”的深度融合, 但当前的自动驾驶多是由智能汽车和互联网公司主导研究的, 其研究内容主要聚焦于车

辆的感知与控制、地图与定位、数据及通信等方面。或许汽车工程师默认未来的自动驾驶汽车仍然在现有的城市街道上行驶, 但从交通规划来看, 自动驾驶模式将足以深刻改变城市交通现有的出行模式, 自动驾驶场景下的城市道路在分级分类、空间划分、设计指标及运行组织上都可能需要进行相应调整。本文试图从城市道路的规划设计角度开展相关研究, 思考自动

[基金项目] “十四五”国家重点研发计划项目 (2023YFC3804103)

[作者简介] 李光红, 高级工程师, 北京清华同衡规划设计研究院有限公司交通规划设计研究所主任工程师。309674177@qq.com

黄伟, 教授级高级工程师, 北京清华同衡规划设计研究院有限公司副总规划师、交通规划研究中心主任。

冯晓玲, 工程师, 北京清华同衡规划设计研究院有限公司交通规划设计研究所项目经理。

张辉, 通信作者, 高级工程师, 北京清华同衡规划设计研究院有限公司交通规划设计研究所副所长。zhanghui1@thupdi.com

孙娜, 工程师, 北京清华同衡规划设计研究院有限公司交通规划设计研究所项目经理。

驾驶场景下的智慧街道需要做出哪些技术调整,以使自动驾驶在城市交通可持续发展的框架内健康、有序发展。

1 自动驾驶将对城市和交通产生深远影响

1.1 城市和交通由“时空集聚”逐步走向“时空均衡”

自动驾驶场景下,车辆操控将更加精准,道路通行更加高效,交通事故率大幅下降,交通拥堵问题得到全面缓解,市民通勤出行的时间成本将明显降低,此时通勤距离不再是影响居住地选择的主要因素,城市的空间功能布局将更加均衡,中心区和边缘地区的边界将进一步模糊,职住空间距离的重要性显著下降。此外,由于远程通信技术的进步,部分上班族可根据需要在进入自动驾驶汽车后通过移动办公、虚拟现实等立即进入工作状态(早上从家出发)或保持工作状态(下午从单位返家),在工作时间和私人时间之间省去了中间的通勤时间,并使上下班的时间弹性大大增强。在此情况下,城市道路交通的高峰小时系数将显著降低,道路资源在使用时间的分配上更加合理。

1.2 城市交通面临能力和需求的双重考验

自动驾驶在一定程度上突破了市民出行距离的限制,扩展了市民的社交范围,市民单次出行的平均距离将会增加,城市出行需求总量也随之上升。此外,由于无人驾驶出租车(或共享汽车)等出行方式的日益普及,大量的个性化出行将更多地选择自动驾驶汽车,小汽车出行分担率的大幅提升将改变当前相对稳定的城市交通出行结构,在道路交通效率明显提高的同时,机动车的交通需求也会大幅增加,这将给城市交通系统带来新的冲击和挑战。

1.3 城市交通运行和组织模式将发生重大变化

1.3.1 “自动驾驶+共享模式”成为城市交通出行的重要方式

自动驾驶不仅可以大幅提升单车的行驶效能,未来还可以通过“模块化智能底盘+个性化车架”的架构使智能汽车编队出行成为可能,从而使道路通行效率进一步提升。此外,自动驾驶汽车还可根据乘客的个人喜好和需求,提供更加多元化、个性化的出行服务;共享模式则可以让出行者在不需要拥有私人汽车的情况下,享受更好的出行服务,共享运营公司通过按需提供车型、提高车辆周转率、减少停放时间等,解决交通资源的时空浪费问题并大幅降低出行成本。因此,未来“自动驾驶+共享模式”的组合将以其突出的高效率、低成本特点和门到门的出行服务,成为市民优先选择的出行方式。长远来看,私家车将逐步退出历史舞台,城市交通出行模式将发生革命性的变化。

1.3.2 自动驾驶场景下的新需求促使城市街道空间作出相应调整

除去交通性干道,大部分城市街道既承载交通功能,也是重要的城市公共空间,是体现城市活力的重要场所。基于以下4个方面的理由,在自动驾驶场景下,有必要重新优化及分配既有的城市街道空间,对既有城市街道空间进行适当的收缩与拓展^[1]。一是自动驾驶的精准和高效有助于减少机动车的行车面积,有可能释放出更多的道路空间用于慢行通行、城市物流配送、绿化以及道路两侧的设施设备建设等;二是随着自动驾驶技术的持续发展,未来还可能出现更先进的不同形式的交通工具,城市道路交通方式的构成将更加复杂,会产生更多更复杂的通行需求;三是新的“自动驾驶+共享模式”的组合出行模式在大幅增加城市街道内临时停车空间需求的同时,又将显著降低道路内的长时停

车需求;四是基于车路协同的技术路线,街道空间还需要同时考虑路侧智能网联设施和设备的敷设需要。

2 自动驾驶场景下的城市道路分类

依据《城市综合交通体系规划标准》(GB/T 51328—2018),城市道路的主要服务对象是行人、非机动车和机动车,按照城市道路所承担的城市活动的特征,可分为干线道路、支线道路、联系两者的集散道路3个大类,以及城市快速路、主干路、次干路及支路4个中类和8个小类^[2]。但在自动驾驶场景下,车路协同的城市道路需要更多的路侧设施,未来道路上的交通工具构成也会更加复杂,交通工具的机动与非机动界限会愈加模糊。此外,由于城市出行模式出现重大变化,道路空间的交通组织模式也需要作出相应调整。因此,有必要对自动驾驶场景下新的城市道路分类开展研究。

2.1 智能网联道路系统分级

2.1.1 自动驾驶技术路径的选择

目前,全球自动驾驶的发展技术路线大致分为两种。一种是单车智能技术路线,主要以美国的谷歌、特斯拉公司为代表。谷歌单车智能技术以多线激光雷达为感知,优势是感知非常灵敏,劣势是对高精地图依赖性非常高,且成本较高;特斯拉的单车智能技术则依赖于摄像头实现视觉感知,运用大量的人工智能和数据学习来实现自动驾驶^[3]。另一种是车路协同技术路线,是基于无线通信技术和传感检测技术,将“人一车一路一云”有机地联系在一起,以提升自动驾驶车辆在环境感知、计算决策和控制执行等方面的能力^[4]。我国采用的技术路线是车路协同,主要依赖于3大技术优势:一是“5G+车联网”通信设施为自动驾驶车辆提供高速度、大容量、低时延的通信网络,二是北斗导航系统

为自动驾驶汽车提供高精度的定位和时空导航，三是高度协同的智能网联道路系统。

2.1.2 智能网联道路系统分级

根据国际汽车工业协会 (SAE) 的定义，自动驾驶技术分为 L0 ~ L5 六个级别^[5]，代表自动驾驶技术的成熟度和自动化水平，这是针对运用单车智能技术的自动驾驶汽车的分级。与此对应，基于车路协同技术路线的智能网联道路也应具有不同的智能等级。中国公路学会于 2019 年发布的《智能网联道路系统分级定义与解读报告》^[6]将自动驾驶道路分为 I0 ~ I5 六级，其中 I0 级为交通基础设施与单个车辆系统之间无信息交互的道路，而 I5 级则为基于交通基础设施的互动能够实现完全自动驾驶的道路。

2.1.3 车路协同下的自动驾驶系统分级

通过自动驾驶车辆和智能网联道路的耦合协同，智能级别较低的自动驾驶汽车在智能网联道路上行驶也可以实现较高级别的自动驾驶水平。根据中国公路学会 2020 年发布的《车路协同自动驾驶系统分级与智能分配定义与解读报告》^[7]，对应地将车路协同自动驾驶系统分为 S0 ~ S5 六个等级，等级越高，自动驾驶水平越高。其中，S0 为人工驾驶、S1 为驾驶辅助、S2 为部分自动驾驶、S3 为有条件自动驾驶、S4 为高度自动驾驶、S5 为完全自动驾驶。

根据车路协同下的自动驾驶系统智能等级与自动驾驶汽车等级和智能网联道路等级的组合表 (表 1)，最高级别的自动驾驶系统不需要自动驾驶汽车和智能网联道路同时达到最高级别，低等级的自动驾驶汽车与智能网联道路的协同配合也可以实现高等级的自动驾驶服务。例如，仅依靠 V5 的智能网联汽车就可以在任何智能网联道路环境下实现完全自动驾驶 (S5)，或者 I5 的智能网联道路与 V3 及以上的智能网联汽车等级组合就

能实现完全自动驾驶 (S5)。因此，智能网联道路在大幅降低自动驾驶汽车成本的同时，还可大大加速自动驾驶应用场景的落地。目前，国家层面还未出台基于自动驾驶车路协同的城市道路建设指南，但一些地区已发布地方标准，如江苏省地方标准《车路协同路侧设施设置指南》(DB32/T 4192—2022)、无锡市地方标准《智能网联道路基础设施建设指南》(DB3202/T)。但这类地方标准主要关注的是路侧设施的建设要求，包括路侧单元、边缘计算单元、视频检测设备、毫米波雷达、激光雷达、信号机、交通标志、交通护栏、照明设备、环境监测设备、差分基站和网络等设施，而对城市道路本身系统性变化的研究较少，如城市道路的功能与分类、路权空间划分、规划设计指标等。

2.2 自动驾驶场景下的城市街道空间与分类

2.2.1 未来城市街道的交通流构成

相关资讯报道特斯拉计划在 2024 年推出无人驾驶出租车 Robotaxi，这显示自动驾驶的商业化进程正在加速，搭载全自动驾驶技术的智能汽车可能比预期更早出现在城市街道上。如上文所述，城市交通需求特征和出行模式将因此产生巨大变化。可以预见，随着新能源和自动驾驶技术日益成熟，加之智能网联道路路侧设施和高精地图的赋能，会衍生出更多更新的城市出行技术，未来城

市街道的交通流构成将更加多元和复杂，当前对于道路通行的机动车、非机动车、行人的简单分类将无法适应未来管理的需要。为此，本文尝试将未来城市街道上的多种出行方式分为 6 类，除了已知的各类公共交通工具、汽车、电动自行车、电动滑板车、老年代步车、无人配送车，还包括现在还没出现的新型交通工具。见图 1。

2.2.2 基于移动速度的街道空间划分

上述的交通出行方式的分类实际上是不同移动速度区间的聚合，因此在新的城市街道空间划分中，应以移动速度为主要控制因素，将街道空间划分为步速、慢速、中低速、中快速 4 类通行空间。其中：步速空间的移动速度最低，不超过 10 km/h，主要用于步行通行；慢速空间的移动速度为 10 ~ 20 km/h，主要供人力驱动车辆和慢速助力车通行，如自行车、共享单车、老年代步车等；中低速空间移动速度为 20 ~ 30 km/h，主要供各种轻型电动车使用，如各种轻骑、私人电动自行车、共享电单车、电动滑板车等；中快速空间移动速度超过 30 km/h，主要供各类汽车和轨道交通通行。见图 2。

2.2.3 自动驾驶场景下的未来城市街道分类

在自动驾驶场景下，依据城市用地的布局形态和功能分布，将未来的城市街道划分为 4 类，即慢行街道、轻行街道、混合街道和汽车专用路。见表 2。

表 1 车路协同系统智能等级 (S)

| 智能网联道路等级 (I) | 智能网联汽车等级 (V) | | | | | |
|--------------|--------------|------|----|----|----|----|
| | V1 | V1.5 | V2 | V3 | V4 | V5 |
| I1 | S1 | S1.5 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| I2 | S1 | S2 | S3 | S3 | S4 | S5 |
| I3 | S1 | S3 | S3 | S4 | S4 | S5 |
| I4 | S1 | S3 | S4 | S4 | S4 | S5 |
| I5 | S1 | S4 | S4 | S5 | S5 | S5 |

资料来源：《车路协同自动驾驶系统分级与智能分配定义与解读报告》。

慢行街道：一般紧邻社区、商圈、景区布置，仅有步速和慢速通行空间，限速 20 km/h，主要供步行和慢速非机动车通行，类似于步行街，与地块出入口连接的路段根据需要允许轻型交通工具和小型智能汽车借道低速通行。

轻行街道：一般在社区、公共建筑、商圈、公园绿地邻近区域布置，具有步速、慢速和中低速通行空间，限速 30 km/h，主要供步行、慢速非机动车及轻型交通工具通行，小型汽车和小型公交车可限速驶入，并需进行主动避让。

混合街道：同时具有步速、慢速、中低速、中快速 4 类通行空间，限速 60 km/h，是交通工具最为集中的街道类型，多种交通流在各自通行空间内分区方向通行，此类街道功能较为复合，道路红线较宽，是未来城市街道的主要形式，承担较多的中距离交通出行。

汽车专用路：仅有中快速通行空间，限速 100 km/h，供机动车、轨道交通快速通行使用，不提供低速交通通行空间，此类街道是未来长距离快速交通出行的主要通道。

与现行的道路分级体系^[6]对比，新的街道分类更侧重于在空间上分离不同速度区间的交通流，更适应未来的多元化交通工具的需求，慢行街道和汽车专用路对快速和慢速交通进行了比较彻底的分离，使步行和自行车慢速交通环境进一步优化，车行空间的人车混杂程度也将大幅降低。总体而言，与现行城市道路体系对照，未来街道体系中的轻行街道和慢行街道与现在的次干路、支路基本对应，混合街道与生活性主干路和次干路基本对应，而汽车专用路与城市快速路和交通性主干路基本对应。需要指出的是，在自动驾驶场景下，信号控制交叉口的通行能力将大幅提升，未来汽车专用路将不再需要建设占地过大的枢纽互通立交，通过一般互通立交与先进的车联网技术 (V2X)、车队协同行驶以



图 1 出行方式分类

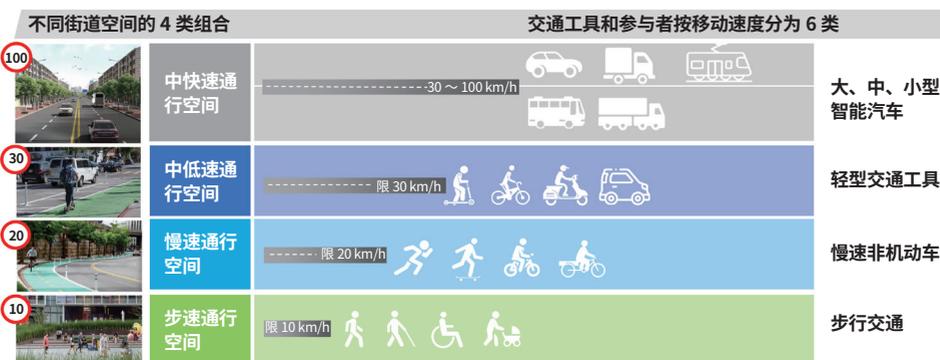


图 2 未来城市道路空间划分与对应的交通参与者

表 2 未来街道四级体系与街道空间组合

| 街道体系 | 速度管控 | 街道空间组合 | 主导交通方式 / 工具 | 其他交通工具的管控要求 |
|-------|------------------|-------------------------------------|---|--|
| 慢行街道 | 限速 20 km/h | 步速通行空间 + 慢速通行空间 | 步行交通，慢行交通工具 | 轻型交通工具和小型智能汽车可以进入，但是要使用指定的空间，按标志和标线的指示行驶，要完全避让自行车，不能抢行和超越自行车 |
| 轻行街道 | 限速 30 km/h | 步速通行空间 + 慢速通行空间 + 中低速通行空间 | 慢行、轻型交通工具主导；有行人通行的空间，比如路侧行人步道和横向过街通道等 | 小型智能汽车可以驶入，但要完全避让慢行、轻型交通工具 |
| 混合街道 | 限速 30 ~ 60 km/h | 步速通行空间 + 慢速通行空间 + 中低速通行空间 + 中快速通行空间 | 步行、慢行交通工具、轻型交通工具、小型智能汽车、大型智能汽车、其他新型快速车辆 | 各种道路使用对象按照划定使用空间 |
| 汽车专用路 | 限速 60 ~ 100 km/h | 中快速通行空间 | 小型汽车、大型汽车、其他新型快速车辆 | 专门为机动车设置行驶空间，轻型交通工具在专门划定的区域使用这些空间，不提供步行交通和慢行交通工具使用空间 |

及动态、高效的信控系统的叠加，汽车专用路可实现全程连续、快速通行。

3 自动驾驶场景下的城市街道设计策略

与传统汽车相比，自动驾驶汽车的行驶速度更快、操控更加精准可靠、单车对道路资源的占用更少、交通事故率大幅降低，城市道路总体通行效率将得到明显提升。在这种趋势下，传统的基于人工驾驶的城市道路设计也需要同步做出调整，以满足未来自动驾驶场景下的机动交通需求。

3.1 机动车车道和慢行车道

3.1.1 现有规范的机动车道宽度标准与未来的城市街道不适应

根据《自动驾驶封闭测试场地建设技术要求》^[9]，自动驾驶测试场地的测试车道宽度应符合《城市道路工程设计规范(CJJ 37—2012)》(2016年版)^[10]中5.3章节的规定，此规范是现行的城市道路工程设计规范，规定机动车道宽度以设计速度60 km/h分界：设计速度小于或等于60 km/h时，大型车或混行车道宽度为3.50 m，小客车专用道宽度为3.25 m；设计速度大于60 km/h时，大型车或混行车道为3.75 m，小客车专用道宽度为3.50 m。

实际上，对于现阶段人工驾驶的小汽车，3.25 m或3.5 m的车行道宽度仍有较大富余，日本、欧洲等地区的小汽车车道宽度远低于这个标准。近年来，在国内多地的道路改造中已出现小于3.00 m的车道宽度，但由于车道宽度属于规范强制性标准，绝大多数城市道路最小车道宽度仍为3.25 m。在未来的自动驾驶场景下，国内刘凯等^[11]提出，基于自动驾驶的平稳控制性可将小汽车车道宽度从3.0~3.5 m缩窄到2.0~2.5 m，考虑到新型货车或公交车辆运行需求，车道宽度可以控制在3 m以内；美国旧金山大

学的一项研究资料则提出无人驾驶小汽车车道可以缩窄至2.43 m^[12]。显然，现有规范的车道宽度不能适应未来自动驾驶场景下的城市街道需要，有必要对自动驾驶状态下各类车辆所需的最小车道宽度进行重新界定，自动驾驶汽车在测试阶段中也应在更窄的道路上进行测试。

3.1.2 自动驾驶场景下的行车道宽度

考虑一般机动车车身宽度为1.6~2.5 m^[13]，单条机动车车道的宽度在2.1~3.0 m，对于分车型行驶的混合街道，小型智能汽车车道宽度宜为2.5 m，允许大型客货和货车通行的车道宽度宜为2.75 m；汽车专用路由于车速较快，车道宽度适当加宽，小型智能汽车车道宽度宜为2.75 m，大型智能汽车车道宽度宜为3.0 m。

对于未来城市街道的步速、慢速和中低速通行空间，除行人外，主要通行人力自行车、电动自行车、小型环卫车以及未来可能出现的无人配送车、电动滑板车等，这些交通工具移动速度相近，占用的道路空间资源较少，可共享通行空间。综合《电动自行车安全技术规范》和企业生产的车辆尺寸，电动自行车的车身宽度在0.7 m左右，行驶速度不超过25 km/h；根据相关资料，无人物流末端配送车辆车身宽度为0.76~1.06 m，行驶最高车速为25 km/h，未来小型无人环卫车车身宽度为0.9~1.3 m，清扫行驶速度低于10 km/h。考虑一辆电动自行车与一辆无人配送车辆或无人环卫车辆并行的情形，慢速和中低速通行空间单条车道的最小宽度控制在2.5 m较为合适，若慢行交通流量较大，单条车道宽度可放宽至3 m。见表3。

3.2 复合功能设施带

智能网联道路将需要更多的路侧设备和杆件，而自动驾驶场景下道路内的出租车、共享汽车的临停需求会大幅增加，街道需提供更多分散化的上、落客空间，此外按需响应式公交车的路侧站

点也会加密布设。本文据此提出道路复合功能设施带的构想，以满足新场景下的复合功能需求。

复合功能设施带一般在外侧车道沿道路全线两侧对称布置，可与绿化隔离带合并设置，主要在混合街道、轻行街道和慢行街道配置，汽车专用路一般不设置复合功能设施带。按复合功能设施带布置的位置不同，可分为机非复合功能设施带和路侧复合功能设施带(图3)。

混合街道的复合功能设施带紧邻外侧机动车车道布置，可提供多功能空间，包括港湾式临时停车位以及道路沿线公交车、无人出租车、网约车、中型无人配送车的临时停靠点或MaaS服务点，结合一侧的绿化隔离带可为路侧的车路协同设施、充电设施、各类杆件及其他市政基础设施提供空间；轻行街道和慢行街道的复合功能设施带结合靠近人行道的行道树带设置，除路侧小汽车的临时停靠点外，还可设置共享(电)单车存取点、小型无人配送车和快递外卖车的临时停靠点。复合功能设施带应是分区分段交错提供多种功能的服务空间，路侧临停点的每个泊位应有可定位、可识别的唯一编号，并确保高位监控的全覆盖，避免被长时停车占用。

3.3 路缘石转弯半径

在自动驾驶场景下的4类城市街道中，混合街道、轻行街道和慢行街道均应明确步行和慢行交通具有更高的优先级，汽车专用路由于只有机动车通行，无需考虑其他交通方式，可以认为是机动交通优先。因此，在确定交叉口路缘石转弯半径时，基本思路为对于包括混合街道、轻行街道和慢行街道的生活性街道，应进一步减小转弯半径，以降低小汽车转弯车速，并缩短行人过街长度；对于以交通性为主的汽车专用路，则可保持一定的转弯半径，以保障机动车的连续快速通过。见表4。

3.4 行人过街设施

对于混合街道、轻行街道和慢行街道，行人具有最高的通行优先权，因此在道路设计中应凸显“以人为本”的理念，缩短行人过街距离、增加行人过街通道^[14]。安全、方便的行人过街设施是营造活力街道、提升街道两侧用地商业价值的重要保障。慢行街道仅允许行人和慢速交通工具通行，因此无须设置行人过街通道，行人可以在安全的前提下穿行街道；对于轻行街道，行人过街横道间距建议在30~50m，可在斑马线内随时穿行街道，机动车需主动让行；对于混合街道，行人过街设施最大间距建议为200m，可设置行人过街信号灯优先保障行人的过街需求，对于老年人或残障人士可刷卡延长行人过街绿灯时间；对于汽车专用路，则应设置行人立体过街设施，以保障汽车专用路内机动车交通的连续性。

3.5 道路标识系统

与当下人工驾驶员通过视觉获取道路指示信息不同，自动驾驶系统将通过车联网技术从云端和路侧设备无线获取相关信息，或通过车载设备直接感知、识别道路交通标志。因此，自动驾驶场景下的道路交通标识系统的数字化和智能化水平很高。例如：可根据交通流量动态更新限速标识，或者在特定时间段内改变车道使用规则等；数字化的交通标识系统将集成更多道路交通信息，如天气状况、施工信息、远端事故预警等，这些信息可以通过V2I技术（Vehicle to Infrastructure）通知自动驾驶车辆，提高车辆对道路状况的感知能力，从而使自动驾驶车辆做出更安全、更合理的驾驶决策。

新型的道路标识系统应增强与路面的对比度和在恶劣天气中的可视性，确保可以完全应对特殊的气候气象状况，以保证自动驾驶汽车的安全。对于有行人和

表3 未来各类街道单条车道宽度建议取值

| 街道类型划分 | 主导交通方式 / 工具 | 单条车道宽度区间 / m |
|--------|--|--------------|
| 慢行街道 | 步行、自行车 | 2.50 |
| 轻行街道 | 自行车、轻型机动车主导；提供行人通行的空间，比如路侧行人步道和横向过街通道等 | 2.50 ~ 3.00 |
| 混合街道 | 步行、自行车、轻型机动车、机动车 | 2.50 ~ 2.75 |
| 汽车专用路 | 小型汽车 | 2.75 ~ 3.00 |
| | 大型车 | 3.00 ~ 3.50 |

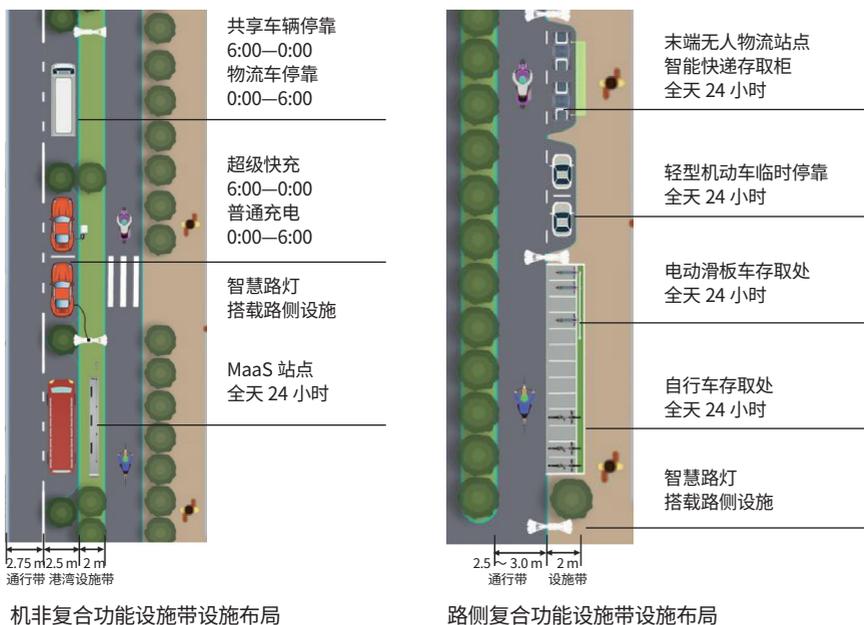


图3 机非复合功能设施带及路侧复合功能设施带布局示意图

表4 未来城市街道路缘石转弯半径推荐值

| 街道功能划分 | 主导交通方式 / 工具 | 路缘石转弯半径 R/m |
|--------|--|------------------|
| 慢行街道 | 步行、自行车 | $R \leq 3$ |
| 轻行街道 | 自行车、轻型机动车主导；提供行人通行的空间，比如路侧行人步道和横向过街通道等 | $3 < R \leq 5$ |
| 混合街道 | 步行、自行车、轻型机动车、机动车 | $5 < R \leq 10$ |
| 汽车专用路 | 小型汽车、大型车 | $10 < R \leq 25$ |

慢行交通通行的城市街道，街道可视范围内的物理标识仍然不可缺少，考虑到从人工驾驶到完全自动驾驶具有相当长的过渡期，在较长时间内同时配置物理和数字两套交通标识系统有其必要性。

3.6 交通组织与管理

自动驾驶汽车基于成熟的车联网(V2X)通信技术，可与远程指挥调度平台、

路侧设备以及其他车辆实现海量的实时信息共享，因此除了上述道路规划设计相关的技术要素，未来城市街道的交通组织和管理方式也将出现诸多变化，一些在今天可以想象但无力实现的创新型交通组织和管理方式将逐渐普及应用，整个城市道路交通网络的效率和安全性将大幅提升。这些交通组织及管理方式可能包括动态自适应交叉口信控系统、道路空间的通

行授权和分时授权、编队行驶。

3.6.1 动态自适应交叉口信控系统

自动驾驶车辆可与交叉口信控系统和路侧基础设施进行通信,提前传输车辆行驶路线,信控系统将实时响应车辆需求,依赖于全息感知、数据孪生和高精地图等新技术,可实现交通信号决策控制的在线并行仿真和即时评估,并通过区域级信号控制的实时自适应优化迭代,自动调整信号灯的时序,减少交叉口延误。在这种情况下,道路交叉口的信控系统将逐步从交通后置响应转变为需求前置引导,有望形成交叉口通行的区域性最优解决方案。

3.6.2 道路空间的通行授权和分时授权

道路的空间授权是指根据实时交通情况和需求,动态划分道路路段空间(或特定车道)并授权给不同类型的车辆使用。交通管理系统可以监测不同时间段的交通需求,并通过“车路云图”的协同,动态分配不同的机动交通工具的独享或共享通行空间,提升道路的组织效率和可行性,如设置HOV车道和预约车辆专用车道、动态设定潮汐车道等。分时授权则是根据不同时间段对车辆通行进行限制,如在早晚高峰时段,限制大货车、施工车辆进入特定区域或道路,并优先赋予通勤车辆通行权限,以有效减少交通拥堵。通过通行授权和分时授权,道路资源的使用将具有更好的时空均衡性,为乘客提供更好的出行体验。

3.6.3 编队行驶

车辆编队行驶是指通过车联网技术(V2V)实现车辆之间的紧密通信和协同控制,使多辆自动驾驶车辆能够在汽车专用路或高速公路以非常短的车距或者直接挂接形成一个编队队列行驶,这种行进方式不仅可大幅减少对道路空间的占用,还因为头车承担了主要风阻,可以明显降低后车的能源消耗,同时使道路通行效率得到大幅提升。协同通行是指

自动驾驶场景下交叉口的交通组织方式,包括连续流和交错通行。

4 结束语

在国内自动驾驶商业化发展加速的背景下,自动驾驶汽车行业的快速发展正在倒逼城市交通系统做出适应性调整。本文分析了自动驾驶对城市交通产生的影响,并重点阐述了未来自动驾驶场景下城市道路可能发生的体系性变化,包括街道空间按照速度区间进行归类、新的城市街道分类、城市街道设计要素调整、新的交通组织与管理模式等。此外,结合智能网联道路建设的需要以及自动驾驶场景下未来城市出行模式的重大变化,本文还提出了在城市街道上全线增设道路复合功能设施带的设想。

需要指出的是,本文是针对未来全部实现自动驾驶后的城市街道出行场景开展的研究。实际上,从全人工驾驶到全自动驾驶会经历较长的过渡期,现有的城市道路系统也不会很短的时间内升级为未来的智慧街道,真实的进程可能是在城市的局部地区通过建设、划定自动驾驶车道逐步发展的,人工驾驶和自动驾驶的混合流也是一个需要深入研究的课题。本文主要是对未来城市道路发展方向的展望,并据此说明这方面研究的必要性和紧迫性。

自动驾驶场景下的城市街道规划和组织相关研究仍在持续推进,后续研究可结合微观仿真软件,依据自动驾驶混合车辆的交通流模型和城市道路相关设计标准,搭建面向自动驾驶场景的道路仿真模型,并对现今主要的城市道路设计指标和参数进行技术验证,为未来的相关技术规范修编以及复合开发地区的试点提供更充分的技术依据及支撑。□

[参考文献]

[1] 刘泉,李昊,陈瑶瑶,等.收缩抑或拓展:

无人驾驶汽车影响下的路权重构与街道演变[J].规划师,2024(5):154-160.

[2] 住房和城乡建设部.城市综合交通体系规划标准[Z].2018.

[3] 常莽.单车智能存在五大问题 自动驾驶需要新的技术路线[J].计算机与网络,2020(23):16-17.

[4] 冉斌,谭华春,张健,等.智能网联交通技术发展现状及趋势[J].汽车安全与节能学报,2018(2):119-130.

[5] Society of Automotive Engineer. Levels of driving automation (SAE-J3016)[S].2018.

[6] 中国公路学会自动驾驶工作委员会.智能网道路路系统分级定义与解读报告[Z].2019.

[7] 中国公路学会自动驾驶工作委员会,中国公路学会自动驾驶标准化工作委员会.车路协同自动驾驶系统分级与智能分配定义与解读报告[Z].2020.

[8] 李文竹,梁佳宁,李伟健,等.技术驱动下的未来城市空间规划响应研究:以黑河市国土空间规划未来城市专题为例[J].规划师,2023(3):27-35.

[9] 全国智能运输系统标准化技术委员会.自动驾驶封闭测试场地建设技术要求[S].2024.

[10] 住房和城乡建设部.城市道路工程设计规范(CJJ 37—2012)(2016年版)[S].2012.

[11] 刘凯,常四铁.面向自动驾驶的城市街道设计研究[C]//品质交通与协同共治:2019年中国城市交通规划年会论文集,2019.

[12] SCHLOSSBERG M, MILLARD BALL A, SHAY E, et al. Rethinking the street in an era of driverless cars[EB/OL].(2018-01-26)[2024-05-15].<https://scholarsbank.uoregon.edu/items/5fb4a0df-2fec-49a9-b7cf-0e91ce6a2eef>.

[13] 住房和城乡建设部.车库建筑设计规范(JGJ 100—2015)[S].2015.

[14] 王维礼,朱杰,郑莘蕙.无人驾驶汽车时代的城市空间特征之初探[J].规划师,2018(12):155-160.

[收稿日期]2024-07-15;

[修回日期]2024-09-15