

无人驾驶技术与街道空间发展交互影响下的智慧街道设计趋势

Smart Street Design Trends Under the Interactive Influence of Autonomous Driving and Street Space Development

杨柳 梁越 张颂安 白杰
YANG Liu, LIANG Yue, ZHANG Songan, BAI Jie

摘要：无人驾驶技术正迅速崛起，成为未来城市和交通发展的重要推动力。它将深刻改变城市和生活，有望助力“双碳”目标的实现。本文首先系统综述了城市规划领域应对无人驾驶技术发展的最新研究进展，丰富了无人驾驶对城市规划的三阶影响模型；在此基础上，聚焦城市街道空间，考察了无人驾驶技术发展对街道空间设计理论的交互演化。其次，通过案例研究方法梳理了街道空间设计与无人驾驶技术发展的互动关系，由此提出不同类型街道面向无人驾驶技术的智慧街道设计策略。最后，为解决无人驾驶技术可能带来的负面影响，本文提出以下应对方式：制定土地政策，鼓励共享无人车，管理停车需求，保障道路安全，关注数据隐私和法律责任。

Abstract: The autonomous driving technology is rapidly advancing, which is becoming a significant driving force for future cities. It will profoundly transform urban environments and daily life, with the potential to contribute to the achievement of the “carbon peaking and carbon neutrality goals”. This study systematically reviews the latest researches on urban planning responses to autonomous driving, enriching the three-tier impact model of autonomous driving. On this basis, we focus on urban street spaces, review the interactive evolution between street design theories and autonomous driving technologies. Through the case study method, the interactive relationship between street space design and the development of autonomous driving technology is explored. Based on this, we provide design recommendations for different types of urban streets in response to autonomous driving, including commercial, residential, and industrial areas, and intercity roads. Finally, to address potential negative impacts of autonomous driving technology, the paper also suggests proactive measures such as formulating land use policies, encouraging shared autonomous vehicles, managing parking demand, improving road safety, and addressing data privacy and legal responsibilities.

关键词：无人驾驶；街道空间；理论研究；案例研究；规划应对

Keywords: Autonomous Driving; Street Space; Theoretical Research; Case Study; Planning Response

中国博士后科学基金资助项目“轨交站域空间人性化设计研究——数据驱动的情绪敏感多智能体仿真模型构建”(2023M740601)；国家自然科学基金项目“中介中心性测度下轨交站域空间三维时空图谱建构研究”(52378009)，“基于场景归纳的智能驾驶决策系统的高泛化性策略研究”(52402504)；江苏省卓越博士后计划“‘双碳’目标下交通基础设施附属空间的设计治理机制及政策仿真研究”(2024ZB363)；国家资助博士后研究人员计划“新一代数智技术赋能轨交站域空间步行行为规律及预测模型研究”(GZC20240254)

作者：杨柳（通信作者），博士，东南大学建筑学院，副研究员；北京交通大学建筑与艺术学院，副教授。yangliu2020@seu.edu.cn

梁越，东南大学建筑学院规划系，本科生。liang_yue@seu.edu.cn

张颂安，博士，上海交通大学漕渊未来技术学院，特聘教轨助理教授。songanz@sjtu.edu.cn

白杰，南京理工大学，博士研究生，正高级工程师。baijie8063@njut.edu.cn

0 引言

随着科技的不断进步和社会的发展，无人驾驶（或称自动驾驶，autonomous driving）技术正成为“双智”政策下的新引擎，无人驾驶汽车（下称“无人车”）也成为实现“双碳”目标的必选题。2022年，全球碳排放主要来自电力、工业和交通三个领域^[1]，我国交通领域的碳排放量占全国终端碳排放量的10%左右^[2]。据测算，无人车的合理使用将有效节能减排，或可减少交通领域34%的碳排放量^[3]。该技术也在城市规划设计中逐渐受到重视。例如：笔者在参与宁德市总体城市设计（2023年）时，在总体交通系统层面规划了包含单轨、无人车、BRT等技术的特色公交环线；在为“宁德时代”公司规划的“时代小镇”中，规划了环湖无人小巴、厂区间接驳的无人单轨电车，并提出无人出租车的试运行区。

世界上第一辆自主导航汽车于1950年由美国贝瑞特公司研制成功^[4]，但在1980年代之前，受限于硬件技术、图形处理和数据融合等关键技术的滞后，地面无人车需依靠遥控驾驶。2010年以来，人工智能和芯片技术的迅速发展与相关法律法规的出台加速了无人驾驶的研发，该技术从军用逐渐转入民用领域并进入了路测时代。2014年美国汽车工程师学会按照自动化水平，将无人驾驶技术分为L0~L5六

个级别,其中L1~L2可为驾驶员提供支持,但对街道设计几乎没有影响。目前已有部分场景的L3无人驾驶(有条件自动化)落地,L4无人车(高度自动化)仍处在研发中。L3以上级别(L3+)的无人车与街道空间和行人的互动较多,这对空间设计提出了新的要求。

街道是城市中重要的交通出行和社交空间^[5]。区别于道路,街道更强调空间的公共属性,不仅涵盖道路空间,还包括与之直接相关的建筑、商铺、服务设施等,构成了城市的基本骨架,在城市规划与管理^[6]中扮演着至关重要的角色。针对街道空间的设计,有学者从理论与历史方面进行研究^[7-12],还有学者针对街道设计的某一维度进行深入分析^[13-14]。虽然已有文献对街道空间设计的研究已十分丰富,但对于引入无人驾驶这一新的交通模式后的智慧街道设计对策仍缺乏系统梳理与前瞻性思考。

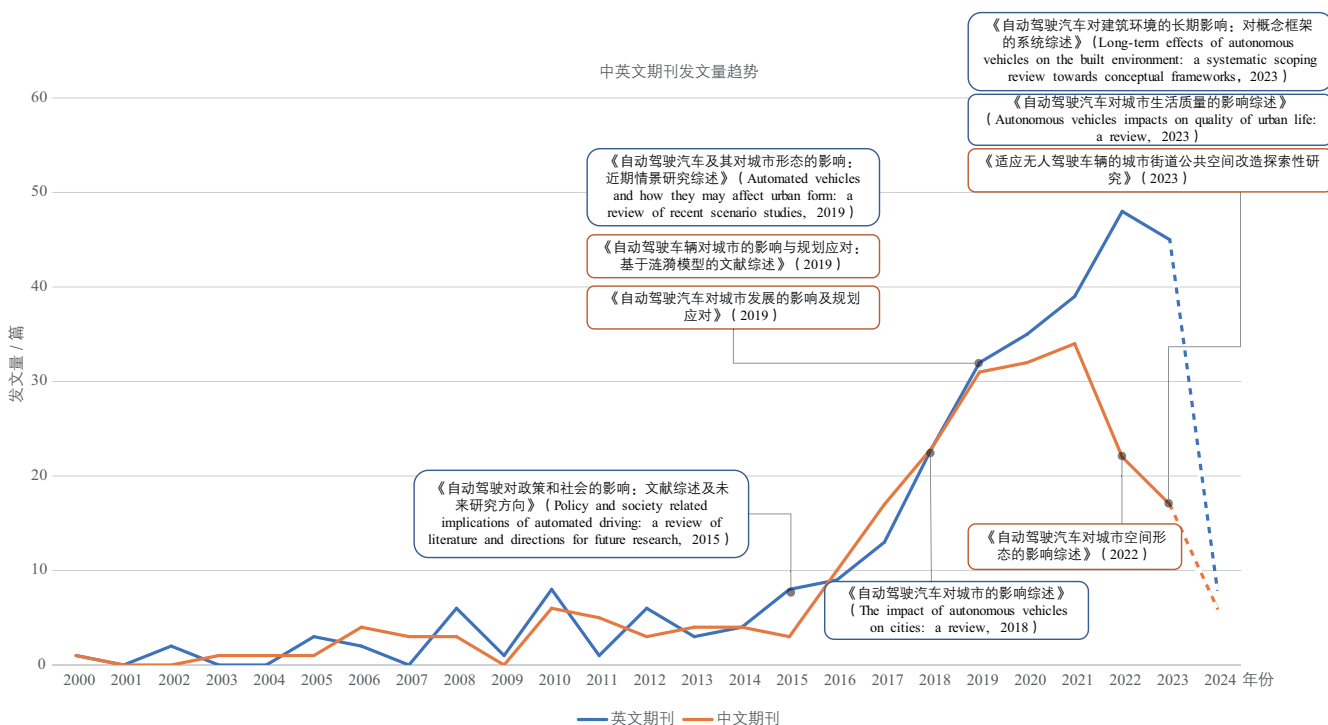
由此,本文主要探讨城市规划和设计(聚焦街道空间)与无人驾驶技术的交互影响,并提出应对未来发展需要的智慧街道设计策略。研究从四个方面展开:(1)研究进展综述;(2)无人驾驶与街道设计思想的交互演化;(3)开发设计策略;(4)展望。笔者希望本研究能为规划师和决

策者提供有益的见解,助力未来城市交通和空间系统的整合规划^[15]。

1 城市规划领域应对无人驾驶技术发展的研究进展综述

为了掌握城市规划应对无人驾驶技术发展的最新研究趋势,笔者使用中国知网(CNKI)和Web of Science数据库进行检索^①。截至2024年5月,在中文数据库中检索到240篇文献,英文数据库中检索到312篇文献,可见该研究领域尚处于起步阶段。从图1可以看出,国内外这一研究在2000年左右开始受到关注,在其后近5年(截至2024年初)发展迅猛。虽然起步较晚,但已有学者进行了较全面的研究综述。其中,米拉基斯等(Milakis et al.)^[16]提出无人车对城市规划影响的“涟漪模型”,将影响划归为三个维度:交通出行,城市空间以及环境、经济、社会,秦波等^[17]和张文烁等^[18]进一步完善了该模型。

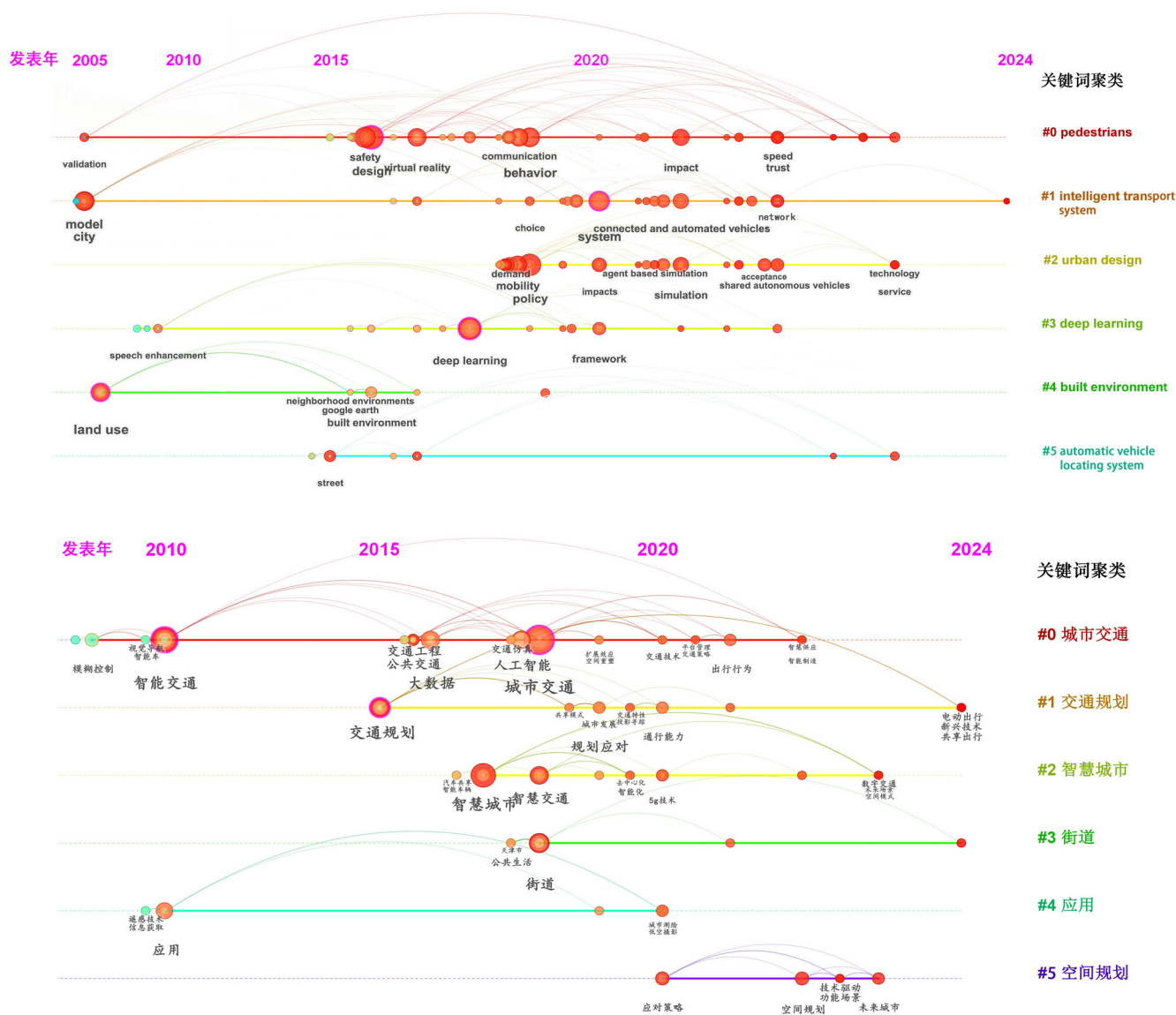
图2是借助CiteSpace软件从中英文文献中提炼的关键词。经聚类,中英文文献的关键词各分为6类。其中,英文文献的关键词包括pedestrians(行人)、intelligent



注:图中文献为重要的综述类文章。

图1 中英文论文发文趋势

① 使用的中文检索词包括(“无人驾驶”或“自动驾驶”或“智能驾驶”)(“空间”或“城市规划”或“城市设计”或“空间设计”或“空间规划”或“街道”或“城市空间形态”),英文检索词为“AV”OR“automat* vehicle*”OR“automat* car*”OR“automat* driving”OR“driveless car*”OR“unmanned car*”OR“unmanned vehicle*”AND“urban planning”OR“urban design”OR“urban space”OR“street”。



注：上图为英文文献关键词，下图为中文文献关键词。

图2 城市规划应对无人驾驶技术的最新研究进展检索

transport system (智能交通系统)、urban design (城市设计)、deep learning (深度学习)、built environment (建成环境)、automatic vehicle locating system (自动车辆定位系统)。中文文献的关键词包括城市交通、交通规划、智慧城市在内的智能交通系统规划，以及街道、空间规划应对策略和应用技术。英文文献采用的方法既有文献分析法，也有基于计算机工具的多情景定量评估。对比英文研究，街道和智慧城市是中文语境中重要的研究方向，由此也引发了针对“智慧街道”的讨论。

综合对比中英文文献的关键词，并参考涟漪模型中提出的三个维度，本文基于复杂适应系统理论对最新研究热点进行了总结（图3）。复杂系统理论认为现代城市具有复

杂性、动态性、异质性和自适应性，城市中的人和基础设施等主体会相互反应并对环境变化作出响应，共同推动城市系统的发展。在分析城市系统时，需要从子系统内部、子系统间互动以及系统与环境的关系等多个层面进行综合考量。

因此，本文从三个层次分析无人驾驶技术与城市规划的互动关系（图4）。首先，分析城市交通子系统，识别出交通安全、交通出行和配套基础设施等关键要素，这是无人驾驶技术的“第一阶影响”，需要城市规划直接回应。其次，探讨交通子系统变化对城市空间子系统的影响——根据城市空间的不同尺度（微观、中观、宏观），形成无人驾驶的“第二阶影响”，需要城市规划间接回应。最后，交通与空间子

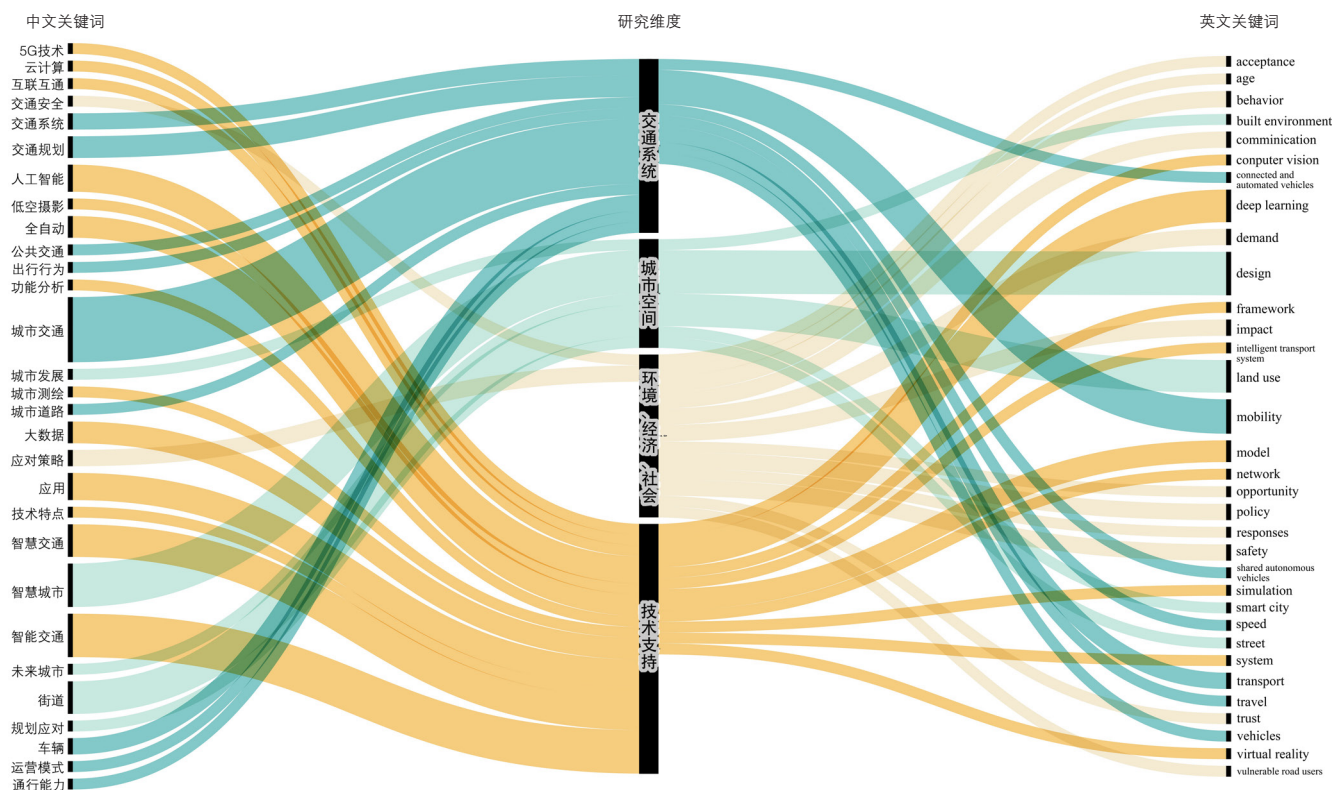


图3 无人驾驶在街道设计中的应用最新研究检索——关键词

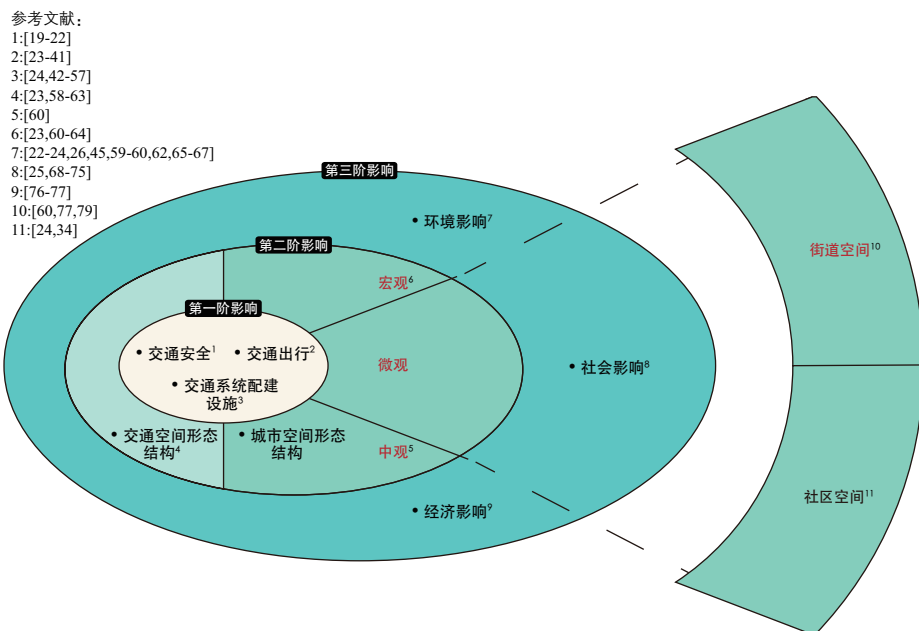


图4 无人驾驶对城市规划的三阶影响模型图示

系统的变革会对更广泛的环境、社会和经济产生“第三阶影响”，这一层级需要城市规划及相关学科共同回应。需要指出的是，在“第二阶影响”中，宏观尺度影响主要体现在城市结构方面，中观尺度影响反映在城市中心区内，微观尺度

影响包括社区空间、街道空间两部分。其中，街道空间是人一车互动最为密切、无人驾驶与公共生活频繁交汇的地点。故此，本文围绕街道空间设计与无人驾驶技术发展的互动关系展开了深入研究。

2 街道空间设计思想演变与无人驾驶技术发展

在本节中，笔者以时间为线索详细梳理了街道空间设计的重要理论和无人驾驶技术发展的重要节点（图 5）。

2.1 交通方式改变与街道空间设计理论的交互影响

在前工业时代（1760 年代—1890 年代），街道被视为连接住宅和活动空间的填充物^[78]，注重人的尺度^[79]。进入工业时代，随着福特 T 型车的问世，大规模交通基础设施的标准化建设兴起，有轨电车逐渐被私家车取代^[80]。同时，以

功能主义为标志的现代城市设计追求最大程度的道路通行能力，街道与公共生活逐渐被分离^[81]。二战后期随着汽车在欧美国家的普及，一派学者认为街道应更加强调通行功能^[82]，另一派学者则呼吁街道回归社交属性，关注人的行为^[83]。同时期还出现了系列设计实践，如荷兰学者提出“生活化街道”（woonerf）概念，哥本哈根市在斯特勒格街道开展了首个步行化改造实践^[84]。

1980 年代随着大众环保意识的增强，步行、有轨电车、电动汽车等绿色出行方式再次获得关注，街道空间的公共属性被唤醒。“新都市主义”理论强调将街道空间与交通行为、

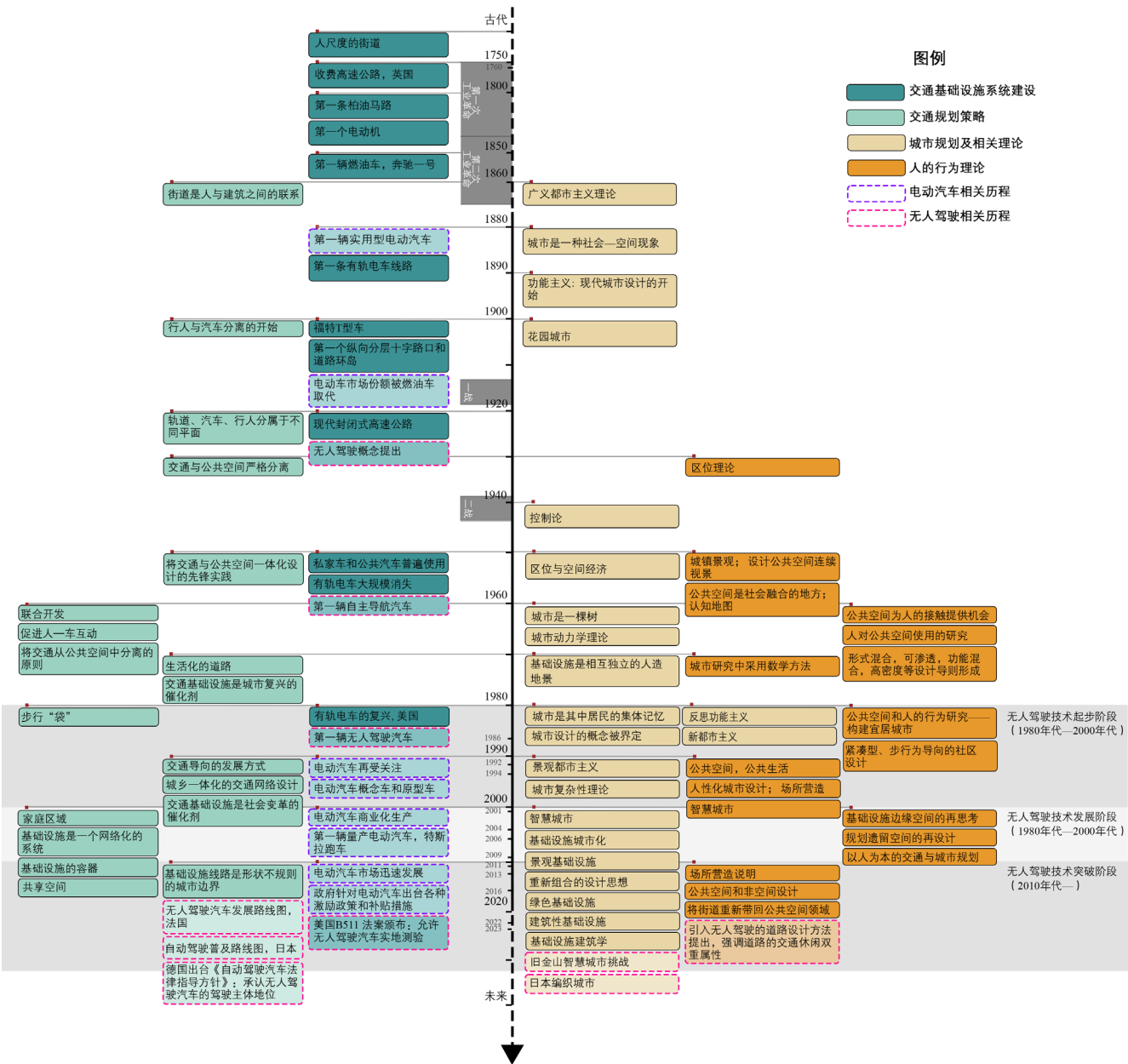


图 5 城市交通基础设施及空间规划设计关键理论

人际交往、生态环境等因素整合起来。在企业界,一些汽车制造商开始推出现代化的电动汽车概念车和原型车,无人驾驶技术逐渐崭露头角并在军事领域得到应用。1986年全球诞生了首辆由计算机驾驶的汽车 NavLab1,但受限于定位导航、障碍识别、计算控制处理器等关键部件的性能,当时的无人车行驶速度较低且环境适应能力较弱,在城市规划领域尚未产生直接影响。进入1990年代,随着人工智能和机器人控制等技术的兴起,半自动型无人车迎来新的发展。在军事需求和技术发展的双重刺激下,美国、德国等国家纷纷展开无人车的研发,如1994年欧洲研制的 VaMP 和 VITA-2 机器人车辆完成了自主跟踪行驶任务。与此同时,中国也开始了无人车的探索和尝试,1992年国防科技大学成功研制出中国第一辆无人车^[85]。

2.2 可持续、智慧街道设计思想的形成和无人驾驶技术发展

20世纪末—21世纪初,可持续发展观和以人为本观念推动了街道空间设计理念的转变^[86],步行、非机动车、公共交通受到欢迎,但小汽车遭到越来越多的诟病。例如:美国政府提出“完整街道”政策以保障街道上所有交通方式出行者的通行权^[87],英国政府提出“家庭区域”(Home Zones),为行人、骑行者、车辆提供可安全共享的社区街道^[88],此外还有“共享空间”(Shared Space)等尝试。技术进步成为这一时期推动可持续发展的重要动因,“智慧城市”的概念应运而生,以期通过整合信息通信技术建立智慧增长的城市模式,满足人与自然的双重需求。

基于此,交通与城市规划领域专家开始思考通过整合新兴交通技术,实现可持续和人性化的城市交通系统,其中无人车受到广泛关注。随着物理计算能力的提升、动态视觉技术和人工智能的迅猛发展,这一时期的无人车解决了路线导航、障碍躲避、突发决策等关键技术问题,使用传感器监测周围道路和车辆,并对车辆的转向、速度进行辅助控制,实现了在特定路段的行驶,即L1、L2的无人驾驶。2000年美国通用公司开发了一套自动碰撞预警系统;同时代,日本丰田公司研发了无人驾驶公共汽车。此外,一系列无人驾驶挑战赛的举办也推动了该技术的发展,如2004年美国军方在莫哈韦沙漠举办的 DARPA 无人驾驶比赛^[89]。相较而言,我国的无人车研究起步较晚:2001年国防科技大学成功研制出时速达76 km的无人车;2006年我国研发的无人车在非封闭道路中完成了自主行驶。

不同于单车智能技术着重汽车单方面对街道空间的适应,欧美一些国家开始研究车路协同技术,以“车—基础设施互联”(V2I: vehicle-to-infrastructure)等方式实现汽车

与街道的相互感知。欧盟在2006年开展了一项名为“车辆—基础设施合作系统”(Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems)的车路协同项目——通过构建车辆与基础设施之间的信息交换平台,提升交通安全性和效率。

2.3 低碳、智慧城市的飞速发展和无人驾驶技术的突破

2010年代以来,低碳城市、智慧城市建设成为热点话题,无人车以其低尾气排放、交通流优化、较高的安全性和便捷性等优势备受关注^[61]。在城市规划和交通管理领域,无人车可以起到减少交通拥堵、提高道路利用效率、激发道路的交通与休闲双重属性、强化人的使用等作用,同时车内的智能导航和通信系统可以实现实时的路况监测和优化调度。

这一时期无人驾驶技术实现了重要突破。随着人工智能和芯片等技术突飞猛进的发展、相关法律的制定,无人车迎来路测时代,L3+无人车的研发陆续展开。研究主体逐渐转向汽车企业或校企合作,美国成为这一技术的孵化中心。2009年谷歌公司将丰田普锐斯改装为首辆无人车,并于同年开启了Waymo无人车计划,预示着无人车大规模研发的开始。2011年美国内华达州通过了允许无人车上路的法律,谷歌成为世界上第一家获得无人车授权的公司,其改装的雷克萨斯成为第二代无人车,增加了环境感知和深度学习技术,推动了车联网的应用。一年后,谷歌获得内华达无人车路测牌照,这是无人驾驶领域的重要里程碑。2013年底密歇根大学批准了一个名为“安全驾驶”的项目,建造用于测试无人车的设施,2020年其主导的无人驾驶虚拟之城(Mcity)项目在安娜堡市开放。在欧洲,德国柏林自由大学推出了名为“德国制造”的无人车;英国政府在2013年开发了名为“豆荚”(The Pods)的无人车,2016年路虎捷豹启动了英国的无人车研发项目。

在中国,无人驾驶研究主体已转向校企合作,并开始进行无人车的道路测试。例如:国防科技大学研制了红旗HQ3无人车^[85];2015年百度正式成立了无人驾驶事业部,成为我国首个大规模研发民用无人车的事业部,并于第二年获得了美国加州政府颁发的全球第15张无人车上路测试牌照^[85];2019年奥迪在中国建立了研发中心;2022年广州生物岛开始运营无人驾驶小巴,成为我国第一个实现无人开放运营的智慧出行服务。

与此同时,伴随4G、5G技术的发展,新一代车路协同技术向着V2X(vehicle-to-everything)发展,将“人、车、路、云”等交通参与要素有机地联系在一起。2023年谷歌母公司Alphabet旗下公司Cavnu与密歇根交通局首创的“互联与无人驾驶车道”项目动工,为V2X提供了试验场。我国出台的“双智”政策推动了车路协同(包括车场协同)技术

的发展——2022 年重庆永川区上线西部地区首个智慧交通系统，上线了无人驾驶中巴车，通过 V2X 技术提前获取路面信息。腾讯的 WeCity 项目将 5G、大数据、物联网等先进技术整合应用在无人驾驶等场景中，并在深圳大铲湾项目进行实践，提出了包括智慧交通系统在内的“互联网 + 未来科技城”理念，为无人驾驶技术的测试与优化提供了理想的实验场。

3 无人驾驶与街道空间交互影响下的开发设计策略

3.1 街道设计对无人驾驶技术开发的影响及案例

无人驾驶技术从功能上可以划分为 4 个模块，即感知、定位、决策规划和测试。其中前 3 个模块需要考虑无人驾驶技术与道路以及各类交通参与者的交互，故现有的道路设计极大影响着这些技术的研发。而街道不同于道路空间，路面通常不是标准化的，面层的颜色和材质差异也较大，而且交通参与者与街道存在灵活的交互行为，这给无人驾驶技术开发带来了挑战，下文将具体分析其影响。

(1) 街道设计对感知技术的影响

感知技术是通过各种传感器对车辆行驶环境进行动态感知，为车辆提供数字化的驾驶环境信息，是实现无人驾驶功能的基础。现有的感知技术大多基于神经网络完成如目标检测、跟踪等任务，需要收集大量真实街道场景的数据进行训练，因此不可避免地被现有街道设计理念所影响。例如：谷歌的 Waymo 数据集、Motional 公司的 nuScenes 数据集都包含了街道场景并标注了行人与非机动车（图 6），所训练的感知神经网络善于识别现有的街道设计相关特征。

(2) 街道设计对定位技术的影响

现有的无人驾驶定位技术大多基于高精地图，即对地图中的道路等信息进行厘米级精确标注，且所有图层信息、特征、属性均可完整地由车辆定位系统所使用。例如：2017

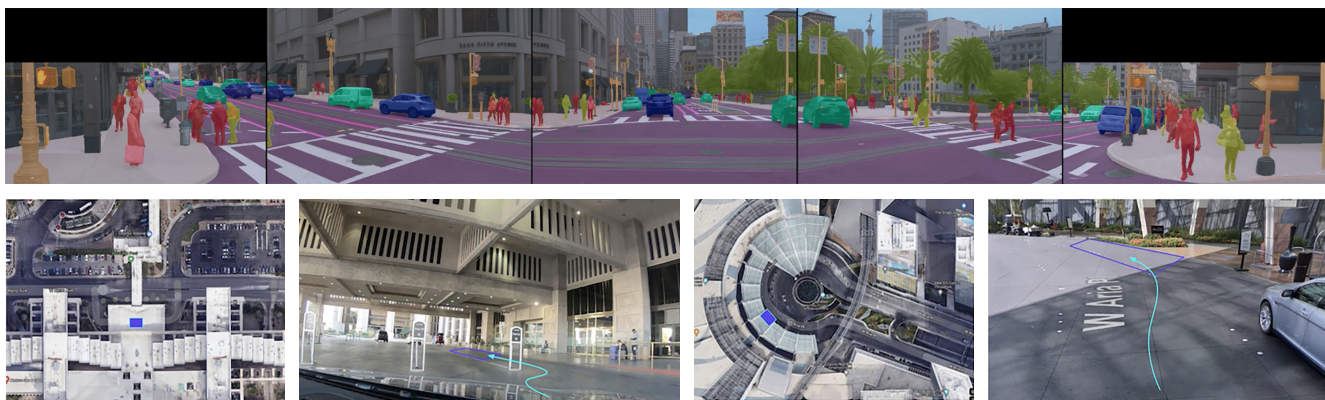
年美国通用公司发布的半自动驾驶系统 Super Cruise，其最大的亮点就是接入了高精地图数据；2018 年搭载了该系统的凯迪拉克 CT6 进入中国，成为首个在中国市场量产落地的高精地图商业应用项目。近些年，各大无人驾驶厂商和地图供应商也开发了自己的高精地图框架，如百度 Apollo 的 OpenDrive（图 7）、SUMO 的 roadnet。

高精地图无疑在很大程度上协助了无人驾驶技术的落地，但也带来一些问题。无人车不仅要考虑机动车道路，还要考虑非机动车道和人行道空间，但不同车道间的物理隔离往往不明显且容易变更，这加大了地图搭建的复杂程度且降低了时效性。2022 年起，“重感知轻地图”的新思潮涌现，众多车企抛弃高精地图，开发无图的高级无人车（如 NOA、NOP）。截至 2023 年已有包括华为、小鹏等 8 家无人驾驶厂商发布了“去高精地图”方案。目前针对城区的无图高级无人驾驶技术尚在研发，如何在无图或低精度地图的情况下利用街道的固有特征对无人车进行准确定位仍有待研究。

(3) 街道设计对决策规划技术的影响

无人驾驶决策规划系统可以依据感知信息进行决策判断，制定相应控制策略，替代人类驾驶员作出驾驶决策。例如：在车距保持、障碍物警告等系统中，需要预测相遇的其他机动车、行人在未来一段时间内的状态并作出决策。在决策规划技术的研发中，驾驶模拟器的使用至关重要。常见的模拟器包括丰田 TRI 开发的 Carla、通用汽车旗下子公司 Cruise 开发的 DeepDrive。这些模拟器针对机动车道和车辆间交互行为的建模已较为成熟（图 8），但由于无人车与行人在街道场景中的交互行为过于复杂，针对非机动车道、机非混行场景的模拟器较少。

此外，自 2024 年以来基于多模态大模型的端对端无人驾驶技术的研究开始博兴。该技术能够通过整合并理解复杂的街道环境数据，提升无人车对周围环境的全面感知和精准



注：上图为 Waymo 数据集中的旧金山街道场景，下图为 nuScenes 数据集中的拉斯维加斯酒店接客、送客路线。

图 6 无人驾驶感知技术训练数据集中的街道空间

资料来源：https://waymo.com/open/data/perception/, https://www.nuscenes.org/nuplan

理解,更好地应对多变的街道空间,也让街道设计有更多的发挥空间^[90]。

(4) 街道设计对实车测试技术的影响

随着智能网联汽车高等级的自动化和网联化系统不断产业化落地,对测试环节的依赖越来越深入,尤其是即将量

产落地的 L3+ 无人驾驶产品,对现有的测试技术、标准和法规都提出了新的挑战。因此,密歇根大学建立了首个全尺寸虚拟之城 (Mcity),主要用于测试互联和无人车,缩短产品开发周期,所构造的街道反映了美国城区街道的主要特征 (图 9)。



图 7 百度 Apollo 的 OpenDrive 所需标注的街道特征等数据

资料来源: https://blog.csdn.net/qq_41542615/article/details/107578217



注: 上图为丰田 TRI 开发的 Carla 模拟器, 下图为 Cruise 开发的 DeepDrive 模拟器。

图 8 无人驾驶决策规划支持技术——模拟器

资料来源: <https://carla.org/>, <https://deepdrive.io/>

3.2 考虑无人驾驶技术的街道设计案例

考虑无人驾驶技术的城市规划实践较为有限，本研究选取已部分实施的项目进行分析与策略总结。所选取的4个案例分别来自美国、日本、加拿大和中国，可以在一定程度上呈现国内外先进的实践经验（表1）。

（1）旧金山智慧城市系列探索

2016年在美国交通部举办的“智慧城市”（Smart City）挑战赛中，旧金山提出智慧交通平台的畅想，以及使用无人车扩展共享服务。在此背景下，2018年ARUP公司对旧金山第四大街进行了无人驾驶背景下的研究与设计，将道路空间更多地让渡给行人和非机动车。2023年Waymo与Cruise的无人驾驶出租车在旧金山全面商业化运营。然而，无人车驾驶行为的不可预测性、半途熄火所导致的交通堵塞以及对紧急情况下的避让等难题仍然困扰着当地居民与政府部门。

（2）静冈编织城市

2020年BIG建筑事务所与日本丰田汽车公司合作，在日本静冈县设计并建设了无人驾驶实验新城——编织城市（Woven City）。在编织城市中，道路被分为主要道路、休闲步道、线性公园三个层级，并被编织成3×3地块的街区单元，



图9 Mcity测试场的街道场景
资料来源：<https://www.ctvnews.ca/autos/>

每个街区只有通过散步道（供行人与非机动车工具使用）或线性公园（仅供行人使用）才能进入，主要道路则供无人车使用。通过单元的重复与组合，街区编织网格实现扩展和收缩，可容纳不同的功能和室外空间。与旧金山智慧城市的手法相似，编织城市也非常关注人行友好、非机动车便利性和生态的融入。据测算，编织城市或将带来2000名新居民，为市区提供8000~10000个工作岗位，这将为处于财政紧张状态的静冈县裾野市提供新的发展机会。

（3）多伦多明日之城

2019年Sidewalk Lab工作室设计了多伦多明日之城（Toronto City of Tomorrow）——引入完全智能、立体的交通系统，并采用自动感应行人的交通信号灯等智能科技，打造了由无人车联系的邻里交通网络，将废弃的海滨地区改造成一个繁忙的迷你都市。但该项目自发布以来就饱受质疑，并最终宣布破产。其中数据的收集、使用与保密是最大的痛点，因为人们很难接受处于密集数据监控下的生活方式。此外，政府与建设方之间的谈判不公开、部分策划与当地法规矛盾等问题也凸显出来。

（4）重庆永川智慧交通系统

2022年重庆市永川区上线的智慧交通系统通过实时获取的车辆通行状态和路段车速，实现了各路口红绿灯的联动调节，减少了汽车在路口停车的次数。与此同时，永川投放了大量“萝卜快跑”自动驾驶汽车（Robotaxi），目前已设有无人化智能站点320个，推荐上下车站点超过400个。市民还可以利用百度地图车位级停车导航功能实时查看永川区路侧停车位的使用情况并直接导航到空闲车位，此外在2021年，自动驾驶公交车（Robobus）收费示范项目正式落地永川区，共投入运营3辆L4自动驾驶公交车，可以通过V2X技术获取当前路面的信息以及司机的视线盲区信息。但是，中国汽车研杨良义工程师表示，在社会公共道路上的L3、L4商用车的应用落地会晚于封闭或特定道路环境，因为封闭条件下商用车的行驶环境相对简单^[91]。

表1 考虑无人驾驶的城市设计策略比较

案例要素	旧金山智慧城市	静冈编织城市	多伦多明日之城	重庆永川智慧交通
阶段	部分实施	实施中	宣告失败	实施中
设计原则	增加无人驾驶专用车道和非机动车专用道，设置宜人步行空间；重新利用街道与社区空间，设置专用的开放空间；街道空间改造并置入绿色空间、活动空间	道路分三级并交织成街区网络：主要道路供无人车使用，提供共享物流运输服务；休闲步道用于自行车、踏板车、步行交通；线性公园为人 与动植物提供交流空间	立体交通——货物与垃圾运输走地下隧道，无人车为地面交通主力，自行车道在冬天可加热；设置大量传感器与监测器对多种交通方式和城市系统进行监测	改造智能路口，升级路测停车泊位；形成动态绿波带，组建区域绿波网；智慧交通平台联动调节交通信号
经验 / 教训	无人车可能会干扰交通，尤其是公共交通，且可能发生紧急情况	无人驾驶新城的建设可以为片区提供新的就业岗位与发展契机	无人驾驶发展过程中信息保密问题需要受到重视	复杂交通条件下商用无人车的落地相较于封闭环境更加困难

资料来源：<http://smartcitysf.com/>，<https://www.woven-city.global/>，<https://www.sidewalklabs.com/toronto>，https://m.thepaper.cn/baijiahao_9232621

3.3 不同类型街道空间设计应对策略

通过总结以上实践案例的设计经验,并结合前文最新研究进展,本节进一步提炼不同类型街道针对无人驾驶技术的应对策略。

首先,在宏观尺度上城市结构会因引入共享式无人驾驶出行而发生相应改变,呈现环绕市中心的多中心紧凑型格局,每个核心周边形成高密度、混合使用的土地利用模式,靠近核心处的交通速度最慢,是以人为导向的城市空间网络^[92]。其次在道路网络方面,路网体系也将更加扁平化,由于干线道路—支线道路—集散道路的道路三级划分转向车行道—人车混行道的二级体系,并引入大中运量的无人驾驶公交车进行补充^[63]。城市中还应设置无人驾驶专用区,专用区之间由混合交通道路相连接^[93]。同时,城市间长距离交通出行体验的提升会增强城市环境的吸引力^[52]。另外,在高铁站区域引入无人车可以优化现有交通换乘格局,实现不同交通方式间的高效转换,提高高铁站周边空间效率^[94]。

具体而言,商业办公区、住宅区和厂区街道应对无人驾驶技术的策略如下。

(1) 商业办公区街道(高密度公共活动区)

城市中心区道路可充分利用无人车提升环境的吸引力,释放土地资源,创造多样的土地用途^[61]。首先,采用无人车可释放大量停车空间,使之经重新规划纳入公共空间,实现停车场与其他土地用途解绑,并创造更多的就业机会。例如:采用自动代客泊车(AVP)技术可实现人车分流,即乘客下车后由停车场的控制系统接管、自动完成泊车——可将车辆统一停放到集中的停车场,释放城市中心的停车需求,而自动停车对比人类司机停车,所占用的停车位面积与层高也 smaller。其次,无人车专用道的规划将使车道变窄,减少机动交通所占空间^[95]。再次,部分配套设施(如信号灯)将不再需要,移除后将使得道路基础设施更加灵活、高效^[61]。

(2) 居住区街道(中高密度区)

居住区可以分阶段引入无人车,实现不同社区治理方式的过渡。在初期可以先行规划无人巴士,并引入无人驾驶专用道和弹性车道以构建基础设施骨架;在中期需对城市进一步细化分区,打造适应无人车的区域布局,并创建生活型无人驾驶街道,配备相应的景观和设施;在后期需着眼于细部的更新,尤其是生活型道路的细部设计,以满足居民的需求^[77]。此外,随着住宅区道路上大面积路侧停车空间的腾退,可拓宽人行道来改善行人出行,并创建更多专用于非机动车的车道,用于短途旅行或长距离出行的“最后一公里”。释放出来的城市空间还可用于邻里服务设施、绿地、街头商业^[52,95],使得居住区内交通转向低速化、人性化。

(3) 厂区街道(中低密度工业区)

在基本上无人居住的工业区,门到门服务或固定站点的无人巴士有望对城市空间产生积极影响。无人巴士可以成为组织厂区内外部交通的一种替代形式,还可满足车站、停车场与乘车设施之间的交通需求,并将很大一部分通勤转向公共交通^[42]。目前无人车应用于港口和厂区等封闭环境的研究已较为成熟,大量厂区内已采用无人物流货运交通系统。由于无需考虑与人交互的复杂性,该系统的设计与运转相对独立,更注重内部路径优化与物流效率^[96]。不过,在厂区间开放区域如何采用无人驾驶技术仍有待探索^[95]。

4 展望

4.1 应对无人驾驶技术发展的智慧街道设计策略

(1) 路面及周边空间

首先,为降低无人车在识别行人、非机动车等环境要素时的难度,可增加无人车专用道和非机动车专用道^[95]。为适应无人车的决策规划,最好将无人车道设置在最左侧,将右侧车道设置为有人驾驶,使得人车交互更加可预测。其次,在高铁站周边等枢纽区域应通过无人车与非机动车、公共交通的高效接驳解决“最后一公里”问题^[94]。再次,若不考虑新型视觉定位技术,则需在街道空间设计中尽量采用模块化设计元素,将部分街道特征进行解析和规范化,以便于无人车的识别和定位。此外,无人车可通过磁场变化进行自车定位,并可去掉路面标识,进而对其进行装饰性改造。

(2) 路网体系

路网体系可以更加扁平化,原本的三级道路可改为新的三级:主要道路、休闲步道、线性公园,或者包括机动车道、机非混行道的二级路网^[63]。城市中可分阶段建设无人驾驶专用区,进行差异化的设计,而专用区之间由混合交通道路相连接^[77,95]。此外,交通网络的立体性应进一步提升,无人车可作为地面交通主力,货物与垃圾运输无人车可通过地下隧道通行。

(3) 公共空间

由无人车引入所释放的城市空间在不同功能区可有多样化的用途。在商业区,停车和道路空间的减少将带来土地的增值,可创造更多样的土地用途^[61]。在居住区,可利用这些空间设置专用的开放空间,用于公共服务和居民活动^[52,95]。此外,在街道空间中置入绿色空间和活动空间将有助于城市公共空间系统的构建。

(4) 智能交通

为配合无人车的使用,城市数字基础设施的建设尤为重要^[91]。首先,需要在路边加设传感器和监测器,对城市系统进行监测并升级路测停车泊位。其次,应改造智能路口,形

成动态绿波带,以交通信号灯追踪行人、自行车和机动车。再次,为应对无人车研发中的感知和测试,《街道设计导则》中应考虑应用无人驾驶技术的策略建议,以此规范街道空间的规划设计和实施管理。

4.2 无人驾驶技术的负面影响及解决策略

需要指出的是,无人驾驶技术在对街道空间产生积极作用的同时,也可能造成一定的负面影响,可考虑从以下四方面采取措施^[23,94,97-98]。

(1) 交通基础设施与城市空间关系

当无人驾驶以私家车为主时,出行成本的下降与交通可达性的提升可能会带来城市蔓延和郊区化现象^[94],进而加剧土地的低效利用和社区隔离,并增加额外的停车空间与设施空间^[23]。为此,可制定土地使用和道路收费政策,结合电气化、自动化、共享出行等手段控制城市扩张并优化空间利用;通过政策调控将停车场与综合换乘枢纽融合,优化停车资源利用。

(2) 出行方式

便捷的门对门服务可能导致人们对汽车的过度依赖,从而减少慢行出行;私家车的普及还可能导致公共交通出行量的减少^[97]。可通过设定市中心无人车通行区、鼓励慢行、打造高品质的综合交通枢纽,促进多元化的交通方式选择。此外,可限制私人无人车的使用,推广共享无人车。

(3) 道路安全

现有无人驾驶可能会引发道路交通安全隐患,尤其是当无人车面对弱势群体、紧急事件时的反应有待完善^[98]。可通过增加无人车向外界表达自身驾驶意图的方式,如设计灯光、语音播报的形式,提升与其他道路使用者的协作,以提高安全性。

(4) 数据的收集与使用

居民的个人隐私、由企业垄断带来的危害公众利益的行为需要被重视,发生交通事故时还会涉及关于责任归属的道德和法律问题。为此,可参考欧盟、美国加利福尼亚州等地出台的相关政策法律,并开发无人驾驶的自动定责系统以区分交通事故的责任方。

总之,无人驾驶无法一蹴而就地解决城市的拥堵、交通事故和环境污染等问题,规划师在进行智慧街道设计时应充分利用共享型无人车,基于所选用汽车的自动化级别,针对不同路段制定相应的规划措施,从而实现可持续、安全且高效的智慧交通规划。**UPI**

注:文中未注明资料来源的图片均为作者绘制。

感谢王建国院士在宁德总体城市设计——交通专题设计中给予的宝贵指导,以及匿名审稿人对本文提出的建设性意见。

参考文献

- [1] IEA: International Energy Agency. CO₂ Emissions in 2022[R]. Paris, 2023.
- [2] 交通运输部规划研究院,德国国际合作机构.中国交通运输行业气候目标及行动建议[R].北京,2022.
- [3] ERCAN T, ONAT N C, KEYA N, et al. Autonomous electric vehicles can reduce carbon emissions and air pollution in cities[J]. Transportation research part d: transport and environment, 2022, 112: 1-19.
- [4] 徐小东,徐宁,王伟.无人驾驶背景下的城市空间转型及城市设计应对策略研究[J].城市发展研究,2020,27(1):44-50.
- [5] JACOBS A B. Great streets[M]. Cambridge: MIT Press, 1993: 2-5.
- [6] 匡晓明,徐伟.基于规划管理的城市街道界面控制方法探索[J].规划师,2012,28(6):70-75.
- [7] 徐磊青,胡滢之.疗愈街道一种健康街道的新模型[J].时代建筑,2020(5):33-41.
- [8] 刘泉,陈瑶瑶,黄丁芳,等.智慧街道三元融合场景的模块化设计方法——以华强北未来街道概念设计为例[J].城市规划学刊,2023(2):110-118.
- [9] 龙熾,唐婧娟.城市街道空间品质大规模量化测度研究进展[J].城市规划,2019,43(6):107-114.
- [10] 高巍,贾梦涵,赵玫,等.街道空间研究进展与量化测度方法综述[J].城市规划,2022,46(3):106-114.
- [11] 何兆阳.对于我国城市道路多维分类体系的再思考——基于街道营造与交通方式转型背景的探讨[J].城市规划,2018,42(3):118-127.
- [12] YANG L, MAJUMDAR A, DAM K H V, et al. Theories and practices for reconciling transport, public space, and people a review[J]. Municipal engineer, 2022, 175(4): 187-203.
- [13] 陈志敏,黄榕,黄莹,等.街道空间宜步行性的精细化测度与导控——基于虚拟现实与可穿戴生理传感器的循证分析[J].中国园林,2022,38(1):70-75.
- [14] 杨俊宴,吴浩,郑屹.基于多源大数据的城市街道可步行性空间特征及优化策略研究——以南京市中心城区为例[J].国际城市规划,2019,34(5):16-26.
- [15] 杨柳.复杂适应系统视角下城市交通基础设施与公共空间整合设计的方法及模拟工具[J].城市规划学刊,2023(4):66-73.
- [16] MILAKIS D, VAN AREM B, VAN WEE B. Policy and society related implications of automated driving: a review of literature and directions for future research[J]. Journal of intelligent transportation systems technology planning & operations, 2015, 21(1-6): 324-348.
- [17] 秦波,陈筱璇,屈仲.自动驾驶车辆对城市的影响与规划应对:基于涟漪模型的文献综述[J].国际城市规划,2019,34(6):108-114.
- [18] 张文烁,陈宇琳,姜洋.自动驾驶汽车对城市空间形态的影响综述[J].城市交通,2022(5):1-10.
- [19] HOEDEMAEKER M, BROOKHUIS K A. Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC)[J]. Transportation research part f: traffic psychology & behaviour, 1998, 1(2): 95-106.
- [20] RUDIN-BROWN C M, PARKER H A. Behavioural adaptation to Adaptive Cruise Control (ACC): implications for preventive strategies[J]. Transportation research part f: traffic psychology & behaviour, 2004, 7(2): 59-76.
- [21] XIONG H, BOYLE L N, MOECKLI J, et al. Use patterns among early adopters of adaptive cruise control[J]. Human factors: the journal of the human factors and ergonomics society, 2012, 54(5): 722-733.
- [22] 毛玮,徐猛.基于MARS模型的出行仿真分析:以北京的自动驾驶发展为例[C]//2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(运输规划与交叉学科篇).北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室,2022:214-220.
- [23] RAHMAN MD M, THILL J C. Impacts of connected and autonomous vehicles on urban transportation and environment: a comprehensive review[J]. Sustainable cities and society, 2023, 96: 104649.
- [24] FAGNANT D J, KOCKELMAN K M. Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas[J]. Transportation, 2016, 45(1): 1-16.

- [25] HOGGENMUELLER M, TOMITSCH M, WORRALL S. Designing interactions with shared AVs in complex urban mobility scenarios[J]. *Frontiers in computer science*, 2022, 4: 866258.
- [26] KHONDAKER B, KATTAN L. Variable speed limit: a microscopic analysis in a connected vehicle environment[J]. *Transportation research part c: emerging technologies*, 2015, 58: 145-159.
- [27] LIU P, XU S X, ONG G P, et al. Effect of autonomous vehicles on travel and urban characteristics[J]. *Transportation research part b: methodological*, 2021, 153: 128-148.
- [28] ARNAOUT G, BOWLING S. Towards reducing traffic congestion using cooperative adaptive cruise control on a freeway with a ramp[J]. *Journal of industrial engineering and management*, 2011, 4(4): 97-100.
- [29] NGODUY D. Application of gas-kinetic theory to modelling mixed traffic of manual and ACC vehicles[J]. *Transportmetrica*, 2012, 8(1): 43-60.
- [30] CHILDRESS S, NICHOLS B G, CHARLTON B, et al. Using an activity-based model to explore possible impacts of automated vehicles[C]. *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, 2015.
- [31] WADUD Z, MACKENZIE D, LEIBY P, et al. Help or hindrance? the travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles[J]. *Transportation research part a: policy and practice*, 2016, 86A(Apr.): 1-18.
- [32] MILAKIS D, SNELDER M, AREM B V, et al. Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050[J]. *Editorial Board EJTR*, 2017(1): 63-85.
- [33] DANG R, WANG J, LI S E, et al. Coordinated adaptive cruise control system with lane-change assistance[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2015, 16(5): 2373-2383.
- [34] LI S, LI K, RAJAMANI R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control[J]. *IEEE transactions on control systems technology*, 2011, 19(3): 556-566.
- [35] LUO Y, CHEN T, ZHANG S, et al. Intelligent hybrid electric vehicle ACC with coordinated control of tracking ability, fuel economy, and ride comfort[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2015, 16(4): 2303-2308.
- [36] MOON S, MOON I, YI K. Design, tuning, and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance[J]. *Control engineering practice*, 2009, 17(4): 442-445.
- [37] BELLEM H, SCHÖNENBERG T, KREMS J F, et al. Objective metrics of comfort: developing a driving style for highly automated vehicles[J]. *Transportation research part f: traffic psychology and behaviour*, 2016, 41: 45-54.
- [38] ELBANHAWI M, SIMIC M, JAZAR R. In the passenger seat: investigating ride comfort measures in autonomous cars[J]. *IEEE intelligent transportation systems magazine*, 2015, 7(3): 4-17.
- [39] LEFEVRE S, CARVALHO A, BORRELLI F. A learning-based framework for velocity control in autonomous driving[J]. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 2016, 13(1): 32-42.
- [40] LEWIS-EVANS B, DE WAARD D, BROOKHUIS K A. That's close enough-a threshold effect of time headway on the experience of risk, task difficulty, effort, and comfort[J]. *Accident analysis and prevention*, 2010, 42(6): 1926-1933.
- [41] SIEBERT F W, OEHL M, PFISTER H R. The influence of time headway on subjective driver states in adaptive cruise control[J]. *Transportation research part f: traffic psychology and behaviour*, 2014, 25: 65-73.
- [42] BRUCK E, SOTEROPOULOS A. Traffic-land use compatibility and street design impacts of automated driving in Vienna, Austria[J]. *Journal of transport and land use*, 2022, 15(1): 137-163.
- [43] CLEMENT S J, TAYLOR M A P, YUE W L. Simple platoon advancement: a model of automated vehicle movement at signalised intersections[J]. *Transportation research part c: emerging technologies*, 2004, 12(3/4): 293-320.
- [44] KAMAL M A S, IMURA J I, HAYAKAWA T, et al. A vehicle-intersection coordination scheme for smooth flows of traffic without using traffic lights[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2015, 16(3): 1136-1147.
- [45] SILVA D, DAVID F, CSABA C. Autonomous vehicle use and urban space transformation: a scenario building and analysing method[J]. *Sustainability*, 2021, 13(6): 3008.
- [46] International Transport Forum. Urban mobility: system upgrade[C]. Paris: OECD/International Transport Forum, 2015.
- [47] CHEN F, BALIEU R, KRINGOS N. Potential influences on long-term service performance of road infrastructure by automated vehicles[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2550: 72-79.
- [48] BOESCH P M, CIARI F, AXHAUSEN K W. Autonomous vehicle fleet sizes required to serve different levels of demand[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2542(1): 111-119.
- [49] FAGNANT D J, KOCKELMAN K M. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios[J]. *Transportation research part c: emerging technologies*, 2014, 40(mar.): 1-13.
- [50] ZHANG W, GUHATHAKURTA S, FANG J, et al. Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: an agent-based simulation approach[J]. *Sustainable cities & society*, 2015, 19: 34-45.
- [51] SPIESER K, TRELEAVEN K B, ZHANG R, et al. Toward a systematic approach to the design and evaluation of automated mobility-on-demand systems: a case study in Singapore[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2014: 229-245.
- [52] FAYYAZ M, ESTHER G, SOLEDAD N. Autonomous mobility: a potential opportunity to reclaim public spaces for people[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1-16.
- [53] DIA H, JAVANSHOUR F. Autonomous shared mobility-on-demand: Melbourne pilot simulation study[J]. *Transportation research procedia*, 2017, 22: 285-296.
- [54] KONG Y, LE VINE S, LIU X. Capacity impacts and optimal geometry of automated cars' surface parking facilities[J]. *Journal of advanced transportation*, 2018, 9: 1-14.
- [55] OSTERMEIJER F, KOSTER H, VAN OMMEREN J N. Residential parking costs and car ownership: implications for parking policy and automated vehicles[J]. *Regional science and urban economics*, 2024, 77: 276-288.
- [56] LIU H Z, YANG M, GUAN C H, et al. Urban infrastructure design principles for connected and autonomous vehicles: a case study of Oxford, UK[J]. *Computational urban science*, 2023, 3(1): 1-21.
- [57] HEINRICHS D. 2016. Autonomous driving and urban land use[M] // MAURER M, GERDES J, LENZ B, et al, eds. *Autonomous driving*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016: 213-231.
- [58] LI S E, PENG H, LI K, et al. Minimum fuel control strategy in automated car-following scenarios[J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2012, 61(3): 998-1007.
- [59] GONZALEZ-GONZALEZ E, NOGUES S, STEAD D. Automated vehicles and the city of tomorrow: a backcasting approach[J]. *Cities*, 2019, 94(Nov.): 153-160.
- [60] PAPA E, FERREIRA A. 2018. Sustainable accessibility and the implementation of automated vehicles: identifying critical decisions[J]. *Urban science*, 2(1): 1-14.
- [61] STEAD D, VADDADI B. Automated vehicles and how they may affect urban form: a review of recent scenario studies[J]. *Cities*, 2019, 92: 125-133.
- [62] KELLERMAN A. Homo viator 2020s: electrified and internet-based personal mobilities[J]. *GeoJournal*, 2022, 88(3): 2553-2562.
- [63] 徐晓峰, 马丁. 无人驾驶技术对城市空间的影响初探——基于中国(上海)自由贸易试验区临港新片区探索性方案[J]. *上海城市规划*, 2021(3): 142-148.
- [64] WANG Z, CHEN X M, OUYANG Y, et al. Emission mitigation via longitudinal control of intelligent vehicles in a congested platoon[J]. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 2015, 30(6): 490-506.
- [65] GREENBLATT J B, SAXENA S. Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas emissions of US light-duty vehicles[J]. *Nature climate change*,

- 2015, 5(9): 860-863.
- [66] RAFAEL S, FERNANDES P, LOPES D, et al. How can the built environment affect the impact of autonomous vehicles' operational behaviour on air quality? [J]. *Journal of environmental management*, 2022, 315: 115154.
- [67] STARICCO L, RAPPAZZO V, SCUDELLARI J, et al. Toward policies to manage the impacts of autonomous vehicles on the city: a visioning exercise [J]. *Sustainability*, 2019, 11(19): 1-21.
- [68] EBY D W, MOLNAR L J, ZHANG L, et al. Use, perceptions, and benefits of automotive technologies among aging drivers [J]. *Injury epidemiology*, 2016, 3(1): 1-20.
- [69] HARPER C D, HENDRICKSON C T, MANGONES S, et al. Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions [J]. *Transportation research part c: emerging technologies*, 2016, 72: 1-9.
- [70] FREY C B, OSBORNE M A. The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation? [J]. *Technological forecasting and social change*, 2017, 114: 254-280.
- [71] PETTIGREW S, BOOTH L, FARRAR V, et al. Walking in the era of autonomous vehicles [J]. *Sustainability*, 2022, 14(17): 10509.
- [72] HENNESSY D A, WIESENTHAL D L. The relationship between traffic congestion, driver stress and direct versus indirect coping behaviours [J]. *Ergonomics*, 1997, 40(3): 348-361.
- [73] LEVY J I, BUONOCORE J J, VON STACKELBERG K. Evaluation of the public health impacts of traffic congestion: a health risk assessment [J]. *Environmental health*, 2010, 9(1): 1-12.
- [74] MIEDEMA H. Adverse effects of traffic noise [M] // GÄRLING T, STEG L. Threats from car traffic to the quality of urban life. Leeds: Emerald Group Publishing Limited, 2007: 53-77.
- [75] FAGNANT D J, KOCKELMAN K. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations [J]. *Transportation research part a: policy & practice*, 2015, 77: 167-181.
- [76] CLEMENTS L M, KOCKELMAN K M. Economic effects of automated vehicles [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 2606: 106-114.
- [77] 张帆, 钟毅. 无人驾驶视角下城市社区更新初探——以成都为例 [J]. *城市建筑*, 2021, 18(35): 52-54, 68.
- [78] KRIER R. *Urban space* [M]. London, UK: Academic Editions, 1979.
- [79] SORIA Y, PUIG A, CERDA I. Cerdà: the five bases of the general theory of urbanization [M]. Barcelona: Electa Espan, 1999.
- [80] RODRIGUE J P. *The geography of transport systems* [M]. 5th ed. New York, USA: Routledge, 2020: 456.
- [81] CIAM: Congress Internationaux d'Architecture Moderne. *The Athens Charter (LaCharte d'Athènes)* [R]. Paris: Le Corbusier, 1943.
- [82] BUCHANAN C. *Traffic in towns* [M]. 1st ed. London: H.M. Stationery Office, 1963.
- [83] HARRIS B. *Urban transportation planning: philosophy of approach* [C]. New York: 1966 National Transportation Symposium, 1966: 97-103.
- [84] 杨盖尔, 吉姆松. 公共空间公共生活 [M]. 汤羽扬, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [85] 穆康乐. 无人驾驶汽车发展现状及未来展望 [J]. *电子技术与软件工程*, 2017(21): 112-114.
- [86] KENT F. Streets are people places [N/OL]. (2005)[2018-05-08] <https://www.pps.org/blog/transportationasplace/>.
- [87] RITTER J. "Complete Streets" program gives more room for pedestrians, cyclists [N/OL]. (2007)[2014-02-26]. http://usatoday30.usatoday.com/news/nation/2007-07-29-complete-streets_N.htm.
- [88] HIE: Institute of Highway Incorporated Engineers. *Home zone design guidelines* [M]. 1st ed. Essex: HQ Design & Print, 2002.
- [89] BUEHLER M, IAGNEMMA K, SINGH S. *The DARPA urban challenge: autonomous vehicles in city traffic* [M]. Berlin: Springer, 2009.
- [90] YANG Z, JIA X, LI H, et al. LLM4Drive: a survey of large language models for autonomous driving [J]. *arXiv*, 2023.
- [91] 杨永芹, 李冬琴. 一辆自动驾驶汽车的“赶考”日记 [N]. *重庆日报*, 2022-08-21(002).
- [92] 叶阳, 袁鸿菲. 无人驾驶时代的城市绿色空间营造策略研究 [C] // 中国风景园林学会. *中国风景园林学会 2021 年会议论文集*. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 603-609.
- [93] LEE S, JANG K M, KANG N, et al. Redesigning urban elements and structures considering autonomous vehicles: preparing design strategies for wide implementation in cities [J]. *Cities*, 2022: 123: 103595.
- [94] 王廉文. 无人驾驶背景下未来高铁站点布局规划策略 [C] // 中国城市规划学会. *人民城市, 规划赋能——2022 中国城市规划年会论文集 (05 城市规划新技术应用)*. 苏州: 苏州科技大学, 2023: 1279-1287.
- [95] POURMOHAMMAD-ZIA N, SCHULTE F, NEGENBORN R R. Platform-based platooning to connect two autonomous vehicle areas [C]. *Virtual: 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2020.
- [96] KIM E, YOUNGRIM K, JIEUN P. The necessity of introducing autonomous trucks in logistics 4.0 [J]. *Sustainability*, 2022, 14(7): 1-10.
- [97] LEVIN M W, BOYLES S D. Effects of autonomous vehicle ownership on trip, mode and route choice [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2015, 2493: 29-38.
- [98] BROOKHUIS K, DE WAARD D, JANSSEN W. Behavioural impacts of advanced driver assistance systems-an overview [J]. *European journal of transport and infrastructure research*, 2001, 1(3): 245-253.

(本文编辑: 王枫)



本文更多增强内容扫码进入