第53卷 第11期
2025年11月

华南理工大学学报（自然科学版）
Journal of South China University of Technology
（Natural Science Edition）

Vol. 53 No. 11
November 2025

doi：10. 12141/j. issn. 1000-565X. 240367

# 城市无人配送车的运行管理、仿真与评价研究综述

李海舰[1] 李宇轩[1] 王威杰[1] 童盛军[2] 高景伯[2] 李同飞[1] 陈娜[1†]

（1. 北京工业大学 城市交通学院，北京 100124；2. 北京车网科技发展有限公司，北京 100176）

**摘 要：**运行仿真和评价是无人配送车相关理论研究的基础，有利于推动无人配送车的高质量落地运营。该文首先梳理了无人配送车相关技术的发展现状和国内外的无人配送车安全运行管理规范，然后分析了无人配送车的行驶特性（包括车身安全特性、速度与能耗特性、跟驰和换道特性）和配送服务运行特性，指出需找到车辆设计、环境、配送任务之间合适的平衡点，并对无人配送车技术测试仿真、运营影响测试仿真和网络仿真方法的现状与不足进行了综述。在此基础上，借鉴国内外的无人配送车运行评价方法，结合无人配送车的运行特性，构建了针对非机动车道无人配送车运行评价的指标体系，指出了无人配送车的运行评价指标和未来研究方向，得到以下结论：现有无人配送车运行仿真技术缺乏统一的、权威性的管理规范；针对无人配送车运营影响的测试仿真研究较少；目前对无人配送车运行特性的研究不够深入，缺乏对实际场景的规划；借鉴道路服务水平评价指标，采用平均速度变化率和平均密度变化率作为无人配送车投放影响评价指标较为合适。

**关键词：**城市交通；无人配送车；投放策略；运行仿真；运行评价

**中图分类号：**U492.3；U491.2　　**文章编号：**1000-565X（2025）11-0090-11

据中国国家邮政局2023年1月公布的数据，新时代十年间，我国年快递业务量迅猛增长，其中2022年快递业务量完成1 105. 8亿件，同比增长2. 1%。末端物流配送是物流运输过程的重要组成部分。但是，伴随物流行业业务量的高速增长和配送服务标准的提升，在快递物品交付的最后一公里，末端物流配送存在的配送量大、时间紧、效率低、成本高、劳动力不足、监管难、可持续性差等问题也日益凸显[1-4]。随着无人驾驶技术的不断发展，无人配送车以机器替代人工或通过人机协作进行物品配送，能有效解决以上问题[5]。

自动驾驶技术经过多年的发展，已经在环境监测、行人监测、路径规划、运动控制和车辆网络安全方面取得了巨大进步[6]。国际汽车工程协会将自动驾驶技术划分为6个自动化级别[7]，大多数车辆处于L1级或L2级。L3级自动驾驶车辆目前已经开始大量进行实际道路测试，例如，北京市高级别自动驾驶示范区（亦庄）内自动驾驶车辆已经测试超过12 175 852 km，涵盖85%的交通场景；L4级和L5级自动驾驶车辆仍处于小规模测试研发阶段[8]。自动驾驶技术的快速发展、疫情影响和市场需求[9-10]直接推动了无人配送车的发展，凭借无接触配送、交付速度快、长期投入成本低、配送量大、

**收稿日期：**2024-07-15

**基金项目：**北京市社会科学基金规划项目（22GLC060）

**Foundation item：**Supported by Beijing Social Science Fund Planning Project（22GLC060）

**作者简介：**李海舰（1986—），男，博士，副教授，主要从事智能交通系统研究。E-mail：lihaijian@bjut. edu. cn

† **通信作者：**陈娜（1991—），女，博士，讲师，主要从事车路协同与自动驾驶仿真研究。E-mail：nachen@bjut. edu. cn

排放量低等优点，无人配送车为个人客户、企业、社区和城市带来了诸多好处[11-12]，有效解决了当前末端物流配送存在的难题。此外，在无人配送车投放的初期，经调查发现，用户对于无人配送车的接受程度总体持中立态度，对于新兴事物的整体接受度符合普适性[13]，其中交付价格等成为主要的影响因素，未来控制好交付价格，将有助于提高公众整体的接受度。伴随无人配送车的出现，在法律法规层面，相关政策陆续出台以助力无人配送车的发展。2019年9月，中共中央、国务院印发《交通强国建设纲要》，提出积极发展无人机(车)物流递送、城市地下物流配送等无人配送商业化应用。2020年5月，深圳市发改委发布了《深圳市关于支持智能网联汽车发展的若干措施》，首次提出在全市范围内鼓励开展开放场景内自动驾驶出租车、公交、短途接驳、物流配送、清扫车、停车场、高速道路等形式的示范应用。2021年北京市高级别自动驾驶示范区(亦庄)发布了《无人配送车管理实施细则》试行版，推动了无人配送车的持证上路和规范化管理。

随着对无人配送车支持力度的增加，相关领域的研究也逐渐增加。当前针对无人配送车的研究主要包括以下几个方面：无人配送车接受度、路径规划、车队和基础设施、交付效率、社会智能、配送效能等，例如，文献[12,14]全面回顾了与无人配送车交付相关的研究。但是，随着无人配送车的大批落地，关于无人配送车投放量的控制、无人配送车对其他交通参与者和交通设施的影响程度等，目前尚缺乏系统研究，特别是关于无人配送车运行投放中涉及到的技术支持、法律法规、运行特性、运行仿真、效能评价等的研究比较匮乏，难以支撑无人配送车的高质量投放。鉴于当前无人配送车的市场需求以及技术发展水平，在当前国家及各级政府大力支持这一政策背景下，研究无人配送车投放对日常道路交通环境的影响具有现实意义。

文中回顾了无人配送技术的发展以及当前国内外无人配送车的运行管理规范，分析了无人配送车的运行特性和仿真研究工具，探究了无人配送车的运行评价指标，在此基础上阐明了无人配送车未来的研究方向。

## 1　无人配送技术的发展

无人配送技术是无人配送车完成配送交付的重要保障，能够让无人配送车自主完成路径选择、自主避障、网络交互、语音提示等功能，主要包括3个方面：安全运行技术、信息交互技术、车辆设计及电池技术。

### 1.1　无人配送车的安全运行技术

无人配送车的安全运行技术依托于自动驾驶技术的发展。无人配送车具有与自动驾驶汽车相似的自动驾驶技术，但无人配送车体积更小、速度更低，只用于运输货物，其行驶范围与自动驾驶汽车不同，危险性较低，因此在技术要求上与自动驾驶汽车有所不同。

无人配送车的安全运行需要融合多领域技术，结合自动驾驶技术以及目前主流无人配送车(如Nuro、小蛮驴等)的研发技术，可将其安全运行技术分为两个方面：感知和行为[15]。感知方面包括环境感知技术、高精地图和定位技术；行为方面包括智能决策技术、控制执行技术。

环境感知技术直接影响无人配送车的安全性和稳定性，无人配送车的环境感知技术是机器视觉、雷达(激光、毫米波、超声波)和热成像检测等多种技术的融合。例如，利用广角相机采集实时图像，通过机器视觉处理技术提取动静态障碍物，再利用雷达采集环境信息，便可建立高精度的实时地图[16]；利用热成像仪探测行人和动物，利用融合算法将多种设备采集的信息加以融合，便可实现精准的环境感知。高精度地图和定位技术则用于保障无人配送车的精确路径规划和导航，目前主要采用全球卫星导航系统(GPS、北斗等)、视觉传感器、激光雷达[17]，其中全球卫星导航系统获取车辆的GPS数据和高精度地图信息，视觉传感器通过摄像机获取精确的视觉距离[18]，激光雷达将行驶环境构建为三维点云地图，并将其与GPS高精度地图匹配，这三者共同结合，构建了更高精度的地图，从而完成无人配送车的位置定位和导航。

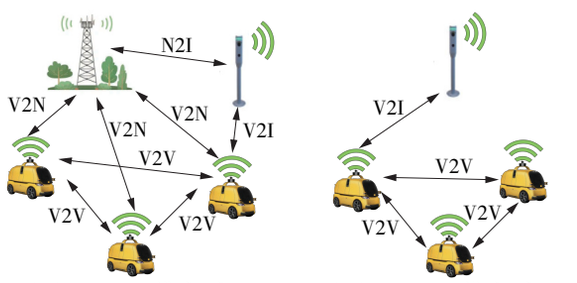
智能决策技术和控制执行技术基于环境感知技术感知周围静止障碍物并预测运动障碍物的运动趋势，用于保障车辆的安全运行和控制。其中：智能决策技术基于优化控制算法[19]，生成正确的驾驶行为，完成危险避让；控制执行技术通过车辆硬件和软件系统对智能决策技术产生的驾驶行为执行控制，实现车辆的动力、制动和转向控制，完成车辆的危险避让和安全运行。

### 1.2　无人配送车的信息交互技术

无人配送车的信息交互技术用于保障无人配送

车的通信传输、数据处理和信息安全，主要可以分为3个方面：V2X通信技术、云平台和大数据技术[20]。

V2X通信技术是基于蜂窝网络的车用无线通信技术，包括基于4G的LTE-V2X技术和基于5G的NR-V2X技术。在有蜂窝基站的情况下，LTE-V2X模式3和NR-V2X模式1采用集中式网络资源分配模式(调度模式)，通过基站进行资源请求和分配，用于实现车辆与车辆(V2V)、车辆与基础设施(V2I)、车辆与网络(V2N)的通信(如图1(a)所示)。在无基站的情况下，LTE-V2X模式4和NR-V2X模式2采用分布式网络资源分配模式(自主模式)，通过基于感知的半永久调度机制，由车辆自主选择传输资源并完成通信(如图1(b)所示)。这些模式支持V2X自组网功能，即使在无基站覆盖的偏远地区也能实现通信。在城市道路交通环境下，移动运营公司布设的基站相对密集，无人配送车仅需由基站进行通信资源分配，即采用模式3组网形式。信息交互技术基于V2X通信技术实现车辆与车辆、车辆与基础设施之间的信息交互，利用云平台和大数据处理技术完成对配送过程中信息的处理，通过信息安全技术保障用户信息和车辆运行的安全。由于基站资源分配方式非直接可控，无人配送车运行过程中的通信性能会受到运行特性、路侧单元(RSU)布设位置、通信数据大小、消息优先级、其他网络用户数量、周围环境等因素的影响[21-23]。论证无人配送车在有限资源和空间范围内的通行性能，可以为不同场景下的网络建设或运营调度提供合理建议或解决方案。




(a) LTE-V2X模式3或NR-V2X模式1组网形式　(b) LTE-V2X模式4或NR-V2X模式2组网形

V2N：车辆与基站通信；V2V：车辆与车辆通信；V2I：车辆与基础设施通信

图1　无人配送车的无线通信模式

Fig. 1　Communication modes of autonomous delivery vehicles

## 1.3　无人配送车的车辆设计及电池技术

无人配送车的车辆设计主要包括车型设计和动力控制设计，电池技术则主要针对电池的续航能力。随着无人配送服务在全国各地的积极推进，无人配送车的服务对象也从原来的快递服务扩大为餐饮配送、商超零售和医疗物资保障服务等，所配送的货物具有批量小、品种多、频率高、时间灵活、主体分散、服务要求高等特征[24]，主要应用于校园、园区、景区、厂区、社区防疫和社会路面等，用户群体多为校园师生、园区工作人员、社区生活居民和医护人员等。根据运输货物和应用场景的不同，无人配送车的车型可分为运输型、快递型、零售型和定制型，车辆性能和构造根据配送需求也具有相应的特点，例如图2所示的几种常见车型。表1列出了目前国内外主流无人配送车的具体参



(a) 京东无人配送车　(b) 美团无人配送车　(c) Nuro无人配送车　(d) Starship无人配送车

图片来自网络公开信息

图2　几种常见的无人配送车[15,25-27]

Fig. 2　Several common autonomous delivery vehicles[15,25-27]

表1　几种常见的无人配送车的参数[15,25-27]

Table 1　Parameters of several common autonomous delivery vehicles[15,25-27]

| 车辆类型 | 车辆尺寸/(mm×mm×mm) | 承载质量/kg | 最大速度/(km·h$^{-1}$) | 续航里程或电池容量 |
|---|---|---|---|---|
| 京东无人配送车 | 2100×960×1850 | 100 | 35 | 40 km |
| 美团“魔袋20”无人配送车 | 2450×1010×1900 | 150 | 45 | 120 km |
| Nuro R2无人配送车 | 2740×1100×1860 | 190 | 40 | 31 kW·h |
| Starship无人配送车 | 697×569×571 | 10 | 6 | 1.26 kW·h |

数，可以看出，无人配送车的续航能力已经能够满足日常配送任务需求，例如美团无人配送车的续航里程可以达到120 km，Nuro无人配送车的电池容量可以达到31 kW·h。

## 2　无人配送车的运行管理规范

目前，无人配送车蓬勃发展，亟需相关政策来推动无人配送车落地。国外在无人配送车管理规范的制定方面相较于国内更为完善，我国目前尚无统一的无人配送车管理规范，但各地都在积极推进管理规范的制定，其中北京和深圳在此领域的推进较快。

### 2.1　国内无人配送车运行管理规范

2021年5月，北京市高级别自动驾驶示范区（亦庄）发布了《无人配送车管理实施细则》试行版，为京东、美团以及新石器公司颁发了首批无人配送车车身编码，对无人配送车的管理建立了标准规范，以探索无人配送车新业态的商业化，进行无人配送车的分类管理，实现平台的统一管理。另外，该细则还规范了无人配送车的保险保障内容，实现了无人配送车的持证上岗和规范化管理。2021年10月，中关村智通智能交通产业联盟发布了《服务型电动自动行驶轮式车》团体标准，该标准主要对车辆整车、主要电器部件、配置、装配、信息系统安全等提出了具体要求。2021年10月，由深圳市智能交通行业协会牵头、无人车领域超过57家单位和112位专家共同编制而成的《低速无人车城市商业运营安全管理规范》正式发布，其中规定了低速无人车的额外技术要求、城市商业运营要求、运营安全制度和安全管理要求，为应用于物流配送的低速无人车的研发、生产、运营和检测提供了参考。

### 2.2　国内外无人配送车运行管理规范的对比分析

欧美国家针对无人配送车颁布了几个重要的法律法规。美国根据各州颁布的法律，将无人配送车依据体积大小分为个人配送设备（PDD）和低速车进行管理。美国多州已发布法案[12]，对无人配送车的车辆特性、远程监控、路权、信息保护、行驶区域和保险等提出了要求。英国将无人配送车归入微型移动车辆类别进行管理，在车辆速度、保险赔偿、安全监管、事故责任等方面给出了明确规定。国内外无人配送车运行管理规范的详细对比见表2。

表2　中国、美国、英国无人配送车管理规范的对比

Table 2　Comparison of management specifications for autonomous delivery vehicles in China, the US and the UK

| 名目 | 相应规定 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 中国（北京） | 美国（宾夕法尼亚州） | | 英国 |
| 车辆分类管理 | 非机动车 | 个人配送设备（PDD） | 低速车 | 微型移动车辆 |
| 行驶范围 | 非机动车道 | 人行道、路肩、路堤 | 机动车道 | 机动车道 |
| 管理规范 | 行业规范 | 各州PDD法规+许可证制度 | 机动车法规+许可证制度 | 依据机动车法规管理 |
| 装载质量/kg | ≤600 | ≤36 | ≤190 | ≤10 |
| 整车尺寸/（m×m×m） | ≤3.0×1.2×1.9 | ≤1.06×8.12×1.82 | ≤2.74×1.1×1.86 | — |
| 最高车速/（km·h$^{-1}$） | ≤15 | ≤11 | ≤40 | ≤25 |
| 行驶监管 | 现场或远程操作人员时刻监管 | 前期为现场监管，后期为操作员持驾驶执照远程监控和操作 | | 前期为现场监管，后期为操作员持驾驶执照远程监控和操作 |
| 事故判定 | 交管部门判定 | 车辆购买保险 | | 运营方 |
| 信息安全 | 符合现行国家和行业标准 | 数据及摄像头记录保护个人身份信息（白名单） | | — |

通过对比国内外对于无人配送车的管理规范和要求可知，我国和美国当前没有统一的国家层面的管理规范，支持各地建立相应规范并进行试运营测试，英国则采用了统一的管理规范进行约束。目前各个国家对无人配送车要求的差异主要体现在管理规范制定单位、行驶路权、车辆特性、事故判定和信息安全方面。我国在相关管理规范的细节制定方面相比于英美两国尚有欠缺，更多的管理方式是遵循现有法律法规，例如将无人配送车列为非机动车，信息安全方面则遵循现有的信息安全领域相关国家标准，期待未来能够根据产品特性制定相应的管理规范。此外，我国无人配送车当前在管理规范

上遵循的是各地的行业规范，未上升到城市或国家层面进行统一的管理和执行，相关规范的权威性较低，缺乏统一的相关立法，不利于未来无人配送车的大批量落地应用。

## 3 无人配送车的运行特性

无人配送车作为一种新型货物配送交通工具，其运行特性受产品参数设置和配送服务需求的影响，以下从行驶特性和配送服务运行特性方面加以讨论。

### 3.1 无人配送车的行驶特性

无人配送车的行驶特性主要包括车身安全特性、速度与能耗特性、跟驰和换道特性。车身安全特性参数主要包括最小安全宽度，目的是避免与其他交通参与者发生碰撞。当道路宽度小于无人配送车最小安全宽度时，无人配送车无法通行；另外，当无人配送车行驶在非机动车道的拥堵路段时，受自行车和电动车的干扰，会长时间触发最小安全宽度，造成车辆长时间停滞，阻挡其他交通参与者行驶。因此，在规划无人配送车的路径时，应避免出现以上情况。在无人配送车的速度与能耗特性方面，当无人配送车运行速度较高和较低时，都可能降低道路其他交通参与者的接受程度；此外，道路路面质量太差也可能增加运行能耗，降低配送效率。无人配送车的跟驰和换道特性方面，主要是依靠智能决策和控制执行技术生成安全驾驶行为，因具有环境感知、高精地图和定位技术，无人配送车可以时刻掌握其他交通参与者的行驶状态，预判行驶轨迹，实现安全的跟驰和换道。

### 3.2 无人配送车的配送服务运行特性

关于无人配送车的配送服务运行特性，关键的一点是找到车辆设计、环境、配送任务之间合适的平衡点[28]。在无人配送车的车辆设计方面，主要考虑配送最远续航、道路通行能力、车身设计和最大速度；在环境方面，主要考虑无人配送车的社会接受度、当前法规和现有交通基础设施；在配送任务方面，主要考虑服务范围、物品数量、配送时间窗和交付策略。这三者的相互作用决定了配送服务的关键效能，直接影响到无人配送车的运营成本、配送时长、可靠性、道路安全性以及外部影响的降低。因此，为更好地完成配送服务，需针对不同配送场景进行专业的服务运行规划，具体如图3所示。

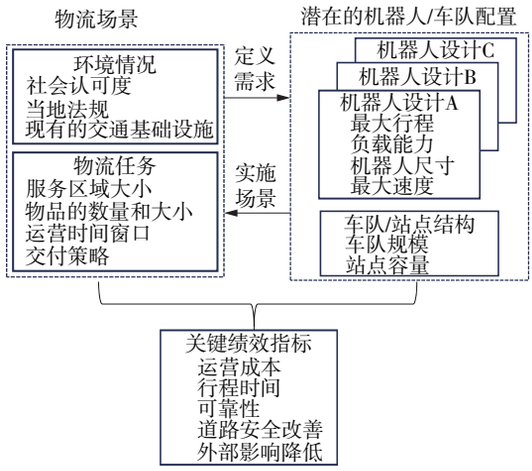



图3 无人配送车的服务运行规划[29]

Fig. 3 Service operation planning of autonomous delivery vehicles[29]

## 4 无人配送车的仿真模型

为了推动无人配送车尽快落地，需要开展多种场景的运营测试。实际环境运营测试存在场景较少、测试成本高和安全性低等问题，线上仿真则可以为无人配送车提供多样化的运营测试环境，有利于安全高效地完成无人配送车的运行测试。当前存在众多的无人配送车仿真环境和模型[30]，由于产品需求、产品特性和环境等各不不同，根据车辆的实际运营需求，目前无人配送车的仿真主要可以分为3类：①无人配送车技术测试仿真；②无人配送车运营影响测试仿真；③无人配送车网络仿真。

### 4.1 无人配送车技术测试仿真

当前无人配送车技术测试仿真的主要思路是通过计算机技术、依托虚拟平台(如ROS等)构建无人配送车模型和多种场景，为保障车辆安全行驶、模拟实际行驶进行可行性测试。具体来说，主要是对无人配送车的定位导航技术、车辆避障算法、环境识别能力、信息交互等进行测试。在无人配送车技术测试仿真研究方面，Tian等[31]基于ROS和Gazebo软件建立了仿真模型和仿真环境组成的增强型模拟器来进行测试，该模拟器可以模拟导航、感知环境、测试通信和数据共享、测试训练强化学习等，实现多场景的高度复现，降低测试费用和时间，提高安全性。Vongbunyong等[32]利用Unity平台开发了无人配送车仿真软件，以CARVER-Cab机器人为基础搭建自动移动机器人(AMR)模型，根据脚本管理自主移动机器人的行为，模拟了两种场景下自主移动机器人在医院中配送物资的运行情况。Liu等[33]

利用Unity对基于ROS的机器人进行混合现实仿真，实现可视化和定位，将真实和虚拟环境加以同步，完成真实与虚拟环境之间的信息交换和相互感知，利用少量实际车辆与大量虚拟车辆，便可在真实环境中实现多机器人仿真，显著提高了仿真效率。Liaqat等[34]通过虚拟机器人实验平台(V-REP)来构建无人配送车仿真模型，利用V-REP中的快速探索随机树算法模拟真实AMR行为，生成仿真模型，将AMR行为分为8个单独的行为，并集成到一个模拟模型中，之后基于真实AMR行为对仿真模型进行修正，从而建立真实的AMR仿真模型。

### 4.2　无人配送车运营影响测试仿真

无人配送车运营影响测试仿真主要利用微观仿真软件构建无人配送车模型和运行场景元素，其关注的是车辆实际运行过程中对其他交通参与者和道路基础设施的影响，为未来车辆投放提供依据，仿真中要么注重车辆安全高效运行的实现，要么注重车辆的微观运行参数及其影响特性。交通运行影响研究领域的交通流理论和微观交通仿真软件经过了多年的发展，目前内嵌微观交通行为仿真模型的交通仿真软件已经可以很好地仿真实际的交通运行情况。交通仿真软件从微观角度参考交通流理论控制车辆的运行，从宏观角度搭建各种路网，对车辆行驶轨迹、车辆输入、车辆模型、车辆种类和车速等进行控制，因此更加接近真实车流情况，能够对各种场景进行仿真。

无人配送车作为一种新型的在道路上行驶的智能货物运输工具，其行驶特性与当前交通工具具有一定的相似性。在当前没有针对性仿真软件的情况下，可结合无人配送车的行驶特性，利用微观交通仿真软件进行仿真。Raju等[35]分析了关于交通微观仿真平台的文献，得到图4所示统计结果。从图4可知，基于VISSIM微观仿真平台的出版物份额最多，说明VISSIM仿真平台更具权威性。以VISSIM仿真平台为例，可根据无人配送车外观、速度、跟驰和换道等特性的具体参数(见表3)在仿真平台中构建无人配送车模型，结合无人配送车的实际运行效果对VISSIM中内嵌的跟驰模型和换道模型进行标定，复现无人配送车的运行状态。由于无人配送车跟驰和换道模型目前鲜有研究，可以参考自动驾驶汽车的跟驰和换道模型进行标定[36]，再结合交通工程基础理论和当前研究成果，筛选出无人配送车落地运行的影响因素[37](如表4所示)，搭建不同仿真运行环境进行仿真。最后，根据仿真结果得到无

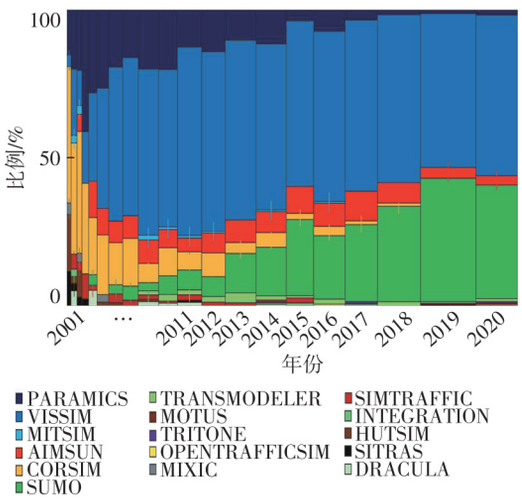



图4　有关微观仿真软件的出版物份额统计[35]

Fig. 4　Statistics of publication share about micro-simulation platforms[35]

表3　VISSIM中无人配送车重要参数的标定

Table 3　Calibration of important parameters for autonomous delivery vehicles in VISSIM

| 参数标定内容 | VISSIM内部参数借鉴对象 | 无人配送车自定义参数 |
|---|---|---|
| 车辆类型 | 小汽车 | 无人配送车 |
| 车辆模型 | 小汽车 | 长度、车轴、前离合器、前车轴、后车轴、后离合器 |
| 期望速度分布 | — | 无人配送车期望速度 |
| 车辆加/减速函数 | — | 最大加速度、期望加速度、最大减速度、期望减速度 |
| 质量分布曲线 | — | 空载质量、满载质量 |
| 功率分布 | — | 无人配送车功率分布 |
| 颜色分布 | — | 无人配送车颜色 |
| 驾驶行为参数 | 跟驰模型 | CC0——停车间距 |
| | | CC1——车头时距 |
| | | CC2——跟车变量 |
| | | CC3——进入跟车状态的阈值 |
| | | CC4——跟车状态的阈值1 |
| | | CC5——跟车状态的阈值2 |
| | | CC6——车速振动 |
| | | CC7——加速度波动幅度 |
| | | CC8——停车的加速度 |
| | | CC9——80 km/h时的加速度 |
| | | 前视距离 |
| | | 后视距离 |
| | | 观察到的车辆数 |
| | 换道参数 | 最大减速度，本车 |
| | | 最大减速度，后车 |
| | | 可接受减速度，本车 |
| | | 可接受减速度，后车 |
| | | 消失的等待时间 |
| | | 最小车头间距 |
| | | 安全距离折减系数 |
| | | 协同刹车的最大减速度 |

表4 无人配送车的运营影响因素[37]

Table 4 Impact factors for the operation of autonomous delivery vehicles

| 因素类别 | 因素名称 |
|---|---|
| 路段 | 路段长度 |
| | 道路宽度 |
| | 非机动车/机动车流量 |
| | 隔离类型 |
| | 车辆组成比例 |
| 交叉口 | 交叉口尺寸 |
| | 有效绿灯时间 |
| | 右转比例 |
| | 车辆启动损失时间 |
| | 道路宽度 |
| | 饱和车头时距 |

人配送车在多种运行环境下的行驶状况及其对其他交通参与者速度、密度等的影响，进而控制无人配送车在道路上的影响程度，更好地实现无人配送车的投放。

### 4.3 无人配送车网络仿真

无人配送车网络仿真主要关注车路协同通信设备在有限道路时空范围内的无线通信能力，重点考虑网络设施布局和交通运行状态。为了开展相关模拟，首先需要利用网络模拟软件(如NS-2、NS-3、OMNeT++等网络仿真器[38])搭建网络环境，然后借助常用微观交通仿真软件(如SUMO、VISSIM等)为无人配送车网络仿真模拟提供交通运行环境。通过双向耦合方式，将网络仿真器与交通仿真器集成在一起，利用中间组件实现交通环境信息与网络仿真信息的交互，从而构建一种综合的车联网仿真模式。车联网模拟平台不仅能够真实模拟车辆节点的网络协议架构，还能将网络仿真结果动态反馈到车辆节点，从而影响车辆的驾驶行为及移动特征。当前典型的车联网交通通信联合仿真平台包括MOVE、Veins及MOSAIC等[39-40]，这些平台融合了交通与通信两个领域的动态特性，能够开展具体的无人配送车网络仿真，其中无人配送车网络仿真平台可以从交通系统特性方面研究路网规模、车辆密度、车辆速度等对网络性能的影响；在网络特性方面，可以开展网络协议、通信设施位置布局等特性对网络性能的影响研究，分析结果可更好地服务于未来无人配送车辆的大规模落地运行。

## 5 无人配送车运行评价

由于国内外与无人配送车相关的法律法规尚未建立完善，无人配送车的运行评价主要依据其行驶的道路范围内机动车、非机动车和行人的管理规范(见表5)。美国部分州法规定，无人配送车行驶在行人道、路堤、护堤和机动车道时，相应地受行人道、非机动车道、机动车道运行管理办法和专门针对无人配送车的运行法规的约束。我国当前的行业规范规定，无人配送车行驶在非机动车道时，主要借助非机动车运行管理规范进行运行评价。文中借鉴国内外的无人配送车运行评价方法，结合无人配送车的运行特性，构建针对非机动车道无人配送车运行评价的指标体系(见图5)。

表5 国内外道路服务水平评价研究统计[41]

Table 5 Statistics of researches on the evaluation of road service levels at home and abroad[41]

| 评价方法 | 评价角度 | 文献 | 车道 | 评级指标 | 等级 |
|---|---|---|---|---|---|
| 实测法 | 用户感知 | 美国《公路能力手册》，2010年版 | 机动车道 | 平均运行速度、负荷度、平均延误 | 六级 |
| | | | 自行车道 | 超越事件数、车道宽度 | |
| | | | 人行道 | 行人占有空间、平均速度、行人流率、负荷度 | |
| | 交通流 | CJJ 37—2012《城市道路工程设计规范》 | 自行车道 | 骑行速度、占道面积、负荷度 | 四级 |
| 仿真法 | 交通流 | 张晋等[41] | 自行车道 | 密度、平均速度 | 五级 |
| | 用户感知 | Liang等[42] | 自动车道 | 速度状态熵、密度 | 五级 |
| | 用户感知和交通流 | 李玉清[43] | 自行车道 | 反应空间障碍物密度、剩余感知空间障碍物密度、负荷度、平均速度、车流密度 | 五级 |

非机动车运行评价可分为两个方面：非机动车道服务水平评价和非机动车运行特征评价。对于非机动车道服务水平评价，国内现行的标准都是基于通行能力评价指标[44]，并结合超车率、用户感知、交通流3个参数构建服务水平评价体系。在无人配送车投放研究中，对非机动车流量进行仿真时，则依据CJJ 37—2012《城市道路工程设计规范》定义的道路通行能力和非机动车道服务水平完成非机动

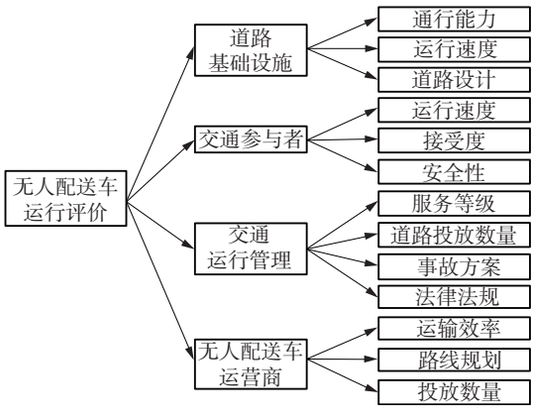



图5　无人配送车运行评价指标体系

Fig. 5　Evaluation indicators system for the operation of autonomous delivery vehicles

车流量的设定。对于非机动车运行特征的评价，更着重于解析交通流三要素，即交通量、速度、密度[45]。交通量反映非机动车对于道路设施的需求和效率，速度和密度则反映非机动车能够获得的服务质量、舒适性和安全性。结合以上评价指标和特点，在无人配送车投放影响研究中，为了降低对其他交通参与者和道路通行能力的影响，可采用非机动车平均速度变化率和平均密度变化率作为评价非机动车运行受无人配送车投放影响的指标。文中制定的无人配送车运行评价指标体系包括道路基础设施、交通参与者、交通运行管理、无人配送车运营商4个方面。

(1)道路基础设施

无人配送车运行评价结果有助于减少对道路通行能力和行驶速度的不利影响。随着未来的大规模投放，无人配送车将逐渐成为一种日常化的货运交通工具。为满足无人配送车和非机动车的运行，道路基础设施可能会因此加以改变，如拓宽道路、设置无人配送车专用道等。

(2)交通参与者

无人配送车的出现，在一定程度上影响了交通参与者原本的通行感受。无人配送车运行评价结果有助于降低配送车对交通参与者运行速度的影响，提高交通参与者的安全性和对无人配送车的接受度，在满足无人配送车和其他交通参与者正常通行的基础上，为未来无人配送车的大规模投放奠定基础。

(3)交通运行管理

基于无人配送车运行评价结果，可以确定道路路段和交叉口的单位时间投放数量阈值，进而制定相关法律法规，规范管理无人配送车的运行。根据投放数量阈值，可以对日常车辆拥堵、车辆损坏等突发事件提前制定应对方案，采取控制进入事故路段的无人配送车数量等方法来保障运行通畅。

(4)无人配送车运营商

根据运行评价中的无人配送车道路可投放数量等评价结果，可以优化配送路线，降低无人配送车配送路线的重复率，在有限的车辆数量下提高运输效率，实现利益最大化。

## 6　结语

无人配送车可以提供无接触、高效和节能环保的配送方式，有效解决末端物流配送难题，是构建城市智能配送系统的重要环节。为推动无人配送车的高质量落地运营，文中综述了无人配送车行为仿真和评价研究的相关内容。在无人配送技术领域，安全运行技术、信息交互技术、车辆设计及电池技术已经逐渐成熟，当前无人配送车已经具备落地应用能力，国内美团、京东、小蛮驴等品牌的无人配送车已经在高校、园区等实际场景中试运营。人们对无人配送车的认知和接受度正逐步提高，各国也在政策法规层面陆续出台相关政策，助力无人配送车的发展，所颁布的管理细则和指南、法律法规、行业标准等有效促进了无人配送车的持证上路和规范化管理。但是，目前各国政策法规对于无人配送车的落地应用探讨不足，无人配送车仍处于试运行测试阶段。

为了了解未来大规模落地应用时可能碰到的问题，文中分析了无人配送车的运行特性，揭示了无人配送车在安全行驶、配送能效等方面的特点，指出要达到最优配送效能，就需找到车辆设计、环境、配送任务之间的平衡点。另外，通过无人配送车技术测试仿真、运营影响测试仿真和网络仿真，可以提前模拟实际场景运营。为了降低无人配送车这种新型货物配送工具对其他交通参与者的影响，文中借鉴道路服务水平评价指标，提出采用平均速度变化率和平均密度变化率作为评价指标，并预测了未来无人配送车大量投放运营对道路基础设施、交通参与者、交通运行管理和无人配送车运营商的影响。综合考虑无人配送车落地前后可能存在的问题以及可能产生的影响，为推动无人配送车的大规模落地应用，建议在无人配送车的研究和发展中着重于以下几个方面：①推进无人配送车全国性法律法规的建设，构建全国统一的无人配送车法律法规，通过统一性权威政策推动大规模无人配送车的

落地；②开展实际场景规划，在对测试运营阶段无人配送车服务运行特性进行研究的基础上，进一步规划实际场景；③开展道路和路网的投放量研究，这方面，可以借助交通仿真环境和模型，开展交通参与者和无人配送车的道路运行仿真，调查其他交通参与者对于在道路上行驶的无人配送车的接受程度，开展最大投放量研究，为后续无人配送车的落地应用提供依据；④从多角度开展运行评价，利用文中提出的运行评价指标，从道路服务水平和交通参与者感知的角度开展运行评价研究。

考虑到未来无人配送车的行驶范围可能会扩展到机动车道，投放量相比在非机动车道时会持续增加，后续研究中，可进一步结合实际应用场景和运行数据开展深入探讨。另外，未来无人配送车的大批量投放也会对通信性能造成一定的影响，后续应重点结合信息交互开展研究。

## 参考文献：


[1] 车百智库，中国电动汽车百人会. 无人配送在国内商业化的现状、挑战及建议[J]. 智能网联汽车，2020(2)：60-67.
China EV100 Think Tank，China EV100. Current status，challenges and recommendations for commercialization of autonomous delivery in China [J]. Intelligent Connected Vehicle，2020(2)：60-67.

[2] BOYSEN N，FEDTKE S，SCHWERDFEGER S. Last-mile delivery concepts：a survey from an operational research perspective [J]. OR Spectrum，2021，43(1)：1-58.

[3] PENG Z，SUN J，LU Q. China's public transportation：problems，policies，and prospective of sustainability [J]. ITE Journal-Institute of Transportation Engineers，2012，82(5)：36-40.

[4] LIU N，WANG Y，BAI Q，et al. Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies：a review [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)，2022，9(4)：532-555.

[5] GARUS A，ALONSO B，RAPOSO M A，et al. Last-mile delivery by automated droids. Sustainability assessment on a real-world case study [J]. Sustainable Cities and Society，2022，79(2)：103728/1-15.

[6] PAREKH D，PODDAR N，RAJPURKAR A，et al. A review on autonomous vehicles：progress，methods and challenges [J]. Electronics，2022，11(14)：2162/1-18.

[7] SHADRIN S S，IVANOVA A A. Analytical review of standard SAE J3016 "taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles" with latest updates [J]. Avtomobil' Doroga Infrastruktura，2019，3(21)：10-20.

[8] AHMED H U，HUANG Y，LU P，et al. Technology developments and impacts of connected and autonomous vehicles：an overview [J]. Smart Cities，2022，5(1)：382-404.

[9] KAPSER S，ABDELRAHMAN M，BERNECKER T. Autonomous delivery vehicles to fight the spread of Covid-19—How do men and women differ in their acceptance? [J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice，2021，148：183-198.

[10] MARSDEN N，BERNECKER T，ZÖLLNER R，et al. BUGA：log—a real-world laboratory approach to designing an automated transport system for goods in urban areas [C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Engineering，Technology and Innovation. Stuttgart：IEEE，2018：1-9.

[11] DE ARAÚJO F A，DOS REIS J G M，DA CRUZ C P F. The role of last-mile delivery in the future of e-commerce [C]//Proceedings of IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. Novi Sad：Springer，2020：307-314.

[12] SRINIVAS S. Autonomous robot-driven deliveries：a review of recent developments and future directions [J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2022，165：102834/1-16.

[13] KAPSER S，ABDELRAHMAN M. Acceptance of autonomous delivery vehicles for last-mile delivery in Germany—Extending UTAUT2 with risk perceptions [J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2020，111：210-225.

[14] FIGLIOZZI M，JENNINGS D. Autonomous delivery robots and their potential impacts on urban freight energy consumption and emissions [J]. Transportation Research Procedia，2020，46：21-28.

[15] Nuro. Safety_Nuro [EB/OL]. https://www.nuro.ai/safety.

[16] BAI J，CAI J，ZHOU T，et al. Research on Key technologies of meal delivery robot based on the fusion of lidar and machine vision [C]//Proceedings of 2021 7th International Conference on Big Data and Information Analytics. Chongqing：IEEE，2021：236-242.

[17] LEE D，KANG G，KIM B，et al. Assistive delivery robot application for real-world postal services [J]. IEEE Access，2021，9：141981-141998.

[18] PROTASOV S，KARPYSHEV P，KALINOV I，et al. CNN-based omnidirectional object detection for hermesBot autonomous delivery robot with preliminary frame classification [C]//Proceedings of 2021 20th Interna-

tional Conference on Advanced Robotics. Ljubljana: IEEE, 2021: 517-522.

[19] CHENG S, WANG Z, YANG B, et al. Convolutional neural network-based intelligent decision-making for automated vehicles [J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(27): 509-514.

[20] 李克强，戴一凡，李升波，等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势 [J]. 汽车安全与节能学报，2017，8(1)：1-14.
LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles [J]. Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1-14.

[21] KAMTAM S B, LU Q, BOUALI F, et al. Network latency in teleoperation of connected and autonomous vehicles: a review of trends, challenges, and mitigation strategies [J]. Sensors, 2024, 24(12): 3957/1-37.

[22] ZHENG G, NI Q, NAVAIE K, et al. A distributed learning architecture for semantic communication in autonomous driving networks for task offloading [J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(11): 64-68.

[23] ZHOU X, XING X, QIN H, et al. Communication-performance trade-off formation control for NAUVs: an interleaved event-triggered strategy [J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 13(8): 8713-8739.

[24] 陆淼嘉，尹钦仪. “最后一公里”无人车配送发展现状及应用前景 [J]. 综合运输，2021，43(1)：117-121.
LU Miaojia, YIN Qinyi. The development and applications of last-mile autonomous delivery vehicle [J]. China Transportation Review, 2021, 43(1): 117-121.

[25] 京东物流. 京东无人配送车 [EB/OL]. https://www.jdl.com/en/IntelligenVehicle.

[26] 美团网. 美团无人配送车 [EB/OL]. https://mad.meituan.com/.

[27] STARSHIP. Starship technologies: autonomous robot delivery vehicle [EB/OL]. https://www.starship.xyz/.

[28] HOFFMANN T, PRAUSE G. On the regulatory framework for last-mile delivery robots [J]. Machines, 2018, 6(3): 33/1-16.

[29] PLANK M, LEMARDELÉ C, ASSMANN T, et al. Ready for robots? Assessment of autonomous delivery robot operative accessibility in German cities [J]. Journal of Urban Mobility, 2022, 2: 100036/1-15.

[30] LI H, ZHANG J, SUN X, et al. A survey of vehicle group behaviors simulation under a connected vehicle environment [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2022, 603: 127816/1-22.

[31] TIAN Z, SHI W. Design and implement an enhanced simulator for autonomous delivery robot [C]//Proceedings of 2022 5th International Conference on Connected and Autonomous Driving. Detroit: IEEE, 2022: 21-29.

[32] VONGBUNYONG S, TRIPATHI S P, THAMRONGAPHI-CHARTKUL K, et al. Simulation of autonomous mobile robot system for food delivery in in-patient ward with unity [C]//Proceedings of 2020 15th International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing. Bangkok: IEEE, 2020: 1-6.

[33] LIU Y, NOVOTNY G, SMIRNOV N, et al. Mobile delivery robots: mixed reality-based simulation relying on ROS and unity 3D [C]//Proceedings of 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Online: IEEE, 2020: 15-20.

[34] LIAQAT A, HUTABARAT W, TIWARI D, et al. Autonomous mobile robots in manufacturing: highway code development, simulation, and testing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104: 4617-4628.

[35] RAJU N, FARAH H. Evolution of traffic microsimulation and its use for modeling connected and automated vehicles [J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021(1): 1-29.

[36] HE S, GUO X, DING F, et al. Freeway traffic speed estimation of mixed traffic using data from connected and autonomous vehicles with a low penetration rate [J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020(1): 1-13.

[37] 李宇轩. 城市低速无人配送车行为仿真与投放策略研究 [D]. 北京：北京工业大学，2023.

[38] 李海舰，吴丽君，陈娜，等. 面向车联网的交通–通信联合仿真平台研究综述 [J]. 交通工程，2024，24(5)：9-18.
LI Haijian, WU Lijun, CHEN Na, et al. Review of joint simulation platform research for transportation and communication in vehicular networks [J]. Journal of Transportation Engineering, 2024, 24(5): 9-18.

[39] RONDINONE M, MANEROS J, KRAJZEWICZ D, et al. iTETRIS: a modular simulation platform for the large scale evaluation of cooperative ITS applications [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2013, 34: 99-125.

[40] PIORKOWSKI M, RAYA M, LUGO A L, et al. TraNS: realistic joint traffic and network simulator for VANETs [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2008, 12(1): 31-33.

[41] 张晋，王慧，李平. 基于元胞自动机(CA)的自行车流建模及仿真[J]. 公路交通科技，2006(1)：125-129，134.
ZHANG Jin，WANG Hui，LI Ping. Modeling and simulation of bicycle flow based on cellular automata (CA)[J]. Highway Transportation Technology，2006(1)：125-129，134.
[42] LIANG X，XIE M，JIA X. Use of entropy to analyze level of service of dedicated bike lanes in China[J]. Advances in Mechanical Engineering，2017，9(6)：1-12.
[43] 李玉清. 基于仿真的自行车道服务水平和设计参数确定方法[D]. 长沙：长沙理工大学，2019.
[44] 韩慧. 混行非机动车道服务水平评价方法研究[J]. 交通与运输(学术版)，2014(2)：125-129.
HAN Hui. Studies about Level of service of mixed non-motorized lane[J]. Traffic & Transportation，2014(2)：125-129.
[45] 李海航. 城市非机动车道通行能力研究[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2015.

# A Review of Researches on Operation Management, Simulation, and Evaluation of Urban Autonomous Delivery Vehicles

*LI Haijian*[1] *LI Yuxuan*[1] *WANG Weijie*[1] *TONG Shengjun*[2] *GAO Jingbo*[2] *LI Tongfei*[1] *CHEN Na*[1]
(1. College of Metropolitan Transportation，Beijing University of Technology，Beijing 100124，China；2. Beijing Chewang Technology Development Co.，Ltd.，Beijing 100176，China)

**Abstract**: The operation simulation and evaluation constitute the basis of theoretical research in the field of autonomous delivery vehicles, and are conducive to the high-quality ground operation of autonomous delivery vehicles. This paper first reviews the current state of autonomous delivery vehicle technology and the domestic and international safety operation management standards, then analyzes the driving characteristics of autonomous delivery vehicles (including vehicle safety attributes, speed and energy consumption profiles, as well as following and lane-changing behaviors) and the operational characteristics of delivery services. The study highlights the need to strike an appropriate balance among vehicle design, environmental factors and delivery tasks, and summarizes the current state and limitations of simulation methodologies for testing autonomous delivery vehicle technology, operational impact assessments, and network simulations. On this basis, by drawing on the operation evaluation methodologies for autonomous delivery vehicles at home and abroad and considering the operational characteristics, an indicator system for assessing the performance of autonomous delivery vehicles operating in non-motorized lanes is established, and the key evaluation metrics and future research directions of autonomous delivery vehicles are outlined. There comes to the conclusions that (1) the existing simulation technologies for the operation of autonomous delivery vehicles lack unified and authoritative management standards; (2) the researches on simulation-based evaluation of the operational impacts of autonomous delivery vehicles are limited; (3) current studies on the operational characteristics of autonomous delivery vehicles are insufficiently detailed and lack consideration of real-world deployment scenarios; and (4) drawing on road level-of-service evaluation indicators, average speed variation rate and average density variation rate are two appropriate evaluation metrics for assessing the impact of autonomous delivery vehicle deployment.

**Key words**: urban transportation; autonomous delivery vehicle; placement strategy; operation simulation; operation evaluation