文章编号:1005-0523(2026)05-0072-14

自动驾驶公交研究知识图谱:一项科学计量分析

吴 霜[1,3],严利鑫[1,2],李黄承成[1],黄祎婧[1],王紫硕[1]

(1. 华东交通大学交通运输工程学院,江西 南昌 330013;2. 江西飞行学院交通运输与工程学院,江西 南昌 330088;
3. 江西交通职业技术学院运输管理学院,江西 南昌 330013)

摘要:随着环境感知、车路协同及人工智能等技术的持续突破,自动驾驶公交有望为城市交通可持续发展与居民出行品质提升提供有力支撑,因而受到国内外学者的广泛关注。为系统把握该领域的研究现状与热点,文章基于Web of Science核心数据库,收集2000—2024年自动驾驶公交相关文献,剔除重复、不相关及信息不全等文献后,共筛选出233篇有效样本,并借助CiteSpace文献分析工具,从文献特征、研究趋势、研究热点和研究前沿等方面绘制知识图谱。结果表明,中国、美国和德国是发文量较高的主要国家,研究呈现显著的跨学科特征。研究热点集中于4个方向:迈向无人化的自动驾驶公交、注重节能减排的自动驾驶公交、混合交通流环境下的自动驾驶公交,以及关注用户接受度的自动驾驶公交。未来研究可进一步从可持续框架下的自动化与电动化公交、开放场景中的完全无人驾驶公交,以及公众偏好驱动的自动驾驶公交等3个方向深化探索。系统梳理自动驾驶公交领域的研究成果,可为制定更具科学依据的发展策略及相关社会支持措施提供有益经验和参考。

关键词:汽车工程;自动驾驶公交;知识图谱;CiteSpace;研究现状与热点

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

本文引用格式:吴霜,严利鑫,李黄承成,等. 自动驾驶公交研究知识图谱:一项科学计量分析[J]. 华东交通大学学报,2026,43(5):72-85.

Knowledge Mapping of Autonomous Bus Research: A Scientometric Analysis

Wu Shuang[1,3], Yan Lixin[1,2], Li Huangchengcheng[1], Huang Yijing[1], Wang Zishuo[1]

(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Transportation and Engineering, Jiangxi Flight University, Nanchang 330088, China; 3. School of Transportation Management, Jiangxi Vocational and Technical College of Communications, Nanchang 330013, China)

Abstract: With the continuous advancement of technologies such as environmental perception, cooperative vehicle-infrastructure systems (CVIS), and artificial intelligence, autonomous buses are poised to significantly support sustainable urban transportation and enhance residents' travel quality, thereby drawing substantial attention from scholars worldwide. To capture the global research status and hotspots in this field, this study retrieved autonomous bus literature from 2000 to 2024 within the Web of Science Core Collection. After removing duplicate, irrelevant, and incomplete records, 233 core articles were analyzed using CiteSpace to generate knowledge maps covering publication characteristics, research trends, hotspots, and frontiers. The results indicate that China, the United States, and Germany are the leading countries in publication volume, and the field exhibits distinct inter-

收稿日期:2025-09-26
基金项目:国家自然科学基金项目(52462049,52162049);江西省"赣鄱俊才支持计划"项目(20232BCJ23012)

disciplinary characteristics. Current research primarily clusters around four hotspots: the transition toward unmanned operations, energy conservation and emission reduction, navigation in mixed traffic flows, and user acceptance. Looking ahead, future research should deepen in three directions: automated and electrified buses under a sustainability framework, fully unmanned buses in open scenarios, and autonomous buses tailored to public preferences. This systematic review offers valuable insights and references for formulating scientifically sound autonomous bus strategies and corresponding social support policies.

Key words: automotive engineering; autonomous bus; knowledge mapping; CiteSpace; research status and hotspots

Citation format: Wu Shuang, Yan Lixin, Li Huangchengcheng, et al. Knowledge mapping of autonomous bus research: a scientometric analysis[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(5): 72−85.

随着自动化技术的不断进步，自动驾驶公交，特别是自动驾驶电动公交，在提升通行效率和服务质量、优化城市环境与出行成本等方面展现出良好优势。例如，自动驾驶公交具备在不同线路间灵活调配的能力，尤其在需求不确定性较高的场景下优势显著，可进一步缩减运力规模并降低运营成本[1]。自动驾驶电动公交可通过车辆小型化和优化发车间隔等手段提升服务品质，同时减少燃油消耗与排放[2]。作为未来交通体系的重要组成部分，自动驾驶公交具备广阔的发展前景。

从自动驾驶公交概念提出以来，国内外学者在该领域已积累了丰富的研究成果，主要聚焦于以下4个核心方面：技术实现与安全保障、用户接受度、社会影响，以及法规与政策。其中，在技术实现与安全提升方面，仍面临环境感知、路径规划及控制执行等一系列关键难题。多传感器数据融合的方法提升了自动驾驶公交的感知与导航能力[3-5]。新型控制器实现了兼顾自动驾驶巴士稳定性的实时规划轨迹跟踪[6-8]。智能公交调度控制方法可优化公交运力调度，有效减少候车乘客数量[9]。在自动驾驶公交用户接受度研究方面，现有研究综合运用定量与定性方法开展了系列分析，并据此提出相应的优化方案与策略。其中，信任度和安全性被普遍视为影响公众使用态度的主要因素[10-15]。针对自动驾驶公交的社会影响，已有研究从人文、经济与环境等多维度展开广泛探讨。例如，自动驾驶公交可为偏远社区居民提供出行便利[16-17]，具备良好的经济性[1-2,18]，且有助于促进公共交通使用、降低私家车依赖[18-19]。在法规与政策方面，完善监管体系并重视用户体验[13]、实施补贴激励政策[20-22]、推进道路基础设施建设[23-24]等举措，均有助于推动自动驾驶公交的商业化应用。总体而言，多维度研究成果为自动驾驶公交的应用推广奠定了重要基础。

本研究以自动驾驶公交为研究对象，运用CiteSpace文献分析工具提取客观实用数据，旨在解答4大核心问题：① 自动驾驶公交研究领域的核心文献有哪些特征？② 该研究领域的发展趋势如何？③ 当前的研究热点有哪些？④ 未来研究应重点关注哪些方面？通过解答这些研究问题，能够更全面地理解自动驾驶公交研究领域的发展脉络。本研究在厘清当前研究热点的基础上，进一步深化了对自动驾驶公交领域关键问题的认知，并结合现有成果，指明了未来亟需突破的重点方向。上述发现可为制定更具科学依据的自动驾驶公交发展方案及相关社会支持措施提供有益参考。

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源

为科学绘制自动驾驶公交领域的知识图谱，确保纳入分析文献的学术质量，并客观呈现该领域的研究发展态势，本研究选取Web of Science（WOS）核心数据库作为数据检索源，针对自动驾驶公交相关研究方向，开展了二十余年期刊文献的系统性检索与分析工作。文献检索基本信息如下：

1）检索主题：“Autonomous Bus”“Driverless Bus”“Self-driving Bus”；

2）时间跨度：2000—2024年；

3）期刊来源：SCI/SSCI。

为保证文献分析的准确性和客观性，对WOS检索的数据进行预处理，删除与自动驾驶公交研究

主题不相关、重复收录、信息不全等文献，对文献进行筛选后得到学术类文献233篇，其中5篇为综述类文献。

1.2 研究方法

知识图谱作为一种现代学术理论与方法，融合了数学、图论、信息科学及可视化技术，旨在通过直观的图形，系统地展现特定学科的发展历程、知识架构与研究前沿[25]。CiteSpace软件能高效解析WOS等主流数据库源文件，基于文献中关键词、机构、作者等的共现或共被引频次，运用网络分析与知识可视化方法，揭示科技产出的主体、客体与载体结构[26]。本文借助CiteSpace工具对文献的强大数据处理与可视化能力，以样本文献为分析对象，从载文量、发文国家及地区、期刊来源、研究机构与作者等方面着手，开展自动驾驶公交文献的知识图谱整理和特征分析工作，并通过绘制和分析关键词时间线与分支聚类图谱，清晰梳理自动驾驶公交研究的发展趋势和研究热点，再根据突现关键词分析，展望未来研究趋势。研究方法流程如图1所示。具体研究步骤如下。

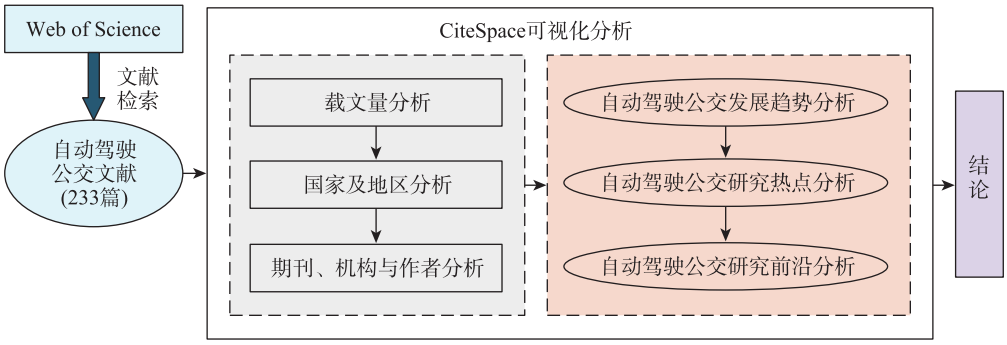


图1 研究方法流程

Fig. 1 Flowchart of study method

1）载文量分析。运用CiteSpace对文献进行数据分析处理，并借助Origin软件绘制载文量分布图进行分析，得到国内外自动驾驶公交文献发表量随时间的变化趋势。

2）国家及地区分析。运用CiteSpace对文献进行国家及地区共现分析，得到自动驾驶公交领域的国家及地区发文量、首发年份以及彼此间的交流合作关系。

3）期刊、机构与作者分析。运用CiteSpace对文献进行期刊和作者的共被引分析，追踪国内外自动驾驶领域有影响力的期刊和作者，并对文献所属机构进行共现分析，得到该研究领域的主要研究机构。

4）研究趋势及研究热点分析。通过CiteSpace对文献关键词进行聚类分析，得到该领域关键词时间线和研究分支聚类图谱，根据知识图谱所呈现的规律，得到自动驾驶公交领域的研究发展趋势及研究热点。

5）研究前沿分析。使用CiteSpace绘制突现关键词图谱，结合关键词时间线和分支聚类图谱，分析得到自动驾驶公交领域研究前沿。

2 文献特征分析

2.1 载文量分析

运用CiteSpace对文献进行数据分析处理，统计自动驾驶公交文献在不同年份的发表量，并借助Origin软件绘制载文量分布图，如图2所示。图2中红色线条代表移动平均载文量，由相邻两年载文量的平均值连接而成。分析可知，自动驾驶公交文献的首次发表年份是2009年，随后国内外陆续涌现该领域的相关文献，并且发文数量呈现逐年增长趋势，尤其是2018年至今，随着自动驾驶技术从实验室走向现实，L4级在特定区域实现商业化，硬件成本不断下降，法规框架逐步构建，自动驾驶公交作为一种极具竞争力的交通工具，相关研究迅速发展，2020年开始每年载文量都突破30篇。由此可见，在技术持续革新与社会发展需要的双重驱动下，自动驾驶公交已逐步发展成为交通运输与智能科技交叉领域的研究热点。

2.2 国家及地区分析

运用CiteSpace对文献进行国家及地区共现分析，发掘自动驾驶公交领域的国家/地区发文量、首

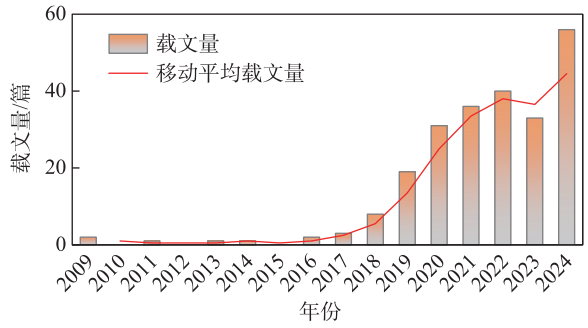


图2　载文量分布

Fig. 2　Distribution of publication volume

发年份以及彼此间的交流合作关系,得到自动驾驶公交领域国家及地区共现图谱,如图3所示。节点大小与对应国家/地区在该研究领域的论文发表总量相关联,节点越大,表明该国家/地区的相关发文数量越多。节点间的连线代表两个国家/地区在自动驾驶公交研究领域开展过学术合作。节点外围呈现紫色表明该节点的中介中心性高,对应的国家/地区是国际合作的中心枢纽,在国际自动驾驶公交研究领域知识交流中扮演着至关重要的角色。节点出现红色树轮表明对应的国家/地区出现了自动驾驶公交研究领域某个方向的起源文献,引起了该研究领域的高度关注。

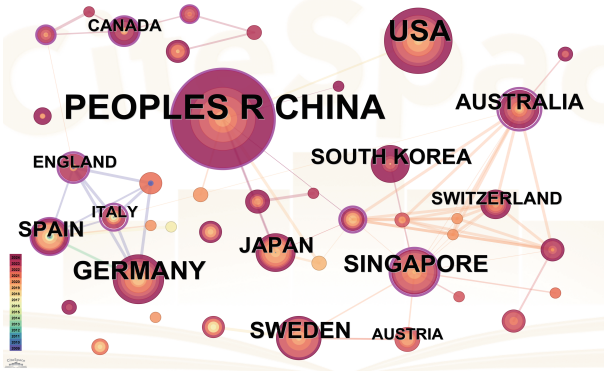


图3　国家及地区共现网络

Fig. 3　Co-occurrence network of countries and regions

通过CiteSpace提取相关数据,绘制国家及地区发文量表,如表1所示。从文献发表时间来看,首次以自动驾驶公交为主题发表文献的国家是德国和西班牙,随后是日本,2018年后,该领域呈现出国际化研究趋势。从文献发表数量来看,中国虽起步较晚,但当前发文总量已处于全球领先水平,且在发

表1　发文量前10的国家及地区

Tab. 1　Top 10 countries and regions by publication volume

序号	国家及地区	发文量	首次发文年份	中介中心性
1	中国	86	2018	0.23
2	美国	42	2014	0
3	德国	24	2009	0
4	新加坡	19	2018	0.44
5	瑞典	16	2018	0.08
6	日本	14	2011	0
7	澳大利亚	14	2017	0.71
8	西班牙	13	2009	0.16
9	韩国	13	2019	0
10	瑞士	8	2019	0

文量排名前十的国家中,除中国以外均为发达国家。综合分析表明,中国在自动驾驶公交研究领域具有强大活力,占据重要地位,在国际间的科研合作网络中承担关键角色,产出了一批具有高影响力的经典文献。值得注意的是,中国的中介中心性(0.23)低于澳大利亚(0.71)和新加坡(0.44),说明中国与国际间的交流合作还有进一步深入的空间。

2.3　期刊、机构与作者分析

为追踪自动驾驶公交领域有影响力的期刊,使用CiteSpace对样本文献进行期刊共被引分析,得到自动驾驶公交研究期刊共被引图谱,如图4所示。节点大小与期刊的被引频次相关联,节点越大,代表被引频次越高,是该研究领域内核心、基础、热门的期刊。分析得出交通运输类学术期刊占主导地位,如《Transportation Research Part C: Emerging Technologies》《Transportation Research Part A: Policy and Practice》《Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board》等,体现了交通领域对自动驾驶公交主体研究的重视。值得注意的是,在此研究纳入分析的期刊样本中,部分期刊来源于其他学科领域,如心理学类《Journal of Applied Social Psychology》、环境科学与生态类《Science of the Total Environment》、能源工程类《Energies》、管理学类《Management Science》等,表明自动驾驶公交是一项跨学科的研究,心理学、环境科学与工程、能源工程、管理学等领域对自动驾驶公交的重视程度较高,学科之间呈现交叉研究的特点。

通过CiteSpace对发文机构进行共现分析,发掘该领域的主要研究机构,得到自动驾驶公交研究机构共现图谱,如图5所示。分析发现瑞典皇家理工

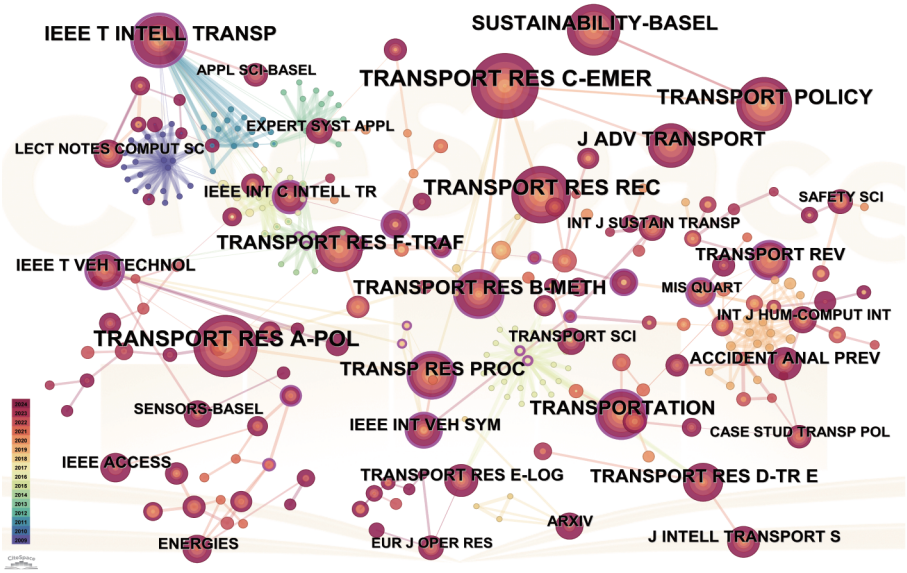


图4 期刊共被引网络

Fig. 4 Journal co-citation network

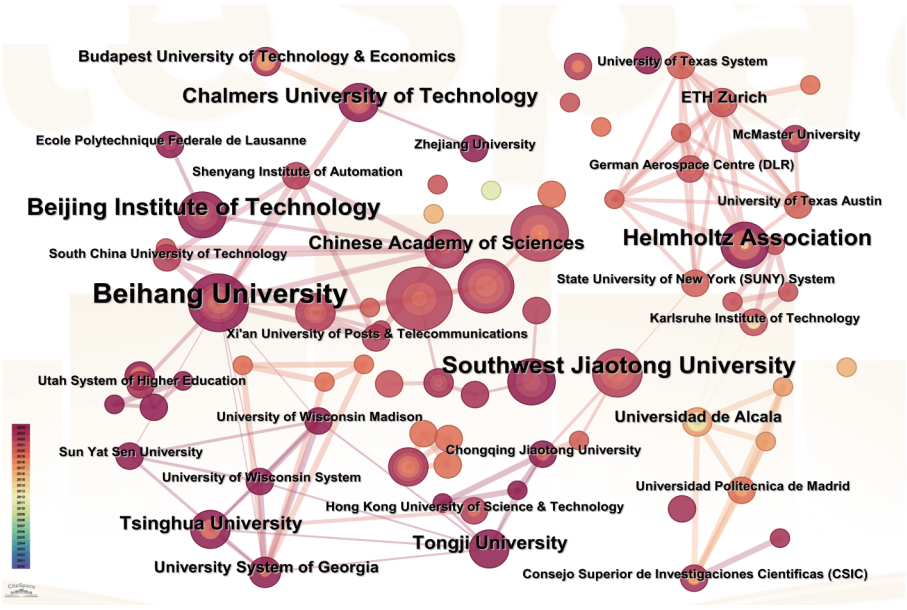


图5 机构共现网络

Fig. 5 Institution co-occurrence network

学院、北京航空航天大学、慕尼黑工业大学和南洋理工大学等机构发文量较多，分别为11篇、10篇、9篇和9篇，但中介中心性不高，分别为0.01、0.07、0和0。CiteSpace的中介中心性可衡量节点在整个合作网络中的战略重要性和桥梁作用，若中介中心性大于0.1，则认为具有显著性，CiteSpace会自动为其标注紫环，整体来看，没有机构的中介中心性大于0.1，表明当前机构间的合作还有待加强。受网络剪枝与最大连通分支筛选影响，上述部分低中心性的高产机构在图中表现为孤立节点而未显现。在国际间的机构合作中，受到技术保密、数据保护、法律法规差异、研发重点的区域性偏好等因素影响，机构间的合作关系尤为薄弱。如欧洲侧重郊区接驳研究，中国侧重城市微循环研究，各国研究多聚焦

本土场景。

为追踪本领域有影响力的学者，使用CiteSpace对样本文献的作者进行共被引分析，得到自动驾驶公交研究作者共被引图谱，如图6所示。节点大小与作者的被引频次相关联，节点越大，被引频次越高，是该研究领域内具有奠基性和核心影响力的学者。分析得出被引频次较高的国外作者主要有University of Texas at Austin的法格南特·丹尼尔（Fagnant DJ）、University of California Davis的诺德霍夫·西娜（Nordhoff S）、University of Eastern Finland的萨洛宁·阿托（Salonen AO）等。被引频次较高的国内作者主要有天津大学的刘鹏（Liu P）、北京航空航天大学的代壮（Dai Z）、南通大学曹志超（Cao ZC）等。

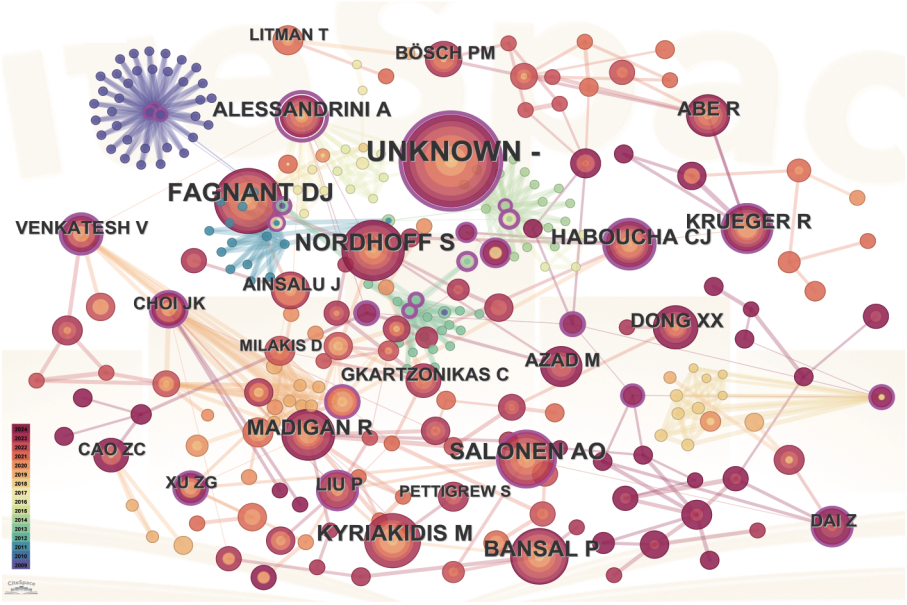


图6　作者共被引网络

Fig. 6　Author co-citation network

3　研究发展趋势分析

通过CiteSpace的关键词聚类分析，将自动驾驶公交研究热点的演化趋势按年份聚类，得到自动驾驶公交领域文献关键词时间线和分支聚类图，如图7所示。知识图谱的聚类效果主要通过模块值（Modularity Q）与平均轮廓值（Mean Silhouette S）两项指标进行量化评估。模块值用来衡量网络模块化结构的强度，当模块值大于0.3时，认为聚类结构显著，图谱划分出的不同群落是合理的，模块值越大，聚类效果越好。平均轮廓值用来衡量每个聚类内部成员的同质性，当平均轮廓值大于0.5时，认为聚类结果合理，当平均轮廓值大于0.7时，认为聚类结果是令人信服且高效的，集群内部高度同质，边界清晰。图7中模块值为0.76，说明聚类结构显著，平均轮廓值为0.90，说明聚类结果令人信服且高效。此外，图谱横轴由左至右对应文献发表时间从早期到近期的演进历程，彩色连接线则直观标识出相关文献在特定年份新增的共引关联。

分析图7可知，自动驾驶公交的研究大致经历了3个阶段。

第1阶段（2009—2014年）：高频关键词为“autonomous vehicle”“algorithm”“obstacle detection”等，研究多聚焦于自动驾驶公交技术实现，通过智能算法处理多传感器数据，让自动驾驶公交更好避开障碍物，实现自动驾驶功能。如使用GPS传感器实现自动导航，配备激光成像探测与测距传感器用于环境重建和障碍物检测，并采用控制算法生成运动指令[27]。

第2阶段（2015—2019年）：高频关键词为“autonomous bus”“user acceptance”“stated preference”“car use adoption”“design”“strategy”等，研究多聚焦于乘客对自动驾驶公交的使用意愿及实际满意度，以及如何有效提升用户接受度。如研究社会利益、

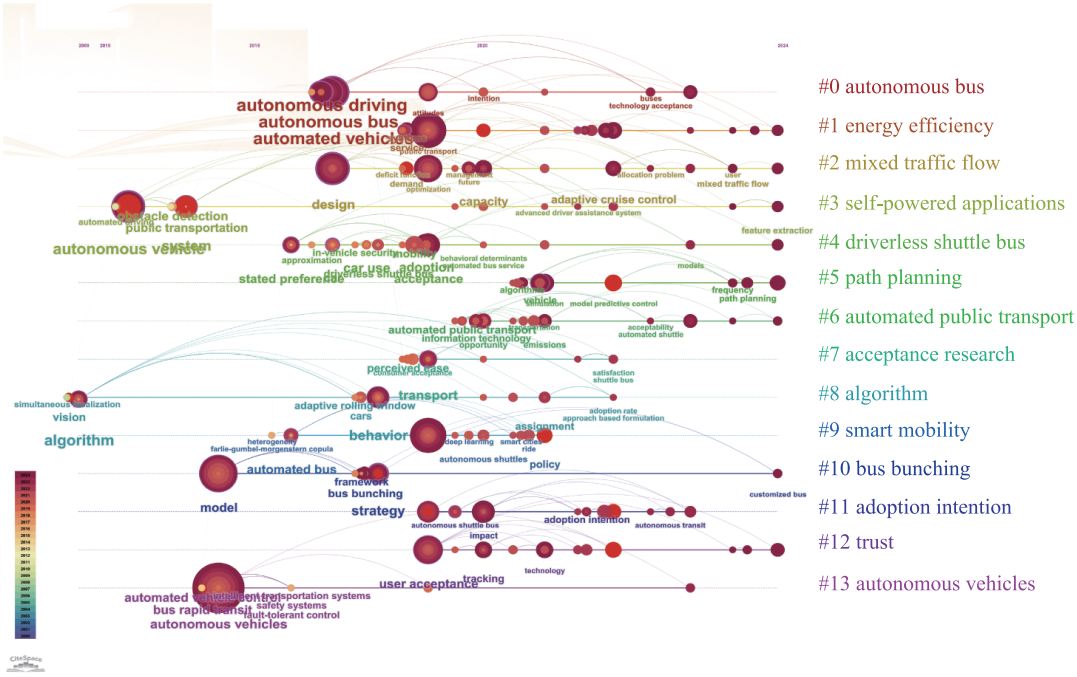


图7 关键词时间线和分支聚类

Fig. 7 Keyword timeline and hierarchical clustering

态度及技术普及等因素对自动驾驶巴士接纳程度的影响[24]，车辆的加速度和颠簸处理[28]，服务频率规划[29]，灵活路线[30-31]、灵活时刻表[32-35]，补贴激励[20-22]等。各种规模化的问卷与量表、定量与定性分析方法得到广泛运用。

第3阶段（2020—2024年）：高频关键词为“adoption intention”“path planning”“mixed traffic flow”“adaptive cruise control”“policy”等，研究继续聚焦用户的使用意愿，同时更加注重自动驾驶公交的现实应用，包括精准路径跟踪控制框架[36-38]、混合交通环境下安全变道[39]、自适应巡航控制的能源管理[40]和防旁车插队干扰[41]、政策对应用普及的影响[42]等。

4 研究热点分析

为进一步厘清自动驾驶公交主题的研究热点，对图7的聚类结果#0~#13进行分析。研究主要围绕“autonomous bus”“energy efficiency”“mixed traffic flow”“acceptance research”等展开，各研究分支间相互融合、彼此渗透。其中“autonomous bus”“driverless shuttle bus”“path planning”“automated public transport”“algorithm”“smart mobility”“autonomous vehicles”等关注公交的自动化功能，研究内容主要有高精度环境感知、自主决策与路径规划、精准控制与执行等；“energy efficiency”“self-powered applications”“path planning”“algorithm”等关注自动驾驶公交的能源效率，研究内容主要有驾驶行为优化、智能调度与运营、新能源技术协同等；“mixed traffic flow”“path planning”“bus bunching”“algorithm”等关注混合交通流对自动驾驶公交的影响，研究内容主要有动态行为预测与风险识别、车路协同、边缘计算与云端协同等；“acceptance research”“adoption intention”“trust”等关注自动驾驶公交的用户接受度，研究内容主要有降低技术顾虑、增强用户体验、构建社会共识、政策与设施协同支持等。

根据图谱中聚类之间的关系、聚类文献量与研究侧重点、关键节点的文献内容，得到迈向无人化的自动驾驶公交、注重节能减排的自动驾驶公交、混合交通流环境下的自动驾驶公交、关注用户接受度的自动驾驶公交4个研究热点，研究框架如图8所示。

4.1 迈向无人化的自动驾驶公交

迈向无人化的自动驾驶公交，是智能交通领域的重要探索方向，即在传统自动驾驶技术基础上，针对公交场景的特殊性进行强化，包括高精度环境感知、自主决策与路径规划、精准控制与执行等相

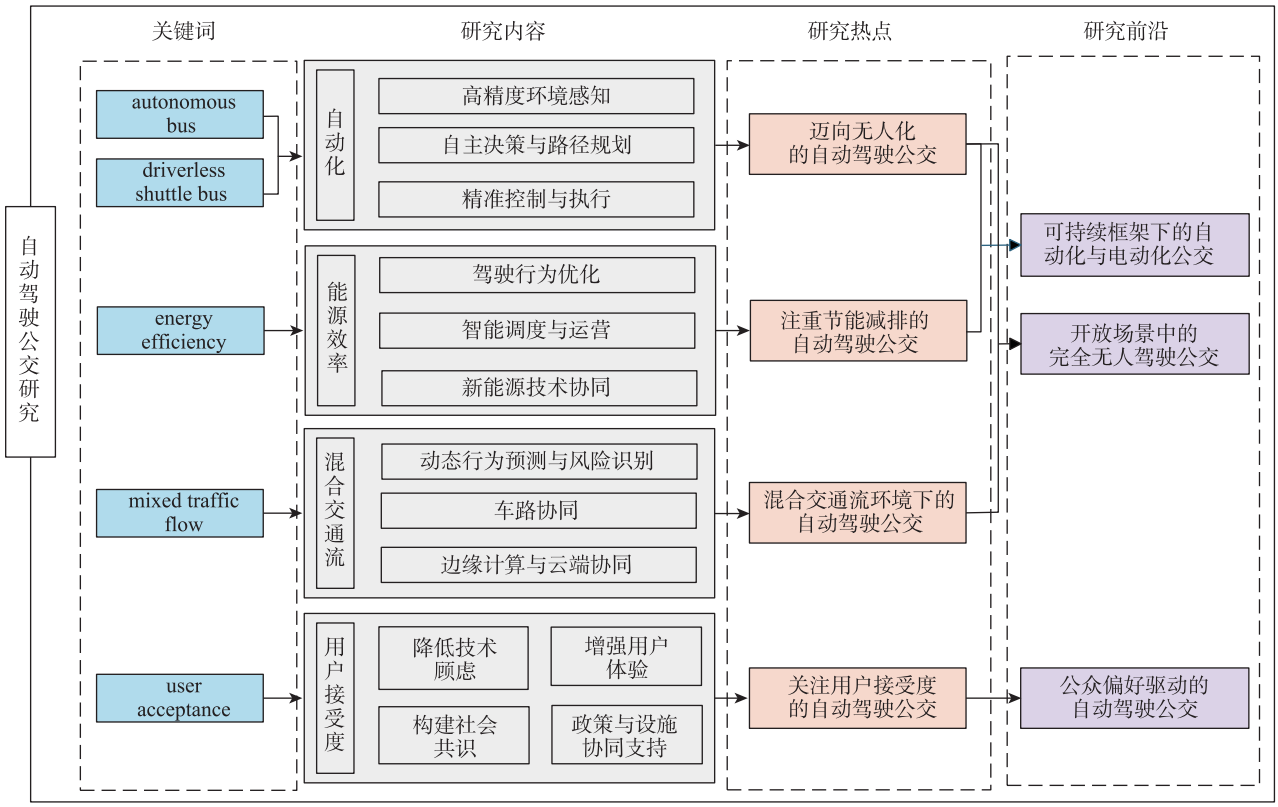


图8　研究框架

Fig. 8　Research framework

关技术与应用。

在高精度环境感知方面,公交车辆体型大、盲区多、停靠频繁,需要有效利用激光雷达、毫米波雷达、摄像头、超声波等传感器数据,精准识别周边环境。多模态融合方法实现了多源信息的协同交互处理[3-4]。在自主决策与路径规划方面,公交路线固定,但实时路况可变,所以在使用高精地图时,还需要结合红绿灯、拥堵等实时交通数据动态调整速度和路径。避障路径规划算法提高了无人驾驶公交的避障安全[43]。在精准控制与执行方面,公交车辆吨位大、轴距长,加速制动响应与乘用车不同,需针对其动力学特性,如制动惯性、转向半径,优化控制算法,避免急刹导致乘客摔倒、转向过急引发侧翻等情况。结合不确定性观测器的滑模控制器可抑制车辆抖振现象,同时提升系统鲁棒性并维持控制性能[8]。

4.2　注重节能减排的自动驾驶公交

随着城市化进程的加速,发展高效、安全、经济、清洁且可持续的公共交通系统始终是提升城市交通效能的关键课题[24, 42, 44-46]。自动驾驶公交作为智能交通的重要载体,其在节能减排领域的潜力不仅源于技术本身对车辆运行效率的优化,更在于通过提升公共交通的便利性和可靠性,吸引更多乘客选择公交出行,减少私家车使用,从而降低整个城市交通系统的碳排放。相关技术与应用主要有驾驶行为优化、智能调度与运营、新能源技术协同等。

在驾驶行为优化和新能源技术协同方面,传统公交的能耗与排放很大程度上受驾驶员操作习惯影响,自动驾驶系统通过精准的算法控制,可实现最优能耗驾驶,同时新能源的使用也可有效降低碳排放。如优化行驶速度曲线[47]能有效降低自动驾驶巴士的能耗,非线性跟踪控制算法[48]能在确保插电式混合动力公交跟踪精度的同时提升其燃油效率。此外,新型能量再生减震器还能将所获能量用于无人驾驶电动巴士[49-50]。在智能调度与运营方面,传统公交线路固定、频次固定,常导致高峰时段拥挤、平峰时段空驶,自动驾驶公交通过路线优化、动态发车、车群协同等方式,可从根源上减少无效能耗。规划算法可实时优化公交线路,动态适应乘客出行需求[31]。停车和速度调节策略可应对实时

需求波动导致的时刻表调整，并减少行程时间和主动能耗[32]。低成本方法可评估车队行驶的能耗与排放影响，在公交和汽车混合编队场景中，车辆位置调整效果最突出[51]。道路的模块化动态区域系统可有效遏制私人车辆的过度使用[19]。

4.3 混合交通流环境下的自动驾驶公交

混合交通流，即自动驾驶公交与人工驾驶车辆、非机动车、行人等在同一道路空间共存的场景，是自动驾驶公交从封闭园区走向城市开放道路的核心挑战场景。相较于封闭环境，混合交通流环境下交通参与者的行为具有强随机性。道路类型、违法变道、未按规定让行以及不当制动等因素对交通事故具有显著影响[52]。相关技术与应用主要有动态行为预测与风险识别、车路协同、边缘计算与云端协同等。

在动态行为预测与风险识别方面，当多个交通参与者互动时，需考虑其相互影响，并进行风险识别。主动防干扰跟随控制方法能有效缓解旁车插队带来的干扰，提升乘客舒适度并抑制多车连环碰撞[41]。将自动驾驶公交的实际运行数据从时空维度转化为灰度图像和雷达图像，并用深度学习卷积神经网络识别图像，可实现风险识别[53]。在车路协同方面，通过与路侧设备、交通信号灯、其他车辆的实时通信，可提前获取单车感知盲区的信息，减少不确定性，缩短决策响应时间。捕捉混合交通流动态的新型分析模型，能减少因公交站点的设置等因素导致车道变更和额外延误[54]。在边缘计算与云端协同方面，混合交通流的路况变化快，需通过“车-边-云”协同架构，将部分计算任务从云端下沉至边缘节点，如路侧边缘服务器，缩短决策延迟。基于数据采集与边缘计算需求的智能公交控制器设计方案，广泛应用于公交车辆[9]。

4.4 关注用户接受度的自动驾驶公交

自动驾驶公交作为智慧交通的重要载体，其商业化落地不仅依赖技术成熟度，更取决于用户接受度，包括乘客信任、公众认同以及社会层面的支持。提升用户接受度需技术优化与社会协同双管齐下，包括降低技术顾虑、增强用户体验、构建社会共识、政策与设施协同支持等。

在降低技术顾虑方面，专职司机陪同是推动自动驾驶早期普及的关键要素[55]。在增强用户体验方面，体验升级，如提升舒适性、安全性、灵活性等可有效提升用户的选择意愿。例如，自主巴士分层纵向运动规划策略能在保持行车安全的同时显著提升乘坐舒适度[56]。多模态异常事件检测框架可用于无人驾驶公交提升乘客出行安全[57]。无人驾驶电动公交接驳路径优化方法可提高出行者异质化需求满意度[58]。服务时刻和车辆调度优化方案能有效缩短乘客行程时间，并减少接驳车使用量[33]。在构建社会共识方面，乘车体验[30,59]、公众教育与认知提升[15,22]可提高公众对新型交通方案的整体接受度。在政策与设施协同支持方面，完善道路基础设施和建立法律框架[23-24]可推广自动驾驶公交应用；专业的公交司机可转型为运营员和维修工[2]，承担全新职责；此外，自动驾驶公交补贴激励[20-22]、自动驾驶公交保险保障[22]等政策，也可以鼓励更多人使用自动驾驶公共交通。

5 研究前沿分析

在某一时间内，出现频率突发性增长的关键词被定义为突现词，这类词能够反映出对应时间段内学术界的新兴研究热点。从研究趋势的表征来看，突现强度越大，代表以该关键词为核心所开展的相关主题研究其前沿发展趋势越明显。使用CiteSpace软件进行分析，得到前20个突现关键词，如图9所示。图中Year、Strength、Begin、End分别代表突现关键词首次出现的年份、强度、开始爆发的年份、结束爆发的年份，图中突现关键词是按开始爆发的年份进行排序。

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2000–2024
vision	2009	1.35	**2009**	2013	
obstacle detection	2013	1.28	**2013**	2017	
bus rapid transit	2014	1.35	**2014**	2016	
automated vehicle control	2014	1.35	**2014**	2016	
car	2017	1.2	**2017**	2020	
autonomous vehicle	2011	2.39	**2018**	2021	
strategy	2018	1.76	**2018**	2019	
cars	2018	1.29	**2018**	2020	
car use	2018	1.13	**2018**	2019	
demand	2019	1.88	**2019**	2020	
preferences	2019	1.47	**2019**	2020	
adoption	2019	1.24	**2019**	2020	
choice	2020	1.65	**2020**	2021	
autonomous shuttles	2020	1.24	**2020**	2021	
attitudes	2019	1.22	**2020**	2021	
policy	2021	1.95	**2021**	2022	
electric vehicles	2022	2.44	**2022**	2024	
system	2013	2.1	**2022**	2024	
public acceptance	2022	2.03	**2022**	2024	
model predictive control	2022	1.45	**2022**	2024	

图9 突现关键词

Fig. 9 Keywords with the strongest citation bursts

分析得到,自动驾驶公交领域的研究前沿主要包括可持续框架下的自动化与电动化公交、开放场景中的完全无人驾驶公交和公众偏好驱动的自动驾驶公交。其中“自动化与电动化公交”是研究热点“无人化公交”在技术上的延续,与研究热点“注重节能减排的自动驾驶公交”在生态目标上协同。“开放场景中的完全无人驾驶公交”也是研究热点“无人化公交”在技术上的延续,与研究热点“混合交通流环境下的自动驾驶公交”应用场景相对应。“公众偏好驱动的自动驾驶公交”与研究热点“关注用户接受度的自动驾驶公交”市场需求相统一。

5.1　可持续框架下的自动化与电动化公交

可持续框架下的自动化与电动化公交包含自动驾驶汽车(autonomous vehicle)、电动汽车(electric vehicles)等关键词。

在全球双碳目标与城市可持续发展战略的推动下,融合自动化与电动化公交正成为破解交通拥堵、碳排放过高等城市病的创新方案。它并非简单的技术叠加,而是通过自动驾驶提升效率、电动化降低排放的双重协同,实现交通系统的低碳化、高效化和普惠化。如宇通客车推出的自动驾驶电动巴士,助力绿色智慧交通发展[60]。未来研究可聚焦车路协同与电网互动,实现公交能源网络动态调度,优化充电策略、降低峰谷电价差成本;探索氢燃料电池等新型能源的应用,提升公交续航里程,降低公交补能时间;研发低算力高鲁棒性的自动驾驶算法,节约自动驾驶公交能耗;制定以旧换新补贴机制,促进自动化与电动化公交的应用;开展电池回收与梯次利用研究,推动新能源公交全生命周期可持续性。

5.2　开放场景中的完全无人驾驶公交

开放场景中的完全无人驾驶公交包含自动驾驶汽车(autonomous vehicle)、视觉(vision)、障碍物检测(obstacle detection)、车辆自动控制(automated vehicle control)、模型预测控制(model predictive control)、策略(strategy)等关键词。

开放场景中的完全无人驾驶公交是指在无物理隔离、交通参与者复杂、环境动态变化的公共道路环境中,实现全流程自主运行的公交系统。与封闭园区、专用轨道等受限场景相比,开放场景的不确定性和复杂性呈指数级提升,是无人驾驶公交从技术验证迈向规模化商用的核心壁垒。开放场景无人驾驶公交的研究前沿正从技术单点突破转向系统生态重构。如杭州市余杭区通过车路协同、云端数据融合等技术构建自动驾驶公交新生态[61]。未来研究可聚焦多模态大模型赋予系统推理能力,让自动驾驶公交从感知驱动到认知驱动;5G-A与车路云一体化,将单车算力扩展至云端,构建全局协同的超级大脑,实现从单车智能到网络智能;伦理算法与公众信任机制建立,实现自动驾驶公交从工程理性到社会理性转变。

5.3　公众偏好驱动的自动驾驶公交

公众偏好驱动的自动驾驶公交包含公众接受度(public acceptance)、自动驾驶穿梭车(autonomous shuttles)、偏好(preferences)、需求(demand)、采用(adoption)、选择(choice)、态度(attitudes)、政策(policy)等关键词。

公众偏好驱动的自动驾驶公交是指在技术迭代与社会需求交互中,能够契合不同群体出行习惯、心理预期及利益诉求的自动驾驶公共交通系统。其核心在于通过技术优化、服务设计与社会协同,让自动驾驶公交从技术可行走向公众接受,最终实现规模化落地。如无锡市推出商用自动驾驶小巴士为民办事接驳线路,响应公益科技助老,同时面向多类院校,开设自动驾驶公交研学专线,推动科技走进生活[62]。未来研究可聚焦探索联邦学习和同态加密协同的技术,在保障数据安全与用户隐私的前提下,实现跨主体的用户偏好分析;推广需求实时响应的穿梭巴士,提升用户的使用偏好;开发因果推理可视化工具,使决策逻辑更易被非专业人士理解,避免黑箱效应引发信任危机;完善针对极端天气和突发事件的应急决策机制,建立弹性安全冗余模型。

6　结束语

运用科学计量分析方法,借助CiteSpace可视化图谱展示知识的宏观结构及其发展脉络优势,对233篇关于自动驾驶公交主题研究的文献进行深入分析,深化了对自动驾驶公交相关领域知识的理解,为制定更具科学依据的自动驾驶公交方案和相关社会支持措施提供经验与参考。研究得出以下结论。

1)从载文量、国家及地区特征来看,自动驾驶公交领域研究文献数量呈快速增长态势,国外对自动驾驶公交研究较多,研究热度持续时间较长,国内

虽然起始研究时间较晚，但研究成果处于领先地位。

2）从发文期刊、发文机构与作者特征来看，发现《Transportation Research Part C: Emerging Technologies》为自动驾驶公交领域的代表性期刊，随着研究内涵的不断扩展，该领域研究已经形成多学科交叉趋势，发文机构呈现大分散、小集聚的分布特点，作者共被引关系明显。

3）从关键词聚类结果来看，研究主要经历了自动驾驶公交技术实现、用户接受度提升和自动驾驶公交现实应用3个阶段，当前主要的研究热点聚焦在迈向无人化的自动驾驶公交、注重节能减排的自动驾驶公交、混合交通流环境下的自动驾驶公交和关注用户接受度的自动驾驶公交4个方面。

4）未来，在全球双碳目标与城市可持续发展战略的推动下，公交自动化与电动化融合的研究可进一步开展和深化。为了让完全无人驾驶公交从技术验证迈向规模化商用，面向开放场景的常态化运营与控制将是关键攻关方向。此外，随着自动驾驶公交从技术可行走向公众接受，能够契合不同群体出行习惯、心理预期及利益诉求的公众偏好研究，也是未来重要趋势。

参考文献：

[1] Tian Qingyun, Lin Yunhui, Wang D Z W. Autonomous and conventional bus fleet optimization for fixed-route operations considering demand uncertainty[J]. Transportation, 2021, 48(5): 2735-2763.

[2] Quarles N, Kockelman K M, Mohamed M. Costs and benefits of electrifying and automating bus transit fleets[J]. Sustainability, 2020, 12(10): 3977.

[3] Song Tao, Zheng Ying, He Shan, et al. MLIOM-AB: multi-LiDAR-inertial-odometry and mapping for autonomous buses[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(17): 28036-28048.

[4] Zhang Zheng, Xu Ruyu, Tian Qing. PIDFusion: fusing dense LiDAR points and camera images at pixel-instance level for 3D object detection[J]. Mathematics, 2023, 11(20): 4277.

[5] Tang Li, Shi Yunpeng, He Qing, et al. Performance test of autonomous vehicle lidar sensors under different weather conditions[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(1): 319-329.

[6] Xin Zilin, Wang Wenwei, Liang Sheng. Path following and lateral-yaw-roll stability integrated control method for autonomous distributed drive electric buses[J]. International Journal of Automotive Technology, 2023, 24(4): 1117-1128.

[7] Nie Zhigen, Zhou Yi, Lian Yufeng. Trajectory planning and tracking of dynamic lane change for autonomous buses considering vehicle stability in dynamic traffic scenarios[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2025, 239(9): 4284-4304.

[8] Hwangbo H, Ryu J, Han S, et al. Robust sliding mode control with optimal path following for lateral motion of autonomous bus[J]. IEEE Access, 2023, 11: 71981-71993.

[9] Yu Jiehan, Xie Zhendong, Dong Zhiguo, et al. Intelligent bus scheduling control based on on-board bus controller and simulated annealing genetic algorithm[J]. Electronics, 2022, 11(10): 1520.

[10] Salonen A O. Passengers' subjective traffic safety, in-vehicle security and emergency management in the driverless shuttle bus in Finland[J]. Transport Policy, 2018, 61: 106-110.

[11] Launonen P, Salonen A O, Liimatainen H. Icy roads and urban environments. Passenger experiences in autonomous vehicles in Finland[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2021, 80: 34-48.

[12] Yan Yingying, Zhong Shiquan, Tian Junfang, et al. Continuance intention of autonomous buses: an empirical analysis based on passenger experience[J]. Transport Policy, 2022, 126: 85-95.

[13] Herrenkind B, Brendel A B, Nastjuk I, et al. Investigating end-user acceptance of autonomous electric buses to accelerate diffusion[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 74: 255-276.

[14] Molinillo S, Caballero-Galeote L, Liébana-Cabanillas F, et al. Understanding users' willingness to travel on autonomous buses: the moderating effect of experience[J]. Journal of Retailing and Consumer Services, 2024, 81: 103931.

[15] DeGuzman C A, Mostafa T S, Othman K, et al. What influences intention to use a first-mile/last-mile automated shuttle service in a suburban area? A case study in Toronto, Canada[J]. Transportation Planning and Technology, 2025, 48(3): 536-554.

[16] Bucchiarone A，Battisti S，Marconi A，et al. Autonomous shuttle-as-a-service（ASaaS）：challenges，opportunities，and social implications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2021，22(6)：3790-3799.

[17] Schlüter J，Bossert A，Rössy P，et al. Impact assessment of autonomous demand responsive transport as a link between urban and rural areas[J]. Research in Transportation Business & Management，2021，39：100613.

[18] Mouratidis K，Peters S，Van Wee B. Transportation technologies，sharing economy，and teleactivities：implications for built environment and travel[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2021，92：102716.

[19] Gecchelin T，Webb J. Modular dynamic ride-sharing transport systems[J]. Economic Analysis and Policy，2019，61：111-117.

[20] Herrenkind B，Nastjuk I，Brendel A B，et al. Young people's travel behavior-using the life-oriented approach to understand the acceptance of autonomous driving[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2019，74：214-233.

[21] Tian Qingyun，Wang D Z W，Lin Yunhui. Optimal deployment of autonomous buses into a transit service network[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2022，165：102865.

[22] Golbabaei F，Paz A，Yigitcanlar T，et al. Navigating autonomous demand responsive transport：stakeholder perspectives on deployment and adoption challenges[J]. International Journal of Digital Earth，2024，17(1)：2297848.

[23] Beckmann S，Trojahn S，Zadek H. Process model for the introduction of automated buses[J]. Sustainability，2023，15(19)：14245.

[24] Chinen K，Sun Yang，Matsumoto M，et al. Towards a sustainable society through emerging mobility services：a case of autonomous buses[J]. Sustainability，2020，12(21)：9170.

[25] 严利鑫，贾乐，刘清梅，等. 基于知识图谱的生态驾驶行为研究现状及热点分析[J]. 公路交通科技，2022，39(4)：150-159.
Yan Lixin，Jia Le，Liu Qingmei，et al. Analysis on study status and hotspots of eco-driving behavior based on knowledge graph[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2022，39(4)：150-159.

[26] 朱震军，许馨方，和煜栋，等. 城市建成环境步行性研究进展：基于CiteSpace知识图谱的分析[J]. 浙江大学学报(理学版)，2025，52(4)：508-521.
Zhu Zhenjun，Xu Xinfang，He Yudong，et al. Research progress of the urban built environment walkability：using CiteSpace knowledge mapping analysis[J]. Journal of Zhejiang University（Science Edition），2025，52(4)：508-521.

[27] Fernández C，Domínguez R，Fernández-Llorca D，et al. Autonomous navigation and obstacle avoidance of a micro-bus[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems，2013，10(4)：212.

[28] Bae I，Moon J，Seo J. Toward a comfortable driving experience for a self-driving shuttle bus[J]. Electronics，2019，8(9)：943.

[29] Nguyen T，Xie Meng，Liu Xiaodong，et al. Platooning of autonomous public transport vehicles：the influence of ride comfort on travel delay[J]. Sustainability，2019，11(19)：5237.

[30] Salonen A，Haavisto N. Towards autonomous transportation. passengers' experiences，perceptions and feelings in a driverless shuttle bus in Finland[J]. Sustainability，2019，11(3)：588.

[31] Li Hongle，Kim S. Efficient route planning for real-time demand-responsive transit[J]. Computers，Materials & Continua，2024，79(1)：473-492.

[32] Cao Zhichao，Ceder A A，Zhang Silin. Real-time schedule adjustments for autonomous public transport vehicles[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2019，109：60-78.

[33] Cao Zhichao，Ceder A A. Autonomous shuttle bus service timetabling and vehicle scheduling using skip-stop tactic[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2019，102：370-395.

[34] Varga B，Tettamanti T，Kulcsár B. Optimally combined headway and timetable reliable public transport system[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2018，92：1-26.

[35] Wang Yun，Zhou Yu，Yan Xuedong. Autonomous bus timetable synchronization for maximizing smooth transfers with passenger assignment[J]. Expert Systems with Applications，2022，193：116430.

[36] He Hongwen，Shi Man，Li Jianwei，et al. Design and experiential test of a model predictive path following con-

trol with adaptive preview for autonomous buses[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 157: 107701.

[37] Shangguan Jinyong, Yue Ming, Qi Huanyu, et al. Coordinated control of path tracking and energy optimization for in-wheel motor drive electric buses with velocity estimation [J]. European Journal of Control, 2022, 65: 100641.

[38] Shi Man, He Hongwen, Li Jianwei, et al. Path planning and following control of autonomous bus under time-varying parameters against parametric uncertainties and external disturbances[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(7): 7057-7070.

[39] Ma Yitao, Liu Qiang, Fu Jie, et al. Collision-avoidance lane change control method for enhancing safety for connected vehicle platoon in mixed traffic environment[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 184: 106999.

[40] Shi Man, He Hongwen, Li Jianwei, et al. Multi-objective tradeoff optimization of predictive adaptive cruising control for autonomous electric buses: a cyber-physical-energy system approach[J]. Applied Energy, 2021, 300: 117385.

[41] Xie Hui, Xiao Pengbo. Cooperative adaptive cruise algorithm based on trajectory prediction for driverless buses [J]. Machines, 2022, 10(10): 893.

[42] Jiang Like, Chen Haibo, Paschalidis E. Diffusion of connected and autonomous vehicles concerning mode choice, policy interventions and sustainability impacts: a system dynamics modelling study[J]. Transport Policy, 2023, 141: 274-290.

[43] 李玉龙, 谢辉, 宋康. 无人驾驶公交车基于循迹误差观测和目标测量误差观测的避障路径规划算法[J]. 汽车安全与节能学报, 2024, 15(4): 579-590.
Li Yulong, Xie Hui, Song Kang. An obstacle avoidance path planning algorithm for autonomous buses based on tracking error observation and target measurement error observation[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2024, 15(4): 579-590.

[44] Gu Peiqin, He Dongxu, Chen Yulin, et al. Transit-oriented development and air quality in Chinese cities: a city-level examination[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 68: 10-25.

[45] Ray R S. The politics of prioritizing transit on city streets [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, 2673(3): 733-742.

[46] Scorcia H, Munoz-Raskin R. Why South African cities are different? comparing Johannesburg's rea vaya bus rapid transit system with its Latin American siblings[J]. Case Studies on Transport Policy, 2019, 7(2): 395-403.

[47] Torabi S, Bellone M, Wahde M. Energy minimization for an electric bus using a genetic algorithm[J]. European Transport Research Review, 2020, 12(1): 2.

[48] Shangguan Jinyong, Yue Ming, Fang Chao, et al. Fuel economy-oriented trajectory tracking control strategy for plug-in hybrid electric buses[J]. Asian Journal of Control, 2022, 24(6): 2993-3005.

[49] Li Hai, Zheng Peng, Zhang Tingsheng, et al. A high-efficiency energy regenerative shock absorber for powering auxiliary devices of new energy driverless buses[J]. Applied Energy, 2021, 295: 117020.

[50] Ali A, Qi Lingfei, Zhang Tingsheng, et al. Design of novel energy-harvesting regenerative shock absorber using barrel cam follower mechanism to power the auxiliaries of a driverless electric bus[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 48: 101565.

[51] Zhang Yixin, Chen Xumei, Ma Jiaxin, et al. Environmental impact of autonomous cars considering platooning with buses in urban scenarios[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 101: 105106.

[52] 严利鑫, 胡鑫辉, 刘清梅, 等. 道路交通事故严重程度预测及致因分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 65-73.
Yan Lixin, Hu Xinhui, Liu Qingmei, et al. Road traffic accident severity prediction and causation analysis[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 65-73.

[53] Cheng Sijie, Wang Jiangfeng. Deep learning method for risk identification of autonomous bus operation considering image data augmentation strategies[J]. Traffic Injury Prevention, 2023, 24(3): 232-236.

[54] Wang Tianqi, Li Xin, Qin Binbin, et al. Estimation of mixed traffic flow including the impact of bus bay in the connected environment[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2024: 1-18.

[55] Kaplan L, Helveston J P. Undercutting transit? exploring potential competition between automated vehicles and public transportation in the United States[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2024, 2678(7): 656-673.

[56] Jo A, Yoon Y. Enhancing ride comfort and driving safety in urban autonomous buses: a data-driven hierarchical longitudinal motion planning using approximate and stochastic MPCs[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2025, 239(6): 1848-1871.

[57] Tsiktsiris D, Lalas A, Dasygenis M, et al. Multimodal abnormal event detection in public transportation[J]. IEEE Access, 2024, 12: 133469-133480.

[58] 奇格奇，邹恺杰，邹婕，等. 面向异质化需求的无人驾驶电动公交接驳路径优化[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2022，62(7)：1178-1185.
Qi Geqi, Zou Kaijie, Zou Jie, et al. Feeder transit routing optimization of driverless electric buses for heterogeneous demands[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(7): 1178-1185.

[59] Namgung H, Chikaraishi M, Fujiwara A. Influence of real and video-based experiences on stated acceptance of connected public transportation and autonomous vehicles in a transit mall: a hybrid choice modeling approach [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2023, 173: 103695.

[60] 肖献法. 宇通客车：发布L4级微循环公交车2.0版，全明星车型亮相2020运输展[J]. 商用汽车，2020(12)：97-99.
Xiao Xianfa. Yutong bus: release L4 level microcirculation bus 2.0 with all-star model unveiled 2020 China Beijing international exhibition on buses, trucks & components[J]. Commercial Vehicle, 2020(12): 97-99.

[61] 童宇，梁小溪. 驶向未来：余杭自动驾驶公交接驳线的实践探索[J]. 人民公交，2025(11)：53-57.
Tong Yu, Liang Xiaoxi. Sailing towards the future: practical exploration of Yuhang self-driving bus connection line [J]. People's Public Transportation, 2025(11): 53-57.

[62] 华贤平，吴烨，徐健秋，等. 基于MaaS理念智慧出行的自动驾驶小巴运营模式应用研究：江苏无锡市级实践[J]. 人民公交，2025(11)：49-52.
Hua Xianping, Wu Ye, Xu Jianqiu, et al. Research on the application of self-driving minibus operation mode based on MaaS concept of smart travel: Wuxi city-level practice in Jiangsu Province[J]. People's Public Transportation, 2025(11): 49-52.



第一作者：吴霜(1989—)，女，博士研究生，研究方向为智能车路关键技术。E-mail：wushuang2025163@163.com。



通信作者：严利鑫(1988—)，男，教授，博士，博士生导师，赣鄱俊才支持计划主要学科学术和技术带头人青年人才，国家自然科学基金委函评专家，中国交通运输协会青年科技工作者委员会委员。研究方向为智能车路关键技术。E-mail：yanlixinits@163.com。

(责任编辑：吴海燕)