

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.07.020

超高速公路设计标准研究综述与展望

周建¹, 李雨璇^{*1,2}, 李欣¹, 周荣贵¹, 王光东^{3,4}

(1. 交通运输部公路科学研究院 公路交通安全技术交通运输行业重点实验室, 北京 100088;

2. 公安部道路交通安全研究中心, 北京 100062;

3. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;

4. 干旱荒漠区公路工程技术交通运输行业重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830099)

摘要: 从超高速公路概念与分级、驾驶适应性与人因、几何线形设计标准、沿线设施设计标准、交通组织与管理等方面的研究现状进行归纳和综述。结果表明: 超高速公路最高设计速度取140~160 km/h时, 通过提速改造或新建的方式满足当前普通小客车的思路, 更适当前的交通发展现状; 超高速驾驶适应性、人因与驾驶行为方面的研究还未系统开展; 几何线形设计标准方面相关研究普遍基于车辆动力学理论推荐, 但结果存在一定的差异; 缺少基于驾驶人和车辆超高速行驶适应性和稳定性的验证研究, 缺少交通流基础规律和适应交通量标准研究; 缺少互通式立交、隧道、服务设施、安全设施、路面条件等设施方面的研究, 应进一步结合人因与驾驶行为、车辆动力学特性系统开展相关研究; 缺少交通流组织与管理方式方面的研究, 当前条件下, 如何从空间上分离不同特性的车辆、降低干扰、保证超高速功能的发挥, 需要从驾驶行为规则、限速管理、车道管理、车型管理等方面开展研究; 应加强不良天气管理、应急救援管理、日常养护管理等方面的研究, 确保超高速公路功能正常发挥; 研究手段方面, 考虑到驾驶人和车辆超高速行驶适应性、规律性和稳定性方面的问题, 应该大量补充基于实车试验、驾驶模拟试验等手段的研究。

关键词: 交通工程; 超高速公路; 综述; 自然驾驶; 人因; 几何线形; 沿线设施; 公路管理

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2024) 07-0172-13

Review and Prospect on Superhighway Design Standard

ZHOU Jian¹, LI Yu-xuan^{*1,2}, LI Xin¹, ZHOU Rong-gui¹, WANG Guang-dong^{3,4}

(1. Key Laboratory of Highway Traffic Safety Technology and Transportation Industry, Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. Research Center for Road Traffic Safety, Ministry of Public Security, Beijing 100062, China;

3. Xinjiang Institute of Transportation Planning and Survey Design Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000, China;

4. Key Laboratory of Highway Engineering Technology and Transportation Industry in Arid Desert Region, Urumqi, Xinjiang 830099, China)

Abstract: This paper summarizes and reviews the research status quo of concept and classification of superhighway, driving adaptability and human factors, geometric alignment design standard, roadside facilities design standard, traffic organization and administration, etc. The result indicates that when the maximum design speed of superhighway is 140-160 km/h, the idea of serving current demand for ordinary passenger cars speed increase through the speed-up reconstruction or new construction is more suitable for the current traffic development situation and demand. The research on adaptability, human factors and driving behavior of superhigh speed driving has not been systematically carried out. In terms of geometric alignment

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 新疆交通投资(集团)有限责任公司科技研发计划资助项目(ZQG-FWCG-202011-015)

作者简介: 周建(1981-), 男, 河北吴桥人, 硕士, 研究员。(361627631@qq.com)

通讯作者: 李雨璇(1998-), 男, 辽宁铁岭人, 硕士。(yuxuanli1123@gmail.com)

design standards, the research is generally carried out based on vehicle dynamics theory; however, due to different selected preconditions, the results are somewhat different. There is a lack of validation research based on adaptability, regularity and stability of drivers, and vehicles driving at super-high speed. There is a lack of research on basic rules of traffic flow and applicable traffic volume standards. There is a lack of research on facilities, e. g., interchanges, tunnels, service facilities, safety facilities, and road conditions, which should be further carried out combining with human factors, driving behavior, and vehicle dynamics. There is a lack of research on traffic flow organization and administration methods. Under the current conditions, it is impossible to exclude the interference of other vehicles from the actual expressway. How to separate vehicles with different characteristics spatially, and ensure the exertion of superhigh speed function? That needs to be studied from the aspects of driving behavior rules, speed limit management, lane management, and vehicle type management, etc. Simultaneously, the research on bad weather management, emergency rescue management and daily maintenance management to ensure the normal functioning of superhigh speed should be strengthened. In terms of research methods, considering the adaptability, regularity, and stability of drivers and vehicles for superhigh speed driving, a large amount of research based on real vehicle experiments, driving simulation experiments, and other means should be supplemented.

Key words: traffic engineering; superhighway; review; naturalistic driving; human factor; geometric alignment; roadside facility; highway administration

0 引言

新发展形势下,经济社会发展对交通运输效率要求越来越高。随着高速公路建设养护质量逐步得到保障,车辆动力性能和安全性能的稳步提升,自动驾驶和车路协同等先进技术的逐步落地,人们对提高出行效率的期待也越来越高。尤其是地形平坦、线形指标高的戈壁荒漠草原等地广人稀的地区,120 km/h的最高速度限制越来越不能适应出行者日益增长的效率追求,阻碍了高速公路基础设施的提质增效和潜能发挥。于是,超高速公路的概念逐步被提出、关注和研究。在对超高速公路国外运营实践、中国在限速值方面的差距、超高速驾驶期望与建设需求、经济可行性、安全可行性等相关研究现状进行归纳和综述^[1]的基础上,明确了当前中国建设超高速公路、提升设计速度体系具有必要性、迫切性和可行性。

由于设计速度是高速公路设计标准的最核心控制指标,速度也是高速公路运行安全的关键因素,国内外研究学者和机构已经开展了一系列针对超高速公路的研究。利用 Web of Science 核心合集数据库针对关键词“unrestricted speed highway (freeway)”和“superhighway”进行英文文献检索,排除检索类别、研究方向中信息科学图书馆学、计算机科学、材料科学、电信学、能源学等无关文献,检索更新

日期为2023年8月1日。最终共检索到18篇英文期刊论文和会议论文,共涉及52位作者及84个关键词,其中高速公路仅为6篇。超高速公路领域的国外研究被引频次总体呈波动趋势如图1所示。

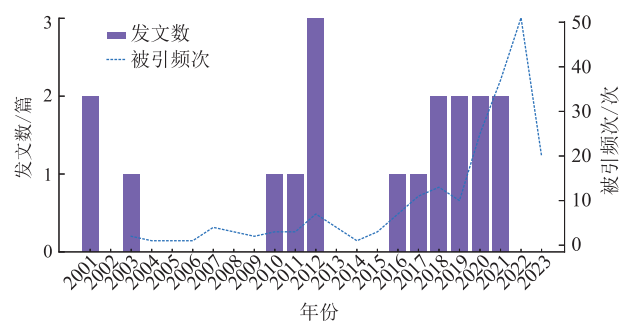


图1 国外超高速公路领域文献数量变化情况

Fig. 1 Quantity variation on literature on foreign superhighway

排除49个无关联性关键词后,剩余的35个关键词共聚类为3类。由于文献数量较少、主题杂乱(涉及自行车交通等),导致共现分析结果较为离散,文献关键词共现分析相关性较弱。

利用 CNKI 知网数据库检索关键词“超高速公路”、“超级高速公路”、“不限速高速公路”,筛选交通运输学科文献,共检索到54篇论文,相关性筛选后共有30篇文献。中国在超高速公路领域的研究基本从2016年开始,总体呈上升趋势,尤其是2022年显著增加(见图2)。利用 VOSviewer 软件进行共

现分析,文献关键词出现频次由高到低依次为超高速公路、超级高速公路、交通安全等。有 8 个关键词出现 2 次,有 73 个关键词仅出现 1 次。

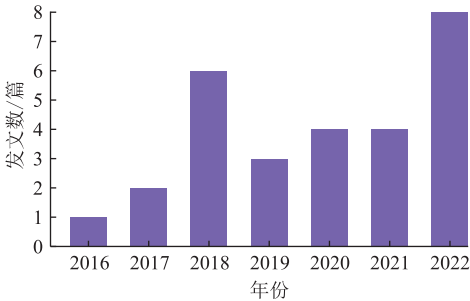


图 2 中国超高速公路领域文献数量变化情况
Fig. 2 Quantity variation on literature on China's superhighway

在排除无关联性关键词后,剩余关键词共聚类为 13 类,包括限速与事故严重程度、路线设计、可行性与油耗分析、时间效益与通行能力、自动驾驶与虚拟轨道等。从时间层面可以看出,自 2016 年中国提出超高速公路的概念以来,国内学者围绕超高速公路的建设与发展开展了一系列研究,研究主题从讨论限速与安全的关系、出行成本与通行能力,逐渐过渡到几何线形指标与新兴智能技术的应用上。总的来看,中国关于超高速公路的各方面研究正在逐步展开,目前超高速公路领域的研究主题较为离散,与其概念的前沿性、创新性有关。

超高速公路领域的国外研究被引频次总体呈波动趋势,文献关键词共现分析相关性较弱。中国超高速公路研究呈现逐年增长的趋势。但目前研究主题较为离散,与其概念的前沿性、创新性有关。研究方向还不够清晰,研究内容还不够系统完善;研究手段还比较单一,距离设计标准应用仍有很大差距;研究成果还不够系统全面,没有在行业内形成统一的标准,因此不能有效指导超高速公路的设计和实施。因此,有必要对已有的研究进行系统梳理、总结和展望,分析当前研究的热点和面临的问题,明确下一步研究的重点和方向。本研究先对超高速公路概念与分级进行了回顾,进一步考虑“人”的因素在交通系统中的核心地位,分析了驾驶适应性与人因研究成果,然后分别从几何线形设计标准、沿线设施设计标准、交通组织与管理标准等 3 个方面展开。几何线形和沿线设施是公路基础设施的重要组成部分,而超高速公路对相关条件的要求更严格,更需要从日常管理标准方面进行思考和综述。

1 超高速公路概念与分级

国外并没有超高速公路这一公路等级,国内外高速公路仅存在设计速度值的差异。从高速公路发展历史来看,一方面欧美很多国家高速公路设计速度普遍比中国高。欧洲各国高速公路曾采用过 160 km/h 设计速度,后来由于提高速度取得的经济效益与为提高速度而增加的工程造价不相适应,又陆续降低设计速度在 140 km/h 以下^[2]。其中受关注度最高的是德国不限速高速公路,德国 62% 的高速公路不限制小客车行驶速度,但建议速度采用 130 km/h^[3-4];法国、俄罗斯、西班牙高速公路最高设计速度为 130 km/h;澳大利亚、意大利、阿根廷、阿联酋、波兰等最高设计速度为 140 km/h;美国 AASHTO—2018 也将高速公路设计速度提高至 140 km/h;同时意大利已启动立法将最高限速提升至 150 km/h^[5-10]。

随着自动驾驶和车路协同技术的发展和逐步落地,催生了对人工智能代替自然驾驶超越人类反应操作能力进而提高车辆行驶速度的期待。为了与目前高速公路 120 km/h 最高设计速度有所区别,中国部分学者使用了“超高速公路”、“超级高速公路”、“不限速高速公路”和“小客车专用高速公路”等名称展开相关研究。中国文献关于超高速公路等级划分情况汇总见表 1。

表 1 中国超高速公路等级划分

Tab. 1 Classification on China's superhighway

等级划分	设计车速/(km·h ⁻¹)	建设方式	服务对象
超 1 级	100, 120, 140 或 100, 120, 140, 160	既有高速提速改造	普通客货混行
超 2 级	120, 140, 160 或 140, 160, 180, 200	参照铁路动车线路新建	乘用车专用
超 3 级	140, 160, 180 或 180, 200, 220, 240	参照高速铁路线路新建	自动驾驶汽车专用
超 1 级	120, 140, 160	参照普快列车提速既有高速改造	Level 3 以上的智能汽车
超 2 级	140, 160, 180	参照铁路动车线路新建	Level 4 以上的智能汽车
超 3 级	160, 180, 200	参照高速铁路线路新建	Level 4 以上的智能汽车
超高速	130, 140, 150	—	适应当前技术需要
小客车专用高速	140	新建	普通小客车

2016年,何永明等^[11-15]第1次对超高速公路进行定义:计算行车速度超过120 km/h的高速公路,超高速公路也属于高速公路,它采用比《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)更高的技术指标。根据使用任务、功能及适用的交通量,将高速公路划分为普通高速公路和超高速公路,并明确了超高速公路的计算行车速度。起初超高速公路设计速度最高为240 km/h。考虑到安全性和经济性问题,经专家论证认为该分级过于超前,因此研究中^[14-15]将最高设计速度下调为180 km/h。同时结合计算行车速度选择、道路技术条件、车辆技术条件、预计实施时间,明确了各级超高速公路的服务对象和建设方式。

赵西超^[16]将超高速公路定义为:设计车速超过120 km/h,更适应社会智能发展的先进高速公路;同时从智能化高速角度^[17],超高速公路可定义为:设计速度超过120 km/h,且专供相应的最低及以上自动化等级的智能小汽车行驶的先进高速公路,它采用比《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)更高的技术标准。根据建设方式、道路条件、设计车速以及智能汽车等级等因素不同将超高速公路划分为超1级、超2级、超3级高速公路。为保证正常运营和操作安全要求,超高速公路仅供符合配置标准的智能小汽车行驶。其交通运输将由普通公路运输的人车路3要素转变为以车路2要素为主,削弱了驾驶员的主观操作因素的作用。智能驾驶系统的驾驶操作行为将不再受驾驶员的心理变化、主观操作失误、疲劳程度等因素影响。

黎纲^[18]分析了德国高速公路分级、法国高速公路直线段运行速度基本值及美国高速公路设计理念,认为超高速公路的最终目的是不限速。相关研究认为超高速公路实现不限速需要车辆拥有L5级自动驾驶技术,这在短时间内无法实现。目前超高速公路为了适应当前技术需要,应将最高设计速度控制在合理范围内,几何设计指标取值应留有一定富余度,以待今后不断提升。超高速公路可以先在直线段实现不限速目标。因此从作用与功能衔接的角度,将目前阶段超高速公路最高设计速度取为150 km/h,最低设计速度取为110 km/h。当小客车超速20%以内时,最高行驶速度在180 km/h以内,这一速度已经能够满足现阶段绝大多数驾驶人行驶需求。

张焕炯^[19]认为超级高速公路具有“智能、快速、绿色和安全”4个方面的突破,将在交通的有效性、安全性和节能环保等方面具有靓丽的性能表

现。在人车路等为要素的交通体系中,交通性能的提升总是以各要素协同进步为前提,这一基本规律需要遵守。超级高速公路实际是发展到一定阶段后面面临具体发展瓶颈背景下的一种“响应”。它为高速公路的发展提供一种远景式的思路,能较多地顾及当前科技的发展态势,具有一定的前瞻性。

超级高速公路特征为:(1)构建大数据驱动的智慧云控平台,有效提升高速公路运行速度,行车安全,可为无人驾驶提供安全的驾驶环境;(2)采用光伏路面,实现新能源供给设施全覆盖,远期目标是实现移动式的无线充电。

中国公路学会团体标准《小客车专用高速公路工程技术指南》(T/CHTS 10042—2021)定义小客车专用高速公路为专供小客车分方向、分车道行驶并全部控制出入的多车道公路。结合功能定位、地形地物、工程经济和沿线土地利用性质等因素综合论证确定小客车专用高速公路最高设计速度为140 km/h。

2021年12月4日中国公安部发布了《道路交通安全违法行为记分管理办法》,将实质性处罚的比例从原来的超速10%以内上调到20%以内,即对于120 km/h限速的高速公路,不扣分不罚款的速度值从原来的132 km/h调整到144 km/h。这实际上也从另一个方面在实践更高的运行车速对高速公路建设及运营安全的影响。

综上所述,针对超高速公路的概念相对较一致,但在服务对象方面存在两种思路,也就导致了设计速度的不同。一种思路是认为超高速公路主要面向自动驾驶汽车或称智能汽车,因此设计速度普遍高于160 km/h,最高达200 km/h。另一种思路认为超高速公路应服务于当前普通小客车提速需求,通过既有高速提速改造或新建的方式实现,并为远期技术进步预留富余度,因此最高设计速度在140~160 km/h。虽然智能车辆技术发展迅速,但事件条件下仍需要驾驶员随时接管超高速行驶的车辆,可见超高速公路人工驾驶经验的积累是必须的,人工自然驾驶的阶段是不可跨越的。因此,后一种思路更适合当前的交通发展现状和需求。目前应该先面向人工自然驾驶特点和需求,开展研究、示范和推广应用。

2 超高速驾驶适应性与人因研究

陈芬菲等^[20]分析了超高速公路的优势和面临的问题。认为安全性方面需结合智能化基础,将通过

容错设计提高道路系统的安全性,把事故危害程度降到最低。近期以实现高速公路全天候安全快速通行为目标,远期将基于高精定位、车路协同、无人驾驶等技术综合接入管控系统实现“零死亡”。

综上可见,目前超高速驾驶适应性、人因、驾驶行为方面的文献较少。应当考虑当前普通小客车超高速自然驾驶时,不同道路和交通条件下,驾驶人经验、车辆控制能力、动视野变化、生心理状态等对安全行驶的影响。如不同几何线形指标条件下,体现在车辆在车道内或距左侧中央分隔带和右侧硬路肩的偏移稳定性方面的驾驶人操控小客车的经验和能力;在动视野变化情况下,体现在前方车辆故障、路面遗撒障碍物、事故、或者突发不良天气等特殊事件时,驾驶人操控小客车稳定减速和变道的经验和能力,及在以上场景下驾驶人的生心理状态稳定性。这部分研究对超高速公路的实现,及几何线形、沿线设施标准的制定起着至关重要的作用。

3 超高速公路几何线形设计标准

对中国超高速公路几何线形相关研究文献进行检索,共收集到28篇论文,其中涉及通行能力、横断面指标、平面指标、纵断面指标的分别有9,6,13,7篇,多为2020年之后发表。

3.1 适应交通量与通行能力指标

德国《公路通行能力手册》(HBS—2010)^[21]给出了不限速高速公路速度流量关系及服务水平分级。与120 km/h设计速度相比,通行能力基本没有差别。

美国《道路通行能力手册》(HCM—2016)^[22]规定自由流速度分别为120,110,104 km/h时,车道通行能力为2 400,2 400,2 350 pcu/h/ln。但没有给出更高的128 km/h和137 km/h速度对应的通行能力指标。

中国《小客车专用高速公路工程技术指南》给出了设计速度140 km/h的通行能力为2 300 pcu/(h·ln),相比设计速度120 km/h提高了100 pcu/(h·ln)。

何永明^[12-13]梳理了超1~3级高速公路的驾驶特性,确定最小车头间距,计算得出各速度水平下各级超高速公路的通行能力,结果表明提高超高速公路的设计车速并不能提高通行能力,只有在超3级高速公路以汽车列车状态运行时,通行能力有显著提升。赵西超^[17]计算了智能车辆编队行驶状态的通行能力,比普通高速公路提高了2~3倍。黎纲^[18]在

现行规范规定的通行能力指标的基础上,线性外延推算了超高速公路通行能力值和车辆折算系数。林耳东^[23]线性外延推算了150 km/h情况下的基本通行能力值,认为影响不限速高速公路通行能力的主要因素为自由流速度、车道数量和交通组成。道路线形设计对通行能力的提高程度十分有限,而直接增加车道数和有效的交通组织可以有效提高通行能力。借鉴德国不限速高速公路运行规则分析了超车设置的有效性。基于临界碰撞模型计算了安全变道间距,提出了不限速高速公路内侧小客车道交通条件:饱和度不大于0.4。

根据交通流理论经典的速度-流量-密度3参数关系^[24],在流量达到一定程度之前,速度并不随流量变化而降低。在没有任何自动驾驶和车路协同技术加持的情况下,自然驾驶超高速状态的车辆依然依靠驾驶人的判断反应,确保与交通流中其他车辆的安全间距。一旦流量增大到一定程度,驾驶人必然减速首先确保安全,即流量对速度的影响要比普通高速公路大,维持超高速行驶的流量条件必然比普通高速公路小。因此,超高速状态速度-流量-密度3参数的关系变化,以及适应超高速度的交通量是需要研究确定的,其决定了超高速行驶的车道数条件和速度管理策略。目前的研究文献仅在现行规定的基础上对通行能力值进行了简单线性外延,均没有进行相应的理论、现场或仿真试验验证。

综上可见,目前研究已经初步提出了超高速公路通行能力指标,但由于超高速公路必然将高速度作为首要实现功能,而传统通行能力状态下,车辆速度下降较多,显然无法实现超高速功能,因此讨论超高速公路的通行能力就没有实际意义,其已经不是维持饱和流的最大服务流率,而是保证超高速行驶的最大流率。设计服务水平也将从目前的3级状态进一步上升到2级甚至1级状态。

同时,在几何线形指标变化不大的情况下,有理由得出超高速公路与普通高速公路的通行能力基本相同的初步判定。因此,当前应将重点放在满足超高速行驶的适应交通量和设计服务水平研究上。当自动驾驶和车队编组技术成熟后,车辆安全状态的保持不需要人工干预的情况下,通行能力又将呈现不同的特性和规律,可作为今后研究的方向。

3.2 横断面设计指标

相关文献对超高速公路横断面主要设计指标规定或研究成果如表2所示。

表 2 国内外超高速公路横断面设计指标汇总

Tab. 2 Summary of cross section design indicators for superhighway at home and abroad

国家	设计速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	车道宽度/ m	左侧路缘带 宽度/m	右侧硬路肩 宽度/m
中国	140	3.50~3.75	0.75	2.50
中国	140	小客车 3.50	—	—
中国	所有速度	—	2.50	—
德国	130	小客车道 3.50 重型车道 3.75	0.75	3.0
美国	所有速度	3.60	3.0	3.0

3.2.1 车道宽度

车道的宽度应满足设计车辆宽度并能为车辆在车道内横向摆动和为相邻车道上的车流提供侧向余宽。其他影响车道宽度的因素还有交通量及组成、有无路肩及会车等。侧向余宽是为车辆行驶提供横向安全空间,是考虑车辆行驶中因驾驶不准确和横风影响等造成的横向摆动等因素所需保证的安全距离,它与车辆行驶速度、交通量及交通组成等有关。根据国内外研究成果,侧向余宽以 0.25 m 为级差,其与车速有直接关系。

德国《高速公路几何设计规范》(RAA—2008)^[25],在车道宽度方面,规定主要由重型车辆使用的车道为 3.75 m 宽,以确保车道上的荷载均匀分布。对于 EKA-1 级高速公路,四车道和六车道最右侧车道及八车道高速公路最右侧两条车道为重型车道。EKA-1 级高速公路的左侧车道货车使用频率较低,宽度采用 3.5 m (见图 3)。可见,车道宽度与主要通行车型、公路等级、设计速度、车道数均有直接关系,但对于小客车车道,最高采用 3.5 m,130 km/h 及以上速度对横断面没有特殊规定。

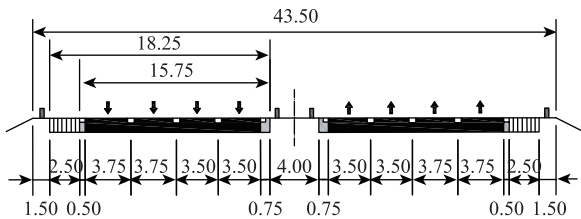


图 3 德国高速公路典型横断面 (单位: m)

Fig. 3 Typical cross-section of German expressway (unit: m)

美国《公路与城市道路几何设计政策》(AASHTO—2018)^[26]在车道宽度方面,没有给出与设计速度相关的指标,认为 3.6 m 车道宽度能够满

足高速大流量公路的需求。

《小客车专用高速公路工程技术指南》结合现场实车试验与驾驶模拟试验结果规定,3.75 m 车道宽度能够适应超高速行驶稳定性需求。因此主线 140 km/h 设计速度条件下车道宽度一般值仍为 3.75 m,最小值可采用 3.5 m。

梁天霄等^[27]基于驾驶模拟试验数据,从通行效率、运行速度与车道保持能力 3 个方面,分析不同车道宽度下车辆的运行特征。研究结果表明,双向八车道高速公路客车专用车道的车道宽度采用 3.50, 3.60, 3.75 m, 均能满足车辆运行速度维持在 140 km/h,通行效率与安全水平无显著差异。因此,3 种车道宽度均能满足客车专用车道的要求,从节约用地的角度推荐 3.50 m 的车道宽度。

3.2.2 左侧路缘带宽度

德国《高速公路几何设计规范》^[25]主要有 0.75 m 和 0.5 m 两种左侧路缘带宽度指标,其中 0.75 m 左侧路缘带适用于 120 km/h 及以上的高速公路,0.5 m 左侧路缘带适用于 100 km/h 及以下的高速公路。

《小客车专用高速公路工程技术指南》给出了主线 140 km/h 设计速度条件下左侧路缘带宽度仍为 0.75 m,分离式路基左侧硬路肩宽度为 1.25 m,与 120 km/h 设计速度一致。

黎纲^[19]考虑超高速条件下驾驶员的动视野角度不断变窄,左侧余宽有缩小的视觉感受,借鉴美国规定,推荐超高速公路设置 2.5 m 宽的左侧硬路肩。

综上所述,横断面指标方面各国标准规定了不同设计速度对应的车道宽度、左侧路缘带指标。个别论文从文献对比、理论计算和驾驶模拟仿真的角度推荐了相关横断面指标,但缺少基于驾驶人和车辆超高速行驶适应性和规律性的验证研究。今后研究要点建议集中在几方面:(1)不同车道宽度、不同车道位置及侧向净空组合条件下,直线段和曲线段,超高速行驶车辆轨迹特性变化规律、驾驶负荷和驾驶效率特性及安全净空指标;(2)不同车型干扰影响下,超高速行驶车辆超车状态轨迹特性变化规律、驾驶负荷和驾驶效率特性,进而系统提出能够适应超高速自然驾驶的横断面设计指标;(3)基于实车试验和驾驶模拟试验的横断面设计指标验证。

3.3 平面设计指标

相关文献对超高速公路平面设计指标规定或研究成果如表 3 所示。

表 3 国内外超高速公路平面设计指标汇总

Tab. 3 Summary of domestic and foreign superhighway plane design indicators

国家	设计速度/ (km · h ⁻¹)	平曲线最 小半径/ m	不设超高 半径/m	最大超 高/%	缓和曲线 长度/m	停车视 距/m
中国	140	910	7 700	10	120	285
	140	1 450	2 250	5	105	320
	160	1 850	2 900	5	120	400
	180	2 350	4 300	5	135	490
	130	1 209	6 500	6	—	295
	140	1 403	7 500	6	200	333
	160	1 832	10 000	6	220	415
	180	2 319	13 000	6	240	507
	200	2 863	16 000	6	300	608
	130	1 200	—	6	135	290
	140	1 400	—	6	160	325
	150	1 600	—	6	180	365
	130	1 000	—	8	125	248
	140	1 000	—	8	125	289
	150	1 000	—	8	125	335
	130	800	6 700	12	—	—
	140	1 000	7 700	12	—	—
	150	1 150	8 800	12	—	—
	160	1 250	10 000	12	—	—
	140	1 100	—	12	—	—
	160	1 220	—	12	—	—
德国	130	900	4 000	6	300 (A 值)	248
美国	130	832	5 360	8	72	285

3.3.1 圆曲线最小半径

Wegman^[5]总结了欧洲等国家不同设计速度情况下的平曲线最小半径,其中阿根廷、澳大利亚、意大利、西班牙等国家采用最高 140 km/h 设计速度,平曲线最小半径均为 1 000 m。结合德国、美国和中国规定可见,平曲线半径最小值基本均在 1 000 m 附近,差别不大,其中美国规定最小。

赵西超等^[16]针对弯道前方车辆、防眩设施和护栏,以及路侧构造物等对视距的遮挡问题,分别针对普通小客车和自动驾驶小客车,计算超 1~3 级高速公路障碍物识别和制动距离。通过几何分析计算得出超高速公路安全平曲线半径值。

赵西超^[17]分别按目前的横向力系数取值与车辆动力学模型和智能车辆遮挡情况下的识别距离推算了超高速公路圆曲线最小半径。发现智能车辆所需平曲线半径要高于车辆动力学模型结果,且随着速度增加,差距也显著增大。

黎纲^[18]取超高速公路横向力系数为 0.05,根据传统车辆动力学模型计算了超高速公路平曲线最小半径值,并采用 ADAMS 对最小半径曲线进行了仿真模拟试验。结果表明,横向加速度和加速度变化率达到人体感受运动的阈值,但仍在舒适性范围内,纵向加速度和加速度变化率、偏向角加速度和角加速度变化率等小于麦克康纳尔提出的人体感知运动阈值,说明该半径曲线上驾驶人舒适性较好。进一步对超速 20%时的车辆状态进行仿真可见,表征车辆侧翻状态的横向载荷转移率 LTR 和侧滑状态的横向力系数均在安全且舒适的阈值范围内。同时,通过仿真试验分析了不同线形组合对超高速车辆动力学性能的影响规律,从空间三维线形的角度检验了平纵几何设计指标取值的合理性。

林耳东^[23]取超高速公路横向力系数为 0.1,根据传统车辆动力学模型计算了超高速平曲线最小半径值。

宋玉婷^[28]通过对现行规范线性外延推算了超高速条件下横向力系数取值,通过传统车辆动力学模型计算了超高速平曲线最小半径值。

裘连毅^[29]提出了满足舒适性要求的超高速公路最大横向力系数取值 0.04~0.06。基于传统横向力系数和超高分配模型,提出了超高速公路极限圆曲线最小半径及不设超高的圆曲线最小半径建议值。并指出当设计车速较大时,采用曲线型横断面布置可以有效减少横向力系数,提高舒适性。

张航等^[30]利用可靠度理论,以曲线段不产生横向滑移为约束条件,考虑运行速度、路面横向摩擦系数、超高值等因素,推算出设计速度分别为 120, 140, 160 km/h 时超高速公路圆曲线最小半径的失效概率。同时结合公众心理承受度,以失效概率小于 0.01%为基准,提出超高速公路圆曲线的最小半径推荐值。

可见,相关文献推荐的平曲线半径指标差别较大,主要原因是最大超高标准和横向力系数的选取不同。Krammes 等^[31]汇总了 19 个国家的最大超高指标,普遍受路面冰雪湿滑条件的限制,澳大利亚和美国采用最大值为 12%,瑞典为 5.5%。大部分国家的最大超高指标在 6%~8% 范围内。McLean 等^[32]总结了澳大利亚和加拿大横向力系数取值。主要国家高速公路横向力系数取值汇总如表 4 所示。可见各国指标值有一定差距。

3.3.2 缓和曲线长度

德国《高速公路几何设计规范》^[25]在缓和曲线

表4 高速公路横向力系数取值汇总

Tab.4 Summary of lateral force coefficient values of expressway

设计速度/(km·h ⁻¹)	澳大利亚	加拿大	美国	中国
120	0.11	0.09	0.09	0.10
130	0.11	0.08	0.08	—
140	—	—	0.07	—

方面,明确采用回旋线,并给出了不同等级高速公路对应的缓和曲线参数 A 的最小值,并要求所有高速公路均应设置缓和曲线。

美国《公路与城市道路几何设计政策》^[26]在缓和曲线方面,给出了130 km/h对应的设置缓和曲线的最大半径和缓和曲线期望长度。设置缓和曲线的圆曲线最大半径要比中国和德国标准低很多。

赵西超^[16]分别根据离心加速度变化率 $0.2 \sim 0.3 \text{ m/s}^3$ 和线性外延推算的超高渐变率 $1/330 \sim 1/275$ 计算了缓和曲线长度。最终以满足超高渐变率为控制条件确定180 km/h及以下的缓和曲线长度指标,以满足舒适性为控制条件确定200 km/h的缓和曲线长度指标。

黎纲^[18]分别根据离心加速度变化率 0.3 m/s^3 、行驶时间3 s及中国超高渐变率 $1/250$ 要求计算了缓和曲线长度。最终以线形组合视觉要求为控制条件确定了缓和曲线长度指标。黎纲还对超高渐变方式进行仿真试验。结果表明,3次抛物线所产生的偏向角速度是3种曲线型超高过渡方式中最小的,推荐作为超高速公路超高过渡方式。

宋玉婷^[28]分别选取离心加速度变化率 0.4 m/s^3 和行驶时间2.5 s,计算了缓和曲线长度。最终以满足舒适性为控制条件确定了缓和曲线长度指标。可见,相关文献缓和曲线计算结果相差不大。

3.3.3 停车视距

各国规范采用的停车视距计算方法相同,但采用的指标值有一定差异。驾驶人反应时间和车辆制动系统生效时间,中美采用2.5 s,德国采用2.0 s。车辆平均的减速度,美国研究发现绝大多数驾驶人紧急停车时的减速度为 4.5 m/s^2 ,停车视距计算时采用90%的驾驶人采用的减速度 3.4 m/s^2 ,德国采用不带ABS系统时驾驶人采用的减速度 3.7 m/s^2 。中国采用制动系数(最大值为纵向摩擦系数)计算,根据推算得到减速度为 $2.8 \sim 3.0 \text{ m/s}^2$ 。速度方面,美国和德国均采用设计速度,中国采用85%位的设计速度作为平均运行速度进行计算。3个国家在反应时间、减速度和速度方面取值均不相同,中国规范

规定介于德国和美国标准之间。

《小客车专用高速公路工程技术指南》、林耳东^[23]在现行规范基础上,通过线性外延推算行驶速度和路面摩擦系数等计算指标,按照2.5 s反应时间,计算停车视距。考虑既有高速公路改建难度,综合制动减速度,推荐采用285 m作为超高速公路停车视距一般值。赵西超^[16]、黎纲^[18]根据传统停车视距模型,选取反应时间2.5 s,参照美国规范 3.4 m/s^2 制动减速度,计算停车视距。宋玉婷^[28]借鉴美国规范方法,对超高速公路停车视距进行计算。

赵西超^[16]还定义了停车识距,即自动驾驶汽车通过传感器、测距仪等识别到同一车道前方障碍物,智能驾驶系统采取制动措施使车辆减速直至速度降为0,避免与障碍物发生碰撞的安全最小距离。这其中,最大制动减速度仍采用美国规范的 3.4 m/s^2 ,反应时间由2.5 s降低至0.2 s。

综上所述,平面指标方面目前的文献普遍从车辆动力学理论分析角度推荐平曲线半径、缓和曲线长度和停车视距指标。但缺少基于驾驶人和车辆超高速行驶曲线段适应性和稳定性的验证研究。今后研究要点建议集中在几方面:(1)超高速条件下,曲线段车辆动力学变化规律和横向力系数取值标准,以及超高设计标准;(2)不同半径曲线段,超高速行驶车辆寻迹特性规律和车辆控制稳定性;(3)考虑线形曲率过渡要求、乘客舒适性要求及线形顺适美观要求的缓和曲线设计标准;(4)超高速条件下,驾驶人反应时间和车辆制动减速度变化规律。

3.4 纵断面设计指标

相关文献对超高速公路纵断面设计指标规定或研究成果如表5所示。

3.4.1 最大纵坡

公路最大纵坡应依据汽车的动力特性、道路等级、自然条件等因素,通过综合分析研究确定,并应考虑车辆行驶安全及工程和运营经济等因素,满足货车高速行驶需求。

德国和美国标准采用的最大纵坡标准相同。美国标准认为几乎所有的小客车都可以轻松通过坡度高达4%至5%的陡坡,而速度不会明显低于平路上通常保持的速度。《小客车专用高速公路工程技术指南》只考虑小客车动力性能,按能够克服的最大纵坡和折减15 km/h速度对应的坡长作为限制纵坡和坡长,标准要比德国和美国大很多。

表5 国内外超高速公路纵断面设计指标汇总

Tab. 5 Summary of vertical section design indicators for domestic and foreign superhighway

国家	设计速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	最大纵 坡/%	凸曲线 半径/m	凹曲线 半径/m	竖曲线 长度/m
中国	140	7	20 000	6 000	120
	140	2.5	16 000	5 000	120
	160	2.3	24 500	6 000	135
	180	2	36 500	8 000	150
	140	5	17 200	5 400	117
	160	5	28 400	7 100	133
	180	4	44 500	9 000	150
	200	4	66 600	11 100	167
	130	3	21 000	5 000	110
	140	2	26 500	5 700	120
	150	2	33 500	6 500	125
德国	130	4	13 000	8 800	300
美国	130	4	12 500	7 288	494

赵西超^[17]根据车辆动力因数和容许速度下降,确定了超高速公路不限坡长的最大纵坡值,指标大于其他文献。黎纲^[18]考虑大客车上坡速度折减量控制在15 km/h以内,通过仿真模拟确定了超高速公路最大纵坡和坡长指标。宋玉婷^[28]根据国内现有汽车牵引功率计算最大纵坡值。

纵坡标准方面,各国规范和研究文献基本一致。由于纵坡3%及以下对小客车运行速度的影响较小,结合地形条件的适应性、成本控制需求,以及一定时期内客货仍不可避免地存在混行的情况,超高速条件下不宜再降低最大纵坡和坡长标准。

3.4.2 竖曲线半径

在线形设计中,竖曲线最小半径是汽车在纵坡变坡处行驶时,为了缓和冲击、行程时间不过短和保证视距所需的最小值。无论是凸曲线还是凹曲线都受到上述3个因素的控制,需要明确哪一种限制因素为最不利状况,才能有效控制。

德国《高速公路几何设计规范》^[25]在计算竖曲线时,眼高采用1.0 m,物高采用0.5 m。停车视距采用了-5.0%下坡最不利状态下的停车视距取值。其安全条件是驾驶员应能提前看到前方拥挤路段车辆排队的队尾。这意味着,为了满足停车视距,必须提供从驾驶员眼睛高度到物体高度的凸曲线。同时夜间或雾天必须保证车辆的可识别性,如前照灯或刹车灯的高度、车辆的视觉可见表面等。长距离快速高速公路行驶中驾驶员的感知和反应行为,也要求凸曲线半径大于根据排队队尾车辆可视性要求所需的指标。

美国《公路与城市道路几何设计政策》^[26]在竖曲线方面,给出了130 km/h对应的凸型竖曲线曲率指标 K ,即坡度差为1%时的曲线长度。其中眼高采用1.08 m,物高采用0.6 m。停车视距采用了平坡状态下的停车视距取值。

中国《小客车专用高速公路工程技术指南》(T/CHTS 10042—2021)给出了主线140 km/h设计速度条件下凸型竖曲线最小半径分别为20 000 m。

可见,竖曲线指标方面,3个国家采用的依据相同。受停车视距、目高和物高标准控制,美国凸形竖曲线半径最小,德国次之,中国凸形竖曲线半径最大。

凹形竖曲线最小半径的取值一般依据2个标准:即夜间车前灯照射距离和行车舒适感。在考察行车舒适感时普遍采用离心加速度指标。德国推算的离心加速度采用 0.296 m/s^2 ,美国在计算时离心加速度采用 0.30 m/s^2 ,法国采用 0.31 m/s^2 。中国现行规范离心加速度采用 0.278 m/s^2 。可见,竖曲线指标方面,3个国家考虑的因素相同,但控制性因素不同。由于美国停车视距要求高,按前灯照射距离控制的凹曲线半径比缓和冲击控制值高很多。

赵西超^[18]根据智能车辆停车识距计算凸曲线半径值。从缓和冲击(最大离心加速度 0.278 m/s^2)、停车识距要求方面计算了超高速竖曲线半径指标。黎纲^[18]参考何永明方法,从视距要求、缓和冲击、照明距离等方面推算了超高速条件下竖曲线半径指标。《小客车专用高速公路工程技术指南》,凸曲线最小半径按停车视距平方的0.25倍选取,凹曲线最小半径按设计速度平方的0.3倍选取。竖曲线最小长度按3 s设计速度行程控制。宋玉婷^[28]基于美国绿皮书方法,从缓和冲击(最大离心加速度 0.278 m/s^2)、视距要求、照明距离等方面推算了超高速条件下竖曲线半径指标。

综上所述,纵断面指标方面已经初步提出了最大纵坡和竖曲线半径指标,但推荐的指标有一定的差别,主要原因是前提条件和适用对象不同。目前的文献普遍从车辆性能角度推荐相关纵断面指标,缺少基于实车试验和驾驶模拟试验的适应性的验证研究,可作为今后研究的重点。

4 超高速公路沿线设施设计标准展望

对国内外超高速公路沿线设施(广义)方面的相关研究进行检索,目前尚未发现这方面的文献。

4.1 互通式立交

超高速行驶对互通式立交设计标准的要求主要体现在立交形式与间距、出口决策视距、立交区主

线指标、变速车道长度、出入口形式、出口匝道类型等方面。

对于立交形式,由于主线-部分形式匝道的速度差值过大,存在固有的安全问题,建议根据现有互通式立交在事故特点方面的统计,结合立交功能研究推荐安全性高的形式。立交间距建议根据出入口速度变化情况合理研究确定,避免交织对超高速行驶的影响。对于出口决策视距选取标准,中国和美国标准差别较大,建议结合中国公路交通发展现状和道路交通特点开展研究。立交区主线指标包括:影响出口判断识别视距的凸曲线半径、受出入口超高变化控制的平曲线半径,以及受出入口变速行驶要求的纵坡指标,建议开展相关研究。变速车道长度建议根据车辆超高速行驶时的出口驶出速度变化规律进行研究确定。出入口形式建议根据出口速度变化规律研究直接式的适应性和平行式的优劣。出口匝道类型涉及运行速度过渡段的长度,对于出口采用环形匝道的情况,运行速度过渡段长度也需要根据驶出速度变化规律开展研究。

4.2 隧道

由于隧道内环境压抑、光线暗,对驾驶人心理均造成一定影响,因此中国高速公路隧道普遍降低限速运行,部分地区隧道路段已经成为高速公路的瓶颈。如何在确保安全的情况下,提高限速和通行能力,甚至是超高速运行,是今后的一项研究重点。超高速条件下,侧向净空、平曲线半径、超高、视距、纵面线形、照明等对安全的影响要显著大于一般路段。建议结合隧道路段驾驶行为特性研究超高速的适应性。

4.3 路面条件

路面条件对高速公路安全行驶的最直接影响体现在抗滑性能和平整度2个指标上。

(1) 抗滑性能影响纵向摩阻系数,是停车视距的主要计算参数,在行驶速度和驾驶人反应时间不变的情况下,纵向摩阻系数越高,刹车距离越短,停车视距越小,碰撞风险就越低。横向摩阻系数是车辆在平曲线行驶横向稳定性的关键。横向摩阻系数越大,在超高速情况下,要求的曲线半径越小,对地形地物的适应性就越好,投资就越节省。但摩阻系数会随着运营时间逐渐衰减。若超高速公路对路面摩阻系数要求提高,一方面增加了施工质量控制难度,另一方面也增大了后期运营养护成本。目前还没有针对超高速公路抗滑性能的研究成果,因此建议综合经济性和安全性,进一步对增加路面抗

滑性能进行研究论证。在速度增加不多的情况下,宜在现有高速公路路面保障条件下,通过增加平面线形指标来满足超高速停车视距和横向稳定性的要求。而速度增加到一定程度,就需要进行进一步研究。

(2) 平整度是车辆振动系统的主要振源,对超高速行驶速度和舒适性影响较大。超高速情况下,路面平整度对驾驶舒适性的影响还未见丰富的研究文献。宋玉婷^[28]通过MICMAC方法分析了影响平整度的相关因素,提出了提高平整度的可行途径。王大为等^[33]对德国不限速高速公路路面平整度评价方法进行了综述。德国建立了系统考虑车辆对路面的动态响应和不同车型乘客舒适度的评价指标体系,对今后中国超高速公路路面性能研究具有重要的参考意义。文献均没有涉及超高速公路平整度安全需求和对安全行驶影响的内容,应作为今后的研究方向。

4.4 服务设施

超高速条件下,一方面车辆行驶油耗成倍上升,加油需求大,另一方面驾驶人超高速行驶长时间集中注意力,驾驶疲劳累积快,停车休息需求高。尤其是戈壁、荒漠、草原等地区人烟稀少,服务设施建设维护困难,因此间距普遍较大。建议结合目前乘用车载油量大小和油耗规律,以及驾驶疲劳累积影响,研究服务设施间距。

4.5 安全设施

4.5.1 标志

超高速条件下驾驶人动视觉特性、反应时间发生显著变化,主要影响标志字高。黎纲^[18]基于汉字高度与速度的传统关系模型推算了不同车道数超高速公路标志字高。验算了出口指路标志前置距离,确定了现行2, 1, 500 km和行动点标志同样适用于超高速公路。考虑驾驶员视野内出现视线诱导设施的最佳数量推算了超高速公路视线诱导设施布置间距,如表6所示。基于驾驶模拟验证了指路标志、车行道分界线和线形诱导标的设置效果相对满意。相关研究还需进一步深入。

4.5.2 标线

超高速条件下驾驶人动视觉特性发生显著变化,对标线设置也构成影响。黎纲^[18]基于舒适性的视觉警示频率阈值,按照现行可跨越同向车道分隔标线闪现频率推算了超高速公路车道分界线的实线长度为8 m,虚线长度为11 m,但缺少相应的验证。同时,超高速情况下,驾驶人视野变窄、变远,对标线视认性和宽度也提出更高的要求,应作为今后研究的方向。

表 6 中国标志字高与视线诱导设施布设间距汇总
Tab. 6 Summary of spacing between height of domestic logo characters and layout of sight guidance facilities in China

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	120	130	140	150
汉字高度建议值/cm	65	70	75	80
视线诱导设施布设间距/m	20	18	16	14

4.5.3 护栏

护栏作为一种障碍物,只是降低驶出路外事故后果的方法或手段之一。只有驶出路外车辆碰撞障碍物与碰撞护栏相比,后果更严重,才考虑设置护栏。戈壁荒漠草原地区地势平坦,应首先考虑放缓边坡达到不设置护栏的条件。在超高速公路事故特点不明确的情况下,沿用目前的碰撞标准存在一定风险。目前还没有相关文献研究,因此建议结合超高速事故轨迹和参数分析,对碰撞车型、碰撞速度、碰撞能量、碰撞角度等碰撞标准开展研究,明确超高速公路护栏设置原则及防护等级选取标准。

综上所述,作为超高速公路的重要组成部分,互通式立交、隧道、服务设施、安全设施、路面条件等设施方面的研究文献很少。这些设施作为超高速公路交通系统的重要组成部分,对主动和被动安全均构成了显著的直接影响,相关研究需要不断加强。

5 超高速公路管理标准展望

对国内外超高速公路管理设施方面的相关研究进行检索,目前尚未发现这方面的文献。

5.1 交通组织管理

自然驾驶条件下,车辆间和车道间速度差的存在是必然的,对安全的影响也是客观的。因此超高速公路进行合理的交通组织管理是至关重要的。德国在车道使用和超车规则方面有法规层面的要求:如必须左侧超车;超车的车速应持续的高于被超车辆;超车后应尽快返回行车道行驶等。同时德国高速公路的安全性离不开对驾驶行为的引导,包括“主动认知”和“被动适应”两个层面。

由于任何措施都无法禁止较慢的车辆进入快速车道,必须从工程、管理、法规等多方面综合措施,可借鉴德国道路交通规则,对《道路交通安全法》进行修订,从法律方面制订严格的驾驶行为规范,如超车后应尽快返回行车道,避免影响快速车辆通行等。同时还应考虑货车的影响问题,虽然通过禁止货车驶入超高速公路可以解决该问题,但在戈壁荒漠草原等地区地广人稀,高速公路本就不发达,禁货的影响过

大。因此货车干扰问题也应作为研究重点。目前相关文献中,仅刘展行以中国规划的第1条超级高速公路杭甬高速为例,提出了左侧大车专用、小车道光伏路面的设计方案,同时采用全道路监控等前沿技术,利用信号灯进行速度控制以保证安全性。

综上所述,由于实际高速公路不可能排除其他车辆的干扰,如何从空间上分离不同特性的车辆,保证超高速功能的发挥,建议从驾驶行为规则、限速管理、车道管理、车型管理等方面开展研究。

5.2 事件预警管控

长时间超高速行驶,驾驶人对速度的敏感度下降,往往在不良天气等事件出现初期,因行驶速度偏高导致对事故风险的影响估计偏低。如何建立实时的天气等事件和路面状态预警系统、采取及时科学有效的速度管理措施,降低不良天气等事件影响,建议作为超高速公路研究的重点内容。

5.3 应急救援管理

由于速度与事故严重程度呈现正相关关系,超高速公路的应急响应能力需求要比普通高速公路高很多。事故发生后如何快速响应,开展应急救援,避免更大的伤亡和二次事故,是超高速公路应急救援管理需要研究的重点。

5.4 日常养护管理

由于超高速公路对路面、交安设施、机电设施等的状态要求严格,如何制定合理的养护标准、确定合理的养护时机、实施科学的养护决策,建议作为超高速公路日常养护管理研究的重点。

综上所述,作为超高速公路安全运行的重要保障,交通组织管理、事件预警管控、应急救援管理和日常养护管理等方面的研究还需要不断加强。

6 结论

新发展形势下,超高速公路的概念逐步被提出、关注和研究,以达到提质增效、满足驾驶期望的目标。目前超高速公路研究在几何线形设计标准方面形成了较多的成果,但本研究认为超高速公路研究方向存在较大偏差,研究内容的系统性和针对性严重不足,研究手段过于单一。

(1) 研究方向。目前的研究方向局限在通过传统车辆动力学模型等推荐超高速条件下几何线形指标。驾驶适应性和人因驾驶行为方面几乎没有成果。考虑当前普通小客车超高速自然驾驶条件下,驾驶人经验、车辆控制能力、动视野变化、反应时间、生心理状态等对安全行驶的影响十分大,对几何线

形、沿线设施标准的制定将起到决定性的控制作用,因此超高速驾驶适应性、人因、驾驶行为等方面的基础性研究应该强化。

(2) 研究内容。相比现状高速公路,超高速公路绝不仅仅是提出设计速度对应的几何线形标准,还应该包括沿线设施设计标准、交通流组织与管理方式等内容,后者目前还没有研究文献涉及。几何线形设计标准方面需要重点补充交通流基础规律和适应交通量标准研究,以及基于驾驶人和车辆超高速行驶适应性、规律性和稳定性的验证研究。沿线设施设计标准方面需要在互通式立交、隧道、服务设施、安全设施、路面条件等设施方面开展系统研究。交通组织与管理方面,需要从驾驶行为规则、限速管理、车道管理、车型管理等方面开展交通组织研究。并在不良天气管理、应急救援管理和日常养护管理等方面加强研究,确保超高速功能正常发挥。

(3) 研究手段。目前的研究手段普遍基于车辆动力学等理论分析方法,十分单一。考虑到驾驶人和车辆超高速行驶适应性、规律性和稳定性方面的问题,应该大量补充基于实车试验、驾驶模拟试验等手段的研究工作。

参考文献:

References:

- [1] 张高才,周建,李欣,等.超高速公路建设需求与可行性研究[J].公路交通科技,2022,39(增2):297-303.
ZHANG Gao-cai, ZHOU Jian, LI Xin, et al. Studies on Super Expressway Construction Demand and Feasibility [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (S2): 297-303.
- [2] 王炳泉.公路设计速度浅议[J].西南公路,1996(2):16-19.
WANG Bing-quan. Discussion on Highway Design Speed [J]. South-western Highway, 1996 (2): 16-19.
- [3] 唐铮铮.德国道路限速及车道管理的启示[J].交通运输研究,2021,7(1):1-15.
TANG Cheng-cheng. Enlightenment of German Road Speed Limit and Lane Management [J]. Transport Research, 2021, 7 (1): 1-15.
- [4] 虞笑晨.德国高速公路对小车真的不限速吗?[J].交通与运输,2018,34(1):54-55.
YU Xiao-chen. Is There Really No Speed Limit for Cars on German Expressways? [J]. Traffic and Transportation, 2018, 34 (1): 54-55.
- [5] WEGMAN F, SLOP M. Safety Effects of Road Design Standards in Europe [J]. Transportation Research Circular, 1998, 39: 1-10.
- [6] ICTAAL. Instruction Sur Les Conditions Techniques D'Amenagement Des Autoroutes De Liaison [M]. Paris: ICTAAL, 2000.
- [7] Abu Dhabi Department of Municipalities and Transport. Road Geometric Design Manual [M]. Abu Dhabi: Abu Dhabi Department of Municipalities and Transport, 2021.
- [8] Transport Wytuczne Projektowania Odcinków Dróg Zamiejskich Część 2: Kształtowanie Geometryczne [M]. Warsaw: [s. n.], 2023.
Transport Urban Road Design Guidelines Part 2: Geometric Shaping [M]. Warsaw: [s. n.], 2023.
- [9] Manual De Carreteras: Diseno Geometrico Dg [M]. Madrid: Spain Direccion General De Caminos Y Ferrocarriles, 2018.
Road Manual: Geometric Design DG [M]. Madrid: Spanish Directorate General of Highways and Railways, 2018.
- [10] Norme Funzionali E Geometriche Per La Costruzione Delle Strade [M]. Rome: Italy Ministero Delle Infrastrutture E Dei Trasporti, 2001.
Functional and Geometric Standards for Road Construction [M]. Rome: Italy Ministry of Infrastructure and Transport, 2001.
- [11] 何永明,裴玉龙.超高速公路发展可行性论证与必要性研究[J].公路,2016,61(1):158-162.
HE Yong-ming, PEI Yu-long. Feasibility Demonstration and Necessity Analysis on Superhighway [J]. Highway, 2016, 61 (1): 158-162.
- [12] 何永明,裴玉龙.超高速公路及其通行能力研究[J].黑龙江工程学院学报,2017,31(4):8-11.
HE Yong-ming, PEI Yu-long. Research on Super Highway and Its Capacity [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2017, 31 (4): 8-11.
- [13] 何永明.超高速公路安全保障与经济评价研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2017.
HE Yong-ming. Research on Safety Support and Economy Evaluation of Superhighway [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [14] 何永明,裴玉龙.超高速公路设计及运行特性研究[M].北京:科学出版社,2021.
HE Yong-ming, PEI Yu-long. Research on the Design and Operating Characteristics of Superhighways [M]. Beijing: China Science Publishing and Media, 2021.
- [15] 何永明,陈世升,冯佳,等.基于高精地图的超高速公路虚拟轨道系统[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(7):2016-2028.
HE Yong-ming, CHEN Shi-sheng, FENG Jia, et al. Superhighway Virtual Track System Based on High Precision Map [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53 (7): 2016-2028.

- [16] 赵西超, 毛红日, 刘江东. 超高速公路安全平曲线半径研究 [J]. 西部交通科技, 2019 (2): 159-163.
ZHAO You-chao, MAO Hong-ri, LIU Jiang-dong. Research on Safety Flat-curve Radius on Superhighway [J]. Western China Communications Science & Technology, 2019 (2): 159-163.
- [17] 赵西超. 基于智能驾驶技术的超高速公路线形指标研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
ZHAO You-chao. The Research on Linear Index of Super Freeway Based on Intelligent Driving Technology [D]. Changsha: Changsha University of Science Technology, 2019.
- [18] 黎纲. 超高速公路几何设计指标取值与安全设施设计方法 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
LI Gang. Geometric Design Index Value and Safety Facility Design Method of Superhighway [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [19] 张焕炯. 对“超级高速公路”的几点深度思考 [C] //世界交通运输工程技术论坛 (WTC2021) 论文集. 西安: 中国公路学会, 2021: 1646-1649.
ZHANG Huan-jiong. Several Deep Reflections on “Superhighways” [C] // Proceedings of the World Transportation Engineering Technology Forum (WTC2021). Xi'an: China Highway and Transportation Society, 2021: 1646-1649.
- [20] 陈芬菲, 徐鹏. 基于SWOT分析法的超高速公路发展研究 [J]. 科技视界, 2018 (5): 139-140.
CHEN Fen-fei, XU Peng. Research on Developing Superhighway Based on SWOT Analysis [J]. Science & Technology Vision, 2018 (5): 139-140.
- [21] HBS-2010. Highway Capacity Handbook [M]. Berlin: German Federal Ministry of Digitalization and Transport, 2010.
- [22] HCM2016, Highway Capacity Manual [M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2016.
- [23] 林耳东. 基于安全和运营考虑的不限速高速公路设计参数研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
LIN Er-dong. Research on Design Parameters of Unlimited Speed Highway Based on Safety and Operation Considerations [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [24] 任福田, 刘小明, 荣建, 等. 交通工程学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
REN Fu-tian, LIU Xiao-ming, RONG Jian, et al. Traffic Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [25] FGSV. Guidelines for the Design of Motorways [M]. Cologne: Road and Transportation Research Association, 2008.
- [26] American Association of State Highway and Transportation Officials. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [M]. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018.
- [27] 梁天霄, 郭忠印, 宋灿灿. 双向八车道超级高速公路客车专用车道宽度研究 [J]. 上海公路, 2021 (4): 110-123.
LIANG Tian-xiao, GUO Zhong-yin, SONG Can-can. Study on Passenger Express Lane Width of Two-way-eight-lane Super Expressway [J]. Shanghai Highways, 2021 (4): 110-123.
- [28] 宋玉婷. 基于道路参数的超高速公路安全性研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
SONG Yu-ting. Research on Superhighway Safety Based on Road Parameters [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.
- [29] 裘连毅. 超高速公路曲线型超高横断面设计方法研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2020 (8): 257-261.
QIU Lian-yi. Study on Design Method of Curved Ultrahigh Cross Section of Superhighway [J]. Urban Roads and Bridges and Flood Control, 2020 (8): 257-261.
- [30] 张航, 梁家明, 吕能超. 超高速公路圆曲线半径参数的可靠性分析 [J]. 交通信息与安全, 2022, 40 (2): 38-44.
ZHANG Hang, LIANG Jia-ming, LÜ Neng-chao. An Analysis of the Reliability of Radius Parameters of Circular Curves on Super-speed Highways [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40 (2): 38-44.
- [31] KRAMMES R A, GARNHAM M A. Worldwide Review of Alignment Design Policies [C] //TRB. Proceedings of International Symposium on Highway Geometric Design Practices Conference. Boston: TRB, 1998.
- [32] MCLEAN J, MORRALL J F. Changes in Horizontal Alignment Design Standards in Australia and Canada [J]. Transportation Research Circular, 1998, 2: 1-9.
- [33] 王大为, 王宠惠, STEINAUER B, 等. 德国不限速高速公路路面平整度评价方法综述 [J]. 中国公路学报, 2019, 32 (4): 105-129.
WANG Da-wei, WANG Chong-hui, STEINAUER B, et al. Overview on Evaluation Methods of pavement Evenness for Pavements Without Speed Limitations in Germany [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (4): 105-129.