

基于驾驶模拟技术的分隔设置研究

印冰, 尹健标

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要: 我国十车道及以上高速公路实践经验较少, 多车道超宽断面高速公路的横断面形式和组成的相关研究较为缺乏, 特别是在内外分幅交通组织模式下同向分隔带的设置方面, 现行技术标准基本处于空白状态。以广深高速扩建为双向十车道为依托, 分析了在内外分幅交通组织模式下, 同向分隔带的功能及相关设置方法; 在综合国内外有关案例的基础上, 提出了基于驾驶模拟技术的分隔带设置方法; 通过对不同分隔带宽度下驾驶人行为特性的变化, 提出分隔带设置的必要性及宽度取值的建议, 为类似项目的建设及研究提供参考及借鉴。

关键词: 高速公路; 多车道; 交通组织; 分隔带; 驾驶模拟; 驾驶行为特性

中图分类号: U491.5

文献标识码: A

Research on Separation Setting Based on Driving Simulation Technology

YIN Bing, YIN Jianbiao

(Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, Guangdong, China)

Abstract: There are few practical experiences in China's ten-lane and above expressways. And there is a lack of relevant research on the cross-sectional form and composition of multi-lane ultra-wide-section expressways, especially in the internal and external traffic organization mode. The current technical standards are basically blank in the setting of the same direction separation zone. Based on the two-way ten-lane expansion of Guangzhou-Shenzhen Expressway, the function and related setting methods of the same-direction separation belt under the internal and external framing traffic organization mode have been analyzed in this paper. Combining the relevant domestic and foreign cases, a method for setting up separation strips based on driving simulation technology has been proposed. Based on the changes of driver's behavior characteristics under different widths of the separation belt, the necessity of setting the separation belt and the suggestion of the width value have been put forward, which provides reference for the construction and research of similar projects.

Key words: expressway; multi-lane; traffic organization; the lane separator; driving simulation; driving behavior characteristic

随着我国经济实力的不断增强, 人口及交通量迅猛增长, 部分现有高速公路的通行能力已逐渐无法与其定位相匹配, 各地陆续进行了“四改八”高速公路改扩建的建设。在粤港澳大湾区等经济活跃地区, “六改十”的高速公路扩建模式已被提出, 可以预见, 未来十车道及以上的超宽断面高速公路将成为我国经济活跃地区交通联络

的大动脉。

京港澳高速公路广州至深圳段(以下简称“广深高速公路”)是我国第一条粤港合作修建的高速公路, 建成以来交通繁忙, 在国家及广东省高速公路网中居于重要地位。广深高速采用设计速度 120 km/h 的高速公路标准, 双向六车道, 标准宽度 33.1 m, 其承担的交通量已近饱和, 现

收稿日期: 2023-08-20

作者简介: 印冰, 工程师, 本科, 研究方向为道路总体、路线设计

状日均交通量高峰时达到13万pcu/d,服务水平已达四、五级,交通拥堵成为常态,交通事故率不断上升,目前正在进行十车道改扩建方案研究。广深扩建利用微观交通流仿真的方法,结合广深高速公路的功能定位及长短途出行需求,最终确定双向十车道整体式断面路段,整体上采用内外幅分隔2+3的交通组织模式^[1]。在此交通组织模式下,内外幅分隔形式及分隔宽度的取值成为亟需解决的关键问题。本文依托于广深高速公路改扩建项目,在综合国内外相关案例基础上,采用驾驶模拟技术,通过分析不同宽度设置条件下驾驶人行为特性的变化,综合驾驶人主观感受,提出分隔带设置的必要性及宽度的取值建议,为类似项目的建设及研究提供参考及借鉴。

1 分隔设置的功能及相关规定

多车道超宽断面高速公路分隔线(带)是指在同向多车道断面采用软、硬分隔的形式,使其内外幅、内外车道承担不同功能,满足不同通行需求。分隔设置主要是引导不同通行需求车辆行驶在适应的车道上、减少临近车道变道行为影响,从而提高道路整体通行效率;总体上主要是考虑多车道超宽断面行车安全和内外幅车道不同功能需求。

1.1 分隔设置的功能

内外幅车道承担不同功能,主要与交通组织模式、交通组成等密切相关,结合广深改扩建高速公路2+3内外幅交通组织模式和内外幅不同功能定位,即内幅主要承担公路交通(干线公路功能)、外幅主要承担城市交通功能(集散公路功能),宜将中长距离快速通行与短距离快速集散(分流汇流)分隔,形成长距离跨区交通、短距离本地交通的有效组织^[2]。

根据已经通车的多车道高速公路事故资料,多车道高速公路交通事故本身也呈现出一定的特性。相关研究表明,由于超宽断面高速在视野开阔性、车道数等交通条件方面优于一般高速,使得性能较好的小型车辆运行速度普遍高于大型客货车,速度的提高增加了超速事故发生的概率。另外,八车道高速公路交通事故中,由于车道数增多,横向断面超宽,违章变更车道成为事故产生的主要原因^[3]。美国道路交通安全管理局(NHSTA)研究表明:90%的交通事故是由驾驶人行为导致,因此,从交通安全管控的角度出发,多车道超宽断面高速公路宜进行分车道、分

车型、分幅管控。

《广东省高速公路推行中型重型货运车辆右侧通行管控工作方案》指出:高速公路、城市快速路同方向有两条车道的,载货汽车除因超车需要外,不得驶入左侧车道;同方向有三条以上车道的,载货汽车不得驶入最左侧车道。由以上规定可以看出:同向三车道以上高速公路内侧车道为小客车专用道,外侧车道为混行车道。广深高速小客车占比90%以上,内幅主要承担中长距离快速通行、外幅主要承担短距离快速集散(分流汇流);宜将内外幅进行分隔管控。

综上所述,广深高速公路在2+3内外幅交通组织模式和内外幅不同功能定位条件下,即内幅主要承担公路交通(干线公路功能)、外幅主要承担城市交通功能(集散公路功能),宜设置内外幅分隔线进行功能区分和交通管控。

1.2 分隔设置规定

我国十车道高速公路可参考案例较少,同向分隔设置的交通标志标线规定也没有相应标准规范可依。因此,主要介绍美国同向分隔设置方法及相关规定。

美国针对高度发达地区的高速公路管控提出了“管控车道”的概念,管控车道是指根据不同条件而采取的主动管控策略,一般与普通车道分隔,形成满足不同交通需求条件下的较优交通流。常见的管控车道包括:HOV车道(high-occupancy vehicle lanes)、定价车道(priced lanes)、高占有率收费车道[high occupancy toll (HOT) lanes]、其他特殊车道等^[4]。管控车道采取的分隔措施有多种,总体可分为硬分隔和软分隔,硬分隔主要是利用护栏、侧分带等设施将不同功能的车道分隔开;软分隔主要是利用标志、标线等将不同车道功能分隔开,如双黄实线、双白实线等。

美国交通标志标线设置主要依据《美国交通工程设置手册》。同向分隔设置有单白实线、双白实线;单实线表示不宜穿越、变道等,双实线表示特殊限制、禁止变道。

近几年,美国高速公路也出现了双黄实线进行同向分隔,主要是考虑增强警示作用,禁止变换车道。2021年3月美国俄勒冈州针对标线设置出版了地方手册,对标线设置提出了明确的要求:纵向标线一般为4英寸(10.16cm)、宽标线为8英寸(20.32cm);纵向双标线一般分隔宽度为12英寸(30.48cm)、窄纵向双标线分隔

宽度为4英寸(10.16 cm)。

2 国内外相关案例分析

2.1 国外相关案例

美国的十车道及以上高速公路基本位于城市发达地区,在改扩建完成以后日益增长的交通拥堵使得美国出现了HOV车道、共享车道、快速车道等。本文主要以快速车道和HOV车道为例介绍美国快速车道、慢车道分隔管控设置方法。

由图1~图4可以看出,美国高度发达城市区高速公路设置内外幅分隔较为常见,内幅一般承担快速通行的功能,外幅承担混行集散功能;加州快速车道设置前后对比数据显示:通行效率提高20%。基于此,内外车道分幅的管控策略在美国其他城市已逐渐得到应用。另一方面,内外幅分幅的方法以双白实线为主,也有双黄实线、弹性示警桩等。

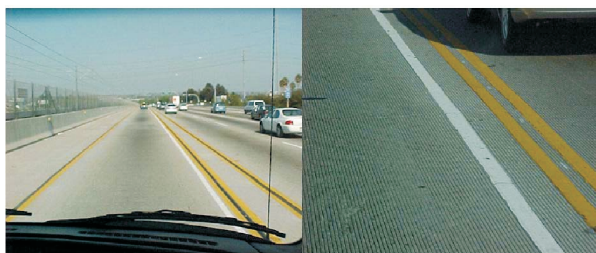


图1 美国加州双黄线分隔优先车道(HOV)

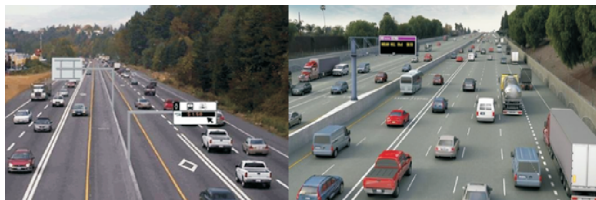


图2 美国华盛顿、洛杉矶双白实线分隔快速车道



图3 I-495 快速车道弹性示警桩分隔设置



图4 美国六、八车道高速快速车道分隔设置案例

2.2 国内相关案例分析

在我国,随着多车道高速公路的兴起,人们逐步认识到一些新问题,但是主要关注点在于改扩建方案选择、几何指标选用、路基桥梁拼接方法研究,近年来相对前沿的研究涉及左侧硬路肩、多车道交通量及交通流模型、交通运行特征方面,同向分隔带的设置及宽度取值方面的研究较少。田敏^[5]在对多车道高速客货分离技术研究中,仅对物理隔离及划线隔离优缺点进行了简单分析,并采用VISSIM仿真软件对划线分隔条件下不同车道功能划分方案进行运行效果分析,其研究重心仍在交通组织方面,对于采用单线或是双线以及分隔宽度方面并未提及。张颂^[6]在对复合断面高速公路的相关研究中,认为应设置同向分隔带并默认为物理隔离方式,其功能及结构可类比中央分隔带,故宽度取值可参照中分带。骆中斌^[7]基于我国高速公路改扩建采用单侧加宽方案时,从节约造价考虑,原有中分带保留而自然成为同向分隔带的事实,对同向分隔带宽度及开口进行了研究,宽度取值可参照中分带宽度。由于我国关于同向分隔带的研究总体较少,特别对于采用划线分隔的研究基本处于空白状态,故国内相关案例的分析显得尤为重要。

国内已建十车道工程案例较少,本次案例分析以水官高速为主。水官高速公路于2013年6月1日扩建为我国第一条双向十车道高速公路,小型车约占总交通量的70%,客车占总交通量的27.19%,大货车的数量最少,占比3.64%。在考虑将大小车辆分离行驶的前提下,结合交通量的分布情况,水官高速采用了左3+右2,中间设置0.5 m分隔带的交通组织模式,分隔带采用双黄色震荡标线软隔离,在互通出入口前后分别设置虚实线和实虚线,供车辆视需要出入,为明晰路权及车型,采用了分车道分车型限速指示标志,通过全线设置监控设施等措施,将小型车与大型车进行交通隔离,如图5所示。



图5 水官高速双黄线内外分隔设置

从双黄线现状分布上看,内虚外实段位于互通式立交出口前,仅允许内幅3车道向外幅2车

道换道。其设置长度主要与转向交通量相关, 长度为 2 km 或 1 km, 设置于 2 km 出口预告标志或 1 km 出口预告标志到行动点告示标志之间; 内实外虚段位于互通式立交入口后, 仅允许外幅 2 车道向内幅 3 车道换道, 其设置长度一般为 400 m, 部分路段因交通事故频发有所加长, 最长为 670 m, 设置于主线入口速度限制标志后; 双虚线位于出入主线收费站前后, 方便驾驶人选择合适的车道行驶, 其长度从 222 ~ 1042 m 不等; 双实线位于一般路段禁止内幅 3 车道与外幅 2 车道之间车辆换道, 其长度从 270 ~ 2540 m 不等。经统计, 目前水官高速上行方向双黄标线全长 12.8 km, 其中双实线 6.7 km, 占比为 53%; 内虚外实长 4.8 km, 占比 37%; 内实外虚长 1.1 km, 占比 8%; 双虚线长 0.2 km, 占比 2%。下行方向双黄标线全长 12.8 km, 其中双实线 6.0 km, 占比为 47%; 内虚外实长 3.9 km, 占比 31%; 内实外虚长 1.8 km, 占比 14%; 双虚线长 1 km, 占比 8%。

据了解, 鉴于水官高速建设时无十车道相关技术标准, 对于内外幅隔离的方式争议较大, 后经专家组讨论认为, 双黄线的强制性效果更好、警示作用更强。从运营情况来看, 水官高速采用左 3 右 2 + 双黄线分隔的交通组织模式车辆分布相对较平衡, 同时实现全路段无缝电子监控, 增加了区间测速、车道识别, 对交通违章和事故的处理更加快速, 近 10 年运营下来总体效果比较理想。

综合国内外对于多车道高速公路的同向分隔设置实例来看, 主要采用标线分隔形式, 然而对于标线颜色选取未明确区分。从我国交通标线规范体系来讲, 同向分隔通常采用白色, 虽然黄色警示作用更强, 但考虑到如今交通违章处理技术及国人安全意识已明显提高, 为保障标线设置体系的统一性, 本次驾驶模拟研究选用白实线为研究对象。

3 驾驶模拟实验及数据分析

3.1 驾驶行为分析

从实际层面上分析, 驾驶行为主要分为信息感知、分析判断、操作完成驾驶任务三部分, 见图 6。驾驶人最终的行为输出是上述三者共同反映的综合, 也可以看作是人、车、路相互作用的函数^[9]。驾驶行为是一个与多因素相关的综合性概念, 其评价可以从驾驶人对车辆控制的指标、驾驶人的认知行为以及生理心理指标入手^[8]。

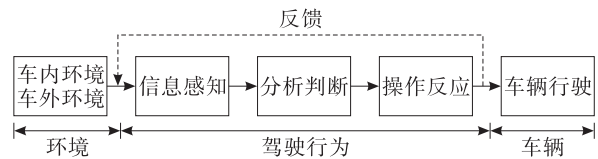


图 6 驾驶行为过程^[8]

3.2 驾驶模拟技术

驾驶模拟系统利用虚拟现实仿真技术营造一个虚拟的驾驶训练环境, 用户通过操作模拟器的部件与虚拟的环境进行交互, 进行驾驶训练^[10]。该驾驶模拟技术既能最大限度地还原真实的道路行驶场景、音响效果, 贴合实际驾驶体验, 可提高实验的有效性, 同时也有效避免了传统方法在实际道路环境下利用实车进行模拟实验的安全性风险, 能更有效地保护实验人员的生命安全, 增强实验过程的可控性, 降低实验成本及风险。

3.3 实验设备

本次实验采用真实车辆驾驶模拟平台, 该实验平台为六自由度, 是目前国际上较为先进的实验设备, 能够为驾驶人员提供多元素、多样化的实验场景。为测量人体生理指标以此反映驾驶人负荷程度, 使用美国 Biopic 公司最新生产的 MP150 无线生理记录及分析系统, 心率的采样频率为 2000 Hz。

3.4 实验被试

为客观、全面地反映不同分隔带设置宽度对于不同特质的实验被试驾驶行为的影响, 本次共邀请不同年龄段、不同性别、不同职业的 33 名实验对象进行模拟实验, 实验对象类型分布见表 1。

表 1 实验对象类型分布表

序号	区别要素		人数/人
1	职业	司机	11
		其他	22
2	性别	男	18
		女	15
		20 ~ 30	5
3	年龄/岁	30 ~ 40	12
		40 ~ 50	9
		50 ~ 60	7

3.5 场景构建及数据采集

实验场景构建基于驾驶模拟平台, 利用三维 BIM 技术, 分别建立 0 m、0.25 m、0.5 m、1.5 m 四种分隔线宽度的仿真模型, 如图 7 所示。

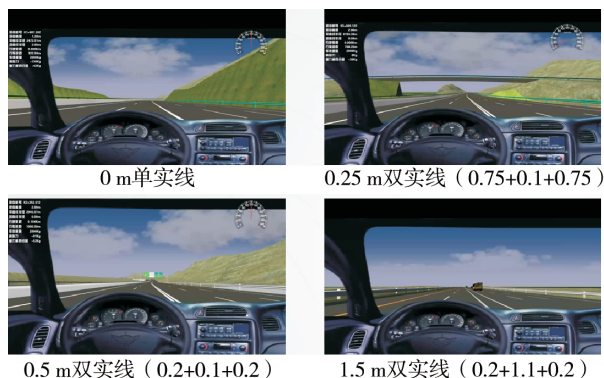


图7 不同分隔线宽度条件下仿真模型

实验过程驾驶员始终保持在第二车道,紧邻分隔线设置位置,见图8。通过分隔线宽度变化采集驾驶员心生理变化和车辆运动参数变化,从而反映不同宽度分隔线的影响效果。除分隔带宽度外,实验对象本身特征的差异,如性别、年龄、驾驶技术等,会对实验结果会产生重要影响。为分析特征差异对实验结果的影响,当实验人员完成了不同场景条件下的驾驶实验之后,实验还通过问卷调查的方式采集相关信息,以此综合反映不同特质驾驶人员的驾驶行为及舒适度情况。

模拟驾驶实验共进行33次,收集不同年龄段、不同性别、不同驾龄行驶数据5万余条,采集的数据包括驾驶数据、心率数据、驾驶感受问卷数据等。

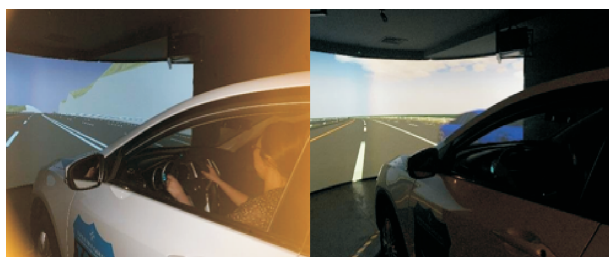


图8 不同分隔线宽度条件下驾驶模拟实验

3.6 分隔带设置对驾驶行为特性影响分析

驾驶员的具体驾驶行为表现在车辆的行驶状态上,如果车辆在行驶过程中速度维持较高水平,横向偏移值较小,可以认为驾驶员对车辆的操控比较平稳,行车交通环境良好。另外,驾驶人的舒适度也是保障行车持续安全的重要指标,可以通过采集分析驾驶人员心率等生理指标,来评价不同分隔带设置宽度下驾驶舒适性的高低。通过数据整理,分析车速、车道横向偏移及驾驶人心率情况如图9~图11所示。

由图9~图11对比分析可知:①当不设双向

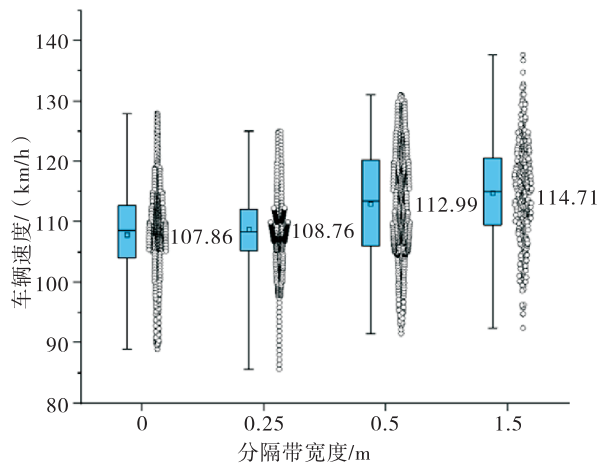


图9 第二车道行驶速度变化情况

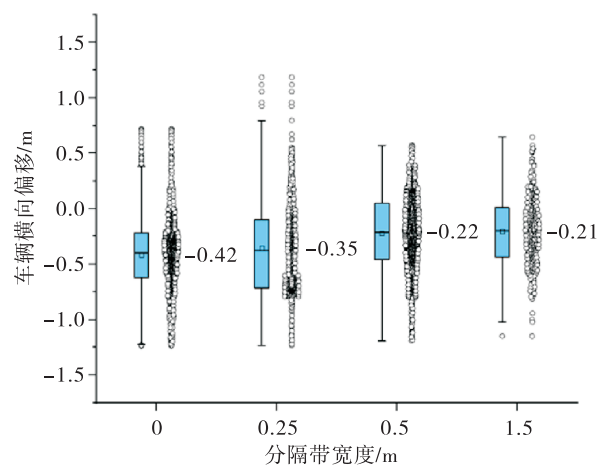


图10 第二车道横向偏移情况

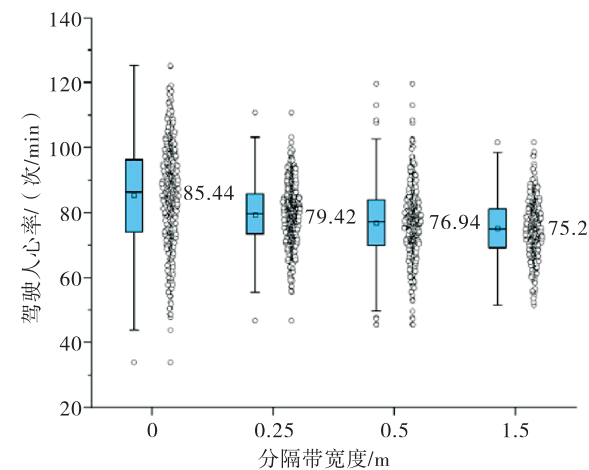


图11 第二车道驾驶人心率情况

分隔线仅采用单实线进行分隔时,驾驶人的平均心率高达85.44次/min,并且车辆运行速度最低,车道横向偏移值最大。②采用双实线分隔带后,虽然行车速度增幅不大,但驾驶人心率及车道横向偏移值显著降低;随着分隔带宽度逐渐加宽,第2车道行驶速度逐渐增加,而车道横向偏移值及驾驶人心率逐渐降低,车辆行驶状况趋向

平稳,人体舒适度增加。③当分隔带宽度从0.25 m变化至0.5 m时,车速增幅最大而车辆横向偏移值降幅最大,当从0.5 m加宽至1.5 m时,车速增幅、车辆横向偏移值及驾驶人心率降幅均不显著。

综合车辆运动参数及调查问卷结果后发现:①不同分隔带宽度对于专业司机、20~40岁区间的男性驾驶人员的车速及心率情况影响较小,主要由于司机驾驶技术较好,该年龄区间男性身体机能较好、反应敏捷,以上两种群体均较为自信,车速基本维持在118 km/h以上,心率基本维持在(65~75)次/min区间,该群体压实线换道行驶也较为频繁,然而随着分隔带宽度的增

加,该群体换道行为逐渐降低。②除女性专职司机外,女性驾驶人员以及40~60岁区间的男性驾驶人员,其车辆运动参数及心率波动随分隔带宽度的变化而明显变化;当不设置分隔带时,该群体车速普遍维持在100 km/h左右,心率普遍达到(85~95)次/min区间;当分隔带宽度为1.5 m时,该群体均普遍无紧张感,感觉驾驶舒适,驾驶速度也相应提高;当分隔带宽度从0.25 m增加为0.5 m时,该群体舒适度改善程度最为明显且该群体较为遵守交通规则,不同分隔带宽度下,压实线换道行驶行为均较少。

综合行驶速度、车道横向偏移值、驾驶人平均心率及主观感受问卷数据后,具体分析见表2。

表2 驾驶模拟实验数据分析表

对比项目	不设置分隔带	分隔带0.25 m 双线	分隔带0.5 m 双线	分隔带1.5 m 双线
行驶速度	速度中,107.86 km/h	速度中,108.76 km/h	速度高,112.99 km/h	速度高,114.77 km/h
横向偏移	大,向左偏移0.42 m	一般,向左偏移0.35 m	小,向左偏移0.22 m	小,向左偏移0.21 m
平均心率	高,85.44 次/min	一般,79.42 次/min	低,76.94 次/min	低,75.25 次/min
驾驶人主观感受	92%有紧张感	51%有紧张感	21%有紧张感	3%有紧张感
综合评价	较差	普通	较舒适	舒适

4 结语

本次研究通过驾驶模拟技术,对分隔带设置及不同宽度进行模拟实验。结果表明,当设置分隔带时,内侧第二车道车辆横向偏移、驾驶人心理特性、驾驶主观感受等方面均优于不设置分隔带,分隔带能够提供驾驶人安全、舒适的横向驾驶环境,总体行车舒适性较优,故广深高速公路采用2+3内外分幅交通组织模式时,宜设置内外幅分隔带;由于分隔带的不同设置宽度对一般人员的驾驶行为特性有明显影响,综合车辆控制指标及驾驶人舒适度评价,同时兼顾工程规模及工程习惯等因素,建议分隔带采用0.5 m双白实线形式;同时,由于专职司机及年轻男性驾驶人员普遍驾驶速度快、压实线换道频率高,故在设置分隔带的前提下,仍要加强安全教育及交规宣传,加大违章监控系统建设及执法力度,采用综合措施提高多车道高速公路的安全性。

参考文献:

[1]广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司. 京港

澳高速公路广州火村至东莞长安段及广佛高速公路广州黄村至火村段改扩建项目工程可行性研究报告[Z]. 2022.

[2]孔令斌. 高速机动化下城市道路功能分级与交通组织思考[J]. 城市交通,2013,11(3):3-4.

[3]赵妮娜. 八车道高速公路交通安全设施设计研究[D]. 上海:同济大学,2008.

[4]FHWA. Managed Lanes: A Primer [R]. Washington D. C.,2008.

[5]田敏. 多车道高速公路客货分离运行安全保障关键技术研究[D]. 西安:长安大学,2021.

[6]张颂. 复合式断面高速公路交通组织与关键指标研究[D]. 西安:长安大学,2021.

[7]骆中斌. 高速公路中央分隔带、同向分隔带布置型式及开口研究[D]. 西安:长安大学,2015.

[8]赵佳. 基于驾驶模拟实验的雾天对驾驶行为影响的研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.

[9]王武宏. 道路交通中驾驶行为理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2001:43-54.

[10]龚鸣. 驾驶模拟器视认特性的有效性研究[D]. 北京:北京工业大学,2011.