

高速公路指路标志系统研究进展

李美玲¹,陈雅楠¹,冉晋²,张军华³,马晓刚³,朱香敏³

(1.山东建筑大学 交通工程学院,山东 济南 250101;2.山东省交通科学研究院,山东 济南 250102;

3.山东高速股份有限公司,山东 济南 250101)

摘要:指路标志是确保高速公路快速安全通行的重要交通管理措施。随着中国高速公路网的逐步建成,交通出行方式已由早期单一线路出行转变为多条高速公路间衔接转换的网状出行,但传统指路标志的内容形式及组合布局难以与现实环境匹配,不利于驾驶者快速、安全地识别信息。该文从指路标志版面设计、指路标志信息量、指路标志位置设置和指路标志效用评价4个方面,系统梳理总结国内外在高速公路指路标志系统方面的规范标准制定现状、研究热点、存在问题、优化措施与效用评价方法以及未来发展趋势。综述表明:从人机工程学、心理学、生理学、认知学等多角度出发,可分析指路标志版面信息要素选用及排布形式对驾驶人视认性的影响;指路标志信息量阈值与指路系统信息发布流程等研究,需符合驾驶员的信息处理特征;采用多元化数据采集汇聚、驾驶模拟与人因测试、多维度数据挖掘建模、沉浸式机理解析等技术,对不同指路标志设置场景进行研究,可为指路标志的科学合理设置提供理论支撑;借助描述性统计分析、多目标定权重、全面量化评价等方法,可实现对指路标志系统设置效果的综合评估。

关键词:高速公路;指路标志;版面设计;信息阈值;位置布局;效用评估

中图分类号:U491.5+2

文献标志码:A

0 引言

随着中国高速公路网的逐步建成,高速公路指路标志系统也在不断完善。作为驾驶员直接读取信息的窗口,指路标志向道路使用者传递道路信息,确保高速公路快速畅通、安全舒适,已成为最基本、最重要的交通管理措施之一。但是,目前不合理的指路标志系统常常存在指引道路交通混乱、信息层次不分明、设置间距过小、出入口交通组织与交通标志设置冲突、标志视认不清等问题。可见,科学合理地设置高速公路指路标志具有重要的现实意义。

近年来,广大学者采用多种技术方法,在指路标志系统研究中取得了众多成果。本文从指路标志版面设计、指路标志信息量、指路标志位置设置和指路标志效用评价4个方面,系统阐述国内外在相关领域的规范标准制定现状、学术研究热点、效用评估方法和发展前景等,指出高速公路指路标志系统在建立

和实际应用中存在的问题,为今后进一步的优化研究与发展提供参考和借鉴,以不断提升道路交通安全运营水平,促进高速公路快速、安全、高效发展。高速公路指路标志系统相关研究的思维导图见图1。

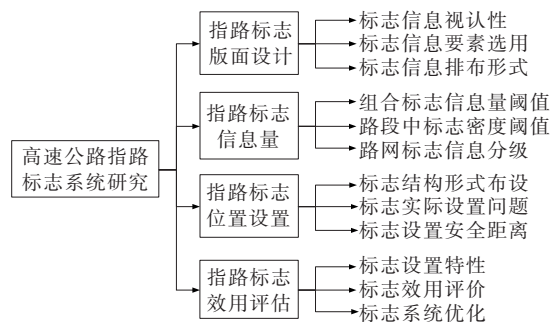


图1 高速公路指路标志系统研究思维导图

1 指路标志版面设计

指路标志版面设计通常是指道路标志信息的要素选用分析和排布方式。现今,中国高速公路网已

收稿日期:2022-07-18

基金项目:山东省技术创新项目(编号:201921901093);山东省交通运输科技计划项目(编号:2020B48)

作者简介:李美玲,女,硕士,副教授.E-mail:lmeiling2015@hotmail.com

成型,交通出行不再是早期的单一线路出行,而是多条高速公路之间衔接转换的网状出行。在车道数多、枢纽互通立交变化复杂等情况下,传统指路标志的版面内容往往适应性不强,内容形式及组合布局难以与现实环境匹配,不利于驾驶者快速、安全地识别信息。尤其对于不熟悉道路环境的驾驶员而言,清晰有效的指路标志版面设计是指引其顺利完成行驶状态改变的重要保证。

1.1 标志信息视认性

探究指路标志信息与驾驶员的视认性关系,通常是通过驾驶员由远及近对标志版面发现、识别、理解,并根据阅读情况作出相应判断与反应。早在20世纪70年代,Gordon^[1]就分析了高速公路指路标志信息要素选用的视认性;Jenssen等^[2]则对交通标志的有效认知距离进行了分析研究;Chang等^[3]通过视认性解释了驾驶者依赖道路指路标志驾驶车辆到达目的地的机理;Ben等^[4]建立了道路标志的汉字尺寸和信息量模型;Schnell等^[5]则在研究中加入实际亮度、标志版面字体大小等因素。上述研究表明:指路标志信息视认的难易程度会影响驾驶员识别过程中汽车的加速度、偏移距离,提高标志信息视认性可以提高驾驶员反应的正确率,并有效减少视认反应时间。

中国研究始于1973年,张伯明^[6]对交通标志的文字字体、高度尺寸、笔画数、字频、字间距、行间距等进行了视读性研究。随着交通安全意识的不断提高,指路标志信息的视认性、理解性需求逐步增加,研究方式也逐渐多元化。黄凯等^[7]从心理学、生理学及人机工程学等角度梳理了交通标志的一般认知规律;蒋海峰等^[8]结合理论分析和大量现场试验,研究了指路标志字高与视认性的定量关系。1986年,参考国外相关标准^[9-10],中国制定了第一部国家标准规范《道路交通标志和标线》(GB 5768.2),经过不断修订完善,依次出现了1999版、2009版、2017版,该标准对中国道路交通标志的版面设计、空间位置等设置原则,对道路指路系统设计进行了统一规定^[11]。

1.2 标志信息要素选用

指路标志的信息要素通常包括完整的道路及地点信息,对其进行分类、分级、编号,必要时选择层级属性,并辅以方向及距离提示。科学合理的指路标志信息要素选用对正确指引驾驶员安全、快速行驶

大有裨益。一般情况下,高速公路指路标志所传递的信息应指向周边具有较高交通吸引力的城市,传递通过互通立交可到达的重要地点的相关道路信息,以达到最佳的交通引流效果。因此,标志信息要素的选用应主要具备以下特性:道路名称信息易理解,道路编号信息表述简洁,道路等级属性直观准确,重要地物指向性明确等。

针对标志信息要素选用,多数研究者基于驾驶员的心、生理特性,从需求角度出发,探索指路标志信息选取的要点和选用方法,并形成规范、系统的信息要素层级体系。Summala等^[12]通过3种指路标志的显著性分析,研究驾驶员的知觉特性,初步测试了交通标志的灯光亮度在不同天气条件下对驾驶员反应时间的影响;Jamson等^[13]利用驾驶模拟试验研究了信息以不同语言组合的视认效率,评价双语对照形式对于驾驶员行为和安全的影响;邓兴栋^[14]从路网拓扑结构和道路交通功能层面研究指路标志信息要素的选用,首次强调了路网结构、土地利用等的重要性;王笃明等^[15]开展了指路标志信息要素需求的KANO调查,指出指路标志信息内容要素的优先级依次为方向标识、当前位置、距离、地标等信息;赵妮娜等^[16]对比了国外发达国家和中国部分高速公路枢纽互通指路标志信息要素选取方法,为大型互通指路标志的多信息要素设计提供了思路。

1.3 标志信息排布形式

指路标志信息排布是指将多个单一的交通信息元素在同一标志版面上进行组合排布,以向道路使用者同时展示多重交通信息。不同种类的指路标志所包含的信息要素各有不同,中国规范按照功能不同将指路标志分为路径指引标志、沿线信息指引标志和沿线设施指引标志,通过不同的信息布局形式来适应道路使用者不同的信息需求。

针对标志版面设计时信息的排布形式,研究者力求不同方案信息布设的效用最优化。Yu等^[17]快速呈现序列和闪现文字,分析了信息以不同角度排布形式下的视认速度规律,发现信息横向排布和纵向排布对其认知时间存在显著影响;胡信奎^[18]采用眼动跟踪技术及视觉搜索范式,验证了信息对称排布对视认效用的显著促进作用,表明信息排布具有对称效应。这说明信息多要素间成组布设的研究思路,能够较好地适用于复杂指路标志的版面设计,尤

其是含有多层地点信息及表示前进方向箭头的标志,选择符合驾驶员视认习惯的信息要素和排布形式,更有助于交通标志系统的充分利用及更新。

国外研究在指路标志版面设计方面构建了更为全面的体系^[19-22],而中国相关规范则是在国外设计经验和理论成果的基础上制定,初步考虑了中国实际道路情况和车辆性能,对于驾驶人视认习惯方面仍存在一定欠缺。因此,近几年标志版面设计理念强调“以人为本”,多基于参与者的主观感受和驾驶行为进行信息需求试验探究,并开发了通用方法 TGSEM,用于检查和评估标志版面信息选取和排布的有效性^[23-25]。如此,不再仅停留在驾驶员的驾驶性能分析,还研究参与者对道路信息和区域信息的需求,此类研究思路为标志设计理念的趋势导向。

2 指路标志信息量

近些年,由于路网密度的提高,指路标志的布设数量和种类不断增多,指路标志需要提供的信息量也随之增加,逐渐出现指路标志“信息超载”问题。对指路标志信息进行合理分级,分析驾驶员视认和处理不同分级的标志信息,考虑信息间相互作用和干扰,进而确定驾驶员换道需求与密度阈值的关系以及与组合标志信息量的关系,是解决此类问题的关键。

2.1 组合标志信息量阈值

针对指路标志“信息过载”问题,早期研究主要着眼于单块交通标志和静态的数据分析,大都认为指路标志版面中占比最大的文字信息是驾驶员最需要的信息。因此,该方面的研究多默认为文字信息量的研究。早期,有学者^[26]从信息接受者的角度提出以“熵”来度量信息,可以消除不确定因素;Messer等^[27]收集了美国10个主要城市高速公路的交通标志特征数据,发现许多指路标志都存在“信息过载”问题;Liu^[28]发现指路信息数量对驾驶员信息搜索行为的影响很大,若陌生信息量过大,驾驶员需花费大量时间理解;黄凯等^[29]确定了公路环境下指路标志信息量的极限;王建军等^[30]从信息理论和驾驶员视觉认知心理学角度提出了交通标志信息量的度量标准;祖永昶等^[31]量化分析了信息量变化与驾驶员负担之间的变化呈负相关。

然而,现实中指路标志的多种信息要素往往在同一版面中要以不同排布形式组合出现,所以近几年多探究组合指路标志版面信息量与驾驶员反应时间的关系,以此确定指路标志信息量阈值范围。国内外研究结果大致相同,即驾驶员识别时间随单个指路标志信息量增加而提高,不利于交通安全和行驶效率,但存在信息量阈值使识别时间不再显著提高,这与驾驶员的驾驶经验无关。中国标准^[32]进一步给出定量结果,即在同一标志版面中,各方向提供的信息数量总和不宜超6个,同一方向提供的信息数量不应超2个。最近几年,此方面问题研究更为系统全面,结合驾驶疲劳研究建立了基于信息理论的结合语义相关性交通标志信息量测度模型^[33],并讨论了指引图形难易程度、限速及不同支撑形式下指路标志的合理信息量^[34-35],即较简单标志或限速40 km/h道路的信息量阈值为6条;指引图形较复杂标志或限速60 km/h道路的信息量阈值为5条;采用悬臂式支撑方式时,信息量阈值为5条;采用门架式支撑方式时,信息量阈值以不超过9条为宜。

2.2 路段中标志密度阈值

高速公路同一路段,相邻的组合指路标志彼此间往往具有较好的关联性和信息连续性,提供清晰连续的信息指引驾驶员到达目的地。但若路段中指路标志的设置间隔过小,密集传递的信息量会使驾驶员分心,增加紧张情绪,降低其信息处理能力,严重影响行车安全性。因此,路段中指路标志密度阈值的大小与行车安全相关性存在较强的联系。相关研究表明:驾驶员在读取指路标志信息时,要经历“发现标志、识别标志、视认信息、加工处理、结束认读、行为决策、执行处理”等一系列过程^[36-37],在确定指路标志密度阈值时,要运用信息论和认知心理学等相关理论考虑驾驶员的行驶特性,以动力学原理构建指路标志信息传输模型,计算处理信息、执行决策过程中涉及的重要距离^[38-40]。

2.3 路网标志信息分级

为了使指路标志系统充分发挥作用,通常对指路信息重要度进行分级,以便于在不同节点处设置不同级的指路标志。常用的分级方法是“三类三级”,其中,“三级”是按照各级信息的行政等级、重要程度、著名程度等划分为A、B、C三级,同时每一级信息都包括道路信息、方向信息、地点信息及距离信息

等,即“三类”。这种方法可以将信息进行有效的分层次选取,使整个指路系统指导精确程度更高,从而逐级指引驾驶员行驶至目的地。过秀成等^[41]提出了在交通标志设施的具体设置之前需要对设置范围内各项原则进行规划;王建军等^[42-43]提出了理论区域优先度、实用区域优先度等概念,并以西安路网为例,对信息分类、分级和节点进行了划分,提出了道路标志优化设计方法。此后,众多学者因地制宜,对苏州、杭州、广州、郑州等地高速公路指路标志中的地名进行了定量分析,研究适合于当地交通环境的方法,提出了目的地节点分级提示^[44-48]。

综上所述,在指路标志信息量方面,中国目前存在的问题一方面是在复杂路段如何对标志信息进行快速有效的识别和筛选;另一方面是在加密路网中标志布置与驾驶员识认特性存在冲突。故一些学者^[49-51]针对指路信息繁多的特点,将指路标志系统分为立交单元和主线单元,进一步细化了指路信息的分级设计和服务对象筛选。如此,信息分级过程可大体分为服务对象的确定、根据道路功能筛选服务对象、明确所需指路信息、指路信息分级4个步骤,在满足相关规范内容的基础上设计标志,便于驾驶员进行信息提取。

3 指路标志位置设置

高速公路分合流、互通立交等处的交通组织往往具有特殊性和复杂性,规范中对上述区域指路标志的布设位置、布设类型及结构形式的规定较为笼统。此外,指路标志的空间布局通常没有将实际的交通流特性、特殊位置激增的交通量以及车辆运行规则等因素考虑在内,从而导致部分指路标志系统在设计时人为主观性较强,缺少充分的作用机理研究作为理论支持。

3.1 标志结构形式布设

指路标志根据支撑结构的不同,可分为柱式、路侧附着式、悬臂式、门架式、车行道上方附着式5种形式。可选取门架式作为高速公路指路标志的主要结构形式,基于力学仿真及力学模型计算,结合风振系数基本理论,设计指路标志支撑结构的尺寸^[52]。有的倾向于单悬臂式交通指路标志,使用有限元方法分析结构的模态,计算自振频率以及风荷载作用下

的位移和应力响应加以验证^[53]。还有的分析了不同指路标志结构形式的特点和设置要求,从设置类型、距离角度、位置应用等方面对标志的视认性和结构形式的道路适用性进行分析^[54]。

3.2 标志实际设置问题

当高速公路车道数较多时,极易产生驾驶视线被遮挡问题。当出现外侧行驶车辆被内侧大型车辆遮挡的情况时,通常会计算指路标志被遮挡的概率。李苗苗等^[55]、邓亚娟等^[56]、胡绍荣等^[57]计算了不同交通条件下小型车被遮挡率的动态化过程,根据驾驶人在视认区域内视线被遮挡的最大、最小临界距离,改善现有高速公路标志优化设计和遮挡状况;杨少伟等^[58]、叶海飞等^[59]以高速公路内侧车道驾驶员视角研究外侧车道大型车辆遮挡概率,基于认读交通标志所需的最短时间、车辆车头时距分布、驾驶员视线与车辆、车道形成的几何关系及微积分原理,建立错过路侧标志信息的概率计算模型。在研究遮挡概率的同时,对于标志的角度、分布设置等方面还提出改善方案,如孙乔宝^[60]建议在较危险的路段应采用门架式标志代替路侧标志,将标志设置在车道上方使驾驶员无遮挡地看清前方路况和提示;李文权^[61]计算标志位置、连续设置个数和标志间的最小间距,提出连续设置路侧交通标志方案;冯移冬^[62]、潘晓海等^[63]将大车的遮挡因素与现有高速公路路侧标志设计设置理论相结合,建立“指路标志—驾驶员操作行为—交通流运行状态”相互作用的标志设置效果综合评价系统,对指路标志设置方案的效果进行综合评价。

3.3 标志设置安全距离

指路标志空间布局应控制在合理范围内,通常以安全距离为研究指标。中国很多学者通过高速公路出口区域交通安全特性与驾驶行为特征分析,考虑道路换道、视前距离等因素,对不同指路标志设置位置的合理性进行比较。研究结果表明:从指路信息发布点开始采取换道行为到驶出高速公路主线的过程中,应满足最内侧车辆完成连续多次换道到最外侧车道的需求。根据驾驶员换道的驾驶行为、视觉特性及交通条件建立数学模型,郭唐仪等^[64]确定了预告指路标志3种不同安装方式在不同车道数和不同设计速度下的安全设置距离;还有学者^[65-67]将机动车驶出高速公路的行为过程分为反应期、变道期、

减速期,建立了安全合理的高速公路出口前置指示标志(AGS)设置距离计算模型,研究高速公路出口处AGS对分流区的安全性能,根据交通流特性和驾驶员的视认-驶离行为,建立了前置指路标志的安全距离设置模型。

综上所述,在指路标志位置设置方面已形成一定规范要求,但由于高速公路道路环境复杂,存在的问题集中于特殊位置的布设,陈志乾^[68]、Huang等^[69]仿真分析了高速公路出口驶出车辆的换道行为和影响因素,得出了高速公路出口指路标志建议设置位置,为标志位置距离设计提供了参考方案。

4 指路标志效用评估

4.1 标志设置特性

国内外很多学者计算影响指路标志认知性的相关因素,提出基于易理解性、连续性、一致性和系统性的指路标志设计原则,更加符合高速公路交通流特性和道路特征。郭瑞利^[70]以标志的易理解程度为依据,提出了标志设置优化方法;曹佳^[71]、韩跃杰等^[72]针对高速公路标志信息连续性进行研究,发现合理设置出口名称和收费站名称有利于高速公路出口信息设置的连续性提高;Distasi等^[73]对指路标志标识一致性问题进行研究,以通往某机场的高速公路为例,发现标识一致时驾驶人可以准确快速标识相关信息,不一致时驾驶人不能顺利辨识有用信息;吕丹^[74]研究各个层次道路交通流特性和驾驶员对指路标志信息的需求特性,确定了高速公路和城市道路衔接区域指路标志系统的设置原则;在此基础上,慕伟^[36]还对标志信息内容构成及排布形式的微观、根本层面有效性进行了分析,建立了有效性熵量化模型及量化研究。

4.2 标志效用评估

通过对道路交通标志的分类、布设要求和布设细则研究发现,指路标志在道路交通标志中影响因素最为复杂。为科学度量指路标志设计的水平,需要挖掘具有普适性的宏观评价指标,进行详细系统的标志效用评价。评价往往既受主观因素影响,也与客观因素有密切关系。因此,常常通过实地调研发现共性问题,从指路标志版面设计^[75]、信息量量化^[76]、路网衔接段的标志设置^[77-78]等方面建立综合评

价模型^[79-80],将调查问卷需求分析和专家评估赋予权值等主观因素转化为量化数据,能更为准确地评估出驾驶员对指路标志信息需求、认知规律的满足程度以及指路标志与道路线形条件和交通环境的切合度,使交通标志系统设计更加合理化、标准化,使交通路网层次更加分明,从而改善高速公路的服务水平,提高驾驶安全。

4.3 标志系统优化

对指路标志系统进行优化,本质上是从标志标识的设置方位、适用状况、使用条件、新材料技术应用等方面,对标志版面内容、信息分级及各个审核点的位置设置进行相应路段的更新,使其更加适应高速公路的交通环境,改善道路条件对行车安全所带来的影响,保障驾驶员安全顺畅通行^[81-83]。目前,中国学者通常从新旧两版国标入手,对比分析得出旧国标存在的问题以及新国标修订的主要内容,完善高速公路交通标志标识优化内容^[84-85];辅以信息论和视认心理学理论,提出以“节点优化设计为主、路段优化设计为辅”的标志位置设计方法,对不同类型的信息节点重新分级^[86-87]。

如今,随着科技创新的高速发展,物联网、智能网联汽车、车路协同等逐步应用,这使得利用新技术理念并结合传统效用综合评价方法,完成指路标志的效用评估成为可能。例如,高精度导航以视觉和语音两种形式,直接面向参与者提供标志信息内容,其播报措辞复杂度的作用机理在一定程度上反映指路标志效用的好坏;基于信息语音补偿技术,搭建不同驾驶行为特征下的智能语音提示系统,构建智能语音提示系统效用评价模型,形成指路标志文字及语音信息一体化的优化系统。更为前沿的研究聚焦在智能网联汽车,模拟连接的车辆环境,并通过人机界面(HMI)提供驾驶辅助,对周围的交通标志信息进行及时有效的评估,使互联车辆环境为驾驶员高效地做出安全决策^[88-90]。因此,借用新技术构建高速公路智能化指路标志系统,将有利于优化指路标志体系、优化指路标志设计理念。

5 结论

科学合理的高速公路指路标志系统对有效引导交通出行、保证交通运行秩序具有重要意义,对发挥

高速公路分担大运量城际交通、有效指引驾驶员安全快捷到达目的地、并快速疏散交通流起到至关重要的作用。从目前国内外高速公路指路标志系统的研究进展来看,已有的高速公路指路标志相关研究成果对现实工程中指路标志系统的设计和优化具有较好的启示和借鉴作用,主要体现在以下几个方面:

(1) 从人机工程学、心理学、生理学、认知学等多角度出发,开展指路标志版面视认性研究,进行指路标志信息要素选用和标志信息排布方式的科学化设计,可有效获取指路标志版面对驾驶人的影响规律。

(2) 对指路标志版面本身的信息阈值、路段范围内标志布设密度阈值以及所处路网环境的道路交通信息分级进行研究,分析驾驶员特性及驾驶操作信息对指路标志信息量的影响,可使指路标志信息量设置与指路系统信息发布流程更加符合驾驶员的信息处理特征,以逐步解决指路标志“信息超载”问题。

(3) 考虑指路标志结构形式布设、被遮挡以及布设安全距离的合理性等问题,采用驾驶仿真模拟、数学概念模型等技术手段,通过多元化数据采集汇聚、驾驶模拟与人因测试、多维度数据挖掘建模、沉浸式机理解析等方式对不同指路标志设置场景进行研究,明确指路标志作用机理,可为指路标志的科学合理设置提供理论支撑。

(4) 借助描述性统计分析、多目标定权重、全面量化评价等方法实现对指路标志系统设置效果的综合效应评估,进而不断地优化提升高速公路指路标志系统。

当然,目前的高速公路指路标志系统研究仍有诸多问题需要进一步深入探讨,如指路标志的研究应用范围还不够全面,不良外界环境条件对指路标志识别及驾驶行为研究较少;指路标志信息量阈值大小及对应的极限信息量大小还不明确,仅有单块标志信息量可供查询,多块组合标志信息量对驾驶员产生的负荷值仍需通过大量研究来确定。

在今后的研究中,可以结合驾驶员获取的交通信息和其执行的驾驶操作,通过先进的全景、全息、全样本形式的驾驶模拟仿真等试验手段,运用机器学习等方式,建立“理论研究—驾驶模拟仿真试验—现场试验验证”三位一体的指路标志系统研究与设计方法。同时,结合智能远程信息控制等技术,探究更为科学合理,更加规范化、标准化和智能化的高速

公路指路标志系统布设方案。

参考文献:

- [1] GORDON D A. The assessment of guide sign informational load[J]. Human Factors: the Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 1981, 23(4): 453-466.
- [2] JENSSEN G D, BREKKE B. A comprehensive evaluation of fluorescent retroreflective traffic control devices based on human factors and traffic engineering data[C]//7th International Conference on Vision in Vehicles, MARSEILLE, FRANCE, 1997.
- [3] CHANG J L, LI J, CHIMBA E D. A Supplement to advance guide sign placement guidelines in MUTCD[C]//Transportation Research Board Meeting, 2006.
- [4] BEN B T, SHINAR D. Ergonomic guidelines for traffic sign design increase sign comprehension[J]. Human Factors, 2006, 48(1): 182-195.
- [5] SCHNELL T, YEKHSHATYAN L, DAIKER R. Effect of luminance and text size on information acquisition time from traffic signs[J]. Transportation Research Record, 2009, 2122(1): 52-62.
- [6] 张伯明. 交通标志汉字视认性的研究[J]. 公路交通科技, 1993, 10(2): 40-46.
- [7] 黄凯, 侯德藻, 何勇, 等. 驾驶员动态视认特性初探[J]. 道路交通与安全, 2008, 8(5): 26-29.
- [8] 蒋海峰, 韩文元, 张智勇. 交通指路标志字高与视认性关系研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(7): 115-120.
- [9] Transportation Research Board. Highway capacity manual [M]. Washington, D. C.: Transportation Research Board National Research Council, 2000.
- [10] MUTCD 2000 CHAPTER 2E. Guide signs-freeways and expressways manual on uniform traffic control devices[S]. FHWA, 2009.
- [11] 交通部公路科学研究所. 道路交通标志和标线: GB 5768—1986[S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.
- [12] SUMMALA H, HIETAMÄKI J. Drivers' immediate responses to traffic signs[J]. Ergonomics, 1984, 27(2): 205-216.
- [13] JAMSON S L, TATE F N, JAMSON A H. Evaluating the effects of bilingual traffic signs on driver performance and safety[J]. Ergonomics, 2005, 48(15): 1734-1748.
- [14] 邓兴栋. 城市道路指路标志信息选取方法研究[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(1): 97-102.
- [15] 王笃明, 胡梦, 葛列众, 等. 城市道路指路标志版面要素信息用户需求研究[J]. 人类工效学, 2015, 21(2): 26-30, 37.
- [16] 赵妮娜, 刘会学, 葛书芳. 国内外高速公路枢纽互通指路

- 信息选取方法研究[J].公路,2016,61(9):208-213.
- [17] YU D Y, PARK H, GEROLD D, et al. Comparing reading speed for horizontal and vertical English text[J]. *Journal of Vision*, 2010, 10(2):1-7.
- [18] 胡信奎. 道路交通标志中对称结构效应的工效学研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2010.
- [19] IARTSEV S G, KULICHEV V A, FILIPPOV E V. Drivers' immediate responses to traffic signs[J]. *Applied Ergonomics*, 1971, 16(2):176-8.
- [20] GOYAL R K. Similarity assessment for cardinal directions between extended spatial objects[D]. Maine: University of Maine, 2000.
- [21] KAZARAS K K, KIRYTOPOULOS A, RENTIZELAS. Introducing the STAMP method in road tunnel safety assessment[J]. *Safety Science*, 2012, 50(9):1806-1817.
- [22] HUNTER M, BOONSIRIPANT S, GUIN A. Evaluation of effectiveness of converging chevron pavement markings in reducing speed on freeway ramps[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2149(1):50-58.
- [23] YAO X L, ZHAO X H, LIU H, et al. An approach for evaluating the effectiveness of traffic guide signs at intersections[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 129: 7-20.
- [24] 赵妮娜, 赵晓华, 林展州, 等. 基于驾驶行为的高速公路出口标志形式研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(4): 137-145.
- [25] GUO Z Y, WEI Z M, WANG H C. The expressway traffic sign information volume threshold and AGS position based on driving behaviour[J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14:3801-3810.
- [26] DUTTA A, FISHER D L, NOYCE D A. Use of a driving simulator to evaluate and optimize factors affecting understandability of variable message signs[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2004, 7(4/5):209-227.
- [27] MESSER C J, MCNEES R W. Characteristics of urban freeway guide signing in selected cities[J]. *Transportation Research Board*, 1981:33-35.
- [28] LIU Y C. A simulated study on the effects of information volume on traffic signs, viewing strategies and sign familiarity upon driver's visual search performance[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2005, 35 (12):1147-1158.
- [29] 黄凯, 何勇, 韩文元, 等. 公路指路标志极限信息量研究[J]. *市政技术*, 2008, 26(6):471-474, 482.
- [30] 王建军, 王娟, 吴海刚. 道路交通标志信息过载阈值研究[J]. *公路*, 2009, 54(4):174-180.
- [31] 祖永昶, 李娅, 王运霞, 等. 城市道路指路标志信息量限值研究[J]. *交通信息与安全*, 2012, 30(6):38-42.
- [32] 交通部公路科学研究所. 道路交通标志和标线: GB 5768—1999[S]. 北京:中国标准出版社, 1999.
- [33] 黄麒麟. 考虑不同驾驶状态的快速路交通标志信息量研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- [34] 刘小明, 王蔚, 姜明, 等. 组合交通标志信息量阈值研究[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(1):141-148.
- [35] 王振国. 绕城高速公路出入口指路标志信息量及版面设置研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
- [36] 慕伟. 城市道路交叉口指路标志信息有效性量化模型研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
- [37] 谢雨辰. 单向五车道快速路指路信息优化设置研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2017.
- [38] 樊大可, 王建军, 常振文, 等. 道路交通标志信息过载阈值的计算[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2009, 29(6): 82-87.
- [39] 姚云. 基于认知心理学的指路标志信息与信息密度阈值研究[D]. 成都:西华大学, 2009.
- [40] 李薇. 基于驾驶员视觉行为的干线公路交通标志研究[D]. 天津:河北工业大学, 2011.
- [41] 过秀成, 郭敏. 对高速公路标志设置的探讨[J]. *华东公路*, 1996(4):24-25.
- [42] 王建军, 周伟, 张争奇. 高速公路交通标志中地名选择方法的探讨[J]. *华东公路*, 1997(5):26-28.
- [43] 王建军, 钟厚冰. 道路交通标志设计理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [44] 徐学敏. 环城高速公路交通标志的设置[J]. *公路交通科技*, 2003, 20(S1):139-143.
- [45] 钮建平. 关于江苏省干线公路标志标线现状及对策的思考[J]. *江苏交通科技*, 2003(3):25-27.
- [46] 余文晟. 环城高速公路交通标志的信息化及设置研究[D]. 成都:西南交通大学, 2005.
- [47] 谢志明. 广州市环城高速公路指路标志系统改善对策研究的探讨[J]. *公路工程*, 2008, 33(4):161-165, 176.
- [48] 杜战军. 郑州绕城高速公路指路标志整改实践研究[J]. *公路*, 2011, 56(9):52-54.
- [49] 吴海刚, 魏华, 李聪颖. 绕城高速公路指路标志信息设计方法探讨[J]. *公路*, 2007, 52(7):98-102.
- [50] 李海南. 多车道高速公路指路标志设计研究[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
- [51] 赵妮娜, 赵晓华, 林展州, 等. 考虑间接到达高速公路信息指引需求的出口预告标志设计[J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(8):1129-1135.
- [52] 贾宁, 刘健新, 张颖. 门架式交通标志的风振系数计算[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2007, 27(2):46-48.

- [53] 陈婷如.基于有限元分析的单悬臂式交通标志优化设计[J].黑龙江交通科技,2011,34(5):72,74.
- [54] 王建强,祖永昶,卢健.城市快速路出口预告标志设置方法研究[J].中国人民公安大学学报(自然科学版),2017,23(1):60-66.
- [55] 李苗苗.基于大型车遮挡的多车道高速公路交通标志优化研究[D].西安:长安大学,2017.
- [56] 邓亚娟,李苗苗,胡小霞,等.多车道高速公路门架式交通标志遮挡概率研究[J].公路,2018,63(4):179-184.
- [57] 胡绍荣,马荣国,李苗苗,等.多车道高速公路路侧交通标志遮挡概率研究[J].中国公路学报,2018,31(3):116-122,150.
- [58] 杨少伟,吴佳昀,潘兵宏.六车道高速公路内侧车道驾驶员错过路侧交通标志信息的概率研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(9):38-45.
- [59] 叶海飞,陆建.多车道普通公路路侧标志遮挡问题研究[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(3):159-164.
- [60] 孙乔宝.关于6车道高速公路路侧标志遮挡问题的讨论[J].公路交通科技,2005,22(7):135-138,146.
- [61] 李文权.高速公路路侧标志遮挡问题[J].交通运输工程学报,2006,6(3):97-102.
- [62] 冯移冬.考虑大型车辆遮挡因素的高速公路路侧标志设置效果评价研究[D].西安:长安大学,2014.
- [63] 潘晓海,姜明.考虑大车遮挡因素的多车道高速公路路侧交通标志设置效果研究[J].公路交通科技(应用技术版),2015,11(1):191-195.
- [64] 郭唐仪,胡启洲,姚丁元.高速出口预告指路标志设置距离及其安全性能比较[J].公路交通科技,2011,28(12):106-111.
- [65] 刘伟铭,邓如丰,张阳,等.高速出口前置指路标志的安全距离设置模型[J].华南理工大学学报(自然科学版),2013,41(2):37-43.
- [66] 王昊程,赵伟,赵彦.基于驾驶模拟的多车道高速公路出口前置指路标志设置位置研究[J].交通科技,2015(3):162-165.
- [67] 崔洪军,马新卫,李霞,等.高速公路出口前置指示标志安全距离计算模型[J].公路交通科技,2016,33(4):120-126.
- [68] 陈志乾.基于换道距离的双向八车道高速公路出口指路标志设置研究[D].西安:长安大学,2017.
- [69] HUANG L H, ZHAO X H, LI Y, et al. Optimal design alternatives of advance guide signs of closely spaced exit ramps on urban expressways[J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 138: 105465.
- [70] 郭瑞利.基于理解性的道路交通标志优化设计方法研究[D].北京:北京工业大学,2012.
- [71] 曹佳,魏中华,荣建,等.高速公路出口标志信息连续性研究[J].道路与安全,2009,9(3):25-28.
- [72] 韩跃杰,许金良,杨宏志,等.指路标志信息连续性评价模型[J].交通运输工程学报,2012,12(6):76-81,88.
- [73] DISTASI L L, MEGÍAS A, CÁNDIDO A, et al. Congruent visual information improves traffic signage[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2012, 15(4):438-444.
- [74] 吕丹.高速公路与城市道路衔接区域的指路标志系统设计研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [75] 刘小明,张伟,魏中华,等.指路标志版面评价与优化[J].北京工业大学学报,2015,41(1):95-102.
- [76] 刘光辉,夏国栋,潘晓东.指路标志信息量评价模型研究[J].公路工程,2013,38(1):169-173.
- [77] 林庚钗.路网衔接段交通标志信息量化及评价研究[D].福州:福州大学,2016.
- [78] 祝可为,林庚钗,林毅.路网交通标志信息系统量化评价研究[J].福建交通科技,2016(4):151-153.
- [79] 蔡事廷.道路交通标志评价体系及设计优化[D].广州:华南理工大学,2015.
- [80] 王宏然.基于模糊理论的道路交通标志设置效果评价研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [81] 薛长龙,程国柱,徐亮,等.路侧解体消能标志设计标准研究[J].中外公路,2016,36(2):318-322.
- [82] 庞志显,吴咪艺,于斌,等.潮湿路面公路眩光评价指标分析[J].中外公路,2019,39(5):44-49.
- [83] 王赤心.中法公路互通立交设计规范的差异[J].中外公路,2021,41(3):380-384.
- [84] 吴海刚.路网环境下道路交通标志优化设计方法[D].西安:长安大学,2008.
- [85] 梁红彦.绕城高速公路指路标志优化设计研究[D].西安:长安大学,2014.
- [86] 张云娇.高速公路交通标志标识优化及其有效性研究[D].西安:长安大学,2014.
- [87] 许美玲.基于驾驶模拟实验的高速公路指路标志有效性研究[D].福州:福州大学,2017.
- [88] 符铎砂,王庭龙,何石坚,等.基于现场实车试验的高速公路门架式限速设施有效性研究[J].中外公路,2020,40(6):317-321.
- [89] 常鑫,李海舰,荣建,等.基于驾驶模拟器的车联网环境搭建及对驾驶行为的影响[J].科学技术与工程,2019,19(15):330-335.
- [90] LI Z L, XING G Y, ZHAO X H, et al. Impact of the connected vehicle environment on tunnel entrance zone[J]. Accident Analysis and Prevention, 2021, 157: 106145.