

雾天不同能见度条件下高速公路限速建议值研究*

张 驰^{1▲} 贺亚龙¹ 黄 星² 宫权利¹ 侯宇迪¹

(1. 长安大学教育部特殊地区公路工程重点实验室 西安 710064; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司 武汉 430010)

摘 要 高速公路雾天不同能见度条件下,驾驶员对道路线形走向的敏感性有所变化,驾驶员需要不断调整方向盘,以不同的车速行驶在线形不断变化的高速公路上。为了探寻在雾天不同能见度条件下,驾驶员以不同车速通过不同曲率道路时的驾驶行为安全特性,利用 UC-win/Road 建立道路驾驶模拟环境,采集驾驶员在单因素和正交多因素实验方案条件下的车辆运行轨迹数据,结合驾驶行为特点提出了新的评价指标(车辆横向偏移系数)对驾驶员的驾驶行为进行分析。结果表明,能见度、圆曲线半径和车速对车辆横向偏移均具有显著性影响;并且通过正交试验确定各因素对车辆横向偏移影响由强到弱依次为:能见度($F=531.643$)>圆曲线半径($F=256.599$)>车速($F=45.986$)。

关键词 交通安全;限速;能见度;横向偏移系数;行车安全

中图分类号:X951 文献标志码:A doi:10.3963/j.issn.1674-4861.2018.05.004

A Study on Speed Limit of Different Visibility on Expressways under Foggy Weather

ZHANG Chi^{1▲} HE Yalong¹ HUANG Xing² GONG Quanli¹ HOU Yudi¹

(1. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Area of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. China Municipal Engineering Central South Design and Research Institute Co. Ltd. Wuhan 430010, China)

Abstract: Under foggy weather, visibility conditions are different on highways. Respond sensitivity of drivers changes with linear shapes of roads. Drivers have to constantly adjust steering wheel to keep driving on expressways with different linear shapes at different speeds. In order to study characteristics of safety driving behaviors under foggy weather when drivers pass different roads with different speeds under different visibility conditions, UC-win/Road is used to establish road driving simulations. Data collected from simulations of a single factor and orthogonal multi-factors is analyzed. According to the driving behaviors, a new evaluation index (vehicle lateral offset coefficient) is proposed. The result shows that visibility, radius of curve circle, and speed of the vehicle have significant effects on the lateral displacement of vehicles. An orthogonal test is used to determine the influences of each factor on lateral deviation of vehicles. From strong to weak there are: visibility ($F=531.643$)> radius of curve circle ($F=256.599$)> speed of the vehicle ($F=45.986$).

Key words: traffic safety; speed limit; visibility; lateral offset coefficient; driving safety

0 引 言

中国国土面积幅员辽阔,不同地区的高速公路具有不同的空间地理环境特性,某些地区的高

速公路会受到雾天环境的影响,由此导致高速公路能见度的下降。驾驶员驾车行驶在低能见度的高速公路上,视线条件恶劣,不能快速准确判断道路行驶前进方向的路况信息,各种路况信息的不

收稿日期:2018-02-09

* 中国博士后科学基金项目(2016M590915)、国家重点研发计划项目(2017YFC0803906)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821172002&310821172201)、陕西省自然科学基金研究计划项目(S2017-ZRJJ-MS-0603)、山西省交通运输厅科技项目(20416-1-11)资助

▲第一作者(通信作者)简介:张 驰(1981—),博士,副教授,研究方向:道路交通安全与仿真. E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

确定性,让驾驶员产生心理压力,进而反应到驾驶员的驾驶操纵行为特性上。与正常条件下的驾驶操纵行为特性相比,会产生较大的差异性,当驾驶员在低能见度条件下的驾驶预期与正常条件不一致时,容易产生道路交通事故,尤其在雾天低能见度条件下,会加剧事故的严重性。

任何驾驶员在雾天行驶都存在驾驶风险,根据美国联邦公路管理局(FHWA)统计,每年因雾天引起的交通事故导致大约 600 人死亡,16 300 人受伤。发生在雾天的交通事故,一般都是多车事故,且事故所导致的人员伤亡和财产损失严重。为了进一步了解雾天低能见度条件下发生道路交通事故的特性,对近几年发生的比较恶劣的交通事故进行了统计,事故资料见表 1。

表 1 雾天恶性交通事故统计资料

Tab. 1 Malignant traffic accident data of Foggy day

时间	地点	事故车辆数/辆	受伤人数	死亡人数
2011 年 11 月 21 日	沪昆高速湖南境内	20	多人	5
2012 年 2 月 11 日	江苏省宁杭高速公路	30	15	2
2013 年 6 月 4 日	京港澳高速驻马店段	56	95	9
2014 年 4 月 8 日	宁洛高速漯河段	50	3	2
2015 年 11 月 29 日	山西大运高速公路运城到侯马段	47	7	3
2016 年 4 月 9 日	沈海高速北向 618+900 南方向	3	17	8
2017 年 11 月 15 日	G63 高速合肥方向	30	21	18

分析发现在恶劣道路交通环境条件下,特别是在雾天低能见度条件下,一旦发生交通事故,其事故严重程度之大以及人员伤亡之惨重,往往数倍于正常天气条件下的交通事故。1997 年 12 月 26 日,中华人民共和国公安部颁布了《关于加强低能见度气象条件下高速公路交通管理的通告》^[1]。在国家政府和交通主管部门的重视下,为了改善在高速公路低能见度条件下道路行车环境和提高驾驶员驾驶操纵的安全性,近些年许多国内外研究学者展开了对高速公路雾天低能见度条件下车辆运行安全问题的研究和探索。

国外从气体及粒子对光吸收与散射的理论出发研究了对雾降低能见度的影响效果^[2-4]。Snowden 等^[5]基于驾驶模拟器实验研究了浓雾环境下,驾驶员对速度的感知。结果显示,浓雾条件下,驾驶员的实际速度比目标速度要高很多。

说明浓雾下驾驶员自己感知到的速度比实际驾驶速度要低。Mueller 和 Trick^[6]运用汽车驾驶模拟器实验,研究了雾天环境下驾驶经验对速度的影响。结果显示,在模拟雾的条件下,有经验的驾驶员和新手驾驶员的速度都会下降,但是有经验的驾驶员速度下降更多,最后 2 类驾驶员的速度趋于一致。Li Xiaomeng^[7]从驾驶员的驾驶经验、驾驶员的性别以及雾天不同能见度 3 个方面对驾驶员在复杂道路 S 形路段上行驶的安全特性,从数理统计和方差分析的角度进行了研究。结果表明,即使在雾天,驾驶员的驾驶警惕性会有所提高,但是由于很难快速准确获取路况信息,从进入曲线减速距离短、速度高以及更多次数的驶离车道可以验证驾驶风险会增加。

国内学者在气象、高速公路雾天管理以及雾环境下仿真驾驶的研究等方面,对驾驶员视觉的影响主要通过仿真手段进行了研究,但是缺乏对雾天驾驶员驾驶行为影响的分析^[8-12]。刘文智^[13]从高速公路交通安全管理和控制的角度,并结合国外能见度等级划分和推荐车速制定经验,对特殊气象环境条件下可变情报板(CMS)和可变限速标志(CSLs)的车距控制与限速指令设置措施要求进行了论述。程国柱^[14]分析了雨、雪、雾等不良天气条件对道路交通安全的影响机理,提出不同车道数的高速道路分车型与分车道车速限制实施方法。提出车速限制区间和车速限制连续性指数的概念,以车速限制连续性指数小于 0.85 作为车速限制区间的划分依据,给出高速道路车速限制区间划分结果。史桂芳等^[15]通过分析驾驶员在高速公路上的制动反应时间,最后给出了雾天的限制车速计算方法,为不同能见度条件下高速公路限制车速管理提供了参考依据。张文斌等^[16]考虑停车视距和交通标志视认距离,提出了雾天高速公路的分析组合限速模型,还提出了不同能见度条件下的高速公路限速值和管理措施,为高速公路雾天行车安全管理提供借鉴。刘俊德^[17]针对雾、雨、雪和大风 4 种灾害天气对高速公路影响的不同特点,进行了限速与限距研究。在限速研究中,将影响限速的灾害路段道路几何信息、道路交通运行信息、交通管理控制信息、气候环境信息、驾驶人自身信息等因素进行量化,从而得到最佳限速取值。辛柯俊等^[18]基于高速公路可变限速理论,将美国 AASHTO 基于停车视距的限速模型应用到团雾条件下的高速公路限速

分析中,最后得到了高速公路不同能见距离条件下的限速值。王磊^[19]基于85%位车速与平均速度的关系以及平均速度模型,推导出了雾天低能见度下高速公路限速值的计算模型,并以200 pcu为增量单位计算出了不同能见度下车辆的限速值。张珊等^[20]提出了一套雾天环境下高速公路的可变限速(VSL)控制方法,可以根据检测到的实时道路能见度和交通流数据,综合确定目标路段的限速值,提出的可变限速控制方法在雾天环境下能更有效地保障高速公路行车的安全和效率。

以往研究得到的限速一般从可视距离角度出发,没有考虑线形对车辆运行安全的影响。

通过对以往关于高速公路雾天低能见度行车安全问题研究现状的文献分析,还没有关于将能见度、圆曲线半径和行驶车速综合起来考虑的研究成果,因此,本文以车辆在曲线路段的横向偏移特性为分析评价依据,通过设计正交试验方案,得到了各个因素对驾驶员驾驶行为影响的强弱顺序;最后,建立了车辆横向偏移距离系数与能见度、圆曲线半径和车辆行驶速度三者之间的定量关系模型。为高速公路管理部门在雾天不同能见度不同半径曲线路段复杂路况条件下速度控制管理策略的制定提供了理论基础。

1 驾驶模拟实验设计

为了研究在不同能见度、不同圆曲线半径和不同行驶车速的多种路况条件,在实际的一条高速公路中很难找到以上各个因素不同水平状况的全部组合情况。此外,如果采用实车试验,一旦发生道路交通安全事故,会产生不可估量的人员伤亡和经济财产损失。综合考虑实际情况,并结合现有实验设备情况,决定采用道路驾驶模拟的实验方法展开研究,整个实验的步骤和要求见图1。

1.1 驾驶模拟测试人员

为了保证实验数据的可靠性,本实验所选取的被试驾驶员,均是西安市某出租车公司的在职驾驶员,且驾驶员的驾龄均在6年以上。考虑到能见度对驾驶员的影响,为了避免驾驶员自身视力缺陷对驾驶操纵行为的影响,所选取驾驶员的视力或者矫正视力均能达到标准视力表的正常值(1.0~2.0)。一共选取了25名驾驶员进行道路驾驶模拟,25名驾驶员经身体健康检查均满足身体健康水平正常的要求,减少和消除驾驶员视力差异和健康状况对实验结果的影响,保证实验数

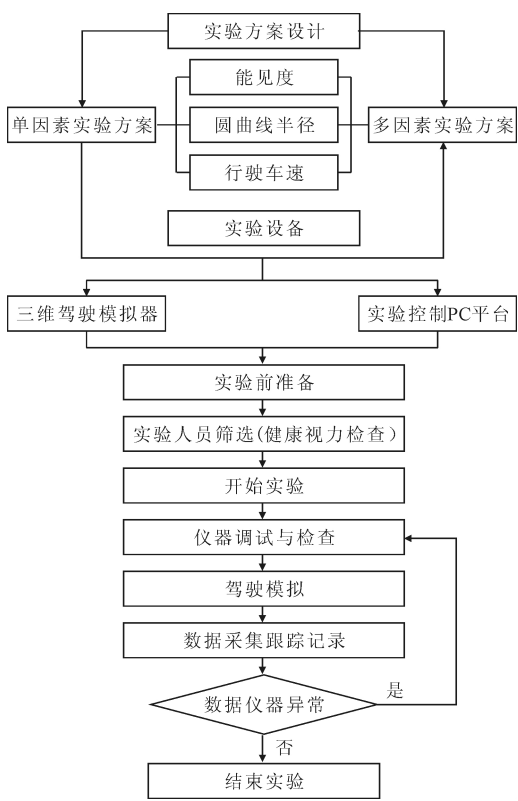


图1 驾驶模拟实验步骤与程序

Fig. 1 Driving simulation experiment procedures

据的可靠性。

1.2 驾驶模拟实验设备

经过对上述影响因素的分析,很难在实际工程中得到各种因素不同组合情况下的复合路段,因此采用驾驶模拟的方法,对各种不同复杂因素组合情况下的路段进行试验,得到驾驶员驾驶模拟时的数据。通过对目前已有的驾驶模拟设备和已具备试验条件的综合考虑,决定采用由日本FORUM8株式会社开发(研发)的道路驾驶模拟器及其配套软件UC-win/Road。驾驶模拟器及配套软件界面见图2~3。



图2 道路驾驶模拟

Fig. 2 3D driving simulator

1.3 驾驶模拟实验方案设计

驾驶模拟实验路段选取设计速度为80 km/h的双向4车道高速公路作为道路行车环境。驾驶



图3 驾驶模拟控制平台

Fig. 3 Driving simulation control platform

模拟实验分为单因素和多因素2个实验方案,单因素实验目的是为了研究圆曲线半径、能见度和行驶速度对驾驶行为特性的影响规律,多因素实验主要为了探索不同因素对驾驶行为影响的显著性及其影响强弱排序,并为雾天不同能见度条件下的实时动态限速提供数据和模型支持。

1.3.1 单因素驾驶模拟实验设计

在圆曲线半径、能见度和行驶车速变化的条件下,为了得到上述影响因素不同水平条件下驾驶员驾驶操纵行为的安全特性,根据控制变量法的要求,让驾驶员在各个单因素不同水平条件下进行驾驶模拟实验,并通过配套的道路驾驶模拟仿真软件获取车辆行驶过程中实时采集记录的数据。不同路况条件下单因素的驾驶模拟实验策略见表2。

圆曲线半径的取值参考《公路工程技术标准》中极限值和一般指的要求,能见度的取值参考中华人民共和国公安部在1997年12月26日颁布的《关于加强低能见度气象条件下高速公路交通管理的通告》,且以低能见度取值为主要研究范围,行驶速度的取值参考《公路项目安全性评价规范》中关于安全行驶速度的要求。圆曲线半径、能见度和行驶速度分别取出5个水平进行单因素的驾驶模拟实验。其中,每个被试驾驶员都分别经历3个实验分组里的各自的5个实验组合,共做25(25个被试驾驶员)×5(每个实验分组里面的5个实验组合)×3(3个实验分组)×5(5次重复试验)=1875次试验。其中为了避免个人单次试验会造成的特殊性,试验策略选择让每个被试驾驶员对每个实验分组里面的每个实验组合分别做5次,最后通过取5次实验数据的平均值的方法来减少特殊性,如:1号被试驾驶员进行实验分组1里面的(250,50,80)实验组合时,连续做这个组合试验5次,最后取平均值作为最终的实验数据,其他被试驾驶员亦是如此。

表2 考虑不同参数条件下驾驶模拟策略

Tab. 2 Driving simulation strategy under different parameters

实验分组	圆曲线半径 R/m	能见度 V/m	行驶车速 v/(km/h)	仿真策略
1	250/400/ 800/1 600/ 3 200	50	80	圆曲线半径单独作用
2	400	50/87.5/ 125/162.5/ 200	80	能见度单独作用
3	400	50	60/70/80/ 90/100	行驶速度单独作用

1)多因素驾驶模拟实验设计。通过单因素不同变化水平下的驾驶模拟实验,能够得到驾驶员在各个单因素不同变化水平下驾驶操纵行为特性的变化趋势。为了进一步说明各个因素对驾驶员驾驶操纵行为特性影响的显著性水平,并建立驾驶员驾驶行为特性与3个因素间的数学模型,论文采用正交试验的方法对驾驶员驾驶行为特性与3个因素之间的关系进行研究。正交试验各个影响因素的取值见表3,3个影响因素均选取3个水平,最后参考《数理统计》一书中关于正交试验方案设计的流程和步骤建立多因素影响分析的正交试验表,见表4。

表3 多因素实验参数取值

Tab. 3 Selecting of Multi-factor experimental parameter values

水平	圆曲线半径 R/m	能见度 V/m	行驶车速 v/(km/h)
1	250	50	60
2	800	125	80
3	3 200	200	100

表4 正交试验方案表

Tab. 4 Orthogonal experimental program

实验号	圆曲线半径 R/m	能见度 V/m	行驶车速 v/(km/h)
1	250	50	60
2	250	125	80
3	250	200	100
4	800	50	80
5	800	125	100
6	800	200	60
7	3 200	50	100
8	3 200	125	60
9	3 200	200	80

1.4 驾驶模拟与数据采集

做好驾驶模拟实验条件准备后,即可让驾驶员按实验方案进行驾驶模拟。在实际实验时,为了减少实验方案顺序对驾驶模拟输出数据的影响,利用办公软件 Excel 的随机选数函数 RAND-

BETWEEN(bottom, stop)在多个实验方案中随机选择进行。驾驶模拟计算机控制平台可以记录输出车辆的多项行车数据,本次实验主要设置车辆位置(position)、速度(speedInKmPerHour)、车辆距离道路左右两侧边缘的距离(distanceToLeft/RightBorder)和车道曲率(laneCurvature)作为数据输出选项。其中,车道曲率的作用是为了识别圆曲线路段,与车辆位置进行匹配。对车辆距离道路左右两侧边缘的距离进行处理,可以得到车辆偏离车道中心的距离。

2 行车安全的单因素与多因素综合分析

在被测试驾驶员的道路驾驶模拟实验中,驾驶模拟主控软件系统在采集数据时,设置的采集频率为 100 Hz,采集的原始输出数据包括车辆的位置、速度和车辆距离道路左右两侧边缘的距离。

2.1 影响因素分析评价依据

为了科学合理的从驾驶行为的角度对车辆横向偏移特性进行分析,需要将评价指标与车辆运行数据联系起来。本文利用驾驶模拟器及其配套的系统软件完成实验研究并获取实验数据,从实验输出数据的类别及数据处理难易程度的角度考虑,车道保持率中车辆在车道内行驶的时间不宜区分且很难量化,速度标准差的变化系数中速度在本文的研究过程中是一个确定的值,不能体现该指标的应用价值。根据驾驶模拟实验主控计算机系统输出的车辆行驶数据中,通过对车辆距离道路左右两侧边缘的距离进行处理和变形,将很容易得到车辆横向偏移系数,且车辆横向偏移系数能很好的反映驾驶员在车辆运行中对行驶方向的操控性,间接的反映出其他因素对行驶安全的影响,因此,本文基于高速公路曲线路段低能见度条件下车辆横向偏移特性分析,选择以车辆横向偏移距离作为单因素影响分析评价指标,以车辆横向偏移系数(lateral offset coefficient, loc)作为多因素分析和建立车辆横向偏移与能见度、圆曲线半径、车速之间定量关系的指标,其定义如下。

$$\text{loc} = \frac{D_{85} - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (1)$$

式中:loc 为车辆横向偏移系数; D_{85} 为第 85 百分位车辆横向偏移距离,m; $D_{\min}$ 为车辆横向偏移距离最小值,m; $D_{\max}$ 为车辆横向偏移距离最大值,m。

2.2 单因素行车安全分析

2.2.1 圆曲线半径对车辆驾驶操纵特性的影响

当车辆在直线上行驶时,驾驶员不用频繁大角度转动转向盘,只需要适当调整方向盘,对车辆行驶方向进行修正,就能保证车辆贴近车道中心线行驶。在曲线上行驶时,驾驶员需要较大幅度的转动转向盘,以使车辆行驶方向能跟随道路走向不断变化,驾驶员的驾驶操作负荷强度会显著增加。如果驾驶员在曲线上驾驶操作不当,车辆横向偏移距离过大时,容易冲出本行车道,驶向相邻车道,发生碰撞等交通事故。对圆曲线半径单因素驾驶模拟实验输出数据进行处理,得到如图 4 所示的图形结果。

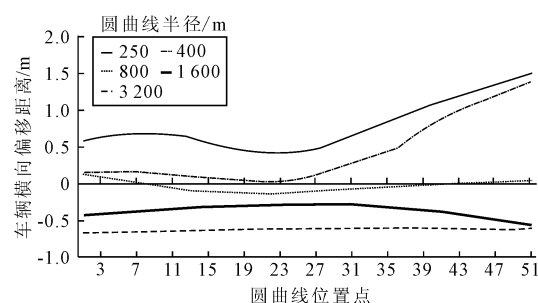


图 4 圆曲线半径与车辆横向偏移距离关系

Fig. 4 Relationship between radius and vehicle lateral offset distance

从图 1 驾驶模拟实验结果可知,当圆曲线半径为 3 200 m 时,车辆行驶轨迹偏移车道中心线的距离稳定在 0.7 m。驾驶员在雾天低能见度条件下,为了避免与相邻车道发生碰撞冲突,驾驶行为比较谨慎,车辆行驶轨迹偏向于内侧车道。当圆曲线半径逐渐减小,车辆行驶轨迹偏离车道中心线距离的变化幅度会越来越大,而且越来越偏向外侧车道。由此可以看出,当圆曲线半径较大时,驾驶员很容易在圆曲线上控制车辆行驶方向,驾驶员对道路行驶方向的感知能力较好;当圆曲线半径较小时,驾驶员需要大幅度转动转向盘,驾驶负荷增强,不易控制车辆行驶方向,车辆容易驶向相邻车道,严重威胁行车安全性。

2.2.2 行驶速度对车辆驾驶操纵特性的影响

对行驶车速单因素驾驶模拟实验数据处理,得到如图 5 所示的实验图形结果。

根据行驶车速单因素驾驶模拟实验输出数据处理结果,可以看出,当行驶车速从 60 km/h 逐渐增加时,车辆偏离车道中心线的距离越来越大,且都是偏向外侧车道;当行驶车速增加到 90 km/h 和 100 km/h 时,车辆行驶轨迹会出现波动

情况,表明车辆在行驶过程中,车辆横向偏移距离的变化幅度也会越来越大。通过行驶速度对车辆横向偏移距离的影响分析,说明行驶车速对其影响比较大,在一定程度上说明,车辆行驶速度越高,驾驶员驾驶操纵的难度越来越大。

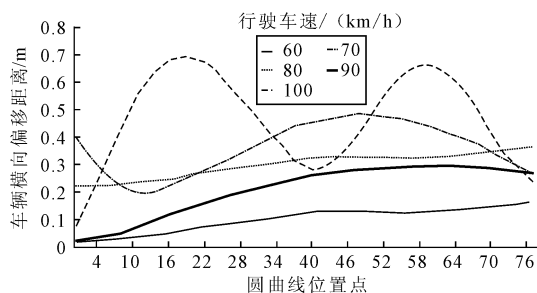


图5 行驶车速与车辆横向偏移距离关系

Fig. 5 Relationship between speed and vehicle lateral offset distance

2.2.3 能见度对车辆驾驶操纵特性的影响

对能见度单因素驾驶模拟实验数据处理,得到如图6所示的实验图形结果。

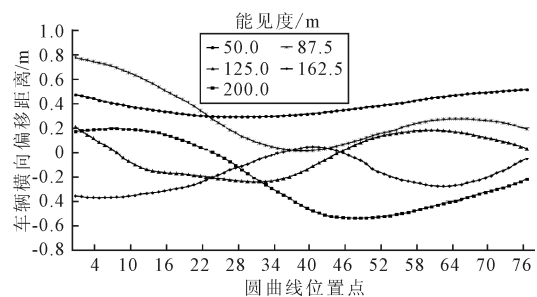


图6 能见度与车辆横向偏移距离关系

Fig. 6 Relationship between visibility and vehicle lateral offset distance

分析图6所示实验结果,在雾天低能见度条件下,驾驶员视线条件变差,对路线走向的感知判断能力减弱;驾驶员在低能见度条件下行驶时,高速公路上的周围环境条件变得模糊,驾驶员容易感到迷茫,心理压力增大。从驾驶员的驾驶行为来看,驾驶员操纵车辆行驶时容易偏离车道中心线。当能见度较大时,车辆运行轨迹偏向于内侧车道,说明驾驶员能够比较清晰的识别车道边线;当能见度为125 m时,驾驶员能保持在车道中心线附近;当能见度继续减小时,车辆运行轨迹偏向于外侧车道,说明驾驶员受能见度的影响程度变大,驾驶操纵难度增加。

2.3 多因素行车安全分析

2.3.1 正交试验结果分析步骤与方法

假设试验结果为 $y_i (i=1, 2, \dots, n)$, $K_i (i=1, 2, \dots, r)$ 且 K_i 表示各个影响因素在相同水平下所有 y 值之和。之后按以下步骤处理数据。

1) 计算离差平方和。

(1) 总离差平方和 SS_T

$$SS_T = \sum_{i=1}^n \left(y_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right)^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \quad (2)$$

(2) 各因素的离差平方和(以 A 因素为例,记为 SS_A)

$$SS_A = \frac{r}{n} \left(\sum_{i=1}^r K_i^2 \right) - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \quad (3)$$

(3) 误差的离差平方和 SS_e

$$SS_e = \sum SS_{\text{空列}} \quad (4)$$

(4) 如果因素 A 和 B 存在相互影响(即交互作用),且因素 A 和 B 的交互作用在正交试验结果表中占有 2 列,则其交互作用的离差平方和 $SS_{A \times B}$

$$SS_{A \times B} = SS_{(A \times B)_1} + SS_{(A \times B)_2} \quad (5)$$

2) 计算自由度。

(1) 总自由度 df_T

$$df_T = n - 1 \quad (6)$$

(2) 正交试验表中某一列因素的自由度 df_j

$$df_j = r - 1 \quad (7)$$

(3) 两因素 A 和 B 交互作用的自由度 $df_{A \times B}$

$$df_{A \times B} = df_A \times df_B \quad (8)$$

(4) 误差自由度 df_e

$$df_e = \sum df_{\text{空列}} \quad (9)$$

3) 计算因素 A 及 A 和 B 之间交互作用下的 F 值,其他影响因素计算方法类似。

$$F_A = \frac{SS_A \cdot df_e}{SS_e \cdot df_A} \quad (10)$$

$$F_{A \times B} = \frac{SS_{A \times B} \cdot df_e}{SS_e \cdot df_{A \times B}} \quad (11)$$

4) 显著性检验。显著性检验水平取为 α , 检验因素 A 和 A 与 B 的交互作用对试验结果影响的显著程度,从数学工具书的 F 分布表中查找出 $F_\alpha(df_A, df_e)$ 和 $F_\alpha(df_{A \times B}, df_e)$ 对应的临界值,并将按照步骤3)计算所得的 F 值与该值进行比较,如果临界值大于 F 值,则说明没有显著性影响;反之,则有显著性影响。其他影响因素检验的步骤方法与此相似。

根据正交试验数据处理方法,对驾驶模拟输

出数据处理后,得到的数据处理结果如表 5 所示。

表 5 正交试验方差分析

Tab. 5 Variance analysis of orthogonal experiment

实验号	圆曲线半径 R/m	能见度 V/m	行驶车速 v/(km/h)	车辆横向偏 移系数(loc)
1	1.000	1.000	1.000	0.982
2	1.000	2.000	2.000	0.986
3	1.000	3.000	3.000	0.805
4	2.000	1.000	2.000	0.952
5	2.000	2.000	3.000	0.882
6	2.000	3.000	1.000	0.815
7	3.000	1.000	3.000	0.733
8	3.000	2.000	1.000	0.718
9	3.000	3.000	2.000	0.699
K ₁	2.738	2.850	2.432	
K ₂	2.586	2.567	2.616	
K ₃	2.293	2.200	2.569	
k ₁	0.913	0.950	0.811	
k ₂	0.862	0.856	0.872	
k ₃	0.764	0.733	0.856	
极差	0.445	0.649	0.184	
离差平方和 SS	0.034	0.071	0.006	
自由度	2.000	2.000	2.000	
F 值	256.599	531.643	45.986	
临界值	F _{0.05} (2,2)=19	F _{0.05} (2,2)=19	F _{0.05} (2,2)=19	
显著性	显著	显著	显著	

由表 5 可见:能见度($F=531.643$)、圆曲线半径($F=256.599$)、行驶车速($F=45.986$)3 个因素各自的 F 值均高于临界值 $F_{0.05}(2,2)=19$,表明能见度、圆曲线半径和行驶车速对车辆横向偏移均具有显著性影响,且各因素对驾驶行为特性(车辆横向偏移)的影响由强到弱依次为能见度($F=531.643$)> 圆曲线半径($F=256.599$)> 行驶车速($F=45.986$)。

2.3.2 多因素定量关系模型建立

根据道路驾驶模拟正交实验方案得到的数据,利用遗传优化迭代算法对数据进行拟合,经过 159 次迭代,建立了车辆横向偏移系数与圆曲线半径、能见度、行驶车速之间的定量关系模型,具体见式(12)。

$$\text{loc} = \frac{0.0137v^2 - 0.00351V^2}{R} + 0.82634 \quad (R^2 = 0.93)$$

(12)

式中:loc 车辆横向偏移系数; R 为道路圆曲线半径,m; v 为车辆行驶车速,km/h; V 为道路环境能见度,m。

将式(12)进行变形,可得到行驶车速与圆曲线半径、能见度和车辆横向偏移系数之间的数学关系,即高速公路雾天不同能见度条件下动态限速模型,见式(13)。

$$v = \sqrt{\frac{V_{\text{loc}}R + 0.00351V^2 - 0.82634R}{0.0137}}$$

$$(R^2 = 0.93)$$

(13)

本文将车辆横向偏移系数作为交通安全的替代指标,其值越大,表明车辆偏离行车道中心的距离越大,发生侧向碰撞的概率越高,故需要将控制在一定的范围内来保障安全,本文参考了运行速度理论,满足道路上行驶的 85% 的驾驶情况,选取 0.85 作为车辆横向偏移系数的安全阈值。利用式(13)中各因素之间的定量数学关系,可以在不同能见度和不同圆曲线半径条件下,以一定的车辆横向偏移系数为标准,得到相应路况条件下的最佳限速值,为公路管理部门设置限速设施提供理论依据,指导实践,具有一定的实际应用价值。

3 综合考虑多因素的动态限速措施

目前高速公路管理部门设置限速标志时,主要是以设计速度为主要参考依据,且目前高速公路限速标志一般都不能根据道路环境及线形的变化进行实时动态更新。在雾、雨、雪、沙尘、冰雹等低能见度气象条件下,没有严格执行的相关标准规范可供参考。低能见度气象条件的高速公路管理主要依据《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》,其能见度分级及其限速标准没有考虑到复杂道路线形的变化情况。论文通过建立的车辆横向偏移系数与圆曲线半径、能见度、行驶车速的关系模型,取 0.85 的车辆横向偏移系数作为安全阈值,对计算结果以 5 的倍数为步长进行取整,可以得到不同圆曲线半径和不同能见度条件下的限速建议值,见表 6。

表 6 高速公路复杂路况动态限速建议值

Tab. 6 Dynamic speed limit for complex expressway road conditions

圆曲线 半径 R/m	以下能见度(m)的限速/(km/h)				
	50	87.5	125	162.5	200
250	30	45	60	75	80
400	35	50	65	80	80
800	45	60	70	80	80
1 600	55	70	80	80	80
3 200	65	80	80	80	80

观察表 6,通过动态限速模型得到了高速公路在不同能见度和不同圆曲线半径下的相应的限速值,使用起来较为方便,对高速公路管理部门在雾天复杂路况条件下采取的动态限速管理方案具有一定的参考价值,便于相关的管理部门进行限速方案的决策,但是文章中所提到的动态限速建议值仅考虑了高速公路设计速度为 80 km/h 的情况,在后期可以对设计速度为 100 或 120 km/h 的高速公路进行研究来得到更为全面的动态限速建议值,方便高速公路管理部门进行相关路段的限速方案的制定,提高道路的安全水平,保障人民的生命财产安全。

4 结束语

1) 通过单因素实验方案设计,可得到在能见度、圆曲线半径和车速 3 个因素分别变化时,车辆偏移距离的变化趋势。从实验图形结果可以发现圆曲线半径、能见度、行驶车速对驾驶员的驾驶行为特性均有不同程度的影响,圆曲线半径越小、能见度越低、行驶车速越高,驾驶转向越困难,驾驶负荷越大,车辆横向偏移距离越大,且往往向外侧车道偏离,冲向相邻车道或硬路肩,容易发生与相邻车道车辆发生碰撞或冲出车道撞向护栏的交通事故。

2) 以车辆横向偏移系数作为分析评价指标,对正交实验数据进行方差分析,圆曲线半径、能见度、行驶车速的 3 个因素的 F 值均高于临界值 $F_{0.05}(2,2)$,表明圆曲线半径、能见度、行驶车速对车辆对车辆横向偏移系数具有显著性影响;通过 3 个因素离差平方和的大小顺序可以得到各因素对车辆横向偏移影响由强到弱依次为:能见度、圆曲线半径和行驶车速。

3) 利用遗传优化迭代算法对实验数据进行拟合,经过 159 次迭代,建立了车辆横向偏移系数与圆曲线半径、能见度、行驶车速之间的定量关系模型。

4) 利用建立的车辆横向偏移系数与各影响因素的定量关系模型,可以为高速公路雾天低能见度复杂路况条件下的实时动态限速提供参考。

5) 限于论文篇幅,论文仅讨论了高速公路设计速度为 80 km/h 的道路场景,结合实际应用环境可以将论文研究方法进行推广,应用到其他设计速度情况下的高速公路,来更好的服务于后期的实际运营,提高道路的安全水平。

参考文献

References

- [1] 公安部.关于加强低能见度气象条件下高速公路交通管理的通告[J].中国安防,1998(3):7.
Ministry of Public Security. Notice on strengthening expressway traffic management under low visibility weather conditions [J]. China Security and Protection, 1998(3):7. (in Chinese)
- [2] GAZZI M, GEORGIADIS T, VICENTINI V. Distant contrast measurements through fog and thick haze[J]. Atmospheric Environment, 2001,35(30): 5143-5149.
- [3] YING Q, MYSLIWIEC M, KLEEMAN M J. Source apportionment of visibility impairment using a three-dimensional source-oriented air quality model. [J]. Environmental Science & Technology, 2004,38(4):1089-101.
- [4] PAGOWSKI M, GULTEPE I, KING P. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern ontario. [J]. Journal of Applied Meteorology, 2004,43(1):3-16.
- [5] SNOWDEN R J, STIMPSON N, RUDDLE R A. Speed perception fogs up as visibility drops[J]. Nature, 1998,392(6675):450.
- [6] MUELLER A S, TRICK L M. Driving in fog: the effects of driving experience and visibility on speed compensation and hazard avoidance[J]. Accident Analysis & Prevention, 2012,48(9):472-479.
- [7] LI X, YAN X, WONG S C. Effects of fog, driver experience and gender on driving behavior on S-curved road segments. [J]. Accident Analysis & Prevention, 2015,77:91-104.
- [8] 陈秀锋,曲大义,刘尊民,等.基于驾驶模拟器的雾天驾驶行为特性研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(4):763-766.
CHEN Xiufeng, QU Dayi, LIU Zunmin, et al. Driving performance research in foggy conditions based on driving simulator[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2013,37(4):763-766. (in Chinese)
- [9] 胡思涛,朱艳茹.团雾天气对高速公路交通安全的影响机理研究[J].中外公路,2013,33(2):290-292.
HU Sitao, ZHU Yanru. Study of the influence mechanism of fog on highway traffic safety [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2013, 33 (2):290-292. (in Chinese)

- [10] 支晓伶,李长城,汤筠筠,等.高速公路雾天可变信息标志信息联动发布策略研究[J].公路,2010(11):123-128.
ZHI Xiaoling, LI Changcheng, TANG Junjun, et al. A study on strategies of expressway fog information intelligent dissemination VMS system [J]. Highway, 2010(11):123-128. (in Chinese)
- [11] 李利,孙策.基于气象能见度的高速公路限速研究[J].公路,2013(7):200-203.
LI li, SUN Ce, Study on expressway speed limitation based on weather visibility [J]. Highway, 2013(7):200-203. (in Chinese)
- [12] 彭金栓.基于视觉特性与车辆相对运动的驾驶人换道意图识别方法[D].西安:长安大学,2012.
PENG Jinshuan. Driver's lane change intent identification based on visual characteristics and vehicles' relative movements[D]. Xi'an:Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [13] 刘文智.高速公路可变信息标志控制方案的研究[J].公路运输文摘,2002(11):37-39.
LIU Wenzhi. Research on Control Scheme of Variable Information Sign of Expressway[J]. Highway Transportation Digest, 2002(11):37-39. (in Chinese)
- [14] 程国柱.高速道路车速限制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
CHENG Guozhu. Research on speed limit method of expressway [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [15] 史桂芳,袁浩,程建川.雾天交通限速计算[J].西南交通大学学报,2010,45(1):136-139.
SHI Guifang, YUAN Hao, CHENG Jianchuan. Calculation of speed limit on foggy days[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(1):136-139. (in Chinese)
- [16] 张文斌,王博,吴超仲.雾天高速公路限速模型研究[J].西部交通科技,2010(1):21-24.
ZhANG Wenbin, WANG Bo, WU Chaozhong. Study on the speed limit model of wutian expressway[J]. Western Transportation Science & Technology, 2010(1):21-24.
- [17] 刘俊德.灾害条件下高速公路行车安全管理技术研究[D].西安:长安大学,2012.
LIU Junde. Research on Highway Traffic Safety Management Technology under Disaster Conditions [D]. Xi'an :Chang'an University, 2012.
- [18] 辛柯俊,刘用渗,张凯.团雾条件下的高速公路限速分析[J].交通科技与经济,2013,15(6):101-104.
XIN Kejun, LIU Yongshen, ZHANG Kai. Research on speed limit of highway under mist conditions[J]. Technology and Economy in Areas of Communications, 2013, 15(6):101-104. (in Chinese)
- [19] 王磊.基于交通流状态和85%位车速的雾天高速公路限速值研究[D].北京:北京交通大学,2015.
WANG Lei. Research on the speed limit value of Wutian Expressway based on traffic flow state and 85% vehicle speed [D]. Beijing :Beijing Jiaotong University, 2015.
- [20] 张珊,张存保,李薇.雾天环境下高速公路可变限速控制方法研究[J].交通信息与安全,2018,36(2):47-53.
ZHANG Shan,ZHANG Cunbao,LI Wei. Study on Variable Speed Control Method of Expressway in Foggy Environment[J]. 交通信息与安全,2018,36(2):47-53.