

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.07.022

基于视觉指标的雾天高速公路限速值

何富勇¹, 杨雅钧², 张驰^{*3}, 王世法¹, 肖锋^{4,5}

- 四川成绵苍巴高速公路有限责任公司成都分公司, 四川 成都 610000;
- 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610047;
- 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
- 四川雅康高速公路有限责任公司, 四川 雅安 625000;
- 四川藏区高速公路有限责任公司, 四川 成都 610047)

摘要:为解决雾天高速公路能见度降低和驾驶人视距受限的交通安全问题,提出了一种基于驾驶人视觉指标的限速控制方法。首先,对雾天高速公路行驶速度与驾驶人视觉的变化进行了分析,并确定了能综合表征路况信息和能见度水平的视觉指标;其次,通过UC-win/Road模拟了不同能见度下的驾驶环境,并收集了视觉指标和运行速度数据,进一步分析了雾天视觉指标的影响因素;然后,使用SPSS构建了运行速度和视觉指标间的数学模型,根据能见度与视觉指标间的线性关系提出了不同能见度下的视觉指标参考值;最后,基于能见度、交通流量、视觉指标3个因素,提出了一种考虑视觉指标的多条件限速控制标准。结果表明:在能见度低于200 m的环境下,视觉指标明显低于无雾环境下的视觉指标,降低范围在0.578%~1.407%之间;视觉指标与运行速度两变量间的相关系数达到0.863,这说明雾天能见度降低和视觉指标下降对行驶速度有显著影响;预测运行速度与实测速度的相对误差平均值为2.43%,满足预测精度要求。综上所述,本研究提出的限速控制方法同时考虑了能见度、交通流量和驾驶人视觉,对于保障雾天高速公路的安全行驶具有重要的实用价值。

关键词:交通工程;车速限制;驾驶仿真;雾天行车;驾驶人视觉

中图分类号:U412

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2024)07-0194-13

Expressway Speed Limit Value in Fog Based on Driver's Visual Indicator

HE Fu-yong¹, YANG Ya-jun², ZHANG Chi^{*3}, WANG Shi-fa¹, XIAO Feng^{4,5}

- Chengdu Branch of Sichuan Chengdu-Mianyang-Cangxi-Bazhong Expressway Construction & Development Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China;
- Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610047, China;
- School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;
- Sichuan Yakang Expressway Co., Ltd., Yaan, Sichuan 625000, China;
- Sichuan Tibetan Area Expressway Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610047, China)

Abstract: To solve the traffic safety problems caused by reduced visibility and limited visual range of drivers on expressway in fog, the speed limit control method based on driver's visual indicator was proposed. First of all, the expressway speed and driver's visual variation in fog were analyzed. The visual indicators were determined, which can synthetically represent road condition information and visibility level. Secondly, UC-win/Road was used to simulate the driving environment with different visibilities. The data of visual indicator

收稿日期:2023-07-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1512005, 2021YFB2301602);四川省科技计划项目(2022YFG0048);四川省交通运输科技项目(2019-ZL-12, 2022-ZL-04);四川藏区高速公路联合技术攻关专题(藏高科技2021-11)

作者简介:何富勇(1976-),男,四川富顺人,高级工程师。(769012336@qq.com)

*通讯作者:张驰(1981-),男,四川宜宾人,博士,教授。(zhangchi@chd.edu.cn)

and running speed were collected. The fog visual indicators of influencing factors were analyzed. Then, by using SPSS regression, the mathematical model of running speed and visual indicator was established. According to the linear relation between visibility and visual indication, the visual indicator reference values with different visibilities were given. Finally, based on the 3 factors of visibility, traffic flow and visual indication, the multi-condition speed limit control standard considering visual indication was proposed. The result indicates that the visual indicator of environment with visibility less than 200 m is obviously lower than that of the environment without fog, and the range of reduction is 0.578% - 1.407%. The correlation coefficient between visual indication and running speed is 0.863. The decrease of visibility in fog has the significant effect on driving speed. The average relative error between predicted and measured speed is 2.43%, and the accuracy of predicted results meets the requirements. The speed limit control method for expressway in fog is presented in this study, which takes visibility, traffic flow and driver's vision into account. It is of great significance to ensure the expressway driving safety in fog.

Key words: traffic engineering; vehicle speed limit; driving simulation; driving in fog; driver's vision

0 引言

山区高速公路的修建使驾驶人更易面临复杂气象的影响, 加上环境恶化, 雾天对驾驶人的影响显著增加。由水汽分子构成的雾对光线产生散射导致能见度降低, 严重增加了行车的难度和危险性, 诱发的行车风险显著高于其他气象条件, 造成了巨大的经济损失。雾天气象条件下, 能见度具有较强局限性, 且其水平通常会显著降低, 从而导致驾驶人视线受阻, 降低对前方行驶状况的机敏度, 增加行车的危险性。此外, 浓雾的出现会影响道路交通状况, 车辆在浓雾环境下行驶时会降低行驶速度, 行驶过程受限速标准和异常天气影响明显, 道路交通事故频发, 且当道路交通流量增大时, 交通拥堵现象严重。根据统计数据表明, 由冰雪、大雨和大雾3种恶劣气象条件引发的交通事故中, 雾天交通事故占比高达50%^[1], 远高于其他不良天气。以太旧高速公路部分路段为例, 曾因大雾的影响, 能见度降至100 m下, 导致7辆汽车发生连环追尾事故, 造成严重的人身伤害和惨痛的经济损失; 乌奎高速公路玛纳斯县境内, 由于北疆大雾天气的影响, 客车司机因无法看清前方路况侧翻至路基下, 造成10人受伤。由此可见, 雾天对高速公路交通安全有着严重的影响。

目前对雾天高速公路行车安全的研究主要是基于致危机理^[2-5]、驾驶人行为^[6-7]、安全性评价^[8-9]和限速策略^[10-11]等。雾天行驶环境的致危机理主要根据雾形成浓度、持续时间、产生频率和类型, 对雾的危险性等级判定指标及阈值进行研究。驾驶人行为方面主要通过模拟驾驶试验和问卷调查方式,

对驾驶人雾天缩短跟驰距离的行为进行分析。2021年, 秦雅琴等^[12]为研究山区不同路段驾驶员视觉需求, 提出不同场景下的注视区域分布规律。安全性评价方面主要通过低能见度环境下交通流参数的变化特征及交通事故主要影响因素对交通安全预测模型和评价方法进行研究。在限速策略方面, 2017年, 初旭新等^[10]建立交通安全影响因素的解释结构模型, 剖析车辆、环境层面的交通安全影响因素的层次结构关系; 2018年, 张驰等^[11]分析驾驶人的行驶特性, 将车辆的横向偏移系数作为雾天限速评价指标; 中国和美国根据天气、地形特点, 考虑能见度、路面湿度等因素, 制订雾天限速标准^[13]。这些指标能直观反映雾天气象条件下道路环境的变化, 但均未能将雾天环境下的驾驶人视野特性与行驶速度相联系。驾驶人视野是驾驶人获取道路环境信息的桥梁, 车辆在行驶过程中, 驾驶人通过视野拾取大部分路况信息, 然后做出控速决策, 大多数路况信息均可在视野路域范围内综合反映。视野路域面积不仅能表征驾驶人视角, 而且能反映道路的线形设计指标和路况信息。但国内外相关研究较少, 仅有小部分学者从驾驶人视觉的角度出发, 选取驾驶人可视路域面积作为研究运行速度的指标。2000年, Fitzpatrick等^[14]为得到驾驶人视觉特性对速度行为的作用机理, 建立了道路竖曲线参数与视觉理论间的关系模型; 2020年, 施兹国等^[15]根据动态视觉的特点, 将交通措施的影响持续时间分为3个阶段, 分析驾驶人速度的变化; 2016年, 张驰等^[16]从驾驶人可视道路面积的角度出发, 建立与运行速度间的关系模型; 2021年, 罗东宇^[17]结合驾驶人动视野进行运行速度的预测, 将动视野路占比作为表征指标, 同时考

虑车辆动力性能与阈值控制;2017年,余博等^[18]在考虑视觉路侧环境影响下,首次通过构建驾驶人视觉车道模型,得到速度变化频繁的运行速度预测模型,但未能考虑复杂气象条件对驾驶人视野的影响。

综上所述,针对雾天高速公路行车安全的研究,目前国内外学者主要针对雾天环境下的驾驶行为和能见度分级进行分析,较少从驾驶人控速根源出发,综合考虑雾天气象影响下的可视路域面积变化。行车安全主要影响驾驶人的动视觉,可能导致驾驶人感到紧张并操作失误。因此,在雾天高速公路复杂行车环境下,行车安全除考虑能见度外,还需考虑驾驶人视野路域面积突变对动视觉和驾驶行为的影响。为有效降低雾天行车风险,有必要基于驾驶人视觉对视觉指标进行更深入的研究,考虑能见度变化对视野路域面积的影响。选取能综合表征路况信息、能见度水平的视觉指标对雾天合理限速值展开研究,提出雾天高速公路限速标准,为相关部门的交通安全管理提供科学依据。

1 雾天驾驶人视觉指标选取

1.1 雾天环境与行车安全

雾天作为恶劣气象的一种,严重影响着高速公路的行驶安全性。随着能见度降低,浓雾环境下驾驶人视距受限,难以正确判断路况信息,导致不当驾驶行为的出现几率增大,该环境下的行驶情况通常比其他路段更加复杂,行车存在严重的安全隐患。

1.1.1 行驶速度变化

当行驶在高速公路上时,车辆的整体平均速度通常会随着道路能见度的降低而下降。这是因为低能见度条件下,驾驶人需要降低车速以保持足够的安全距离,并且需要更加注意道路情况及其他车辆的行驶状态,从而降低事故发生的风险。同时,在雾天环境下,不同雾浓度、能见度水平下驾驶人的行驶速度不同,长时间处于雾天环境易产生视觉错觉与疲劳,最终影响驾驶人判断道路上行驶车辆间相对位置能力。

驾驶人对车辆的行驶速度的控制受雾天气象影响。相关研究表明^[19],当处于轻雾气象时,驾驶人仍维持较高的车速行驶,当能见度降低至150 m左右时,驾驶人的行驶速度明显呈逐渐降低趋势;当能见度持续降低,降至100 m左右时,平均车速比无雾气象条件下降25%~30%。同时,当出现雾天气象时,在一定能见度范围内,每当能见度下降50 m,行驶速度下降约15%。

1.1.2 驾驶人视觉变化

雾天气象发生时,随着雾浓度逐渐增加,驾驶人视觉环境中的对比度降低,车辆和道路信息变得暗淡甚至从视野中消失,导致驾驶人行为发生变化,进而直接影响车辆行驶速度。在雾天环境下,驾驶人视觉环境恶劣,目标物边缘模糊,难以被识别,此时驾驶人第一视觉需求在于快速发现目标物,而不是识别清目标物的具体细节^[20],而这一系列的影响因素对于驾驶人而言,直接作用对象是眼睛。驾驶人接收的路况信息中,80%的信息来源于视觉。因此,本研究基于驾驶人视觉出发,考虑能见度变化对行驶速度的影响。

1.2 驾驶人视觉指标研究

驾驶人在实地驾驶过程中,时刻动态接受着丰富多变的路域环境信息。驾驶环境是影响驾驶行为的重要因素之一,尤其在雾天复杂行驶环境下,驾驶人会出现紧张、焦虑的驾驶情绪,并且会增加驾驶负荷。为量化视觉信息,本研究将驾驶人视野分割为4个区域,即左路侧、右路侧、天空和路面,主要考虑的视觉指标为天空占比指标、视野路域占比指标及视野路侧占比指标。天空占比是指正前方视野图像中天空边际线所围区域面积占全部视野图像面积的比例,能反映行驶期间前方风景实时变化的情况;视野路域占比是指驾驶人在行驶过程中能够看到的同向道路面积,能综合表征驾驶人视角、道路的线形设计指标和路况信息;视野路侧占比是指视野图像中除天空和路域剩余区域所占之比。

对大量视野图像的处理结果显示^[21]:正常行驶环境下,由于行车记录仪固定在与驾驶人视野平行且目高相同的副驾驶位置处,车轮始终与路面相切,因此采集过程中行车记录仪拍摄的视野图像与道路路面的角度基本固定不变,于是得到的视野路域在图像中的成像比例变化较小,主要受道路线形变化的影响。

考虑到3个指标为同质指标,且三者间存在换算关系,为避免重复利用,本研究选取了视野路域占比指标作为表征驾驶人视觉的特征指标。这是由于雾天环境对天空占比指标、视野路侧占比指标的影响较大,浓雾环境下难以将两个指标区分开。当能见度降低时,浓雾弥散会遮挡路域面积,能见度的变化能有效反映在视野路域占比的数值上。因此,本研究将视野路域占比指标作为特征指标,以便研究雾天环境对驾驶人视觉的影响。

综上, 引入视觉指标, 作为量化指标表征驾驶人行驶时的视野路域变化情况, 其定义为驾驶人视野范围内, 有效路域面积与视野范围总面积之比, 计算为:

$$F = \frac{S_r}{S_T}, \quad (1)$$

式中, F 为视觉指标; S_r 为视野路域像素值; S_T 为视野图像总像素值。

2 驾驶模拟仿真试验设计

2.1 仿真试验设计

本研究基于雾天气象条件下能见度降低的现象, 分析该行驶环境对视觉指标的影响, 进而构建雾天驾驶人视觉与行驶速度的深层次关系。本研究采用 UC-win/Road 软件对雾天不同能见度下的视觉指标与其速度行为关系进行辅助分析研究。

所构建的试验道路为双向四车道高速公路, 采用分离式断面形式。为增加主车与其他车之间的互动性, 使仿真环境更加逼真, 在车道上设置低密度的自由车流。试验选择雾天作为试验的干预选项, 相关研究表明^[22], 当雾天能见度小于 200 m 时, 平均车速开始呈明显降低趋势。《雾天高速公路交通安全控制条件》(GB/T 31445—2015) 中对雾天能见度小于 200 m 的高速公路采取安全控制, 当能见度小于 200 m 时, 称为浓雾; 当能见度小于 50 m 时, 宜关闭雾区路段。因此, 本试验主要研究能见度小于 200 m 的情况, 设计能见度分别为 200, 150, 100, 50 m 和无雾这 5 类天气条件, 分析 5 种不同雾天环境对视觉指标和行驶速度的影响。

基于道路线形的三维角度, 立体线形可分为 6 种类型——恒等坡度直线、恒等坡度曲线、凹形直线、凸形直线、凹形曲线、凸形曲线。道路线形设计包含 6 种立体线形, 具体设计参数如表 1 所示。不同天气、线形组合的试验工况如表 2 所示。

表 1 立体线形参数

Tab. 1 Stereoscopic alignment parameters

线形组合	平曲线半径/m	竖曲线半径/m	纵坡/%	横断面宽度/m
恒等坡度直线	∞	∞	0.5	12.75
恒等坡度曲线	500	∞	0.5	12.75
凹形直线	∞	5 000	2.0	12.75
凸形直线	∞	6 500	2.0	12.75
凹形曲线	500	5 000	2.0	12.75
凸形曲线	500	6 500	2.0	12.75

表 2 试验工况

Tab. 2 Experimental working conditions

序号	线形组合	能见度/m
工况 1	恒等坡度直线	200, 150, 100, 50, 无雾
工况 2	恒等坡度曲线	
工况 3	凹形直线	
工况 4	凸形直线	
工况 5	凹形曲线	
工况 6	凸形曲线	

2.2 视觉指标提取方法

本研究利用 Matlab 实现驾驶人视野路域面积的提取。Matlab 是一款能够实现图像处理和计算机视觉通用算法、集科学数据可视化等功能为一体的软件。它面对数字图像时, 能对图像进行处理, 使图像内容可编辑化, 图像具体处理流程见图 1。

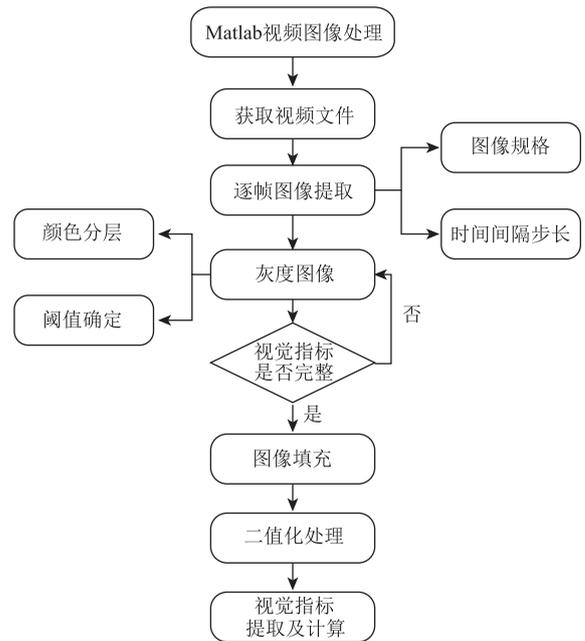


图 1 图像处理流程

Fig. 1 Image processing

具体处理步骤如下。

(1) 图像读取。首先每秒捕获一次行车视频中的图像, 以便使视野区域与行驶速度具有相同的时间间隔; 视野图像的尺寸大小与视频图像的原始大小相同, 并以 .jpg 格式保存。

(2) 图像灰度转换。图像读取完成后, 进行三原色分层处理, 并采用加权值算法对图像进行灰度转换, 灰度转换是将彩色图像转变为灰度图像, 其算法为:

$$g = W_R R + W_G G + W_B B, \quad (2)$$

式中, g 为灰度图像里的某一像素灰度值; R, G, B

为对应彩色图像中的像素分量,分别为红、绿、蓝; W_R, W_G, W_B 为对应分量的权值,分别为红、绿、蓝,且3个变量间满足 $W_R R + W_G G + W_B B = 1$ 。

本研究选取符合视觉感受的最佳分量权值($W_R = 0.299, W_G = 0.587, W_B = 0.114$)对图像进行灰度转换。

(3) 图像填充。根据灰度图像中路域、路侧、天空特征数值的不同,选取适当像素点阈值对图像进行提取,得到将非视觉指标区域转换为白色的图像。根据阈值提取图像后,图像内部仍存在背景色孔洞,孔洞被定义为由较亮像素包围的暗像素区域,会对视觉指标的提取造成干扰。为达到图像清晰与完整的目的,通常采用颜色填充的方法填充某一条或多条曲线所构成的闭合区域,以实现填充图的处理。

(4) 二值化处理。灰度转换完成后,对图像进行二值化处理,二值化处理是将原图像上所有点的灰度值转换为0和255两种数值。其中,数值0对应黑色,数值255对应白色。由于不同能见度下图像像素值不同,需选取合理的阈值以确保准确提取驾驶人视野中的路域范围,然后将所提取的图像转换为二值图像。

(5) 视觉指标提取。利用 Matlab 的多种数学功能应用于图像的像素提取与数据分析,进行科学运算^[23]。运算过程通过程序语言进行。由于采用图像处理方法已经得到了区分视觉指标与视觉图像中其他元素处理后的图像,因此该部分内容仅需计算视野路域的像素值,代入式(1)得到视觉指标值即可。

2.3 数据采集与分析

2.3.1 数据采集

(1) 试验人员。本试验参考相关类似的仿真试验^[17],结合实际驾驶状况,选取了10位具有3a以上驾驶经验的驾驶人员。根据汽车行业的相关统计数据^[24],中国车主中男女比例分别为74.6%和25.4%,因此本次试验选择矫正视力4.5以上的男性驾驶人7名、女性驾驶人3名。所有驾驶人都有良好的身体状况,均合法持有驾驶执照。进行模拟试验前,要求驾驶人保证充足睡眠,试验期间不服用任何药物。

(2) 试验数据采集。本试验主要收集的数据包括车辆的平均速度、不同断面瞬时速度,驾驶人连续的视野图像采集及视觉指标提取。

本试验主要的硬件设备为 Forum 驾驶模拟平台,

该设备主要通过三维电子信息与驾驶模拟结合完成试验道路的驾驶模拟。同时,利用 UC-win/Road 中的屏幕录像功能同步采集驾驶模拟过程中驾驶人的视野图像,视频帧宽度设置为1920像素,帧高度设置为961像素,每秒帧数为30fps。根据参数的设置输出并记录试验数据所记录的试验数据如表3所示。

表3 车辆运行参数输出示例

Tab.3 Example of vehicle operation parameters output

时间/s	行驶距离/m	行驶速度/(km·h ⁻¹)
34.121	801.492	101.084
34.180	803.164	101.005
...
211.118	5473.855	116.290

以100m为步长提取驾驶模拟过程中不同断面处的驾驶人视野图像,提取并计算不同视野图像中的视觉指标。采集不同断面视野图像时需与驾驶模拟的车辆行驶速度相对应,如表4所示。

表4 视觉指标提取示例

Tab.4 Example of visual indicator extraction

桩号	能见度/m	视觉指标/%
100.176	50	29.857
...
2000.308	50	29.555
100.176	100	30.140
...
2000.308	100	29.807
100.176	150	30.340
...
2000.308	150	30.047
100.176	200	30.384
...
2000.308	200	30.279

2.3.2 视觉指标的影响因素分析

根据采集得到的试验数据,分析不同因素影响下视觉指标的变化特征。

(1) 不同立体线形

视觉指标是道路信息的主要组成部分和载体,能够综合反映道路平、纵、横断面的变化。当行驶在公路的上坡路段时,驾驶人视觉变化为:车辆首先不停加速以达到坡段顶点,该过程中驾驶人注视距离远,眼球转速慢,注视点范围小;行驶至一定坡度时,车辆速度逐渐下降,驾驶人视距受坡度影

响减少, 观察路侧变化的时间增多, 因此眼球转速加快, 注视点范围增大; 当行驶在下坡路段时, 对视距的影响小, 行驶中能看到较远的事物, 因此眼球转速和注视点范围均变小; 坡度接近末端时, 行驶速度下降, 驾驶人能清楚并较高频率观察近处环境, 横向视野增大, 眼球转速加快, 并且注视点范围增大。

根据视觉指标的提取和计算, 得出当道路线形组合为凹形曲线时, 驾驶人的视野最开阔, 视觉指标为 31.15%, 在 6 种立体线形组合中为最大值; 相比之下, 当道路线形组合为凸形曲线时, 驾驶人视野最差, 视觉指标为 30.73%, 在 6 种立体线形组合中为最小值 (见图 2)。

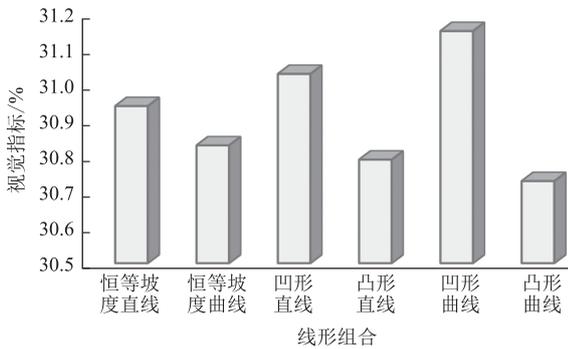


图 2 不同立体线形处对应的视觉指标
Fig. 2 Corresponding visual indicators of different three-dimensional lines

此外, 驾驶人在凹形曲线上行驶时, 视野开阔, 通常速度较快, 而在凸形曲线视野最差, 行驶时则较慢, 这与实际情况相符合。结合上述道路平、纵、横断面对驾驶人控速行为的影响分析及杨少伟等^[25]、许金良等^[26]对车速预测模型的研究结果, 可以得出结论: 道路平、纵、横断面与行驶速度间存在较强相关性, 同时道路平、纵横断面与视觉指标也存在紧密关联。

(2) 不同能见度水平

取与试验数据相对应的桩号断面, 按桩号递增顺序排序, 如图 3 所示。同一断面的视野图像中, 能见度低于 200 m 环境中的视觉指标明显低于无雾环境中的视觉指标, 且随着能见度不断降低, 视觉指标也逐渐降低; 能见度低于 200 m 的视觉指标相较于无雾环境下的视觉指标存在不同程度的减少, 减少范围在 0.578% ~ 1.407%, 且随着能见度降低, 视觉指标减少趋势变大; 能见度 200 m 与能见度 150 m 下的视觉指标最大差值为 0.252%, 而能见度 100 m 与能见度 50 m 下的视觉指标最大差值为 0.384%。

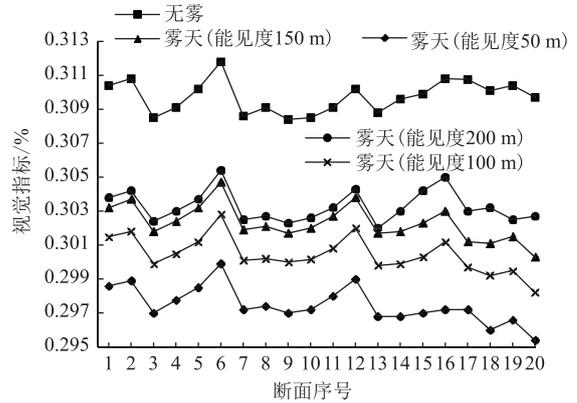


图 3 不同能见度水平下的视觉指标变化
Fig. 3 Visual indicators variations at different visibility levels

这是因为随着能见度降低, 视野中的路面信息模糊, 驾驶人能接收到的道路信息在一定程度上减少, 视觉指标所综合反映的道路平、纵、横信息减少, 即视觉指标减小。随着道路线形变化, 断面序号不同, 视觉指标存在相似变化趋势, 可认为即使能见度降低, 视觉指标仍能较好地表征道路的平、纵、横参数。可初步判断雾天行驶环境下, 所选取的视觉指标能较好地表征路况信息和能见度水平的变化, 视觉指标与行驶速度间必然存在某种密切的联系。

(3) 不同行驶速度

由试验数据可得, 在能见度分别为 50, 100, 150, 200 m 的行驶环境下驾驶人的平均车速分别为 49.71, 62.89, 79.26, 99.10 km/h。由此可见, 随着雾浓度增大, 能见度水平减小, 车辆的行驶速度区间及平均车速均呈下降趋势。

这是因为无雾环境下驾驶人驾驶自由度更高。当能见度小于 200 m 时, 驾驶行为因可视距离受限而被限制, 驾驶人难以看清周围的行驶环境, 给驾驶人带来了不安全感, 为了减少这种不安全感, 驾驶人通常降低车速行驶。

3 雾天高速公路运行速度预测模型

3.1 相关性分析

在雾天行驶环境下, 随着能见度降低, 视觉指标和行驶速度均呈下降趋势, 由此可认为, 视觉指标受能见度影响变化时, 由于驾驶人主要通过视觉传递道路环境信息, 因此对行驶速度产生了显著影响。

为增加结论的可靠性, 更加精确地分析能见度对视觉指标的影响, 构建视觉指标与行驶速度间的关系, 借用 SPSS 数据分析软件, 采用斯皮尔曼相关

性分析方法定量分析能见度值与视觉指标、视觉指标与行驶速度的相关性,分析结果如表5所示。

表5 斯皮尔曼相关性分析结果

Tab. 5 Spearman correlation analysis result

Γ -VIS	相关系数	0.852**
	显著性(双尾)	0
	个案数/个	80.0
V- Γ	相关系数	0.893**
	显著性(双尾)	0
	个案数/个	80.0

注:**为0.01级别(双尾),相关性显著。

视觉指标与能见度值间的相关系数为0.852,大于0.5,相关性显著,为中度相关。并且 $P < 0.01$,差异性显著。由此可得,能见度值对视觉指标存在显著性影响,随着能见度值降低,视觉指标减少。

行驶速度与视觉指标间的相关系数为0.893,大于0.5,相关性显著,为中度相关。并且 $P < 0.01$,差异性显著。由此可得,视觉指标对行驶速度存在显著影响,在一定范围内,当视觉指标增加或降低时,必然引起驾驶人的加速或减速控速行为,以达到将行驶速度控制在驾驶人可接受范围内的目的。

3.2 运行速度预测模型构建

当能见度变化时,视觉指标会对车辆的行驶速度产生影响,且不同的能见度对应的视觉指标不同,车辆的行驶速度同样发生变化。为准确构建不同能见度下视觉指标和行驶速度间的关系模型,增强模型结果的普适性和可靠性,本研究选择视觉指标(Γ)作为自变量,车辆行驶速度(V)作为因变量,分析两者间的数学关系,并得到预测模型。

运用SPSS软件,采用增长函数的形式进行拟合与分析,建立了 Γ 和 V 间的数学关系。其相关系数 R 为0.863,达到了显著水平。其检验值 $P < 0.01$,呈差异性显著。由此可知,雾天能见度降低导致视觉指标下降对行驶速度有显著影响。因此得出视觉指标与行驶速度之间的关系模型:

$$V = \exp(-23.940 + 0.937\Gamma). \quad (3)$$

视觉指标随能见度降低而减少,两者间存在线性关系,因此本研究选择能见度值(VIS)作为自变量, Γ 作为因变量,利用SPSS软件中的线性回归方式进行拟合,其相关系数 R 为0.890,达到了显著水平。其检验值 $P < 0.01$,呈差异性显著。由此可知,雾天能见度降低导致视觉指标下降。因此得出能见度与视觉指标的线性关系模型为:

$$\Gamma = 0.004VIS + 29.607. \quad (4)$$

由于车辆实地驾驶时,行驶速度不会无限制地提高或降低。故考虑采用最高行驶速度(V_{\max})和最低行驶速度(V_{\min})范围作为行驶速度的约束条件。根据《公路项目安全性评价指南》(JTG B05—2015)中设计速度(V_d)与行驶速度的协调性规定,结合文献[1]基于安全距离的雾天最高车速限制研究,能够得到 V_{\max} 和 V_{\min} 的界限,如表6所示。最终,基于视觉指标的雾天高速公路行驶速度的数学表达式为:

$$\begin{cases} V \geq V_{\max}, 50 \text{ m} < VIS < 200 \text{ m} \\ V_{\min} < V < V_{\max}, 50 \text{ m} < VIS < 200 \text{ m} \\ V \leq V_{\min}, 50 \text{ m} < VIS < 200 \text{ m} \end{cases} \quad (5)$$

表6 V_{\max} 和 V_{\min} 取值

Tab. 6 Values of V_{\max} and V_{\min}

速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	六车道公路		四车道公路				
			高速公路		1级公路		
V_d	120	100	100	80	60	80	60
V_{\min}	90	75	75	60	45	60	45
V_{\max}	145	135	130	110	90	110	90

速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	双车道公路		单车道公路			
V_d	80	60	40	30	20	20
V_{\min}	60	45	30	22	15	25
V_{\max}	115	105	88	78	70	60

根据式(4)计算得到不同能见度下的预测视觉指标作为不同能见度对应的视觉指标参考值,如表7所示。

表7 不同能见度下的视觉指标

Tab. 7 Visual indicators at different visibility levels

VIS/m	200	190	180	170	160	150	140	130
$\Gamma/\%$	30.407	30.367	30.327	30.287	30.247	30.207	30.167	30.127
VIS/m	120	110	100	90	80	70	60	50
$\Gamma/\%$	30.087	30.047	30.007	29.967	29.927	29.887	29.847	29.807

4 模型实例验证及合理限速值研究

4.1 模型实例验证

选择西部某山区高速公路作为试验路段,所选试验路段的设计速度为80 km/h,选择雾天气象发生的日期开展实车试验。由于交通流较小,道路条件良好,能见度可视为唯一影响车辆行驶的因素。因此,在此高速公路上行驶时,车辆的行驶速度波动范围大,视觉指标的变化频率高,行驶速度的波动

可视为由视觉指标变化所致。

在气象数据网上获取试验路段处站点当日的能见度数据, 以小时为单位记录。实车试验在往返总长约 200 km 的路段进行, 验证路段的长度能够使行驶的车辆达到平稳状态。选取该高速公路上桩号为 K8+000~K20+000 之间无车辆占用视觉指标的路段作为验证路段。该段道路线形比较丰富, 且无隧道结构物, 由于速度预测模型主要针对能见度小于

200 m 的雾天行驶环境, 选择当日能见度小于 200 m 的时间段所采集的实车试验数据。

试验后对视觉指标及其对应的实测行驶速度 (V_n^*) 进行提取; 运用本研究所建立的模型预测得到行驶速度 (V_n); 由视觉指标预测式 (4) 计算得出不同能见度下的视觉指标参考值 (见表 7); 代入视觉指标参考值计算得到行驶速度 (V_m); 根据计算结果分析三者之间的对比关系。

表 8 速度预测模型误差统计

Tab. 8 Statistics on speed prediction model error

断面 序号	能见 度/m	实测值/ (km·h ⁻¹)	实测视觉 指标/%	模型预测值 1/(km·h ⁻¹)	视觉指标 参考值/%	模型预测值 2/(km·h ⁻¹)	断面 序号	能见 度/m	实测值/ (km·h ⁻¹)	实测视觉 指标/%	模型预测值 1/(km·h ⁻¹)	视觉指标 参考值/%	模型预测值 2/(km·h ⁻¹)
1	100	65	29.962	61.87	30.007	65.14	16	200	95	30.397	93.88	30.407	94.76
2	100	65	29.973	63.10	30.007	65.14	17	200	96	30.412	95.21	30.407	94.76
3	100	64	29.974	63.16	30.007	65.14	18	200	97	30.418	95.74	30.407	94.76
4	100	66	29.976	63.28	30.007	65.14	19	200	98	30.426	96.46	30.407	94.76
5	100	67	29.995	64.41	30.007	65.14	20	200	99	30.429	96.73	30.407	94.76
6	100	66	30.007	64.53	30.007	65.14	21	200	100	30.432	97.01	30.407	94.76
7	100	67	30.022	65.45	30.007	65.14	22	200	100	30.437	97.46	30.407	94.76
8	100	68	30.024	65.57	30.007	65.14	23	200	101	30.441	97.83	30.407	94.76
9	100	70	30.055	67.50	30.007	65.14	24	200	100	30.442	97.92	30.407	94.76
10	100	69	30.056	68.20	30.007	65.14	25	200	102	30.449	98.56	30.407	94.76
11	100	70	30.062	69.23	30.007	65.14	26	200	101	30.451	98.75	30.407	94.76
12	100	70	30.078	71.14	30.007	65.14	27	200	103	30.471	100.62	30.407	94.76
13	100	71	30.099	70.87	30.007	65.14	28	200	102	30.476	101.09	30.407	94.76
14	100	70	30.1	71.07	30.007	65.14	29	200	104	30.478	101.28	30.407	94.76
15	100	70	30.105	68.20	30.007	65.14	30	200	104	30.576	111.02	30.407	94.76

采用相对误差法和绝对误差法对验证结果进行评价分析。相对误差为绝对误差与测量值之比, 该误差评价方法通常用来评估模型的精度和比较不同测量结果之间的可靠性, 代入实测视觉指标和视觉指标参考值的结果如表 8 所示。相对误差平均值的计算为:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n (|V_i - V_i'| / V_i')}{n}, \quad (6)$$

式中, V_i 为序号 i 样本的行驶速度预测值; V_i' 为序号 i 样本的行驶速度实测值; n 为样本数量。

(1) 由计算结果可知。本研究所建立的行驶速度预测模型的相对误差平均值为 2.43%, 符合小于 5% 的精度要求; 模型预测结果与实测结果之差的绝

对误差最大值为 7.02 km/h, 相对误差最大值为 6.75%, 误差值均小于 10 km/h。这表明该速度预测模型可应用于雾天高速公路车辆行驶速度的预测。

(2) 行驶速度预测值与实测值的相对误差的平均值为 4.75%, 小于 5%, 其绝对误差最大值为 9.24 km/h, 相对误差最大值为 8.88%, 与实测结果之差均小于 10 km/h, 因此认为采用视觉指标参考值计算的雾天行驶速度预测模型满足精度要求。

(3) 实测行驶速度与基于实测视觉指标预测得到的行驶速度的波动趋势基本一致 (见图 4), 基于实测视觉指标的计算方法精度更高, 但二者精度均符合要求。因此, 可以初步得出雾天行车环境下基于视觉指标的行驶速度预测模型具有较高的精度。

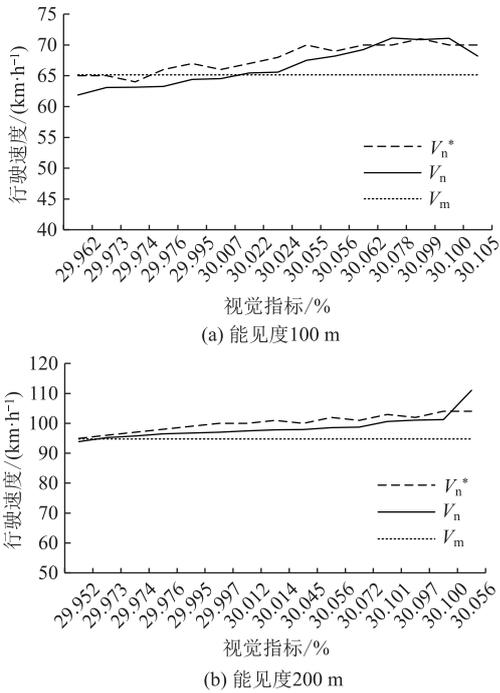


图4 行驶速度预测值与实测值对比
Fig. 4 Comparison of predicted and measured travel speeds

(4) 由于高速公路行驶环境复杂，可能出现部分路段难以完整提取视觉指标的情况，例如前方存

在大型施工占道，标志牌等临时警告标志侵占视觉指标，前方出现隧道等明显影响驾驶人视野的结构物，道路交通流量过大造成拥堵，前方车辆过多而影响视觉指标提取等情况。针对这部分路段，可选用视觉指标参考值对行驶速度进行预测。

(5) 误差分析：驾驶人的心生理特性和驾驶习惯不同，驾驶水平存在差异，对速度的适应性不同；试验所选用的数据采集仪器的精度及采集过程的延迟会对模型精度产生一定的影响；道路周围环境对驾驶人产生细微影响，导致模型的准确性受影响；实际行驶时，道路状况多变，视觉指标也随之变化，车辆难以维持同一行驶速度，固定视觉指标参考值难免会影响模型的准确性。

4.2 雾天高速公路合理限速值研究

目前高速公路低能见度路段缺乏严格执行的规范标准作为参考，高速公路管理部门多采用设计速度作为限速的主要参考依据，其单一化、独立化明显，且没能充分考虑驾驶人视角和复杂的道路情况。由于雾天行驶环境恶劣，行车潜在风险大，本研究考虑驾驶人、气象条件、路面状况和交通状况因素的影响，提出考虑视觉指标的多条件限速控制标准确定方法，如图5所示。

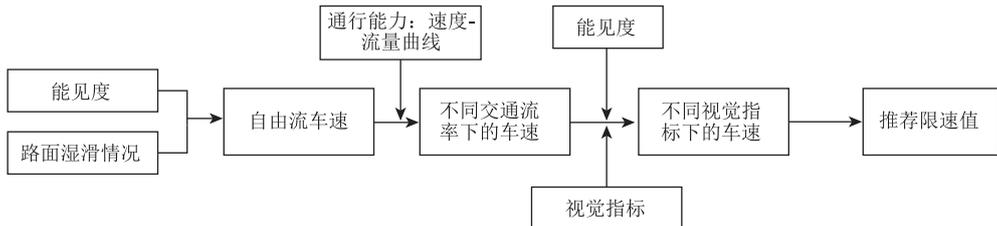


图5 限速值确定方法流程图
Fig. 5 Flowchart of method for determining speed limit values

(1) 自由流车速计算

为了使驾驶人在发现前方障碍物时能够及时停车，避免发生碰撞，道路设计应满足停车视距要求。停车视距主要由3段距离组成^[27]，基本公式为：

$$S = vt/3.6 + v^2/254(\varphi \pm i) + s_s, \quad (7)$$

式中，S为停车视距；t为驾驶人反应时间；v为车辆行驶速度；φ为摩擦系数；i为道路纵坡度；s_s为车

辆静止后距障碍物的距离。雾天能见度小于200 m时，由于能见度和潮湿摩擦系数均降低，受环境影响，驾驶人的反应时间也会相应增加。反应时间取3 s；制动至完全静止后与障碍物的间距取10 m；雾天条件下，空气中的水分增加，导致路面变得潮湿，取滑动摩擦系数为0.4^[28]；得到能见度介于200~50 m间的最高车速，反映了能见度变化下的自由流车速V_F如表9所示。

表9 不同能见度下自由流车速值

Tab. 9 Free-flowing vehicle speed values at different visibility levels

VIS/m	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50
V _F (km·h ⁻¹)	103	99	96	92	88	84	80	76	72	67	62	57	52	46	41	34

表 11 考虑视觉指标的多条件限速控制标准 (设计速度为 80 km/h)

Tab. 11 Multi-condition speed limit control standards considering visual indicators with design speed of 80 km/h

VIS/m	不同交通流率 $[(\text{pcu} \cdot (\text{h} \cdot \text{ln})^{-1})]$ 下的限速控制标准 $V_{80}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$										
	200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200
200	80	80	70	70	70	70	60	60	50	50	50
190	80	80	70	70	70	70	60	60	50	50	50
180	80	80	70	70	70	70	60	60	50	50	50
170	80	80	70	70	70	70	60	60	50	50	50
160	80	80	70	70	70	70	60	60	50	50	50
150	80	80	70	70	70	70	60	60	50	50	50
140	70	70	70	70	70	60	60	60	50	40	40
130	70	70	70	70	70	60	60	60	50	40	40
120	70	70	70	60	60	60	60	50	50	40	40
110	60	60	60	60	60	60	50	50	40	40	40
100	60	60	60	60	50	50	50	50	40	40	40
90	50	50	50	50	50	40	40	40	40	40	40
80	50	50	50	50	50	40	40	40	40	40	40
70	40	40	40	40	40	30	30	30	30	30	30
60	40	40	40	40	40	30	30	30	30	30	30
50	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

5 结论

本研究利用 UC-win/Road 建立了雾天不同能见度下的道路驾驶模拟环境; 基于图像处理原理, 利用 Matlab 实现了视野图像的采集与视觉指标的提取, 得到了雾天环境下量化驾驶人视野的方法; 分析了不同立体线形和能见度水平下的视觉指标变化特征, 探究了视觉指标的影响因素。结果表明: 道路的 6 种立体线形组合中, 凹形曲线处驾驶人的视野最开阔, 其视觉指标最大, 为 31.15%; 凸形曲线处驾驶人视野最差, 其视觉指标最小, 为 30.73%; 针对雾天气象频发的高速公路路段, 其路线设计的技术指标可结合驾驶人视觉指标较小路段进行优化; 能见度低于 200 m 环境下的视觉指标明显低于无雾环境下的视觉指标, 降低范围为 0.578%~1.407%, 且随着能见度降低, 视觉指标逐渐下降。

利用数理统计的角度通过 SPSS 分析软件构建了预测模型并检验模型的合理性。在雾天高速公路行驶环境下, 选取视觉指标作为自变量, 建立了运行速度预测模型, 得到视觉指标与运行速度两变量间的相关系数为 0.863, 该预测模型在精度方面符合要求。选取能见度作为自变量, 建立了能见度与视觉

指标间的线性模型, 得到能见度与视觉指标两变量间的相关系数为 0.890, 检验结果满足要求。结合实际行驶状况, 得到了基于视觉指标的雾天高速公路行驶速度预测模型, 并提出了不同能见度下的视觉指标参考值。

以西部某山区高速公路为例, 验证了雾天高速公路行驶速度预测模型的有效性。分别代入实测视觉指标和视觉指标参考值预测行驶速度, 预测结果的精度均符合要求, 其相对误差平均值分别为 2.43% 和 4.75%。基于所建立的速度预测模型, 为解决雾天高速公路能见度降低和驾驶人视距受限的交通安全问题, 依据不同设计速度, 根据能见度、交通流量和驾驶人视觉三重因素, 提出了考虑视觉指标的多条件限速控制标准, 为雾天复杂环境下高速公路的限速标准制订提供了参考。

参考文献:

References:

- [1] 吴其琛. 不良天气影响下山区高速公路限速研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
WU Qi-chen. Research on Speed Limit of Mountain Highway Under the Influence of Adverse Weather [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.

- [2] 杨小兵, 杨再均, 韩晖, 等. 基于重要指示变量和特征的高速公路浓雾短临预测研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (6): 120-128.
YANG Xiao-bing, YANG Zai-jun, HAN Hui, et al. Study on Short-term Prediction of Dense Fog on Expressway Based on Important Indicator Variables and Characteristics [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (6): 120-128.
- [3] 许绍祖, 尹球. 雾能见距离和光衰减系数的参数化公式 [J]. 气象科学, 1988 (4): 62-68.
XU Shao-zu, YIN Qiu. Parameterization of Visibilities and Extinction Coefficients in Fogs [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 1988 (4): 62-68.
- [4] 王炜, 卢雪翠, 解以扬. 雾的标准化危险性指数计算方法及其应用 [J]. 气象与环境学报, 2010, 26 (1): 16-20.
WANG Wei, LU Xue-cui, XIE Yi-yang. Normalized Fog Hazard Index and Its Application [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26 (1): 16-20.
- [5] GAZZI M, GEORGIADIS T, VICENTINI V. Distant Contrast Measurement Through Fog and Thick Haze [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35 (30): 5143-5149.
- [6] 盛旭高, 于梦阁, 霍炜. 基于停车视距的强降雨环境下公路车辆制动安全可靠研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (1): 227-235.
SHENG Xu-gao, YU Meng-ge, HUO Wei. Study on Braking Safety Reliability of Highway Vehicles in Heavy Rainfall Environment Based on Stopping Sight [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (1): 227-235.
- [7] 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 and Prevention, 2012, 48: 472-479.
- [8] OH J S, OH C, RITCHIE S G, et al. Real-time Estimation of Accident Likelihood for Safety Enhancement [J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131 (5): 358-363.
- [9] ABDEL-ATY M, HASSAN H M, AHMED M, et al. Real-time Prediction of Visibility Related Crashes [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 24 (9): 288-298.
- [10] 初旭新, 宗刚, 彭朝霞, 等. 基于ISM的道路交通安全影响因素研究 [J]. 安全与环境学报, 2017, 17 (5): 1668-1672.
CHU Xu-xin, ZONG Gang, PENG Zhao-xia, et al. Analysis of the Key Influential Factors on the Road Traffic Safety Based on the Interpretive Structural Model [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 15 (5): 1668-1672.
- [11] 张驰, 贺亚龙, 黄星, 等. 雾天不同能见度条件下高速公路限速建议值研究 [J]. 交通信息与安全, 2018, 36 (5): 25-33.
ZHANG Chi, HE Ya-long, HUANG Xing, et al. A Study on Speed Limit of Different Visibility on Expressways Under Foggy Weather [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36 (5): 25-33.
- [12] 秦雅琴, 杨妮, 谢济铭, 等. 山区低等级公路典型路段驾驶人视觉差异性分析 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22 (6): 3235-3243.
QIN Ya-qin, YANG Ni, XIE Ji-ming, et al. Analysis of Driver's Visual Differences in Typical Sections of Low-grade Highways in Mountainous Areas [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22 (6): 3235-3243.
- [13] Federal Highway Administration. Synthesis of Safety Research Related to Speed and Speed Limits, Publication No-FHWA-RD [R]. Mclean: Federal Highway Administration, 2000.
- [14] FITZPATRICK K, ELEFTERIADOU L, HARWOOD D W, et al. Speed Prediction for Two-lane Rural Highways, Publication No. 99-171 [N]. Mclean: Federal Highway Administration, 2000.
- [15] 施兹国, 秦宇婷, 徐锋铭, 等. 基于驾驶人视觉感知的高速公路速度控制措施效果分析 [J]. 公路交通技术, 2020 (1): 147-152.
SHI Zi-guo, QIN Yu-ting, XU Feng-ming, et al. Analysis on Effectiveness of Speed Control Measures Based on the Driver's Visual Perception [J]. Technology of Highway and Transport, 2020 (1): 147-152.
- [16] 张驰, 闫晓敏, 华贵龙, 等. 考虑可视路表面积的小客车运行速度预测模型 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2016, 36 (3): 72-80.
ZHANG Chi, YAN Xiao-min, HUA Gui-long, et al. Prediction Model of Operating Speed for Passenger Cars by Considering Visual Area of Road Surface [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36 (3): 72-80.
- [17] 罗冬宇. 三维点云环境下基于动视野的运行速度预测 [J]. 华南理工大学学报, 2021, 49 (7): 17-25.
LUO Dong-yu. Operating Speed Prediction Based on Dynamic Visual Field in Three-dimensional Point Cloud Environment [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49 (7): 17-25.
- [18] 余博, 陈雨人, 付云天. 基于驾驶人视觉感知的低等级公路行车速度预测 [J]. 同济大学学报 (自然科学

- 版), 2017, 45 (3): 362-368.
- YU Bo, CHEN Yu-ren, FU Yun-tian. Driving Speed Prediction Method for Low-grade Highways from Driver' Visual Perception [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45 (3): 362-368.
- [19] BROOKS J. Speed Choice and Driving Performance in Simulated Foggy Conditions [J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43 (3): 698-705.
- [20] 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.
- ZHAO Jia. Study of Driving Behavior Under Fog Weather Condition Based on Driving Simulator Experiment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [21] 何石坚. 基于驾驶人-车辆-道路-环境全因素的高速公路事故分析与预测方法 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- HE Shi-jian. Accident Analysis and Prediction Method of Expressway Based on Whole Factors of Driver, Vehicle, Road and Environment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [22] 彭余华, 李璇, 陆昕, 等. 基于 VISSIM 仿真的山区高等级公路雾区限速方法 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (16): 127-133.
- PENG Yu-hua, LI Xuan, LU Xin, et al. Speed Limit Method of Mountain High-grade Highway in Fog Area Based on VISSIM simulation [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (16): 127-133.
- [23] 顾梅花, 王苗苗, 李立瑶, 等. 彩色图像多尺度融合灰度化算法 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (4): 209-215.
- GU Mei-hua, WANG Miao-miao, LI Li-yao, et al. Color Image Multi-scale Fusion Graying Algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57 (4): 209-215.
- [24] 周海宇. 山区高速公路小半径平曲线隧道交通安全保障技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- ZHOU Hai-yu. Study on Traffic Safety Guarantee Technology of Small Radius Curve Tunnel in Mountainous Expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [25] 杨少伟. 可能速度与公路线形设计方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.
- YANG Shao-wei. Research of Possible Velocity and Highway Alignment Design Method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [26] 许金良, 胡圣能, 杨宏志. 基于曲率变化率的运行速度模型 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2011, 31 (5): 1-6.
- XU Jin-liang, HU Sheng-neng, YANG Hong-zhi. Operating Speed Prediction Models Based on Curvature Changing Rate [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31 (5): 1-6.
- [27] 孙宏贤. 高速公路交通工程安全设施施工技术 [J]. 工程技术研究, 2020, 5 (5): 105-106.
- SUN Hong-xian. Construction Technology for Highway Traffic Engineering Safety Facilities [J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5 (5): 105-106.
- [28] 贾浩楠. 雾天高速公路预警方法及限速策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- JIA Hao-nan. Research on Expressway Warning Method and Speed Limit Strategy in Foggy Days [J]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [29] 李长城. 不良天气下的高速公路交通流特性及引导控制研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- LI Chang-cheng. Research on Expressway Traffic Flow Characteristics, Traffic Guidance and Control under Adverse Weather [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [30] 李赞勇, 冯焘. 基于多因素的高速公路团雾区限速设计 [J]. 中外公路, 2018, 38 (4): 337-342.
- LI Zan-yong, FENG Tao. Speed Limit Design of Expressway Agglomerate Fog Area Based on Multi Factor [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38 (4): 337-342.