

张 驰,高艳阳,杨榕玮,等.基于航拍数据的互通隧道小净距路段运行速度模型[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(2):136-150.
ZHANG Chi,GAO Yan-yang,YANG Rong-wei,et al.Operating speed model of tunnel exit and interchange exit in short distance sections based on aerial photography data[J].Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2024,44(2):136-150.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.02.013

基于航拍数据的互通隧道小净距路段 运行速度模型

张 驰¹,高艳阳¹,杨榕玮²,刘昌赫¹,谢子龙¹,靳引利³

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通规划设计研究院,陕西 西安 710065;
3. 长安大学 电子与控制工程学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为探究车辆在隧道出口-互通出口小净距路段运行速度变化规律,改善当前山区高速公路小净距路段行车安全性不足现状,开展小净距路段车辆运行速度模型研究。首先,基于无人机航拍获取西汉(西安-汉中)高速等 4 处隧道出口-互通出口小净距路段车辆实测数据,利用 YOLO-v5 算法编写航拍视频数据提取程序,输出车辆在目标路段的实时速度数据和轨迹数据,同时结合驾驶仿真模拟系统对试验进行对照组数据补充。其次,统计车辆在该区域运行情况断面速度分布并进行宏观分析,确定构建运行速度模型的自变量。最后,应用非线性曲线拟合软件 1stOpt 对分析数据进行回归,分别建立小型车、大型车在出口小净距路段主线行驶、驶出主线的运行速度预测模型,并依托西南山区某小净距工程实际路段开展预测模型的有效性验证。研究结果表明:出口小净距路段车辆运行速度与主线半径、车辆距隧道洞口距离和净距长度存在显著正相关关系;建立的运行速度预测模型通过了拟合优度检验、统计学残差检验和相对平均误差检验,模型预测值与实测值的相对误差平均值均小于 10%,回归模型满足精度要求。本研究能应用于实际工程中的隧道出口-互通出口小净距路段,能准确表征车辆在此区域的速度变化规律,在预测车辆运行速度和表征速度变化规律方面具有一定的参考价值。

关键词:道路工程;运行速度模型;YOLO-v5 算法;小净距路段;航拍数据

中图分类号:U411 文献标志码:A 文章编号:1671-8879(2024)02-0136-15

Operating speed model of tunnel exit and interchange exit in short distance sections based on aerial photography data

ZHANG Chi¹, GAO Yan-yang¹, YANG Rong-wei², LIU Chang-he¹, XIE Zi-long¹, JIN Yin-li³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial
Transport Planning Design and Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China;
3. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To explore the pattern of vehicle speed variation in short distance sections between tunnel exits and interchange exits, and to alleviate the current insufficiency in driving safety on short-distance sections of mountainous highways. Vehicle speed models in such sections was

收稿日期:2023-09-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1512005,2019YFB1600700);四川省科技计划项目(2022YFG0048);

藏高科技项目(2021-11);陕西省自然科学基金项目(2023-JC-YB-391)

作者简介:张 驰(1981-),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhangchi@ chd.edu.cn.

studied. Firstly, based on aerial drone footage, real-time vehicle speed and trajectory data were extracted from sections with short clearance between tunnel exits and interchange exits on the Xi-Han (Xi'an to Hanzhong) Expressway and three other locations, and a program written with the YOLO-v5 algorithm was used. This was complemented with control group data from a driving simulation system. Secondly, the vehicle operation and sectional speed distribution in this area for macroscopic analysis were analyzed statistically, the independent variables for constructing the speed model was determined. Finally, non-linear curve fitting software 1stOpt was applied to regress the analyzed data, establishing predictive models for the operational speeds of small and large vehicles driving on or exiting the mainline in short-distance exit sections. These models were validated in a real-world short-distance section project in a Southwestern Mountainous Area. The results show that there is a significant positive correlation between vehicle speed in short-distance exit sections and mainline radius, the vehicle's distance from the tunnel entrance, and the clearance length. The established speed prediction models passed tests for goodness of fit, statistical residual examination, and relative average error, with an average relative error between predicted and actual values of less than 10%, satisfying accuracy requirements. This research can be applied to actual engineering projects in short-distance sections between tunnel exits and interchange exits, accurately characterizing vehicle speed variations in this area and providing valuable reference for predicting vehicle operational speeds and representing speed variation patterns. 13 tabs, 20 figs, 30 refs.

Key words: road engineering; operating speed model; YOLO-v5 algorithm; short distance section; aerial photography data

0 引 言

随着西部大开发战略的进一步实施,中国高速公路路网的建设重点已经向西部山区转移。受西部山区地质条件的限制,高速公路道路桥梁经常跨越不良的地形地质条件,提高了工程建设难度,如雅康(雅安—康定)高速全长 135 km,全线建有 129 座桥梁、44 座隧道,桥隧比高达 82%,极高的桥隧比增加了互通立交的设置难度,若相邻构造物间距设置不当会导致小净距路段的出现,威胁行车安全。已经建成的山区高速公路出现了许多隧道-互通距离过近的实例,如西汉高速中木瓜园隧道与皇冠互通、飞仙关隧道与多功隧道之间路段;雅康高速中二郎山隧道与泸定互通之间路段,均为小净距路段。关于小净距路段,邓国忠等通过收集多处历史事故数据,建立路段特征等因素对交通事故的影响权重,发现隧道互通净距自变量对事故严重程度有显著影响^[1]。王方杰根据隧道-互通小净距路段行车特点,分别对隧道出口与互通出口、互通入口与隧道入口 2 类情况提出安全设计原则和交通安全保障措施^[2]。隧道-互通出口小净距路段在道路线形、驾驶环境、交通冲突方面均与普通路段存在不同,这些因

素或单独或共同作用,会导致驾驶人对车辆周围环境的感知判断能力减弱^[3],影响驾驶人对路况信息判断和对车辆的操控,并最终表征于车辆速度变化。徐进等对高速条件下隧道出入口车辆行驶特性进行研究,发现当隧道出口前方有小半径曲线或其他构造物时,车辆速度变化规律会与正常情况下车辆加速驶离隧道出口存在明显差异,同时在洞口断面位置处车辆间存在较强纵向干涉^[4]。车速过高、车辆间离散性较大都有引发安全事故的隐患,而隧道-互通小净距路段间行车环境复杂,交通风险较大,许多行车安全问题亟待解决。针对此种现状,从速度指标入手,研究此类特殊路段车辆速度变化规律,建立精度较高的运行速度模型,对交通管理、交通安全设施的设计,以及降低安全事故隐患均有重要的参考意义。

目前,关于运行速度模型的研究已有较多成果。Collins 等研究了车辆驶入和驶离平曲线过程中的加减速特性,建立了与曲线半径相关的速度预测模型,但其未将道路交叉口对车辆速度的影响考虑在内^[5]。Cafiso 等利用 GPS 系统测得车辆连续速度数据,考虑曲率和纵坡坡度等几何指标加权值构建了运行速度模型^[6-7]。Anderson 等统计了平曲线上

曲线中点速度并构建速度预测模型,将数据划分为8个区间分别对平均事故率和平均减速率进行了回归分析^[8]。Donnell等则通过实测数据与驾驶模拟数据结合,构建了适用于双车道公路正常行驶和超车行驶的大型车速度预测模型^[9]。Fitzpatrick等考虑平面指标、纵断面指标以及二者结合对运行速度的影响,并进行有效性验证^[10]。袁华智等对2条山区国道弯坡组合路段进行速度数据采集,结合山区公路运行实际建立了弯坡组合路段车辆运行速度模型并进行了修正^[11]。杜锦涛结合山区公路小半径曲线的不良线形特点对山区公路车辆运行速度展开研究,考虑曲线半径、视距和交通因素修正,建立了山区公路运行速度模型并应用于实际工程检验^[12]。田佩汐等从几何设计角度,建立了基于线形三维几何特征的VAR模型^[13]。杨少伟等在速度指标基础上对加速度指标研究,考虑曲率、超高、纵坡坡度综合量化车辆速度在平纵横3个维度受到的影响^[14-15]。除上述道路主线段运行速度模型外,众多学者在隧道、互通等车速频繁变化路段进行了大量研究。Jin等从机械平衡方程入手,研究了立交匝道匀速段的预测模型及拟合方法,确定了4个匝道匀速段的预测模型方程^[16]。马聪等开展实地调研,选定影响隧道路段车速的变量对其开展单因素分析,最终构建隧道路段小型车运行速度模型^[17-18]。祝站东等对大小型车开展实车试验,研究了不同长度隧道对车辆速度的影响,完善了隧道路段速度模型单元划分^[19-20]。张晋伟利用数码相机感光元件记录隧道洞内外亮度差值,建立了考虑洞口位置等指标的运行速度模型^[21]。阎莹等研究了道路几何线形过渡对隧道车速的影响,建立速度差值与过渡指标间的运行速度模型^[22]。许金良等考虑坡长、纵坡坡度、坡底速度为自变量,通过SPSS回归分析建立车辆在纵坡路段上的运行速度模型,并得出坡度、坡长与速度变化间关系^[23]。潘兵宏等使用雷达测速仪获取实车数据,应用SPSS软件进行统计学分析,最终分别得到互通出入口、B形喇叭式立交环圈出口处的运行速度^[24-25]。

综上所述,目前国内外关于运行速度模型的研究已相对成熟,关于影响运行速度指标的选取不再局限于道路几何元素,而变得更加贴合驾驶实际。雷达激光测速、车载定位系统等技术的普及,也让采集车辆运行信息、分析车辆实时姿态拥有更高精度。研究路段也从公路主线研究到加入对隧道、互通此类大型构造物路段运行速度的考虑,建成了相对完

整的预测模型体系。但是,现有模型未对隧道-互通出口小净距路段车辆速度变化规律专门研究,且《公路项目安全性评价规范》(JTGB05—2015)(下文简称安评规范)中运行速度模型针对隧道和立交处特殊路段仅是考虑折减值的影响,没有具体细化这些区段的速度变化特征等内容^[26]。现有的数据收集方法基本都是采用雷达/激光测速仪、气压管式测速仪在测点附近进行断面测速采集,存在采集数据不连续的弊端,影响模型构建精度。在部分隧道-互通出口小净距路段甚至缺乏人工架设激光雷达或气压管式测速仪的硬性条件,无法进行数据采集。

因此,为了补充完善此类特殊路段运行速度模型研究,进而提出相应安全保障措施,降低路段安全隐患,本文提出了一种基于无人机航拍数据的运行速度模型构建方法。针对无人机航拍视频提取数据进行宏观层面规律分析和断面速度分布统计,明确隧道-互通出口小净距路段对于车辆速度的定性影响,为后续定量分析提供基础,而无人机航拍具有小巧隐蔽、高空长时间作业优势,相较于传统采集方法可为研究提供精确支撑;选定模型自变量,在定性分析基础上罗列可能对车速产生影响的因子并对其进行单因素定量分析,根据影响程度大小确定模型选用指标;基于多元非线性回归方法对数据进行拟合,再对拟合函数进行拟合优度分析,确定因变量与自变量间的最佳解释关系,考虑隧道-互通出口路段特殊指标修正影响,最终得到与道路几何指标相关的车辆运行速度预测模型。

1 数据采集与处理

1.1 数据采集地点

为了能够获取到足够的隧道-互通出口区域车辆运行速度数据,对后期建立模型提供大量的数据支撑,本文对已通车运营高速展开实地调研,以陕西西安与四川雅安两地为中心,通过卫星地图对城市周边路网进行辐射式检索,搜索在实际工程中隧道与互通立交小净距案例频繁出现的典型路段,最终选定位于陕西省西安市周边的木瓜园隧道—皇冠互通、朱雀隧道—朱雀停车区2处路段与位于四川省雅安市周边的飞仙关隧道—多功互通、二郎山隧道—泸定互通2处路段。选定路段的工程概况如表1所示。

1.2 数据采集过程

本次调研数据基于无人机长时间录制实车视频开展,选取晴朗天气条件进行实地视频采集,运用DJI Mavic 2 Zoom型号的旗舰级无人机,最大起飞

表 1 研究路段概况

Tab.1 Overview of study sections

高速公路	互通/ 服务区	隧道	隧道 长度/m	隧道出口- 互通出口长度/m
西汉高速	朱雀停车区	朱雀隧道	6 500	10
	皇冠互通	木瓜园隧道	300	20
雅康高速	多功互通	飞仙关隧道	4 940	345
	泸定互通	二郎山隧道	13 406	10

高度 6 000 m, 采用了 1/2.3 英寸 CMOS, 有效像素 1 200 万, 视频单次采集时长为 45 min, 图传画质稳定, 可实时监测车流运行状况。调研人员在测点附近起飞无人机, 悬停至空中适宜高度持续进行视频录制, 录制时间 1~2 h, 见图 1、图 2。大致步骤如下:

(1) 准备无人机、系留系统与蓄电池, 试验前对各设备进行充电试飞及硬件检查。对试验路段进行勘查、熟悉路况, 寻找可以满足拍摄需求的最佳起飞点。

(2) 试验开始前, 做飞行准备工作, 需要对无人机进行固件更新检查、指南针校准, 检查飞行器与遥控器之间的信道质量以及飞行器连接卫星的数量, 确认云台无障碍物阻挡以及桨叶安装牢固。

(3) 开启系留系统和蓄电池, 电源线预热 5 s 后, 转换线接到地面端, 地面端白灯常亮后, 供电线缆连接飞行器, 飞行器启动升空, 当上升到 1 m 高度时, 打开系留系统地面端 400 V 开关, 之后飞行器继续升高, 直到到达理想位置。

(4) 飞行器升空到达最佳观测位置后进行航拍录制。在录制完成后, 现场将视频备份到电脑, 检查视频完整性, 标注时间地点等测点相关信息, 并清除内存卡中的数据占用, 准备进行下一测点视频录制, 重复上述操作直至试验结束。

(5) 试验结束后, 飞行器降落到地面, 将录制视频检查储存后进行后续处理。

1.3 数据提取与处理

数据提取与处理具体流程如图 3 所示。

1.3.1 视频防抖处理

在原视频中截取基准图, 设基准图像为 $f(x, y)$, 待配准图像为 $g(x, y)$ 。令基准图像上的点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 在待配准图像中为 (x, y) , 使二者之间具有仿射关系, 利用这样的逻辑将基准图中的特征点匹配到和待处理视频中第 1 帧相同的位置, 从而抵消随时间产生的镜头晃动, 之后运行程序时会自动按照该图像的像素大小与临近像素排列, 对视频中的抖动部分做逐帧对齐处理, 并将对齐处理好的图片放入预



图 1 Mavic 2 Zoom 大疆无人机

Fig.1 DJI Mavic 2 Zoom drone



图 2 现场调研照片

Fig.2 Field research photo

设文件夹, 即

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: k 为尺度参数; θ 为旋转角度; Δx 和 Δy 分别为两坐标轴的平移量。

1.3.2 像素距离标定

视频防抖处理是后续工作步骤的预处理阶段, 在对原视频进行防抖处理后, 需要对视频中的像素单位与实际距离做标定。参数标定如图 4 所示。在 1 张图片中, 任 1 点的像素位置可以通过 Photoshop 中的坐标系确定, 而在对应到实际距离时需要借助已知长度的参照物作为标准。在此次调研中, 选取高速公路“69 线”(6 代表的是 2 根虚线相隔 6 m, 9 代表的是虚线长度为 9 m) 作为参照, 计算道路已知标线的像素长度, 即

$$k = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{6} \quad (2)$$

式中: x_1, y_1 均为第 1 点的像素坐标; x_2, y_2 均为第 2 点的像素坐标。

1.3.3 基于 YOLO-v5 的车辆识别与跟踪

为提高视频识别的精度, 需要对 YOLO-v5 算法进行训练, 对用于训练及拟分析视频进行了车辆

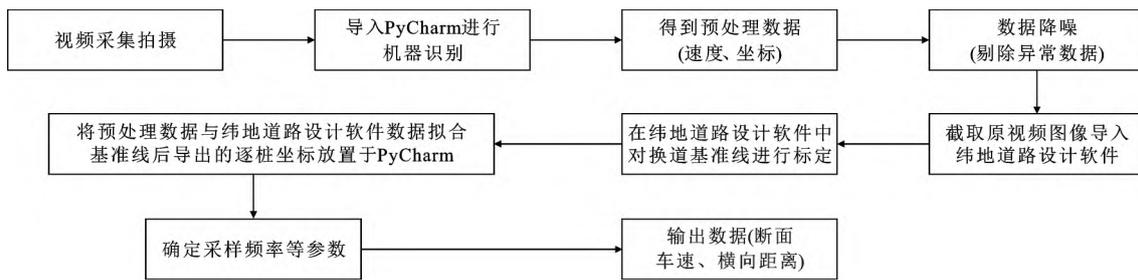


图 3 视频数据提取流程

Fig.3 Process of video data extraction

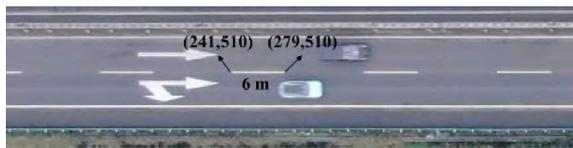


图 4 参数标定示意

Fig.4 Parameter calibration

框选标记,如图 5 所示。以训练集 : 验证集 : 测试集为 0.7 : 0.2 : 0.1 进行模型训练,共计进行 100 轮训练,取测试效果最好的模型用于车辆检测,见图 6。经实际验证,车辆检测效果可达到 100%,且检测框稳定,可以持续跟踪目标车辆不受画面高光阴影过渡的影响。



图 5 车辆训练标记

Fig.5 Vehicle training mark



图 6 车辆检测结果

Fig.6 Vehicle detection results

1.3.4 断面车速提取

本文提出了以车道线提前标定再计算距离的方法代替原 YOLO 对车道线的实时识别,可稳定获取车辆与车道线的速度与距离关系,方法如下:从航拍视频中提取图片,将图片位于坐标原点导入 CAD 软件中,通过缩放使图片长与宽坐标值与像素长度相等。通过纬地道路设计软件的平面设计功能,按照实地调研情况拟合设计出与图片中车道线相同的

设计线,再根据固定间隔输出该设计线的逐桩坐标,并可根据试验需求以不同精度输出,最高可以实现实际道路中 10 cm 级别精度。将逐桩坐标的 Y 轴坐标值取负值,即为车道线的像素坐标标定文件,直接进行运算。使用 Python 语言编写程序,遍历所有车辆的编号,得到每辆车在视频中的连续像素坐标与速度值;再遍历所标定车道线的每个希望提取的桩号,根据试验需求每隔 1 m 采集 1 次,用每个桩号与上层所提取编号车辆的所有坐标进行距离计算,通过此方法遍历每 1 辆车与每 1 个断面,即可得到每辆车在每个断面的车速。

1.3.5 准确性验证

为保证通过机器识别跟踪所获得数据的精确性,需对其进行准确性检验,从雅康高速主线出口段所提取数据中随机挑选大小型车各 7 辆,使用逐帧播放手段,分别记录其通过道路上虚线的时间,因为道路虚线划线实际长度已知为 6 m,即可计算出该车此处实际车速,将其与机器视觉所提取车速对比,进行车速检测精度检验,见表 2。

1.4 驾驶仿真模型构建

由于实地调研路段数量有限,且建成后的高速公路隧道与互通立交各项参数(曲线半径、纵坡坡度等)都已固定,在对各影响因素进行单因素分析时只改变单一因素而控制其他变量不变,无法获得足够的对照试验组。因此在实地调研数据的基础上,利用驾驶仿真模拟系统对试验进行数据补充,具体仿真方案如表 3 所示。

根据获取到的调研路段设计资料,汇总各路段主要技术指标,便于在 UC-Win Road 中构建相应模型,实际各路段技术指标如表 4 所示。

表 2 数据准确性检验

Tab.2 Data accuracy test

km · h⁻¹

车辆类型	小型车							大型车						
实际速度	79.00	79.00	64.80	86.00	86.00	74.05	86.40	47.12	45.00	45.00	64.20	39.80	43.20	57.60
检测速度	77.00	79.00	67.00	81.00	82.00	76.00	89.00	45.00	43.00	43.50	65.00	36.00	41.00	59.00

表 3 仿真数据补充方案

Tab.3 Supplementary scheme of simulation data

仿真编号	半径/m	纵坡坡度/%	净距长度/m	仿真方案
半径组	700,1 000,1 500,2 000,2 500	同调研路段	同调研路段	半径单因素
纵坡坡度组	同调研路段	0,1,2,3,4,5,6	同调研路段	纵坡坡度单因素

表 4 调研路段工程技术指标

Tab.4 Engineering technical indexes of investigated road section

路段名称	净距长度/m	主线半径/m	隧道长度/m	互通类型	纵坡坡度/%	横断面类型
飞仙关隧道-多功互通	345	1 800	4 940	单喇叭 A	2.350	双向四车道
木瓜园隧道-皇冠互通	20	700	300	单喇叭 A	-1.599	双向四车道
朱雀隧道-朱雀停车区	10	1 400	6 500	单喇叭 A	4.600	双向四车道

在 UC-Win Road 软件中构建隧道-互通出口小净距模型时主要包括地形图导入、模型主体构建(道路主线、隧道、互通立交)、道路附属设施构建(交通标志标牌、护栏等)以及仿真数据输出,具体建模流程如图 7 所示。

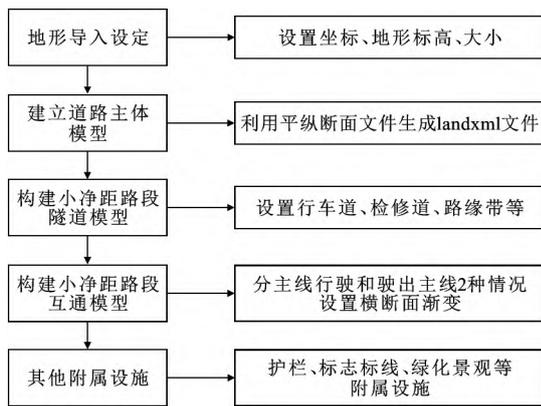


图 7 仿真模型建立流程

Fig.7 Simulation model establishment process

1.5 驾驶仿真数据标定

为保证驾驶模拟数据能够有效弥补实测数据在自变量单因素分析方面的不足,需对仿真数据进行标定,验证其与实测数据是否具有一致性。具体标定方法为:在实地调研路段中,取隧道洞口位置至减速车道渐变段起点位置特征断面处为测点,输出该处车速并与 UC-Win Road 软件中路段相应位置处进行比较。图 8 为特征断面车速提取位置示意(以木瓜园隧道出口-皇冠互通出口为例)。

调研路段各特征断面及上述路段的对应模型仿真后的断面车速平均值如图 9 所示。

由图 9 可知,通过驾驶模拟得出的仿真路段速度数据普遍比实测数据高,误差范围在 2~8 km/h 内,出现这种现象的原因是驾驶模拟设备始终无法完全构造真实驾驶环境,给被试相应的驾驶反馈,且被试在开展试验时易对整体驾驶体验有心理预期,

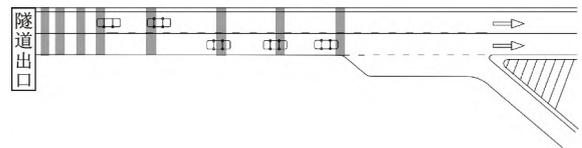


图 8 特征断面车速提取位置示意

Fig.8 Location of vehicle speed extraction on characteristic section

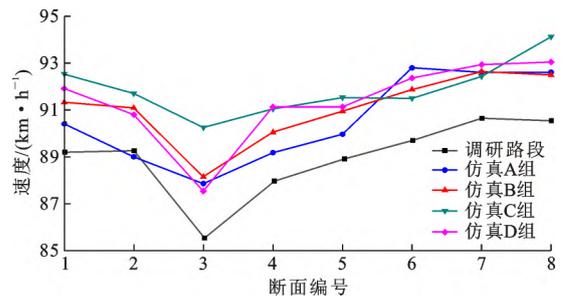


图 9 特征断面速度变化

Fig.9 Velocity variations of characteristic section

特别是在驶出隧道洞口时不会感到明显的环境变化,驾驶人心生理方面均不会受到太大压力,对车速感知不敏锐。但仿真数据与实测数据的变化趋势基本保持一致,误差在可接受范围,从进行自变量单因素分析角度考虑,选择驾驶仿真数据来弥补实测数据对照组不足的方法是可以达到要求的。

2 车辆运行特性分析

2.1 车辆速度变化分析

为更直观显示车辆运行速度在隧道-互通出口区域内,特别是驶出隧道洞口后一段距离内的变化情况,以调研路段中 4 处互通式立交附近的车辆数据为例,以隧道出口洞门为起点,从视频处理数据中每隔 10 m 提取车辆在自由流状态下的实时速度,并取第 85 百分位汇总,结果如图 10~图 12 所示。

由图 10~图 12 可知,车辆在隧道-互通出口区

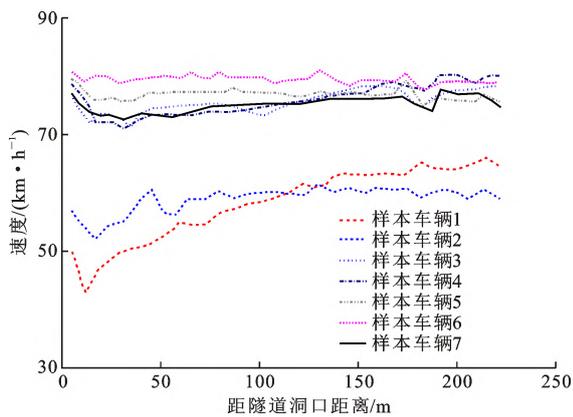


图10 飞仙关隧道-多功互通车辆运行速度变化

Fig.10 Feixianguan Tunnel-Duogong Interchange vehicle speed changes

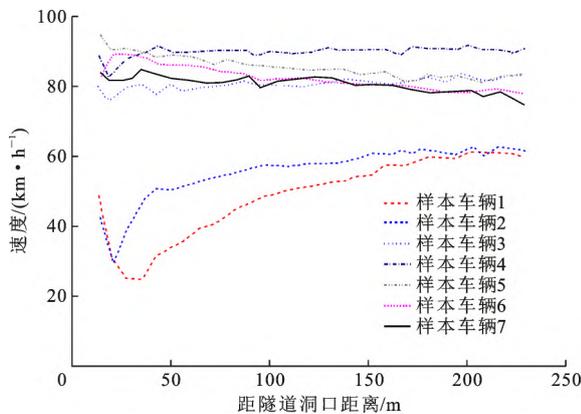


图11 木瓜园隧道-皇冠互通车辆运行速度变化

Fig.11 Muguayuan Tunnel-Huangguan Interchange vehicle speed changes

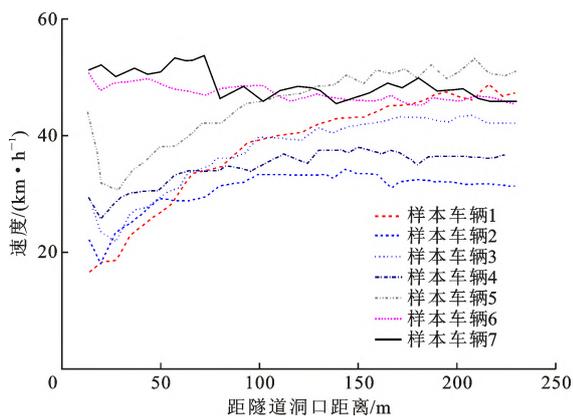


图12 朱雀隧道-朱雀停车区车辆运行速度变化

Fig.12 Zhuque Tunnel-Zhuque Parking Area vehicle speed changes

域路段行驶时,隧道会对小净距路段车辆速度产生一定影响,使车辆在驶出隧道洞口时出现速度骤降现象,对主线行驶速度、驶出主线速度进行单因子方差分析,发现两者在显著水平 $\alpha=0.05$ 时存在差异。另外,不同净距长度之间这种速度变化的程度和位置也均不同,且速度作为表征车辆在此区域运行的

一个因变量,会受到包括道路线形因素、环境因素和驾驶人自身因素的共同作用,因此需要继续对断面车速分布特征进行分析。

2.2 断面速度分布特征

在对调研阶段录制视频的数据提取与分析处理基础上,采用 SPSS 软件对运行速度总体特征进行描述性统计分析,隧道出口与互通出口小净距路段的统计描述结果如表 5 所示,其中部分小净距路段车辆速度频率分布直方图如图 13~图 14 所示。

由图 10~图 14 可知,小净距路段大部分小客车运行速度处于 $60\sim 80\text{ km/h}$,大车运行速度处于 $50\sim 70\text{ km/h}$,也存在相当部分车辆以此速度范围之外的极大值和极小值行驶。结合表 6 检验结果可知,Kolmogorov-Smirnov Z (基于累积分布函数,通常用于确定 2 个观测数据的潜在概率分布是否存在显著的差异,或者观测数据的潜在概率分布是否与假设分布存在显著的差异)均小于 0.3,渐进显著性值均小于显著性水平 0.05,说明隧道-互通出口小净距路段的车辆运行速度分布并不符合正态分布。

3 运行速度模型建立

3.1 模型指标选取

利用实地调研数据结合驾驶仿真模拟数据对道路几何指标与速度之间的关系进行单因素分析,以便确定模型构建所需指标,图 15 列出了圆曲线半径对速度的影响,可见,从整体趋势来看车辆速度与半径存在明显关系,随着半径的增大,不同特征断面处的车辆速度也在增加,在半径增大到 $2\ 500\text{ m}$ 后变化幅度逐渐变缓。图 16 表征道路纵坡坡度与车速关系,可见,随着坡度增加,其与速度之间并未表现出明显的线性或非线性关系,出现这种现象的主要原因是选定路段的净距长度较短,纵坡坡度对速度影响不能得到“完整”体现,因此在后续建模中,对纵坡坡度影响暂不考虑。

考虑到隧道内外行车环境的差异可能会对车辆速度产生影响,采用速度离散性指标来表征这一因素^[27]。速度离散性越大说明车辆在该处趋近于平均速度的几率越小,也表示存在较大的随机性和不确定性。在本文中速度离散性指标主要用标准差 S_D 、速度变异系数 η 表示,其中速度变异系数 η 是指速度标准差与平均速度的比值,该值越大表明离散程度越高,具体计算如下

表 5 隧道出口-互通出口小净距路段运行速度统计描述量

Tab.5 Statistical descriptors of running speed of tunnel exit-interchange on short-distance sections at exits

车型	小净距路段	均值/ (km · h ⁻¹)	中位数/ (km · h ⁻¹)	标准差	方差	偏度	峰度	最大值/ (km · h ⁻¹)	最小值/ (km · h ⁻¹)	最大最小速度 差/(km · h ⁻¹)
小型车	木瓜园隧道-皇冠互通	83.09	81.36	4.952	24.520	0.991	-0.206	94.65	73.84	20.81
	飞仙关隧道-多功互通	76.47	78.36	6.199	38.431	-0.968	0.477	95.90	61.34	34.56
	朱雀隧道-朱雀停车区	68.91	69.21	5.809	33.749	-0.175	-1.637	78.34	59.35	18.99
大型车	木瓜园隧道-皇冠互通	52.30	50.91	9.903	98.070	-0.280	0.359	78.94	33.55	45.39
	飞仙关隧道-多功互通	62.01	61.89	6.219	38.673	-0.056	1.279	78.34	35.25	43.08
	朱雀隧道-朱雀停车区	41.92	44.12	7.325	53.663	-0.865	0.234	53.29	17.17	36.12

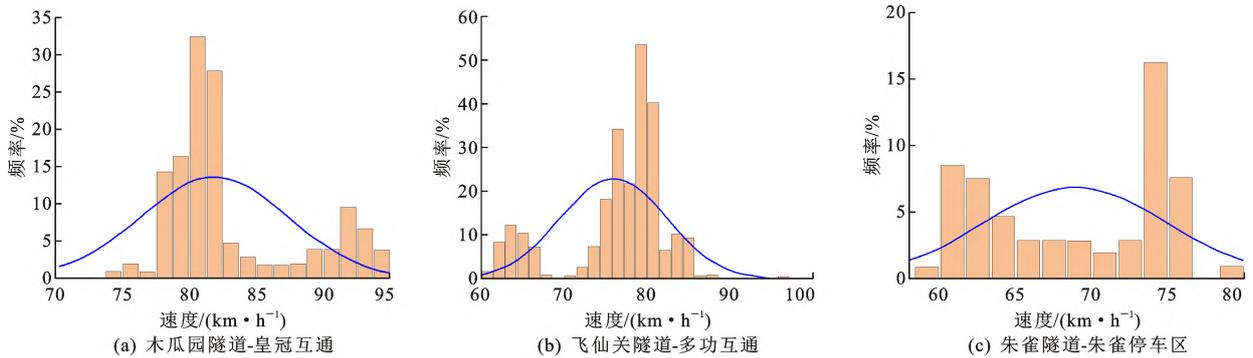


图 13 小型车运行速度数据频率分布直方图

Fig.13 Small vehicle running speed data frequency distribution histograms

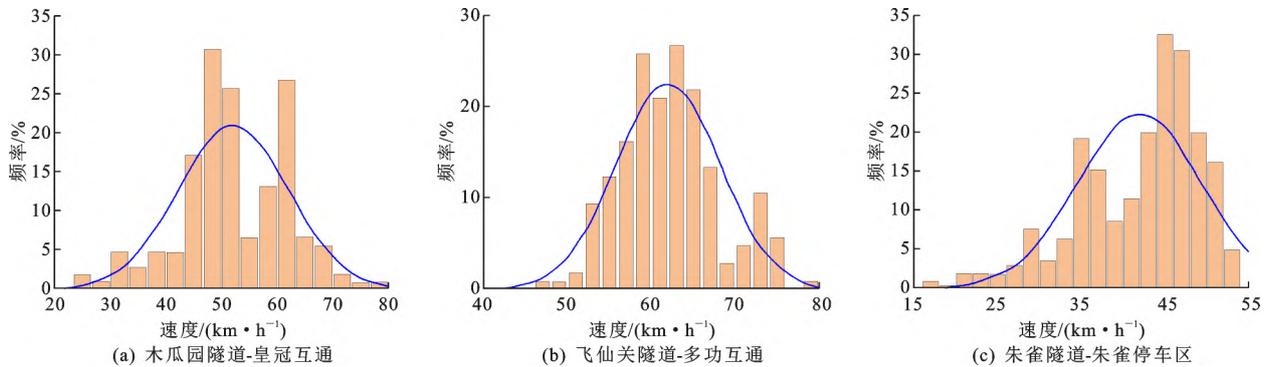


图 14 大型车运行速度数据频率分布直方图

Fig.14 Large vehicle running speed data frequency distribution histograms

$$S_D = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n v_i^2 - (\sum_{i=1}^n v_i)^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{S_D}{\bar{v}} \quad (4)$$

式中: n 为样本数量; v_i 为第 i 个样本车辆车速、 \bar{v} 为样本平均车速。

图 17 为距隧道洞口距离与速度离散系数关系。从图 17 可以看出,车辆-洞口距离与速度存在明显影响关系。在隧道洞口处开始截取特征断面,可以发现驶出隧道洞口不久后,车速离散程度会达到显著较高的水平,之后逐渐恢复到稳定状态。小型车的速度离散峰值在 0.15 附近,大型车

表 6 各隧道出口与互通出口小净距路段运行速度正态检验

Tab.6 Normal test of running speed of each tunnel exit and interchange exit on short distance sections

路段	小型车		大型车	
	Kolmogorov-Smirnov Z	渐近显著性 (双侧)	Kolmogorov-Smirnov Z	渐近显著性 (双侧)
木瓜园隧道-皇冠互通	0.260	0	0.074	0.028
飞仙关隧道-多功互通	0.187	0	0.082	0.004
朱雀隧道-朱雀停车区	0.214	0	0.135	0.000

速度离散峰值在 0.11 附近,且大型车的速度变化明

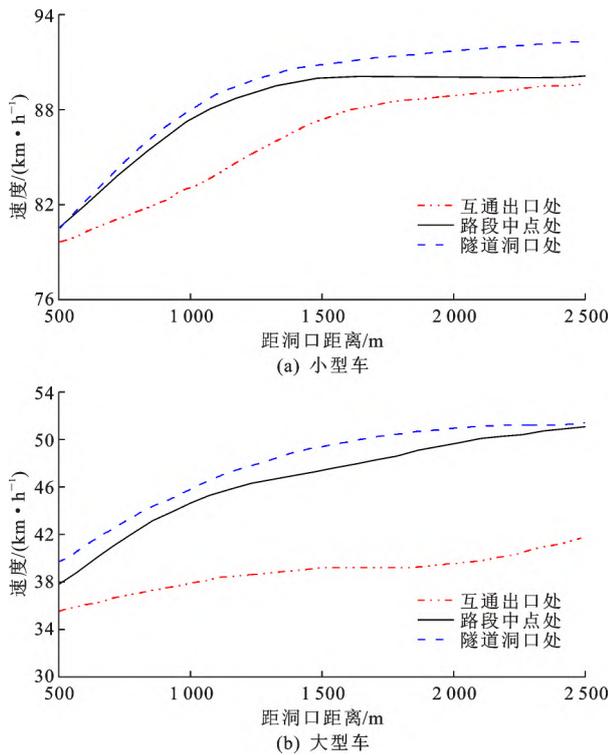


图 15 出口小净距路段主线半径与速度关系

Fig.15 Relationships between radius of main line and speed of short distance section at exits

显较为稳定。

综上所述,选取主线半径 R 、距隧道洞口距离 D 、净距长度 L 作为构建运行速度模型的指标。

3.2 模型建立过程

(1)在构建运行速度模型时考虑有不同自变量,为防止由于 1 个自变量变化同时引起因变量和其他自变量的改变,影响自变量对因变量的解释精度,需对变量间的相关程度进行检验,引入方差膨胀因子 V_{IF} 和条件索引指标值 K 对半径 R 、距隧道洞口距离 D 进行因子共线性诊断,并对存在高度相关关系 ($V_{IF} > 10, K > 100$) 变量予以剔除。以木瓜园隧道出口-皇冠互通出口小净距路段主线行驶车辆为例,对各变量间的因子共线性进行诊断,见表 7。可知,木瓜园隧道出口-皇冠互通出口小净距路段选取变量的条件索引指标 K 值最大为 7.656 未超过 100。此外,经进一步计算得到关于半径 R 变量、距隧道洞口距离 D 变量的 V_{IF} 值分别为 1.013 和 1.018,可认为引入自变量之间不存在高度相关关系,可以用于模型构建。

(2)确定运行速度模型构建所需变量后,需对各自变量与因变量间的关系进行探究,以便确定函数大致形式,为拟合分析提供方向,尽可能提高拟合精度。根据单因素分析结果,曲线半径与运行速度基

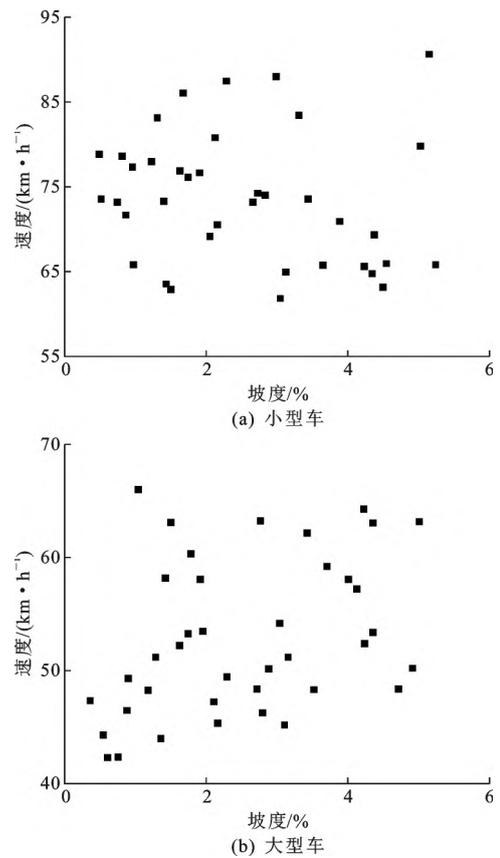


图 16 出口小净距路段纵坡坡度与速度关系

Fig.16 Relationships between longitudinal slope and speed of short distance section at exits

表 7 木瓜园隧道-皇冠互通自变量共线性诊断(小型车主线行驶)
Tab.7 Colinear diagnosis of independent variables of Muguayuan Tunnel-Huangguan Interchange (Mainline driving of small cars)

维数	特征值	条件指标 K	方差比例		
			常数	D	R
1	2.748	1.000	0.010	0.030	0.010
2	0.205	3.661	0.030	0.860	0.130
3	0.047	7.656	0.960	0.110	0.860

本呈对数函数关系。结合文献[28]方法在 SPSS 中拟定多种函数关系进行拟合试算,结果见表 8、图 18。

表 8 距离洞口距离与车辆速度模型汇总(小型车主线行驶)

Tab.8 Summary of vehicle speed model and distance from entrance (Main line driving of small cars)

模型	拟合优度	F 值	自由度 1	自由度 2	显著性
线性函数	0.007	2.714	1	53	0.681
二次函数	0.644	10.075	2	52	0.002
三次函数	0.447	24.823	3	51	0.048
增长函数	0.006	0.145	1	53	0.707
指数函数	0.603	8.688	1	53	0.000
Logistic 函数	0.455	0.145	1	53	0.000

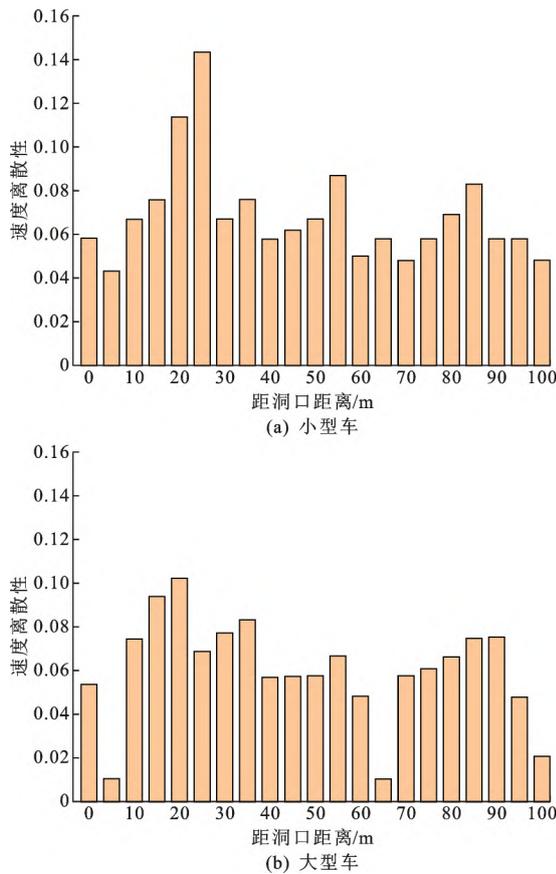


图 17 距隧道洞口距离与速度离散系数关系

Fig.17 Relationships between distance to tunnel entrance and velocity dispersion coefficient

表 9 不同拟合关系式拟合优度参数(小型车主线行驶)

Tab.9 Goodness of fit parameters of different fitting relations (Main line driving of small cars)

拟合关系式	K'	n	SSE 值	AIC 值	拟合优度
$V = -41.74 - 1.78D + 0.70D^2 - 0.08D^3 + 0.00389D^4 - 6.11 \times 10^{-5}D^5 + 2.687 \ln R - 214(\ln R)^2 + 16.40(\ln R)^3 - 7.003(\ln R)^4$	10	164	24.99	-284.811	0.7519
$V = -6.940 - 1.78D + 0.68D^2 - 0.08D^3 + 0.00389D^4 - 6.11 \times 10^{-5}D^5 - 3.48R + 0.019R^2$	8	164	24.82	-290.499	0.7519
$V = -3.019 + 4.44R - 4.43 \exp[-0.5((D - 16.88)/2.48)^2]$	5	164	41.31	-213.582	0.5846
$V = 1.46 - 0.51D + \exp(0.21D - 0.0039D^2) + 12.82 \ln R$	5	164	24.68	-293.666	0.7360
$V = (-874 - 0.21D + 0.01D^2 + 0.82R + 0.0006R^2) / (1 - 0.0024D + 8.89D^2 - 2.48D^3 - 0.0014R)$	9	164	28.60	-264.981	0.7125
$V = -9.377 + 0.845D - 0.1013D^2 + 0.0029D^3 - 10.479 \ln R + 7.555(\ln R)^2 - 0.566(\ln R)^3$	9	164	48.85	-177.184	0.6825
$V = (-1050 - 2.54D + 0.007D^2 + 0.818R + 0.0006R^2) / (1 - 0.0024D + 8.89D^2 + 5.75D^3 - 0.0014R)$	7	164	53.11	-167.981	0.7081

$$V_{AIC} = n \ln \left(\frac{V_{SSE}}{n} \right) + \frac{2n(K' + 1)}{n - K' - 2} \quad (5)$$

式中: V_{AIC} 、 V_{SSE} 分别为 AIC、SSE 的参数形式。

由表 9 可知,上述拟合表达式中,AIC 最小值为 -293.666,可将对应关系式作为最优回归解释,综合其拟合优度、均方差和 F 值,可认为各项系数均达到

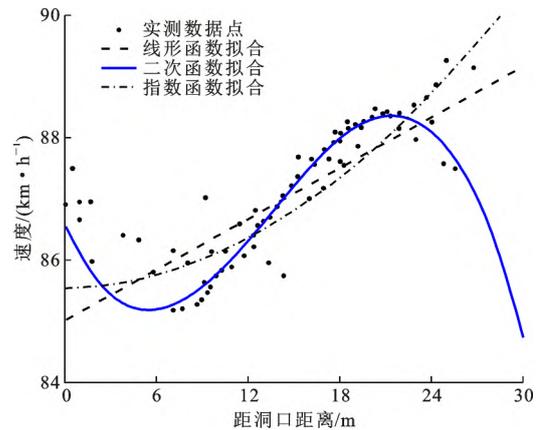


图 18 距隧道洞口距离与速度拟合关系

Fig.18 Fitting relationships between distance from tunnel entrance and velocity

可见,二次函数模型和指数函数模型的拟合优度与显著性水平均明显高于其他模型拟合优度,因此在后续回归分析过程中,优先考虑上述形式构建回归函数表达式。

(3)对木瓜园隧道出口-皇冠互通出口小车数据进行拟合分析,并针对拟合函数关系进行优度检验。本文引入赤池信息量准则(AIC)概念^[29]用以衡量模型复杂度和拟合数据优度,见表 9。该指标建立在熵值基础之上,用残差平方和 SSE、样本量 n 以及参数个数 K' 表征,即

显著水平,因此可以得出木瓜园隧道出口-皇冠互通出口小净距路段小客车运行速度 V 模型如下

$$V = 1.46 - 0.51D + \exp(0.21D - 0.0039D^2) + 12.82 \ln R \quad (6)$$

其他各处路段模型构建过程与上述保持一致,结果见表 10。

表 10 出口小净距路段运行速度模型

Tab.10 Running speed models on short distance sections at exits

路段名称		运行速度模型	判定系数
小型车主线行驶	木瓜园隧道出口-皇冠互通出口	$V=1.46-0.51D+\exp(0.21D-0.0039D^2)+12.82\ln R$	0.736 0
	朱雀隧道出口-朱雀停车区出口	$V=4.72-1.08D+\exp(0.50D-0.0234D^2)+11.40\ln R$	0.807 2
	飞仙关隧道出口-多功互通出口	$V=-46.69+0.0048D+\exp(0.34D-0.02D^2)+16.58\ln R$	0.738 7
小型车驶出主线	木瓜园隧道出口-皇冠互通出口	$V=2.15-0.46D+\exp(0.19D-0.0036D^2)+11.97\ln R$	0.901 5
	朱雀隧道出口-朱雀停车区出口	$V=-0.02-0.97D+\exp(0.46D-0.0205D^2)+11.49\ln R$	0.840 3
	飞仙关隧道出口-多功互通出口	$V=154.78+0.0048D+\exp(0.33D-0.0187D^2)-10.66\ln R$	0.619 5
大型车主线行驶	木瓜园隧道出口-皇冠互通出口	$V=0.857-1.0589R+0.0016R^2-12.392/[1+((D-3.419)/-7.668)^2]$	0.914 3
	朱雀隧道出口-朱雀停车区出口	$V=-12.72+44.88R-0.032R^2-4.342/[1+((D-7.691)/-4.791)^2]$	0.913 4
	飞仙关隧道出口-多功互通出口	$V=-89.89+1.804R-0.001R^2+14.96/[1+((D-229.658)/-148.29)^2]$	0.928 4
大型车驶出主线	木瓜园隧道出口-皇冠互通出口	$V=-3.616-0.993R-0.001R^2-12.324/[1+((D-3.423)/7.891)^2]$	0.906 7
	朱雀隧道出口-朱雀停车区出口	$V=-0.094+0.318R-0.0002R^2-4.174/[1+((D-7.443)/4.692)^2]$	0.850 6
	飞仙关隧道出口-多功互通出口	$V=28.142-444.494R+0.247R^2-12.353/[1+((D-13.221)/-105.340)^2]$	0.878 3

3.3 模型参数修正

从已构建的运行速度模型来看,净距长度对各模型具有明显影响,但这种影响具体到每处模型中每个参数的敏感程度也存在差异,因此需要在引入净距长度变量前,分析其对模型各参数的影响,对于随净距长度变化明显的参数进一步求解其关系,对于变化不明显的参数则给予定值。本文使用 SPSS 中变量相关系数显著性来表征模型参数对于净距长度变化的敏感程度^[30],具体结果如表 11 所示。

表 11 净距长度与车辆模型参数相关系数

Tab.11 Correlation coefficients between net distance length and model parameters

类型	主线行驶		驶出主线	
	参数	显著性	参数	显著性
小型车	p_{D1}	0.019	p_{D1}^{zd}	0.027
	p_{D2}	0.035	p_{D2}^{zd}	0.04
	p_{D3}	0.945	p_{D3}^{zd}	0.071
	p_{D4}	0.788	p_{D4}^{zd}	0.904
	p_R	0.154	p_R^{zd}	0.101
大型车	P_{D1}	0.062	P_{D1}^{zd}	0.143
	P_{D2}	0.035	P_{D2}^{zd}	0.069
	P_{D3}	0.008	P_{D3}^{zd}	0.031
	P_{R1}	0.788	P_{R1}^{zd}	0.017
	P_{R2}	0.043	P_{R2}^{zd}	0.025
	P_{R3}	0.959	P_{R3}^{zd}	0.887

注: $p_{D1} \sim p_{D4}$ 、 p_R 分别为小型车在主线行驶时模型与 D 、 R 相关的参数; $p_{D1}^{zd} \sim p_{D4}^{zd}$ 、 p_R^{zd} 分别为小型车驶出主线时模型与 D 、 R 相关的参数; $P_{D1} \sim P_{D3}$ 、 $P_{R1} \sim P_{R3}$ 分别为大型车在主线行驶时模型与 D 、 R 相关的参数; $P_{D1}^{zd} \sim P_{D3}^{zd}$ 、 $P_{R1}^{zd} \sim P_{R3}^{zd}$ 分别为大型车驶出主线时模型与 D 、 R 相关的参数。

由表 11 可以看出,小型车运行速度模型中参数

p_{D1} 、 p_{D2} 、 p_{D1}^{zd} 、 p_{D2}^{zd} ,大型车运行速度模型中参数 P_{D2} 、 P_{D3} 、 P_{R2} 、 P_{D3}^{zd} 、 P_{R1}^{zd} 、 P_{R2}^{zd} 随净距长度变化的显著性小于 0.05,表明其与净距长度显著相关,有必要对其关系详细研究;而其余参数与净距长度间均未表现出明显相关关系,且本身数值相差不大,在本文做平均处理后赋定值。

将 3 处出口小净距路段小型车运行速度模型总结归纳为 $v = \sum_{j=1}^2 p_{Dj} D^{j-1} + \exp(\sum_{j=3}^4 p_{Dj} D^{j-2}) + p_R \ln R$,求解参数 p_{D1} 、 p_{D2} 随净距长度 $10 \leq L \leq 500$ 变化函数关系如下

$$\begin{cases} f_{p_{D1}} = 17.28 - 3.44\sqrt{L} - \frac{166.80}{L^2} \\ f_{p_{D2}} = 0.036 - \frac{10.93}{L} - 518.11e^{-L} \end{cases} \quad (7)$$

小净距路段大型车运行速度模型可总结归纳为 $v = \sum_{q=1}^3 P_{Rq} R^{q-1} + P_{D1} / \left[1 + \left(\frac{D - P_{D2}}{P_{D3}} \right)^2 \right]$,共含有 6 个参数,同样取不同净距长度 L 对模型中 P_{D2} 、 P_{R1} 、 P_{R2} 进行分析,各参数与净距长度之间函数关系如下

$$\begin{cases} f_{P_{D2}} = -78.93 + 15.88\ln L + \frac{379.33}{L} \\ f_{P_{R3}} = \exp\left(4.97 + \frac{135.11}{L-56.13}\right) \\ f_{P_{R2}} = 1.88 + \frac{2.58}{1+2.54L} \end{cases} \quad (8)$$

在考虑净距长度影响之后,出口小净距路段大型车的速度与净距长度 L 、曲线半径 R 、距隧道洞口距离 D 呈非线性关系,其运行速度模型系数如表 12 所示。

表 12 出口小净距路段运行速度模型系数

Tab.12 Coefficients of running speed model on short distance sections at exits

类型	参数	主线行驶模型	驶出主线模型
小型车	p_{D1}	$f_{pD1} = 17.28 - 3.44/L^{1/2} - 166.80/L^2$	$f_{pD1} = -9.995 + 0.48L + 52.03/L$
	p_{D2}	$f_{pD2} = 0.036 - 10.93/L - 518.11\exp(-L)$	$f_{pD2} = -10.349/L + 0.10L^{-0.176}$
	p_{D3}	0.350	0.330
	p_{D4}	-0.016	-0.014
	p_R	13.600	11.37
大型车	P_{D1}	-0.621	-9.623
	P_{D2}	$f_{PD2} = -78.93 + 15.88\ln L + 379.33/L$	8.029
	P_{D3}	$f_{PD3} = \exp(4.97 + 135.11/L - 56.13)$	$f_{PD3} = 22.14 - 0.37L - 137.65/L$
	P_{R1}	-33.918	$f_{PR1} = 15.39 + 0.16L - 7.43\ln L$
	P_{R2}	$f_{PR2} = 1.88 + 2.58/L + 2.54L$	$f_{PR2} = -0.96 - \exp(L/55.02) + 0.248L$
	P_{R3}	-0.014	0.082

4 运行速度模型验证

4.1 实际工程应用

选取雅康高速公路二郎山隧道出口-泸定互通出口小净距路段作为依托工程进行误差检验,其主线设计速度为 80 km/h,双向四车道,路基宽度 24.5 m,隧道出口处与主线出口处净距长度为 10 m,主线半径为 1 800 m,此外在现场视频录制时无人机飞行高度同样保持在 210 m 左右,各项技术指标与视频录制环境均和前述小净距路段保持一致,尽可能减小因客观环境带来的误差。

二郎山隧道出口处距离泸定互通出口处净距长度为 10 m,按照每 1 m 选择特征断面,共计 10 处,计算模型预测值与视频实测值之间误差,小客车、大货车运行速度绝对误差最大值、相对误差最大值、相对误差平均值如表 13 所示。可见,本文模型精度满足要求,使用该模型预测的结果与实际结果差异不

大,可以为高速公路出口小净距路段车辆运行速度预测提供一定参考。

4.2 模型验证

为评估隧道-互通出口小净距路段车辆运行速度模型应用于工程实践的准确性,除选用相对误差和相对误差平均值指标评价模型误差以外,还选择安评规范中运行速度预测模型对二郎山隧道出口小净距路段进行预测,并分别与实测数据、本文模型预测数据进行比较,见图 19、图 20。

可以看出,按照安评规范中运行速度模型对该路段的速度预测,小型车和大型车的速度分别为 90、75 km/h,与实测速度 78、54 km/h 存在一定偏差,无法表征车辆实际运行情况。

对将小型车实测速度变化曲线起点(74.5 km/h)、终点(77 km/h)、峰顶(78 km/h)、峰谷(73 km/h)与预测速度变化曲线起点(75.5 km/h)、终点(78.5km/h)、峰顶(78km/h)、峰谷(73.5km/h)对比可得,本文

表 13 误差计算值汇总

Tab.13 Summary of calculated error values

特征断面 编号	小型车			大型车		
	速度绝对误差最大值/ (km · h ⁻¹)	相对误差最大 值/%	相对误差平均 值/%	速度绝对误差最大值/ (km · h ⁻¹)	相对误差最大 值/%	相对误差平均 值/%
1	6.202	7.771	3.917	5.908	8.899	4.587
2	6.826	8.670	6.872	4.982	8.798	6.541
3	5.165	8.743	5.596	7.550	6.853	6.064
4	6.239	6.514	7.404	7.138	9.697	6.670
5	8.183	8.404	7.202	6.550	10.018	6.220
6	7.110	7.817	7.183	7.752	6.028	6.303
7	6.009	9.083	6.385	6.367	8.413	5.560
8	3.706	6.991	8.073	5.743	10.881	6.147
9	7.734	9.101	6.275	4.963	10.725	4.440
10	5.239	9.321	5.294	5.312	7.183	3.945

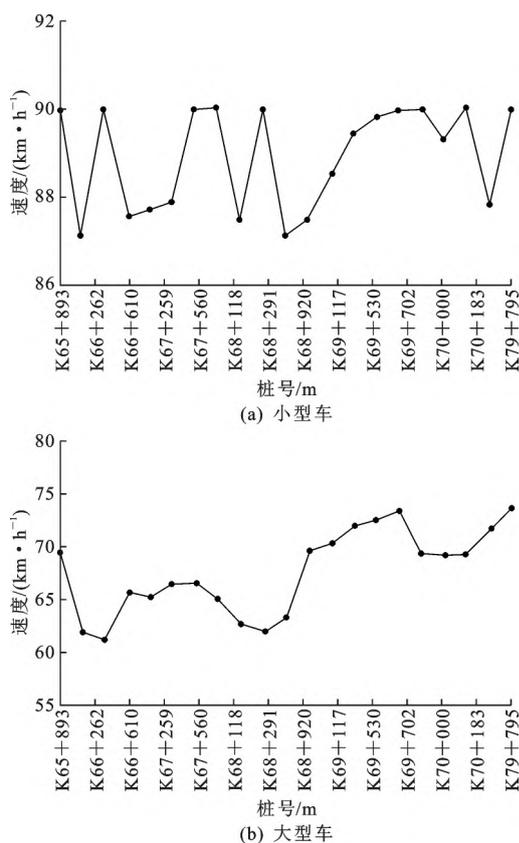


图 19 规范模型测试路段速度预测

Fig.19 Speeds prediction of test section by specification model

模型预测值与速度实测值之间差值较小,具有良好的拟合效果。大型车的预测效果经分析同样具有良好的拟合效果。相比于现行规范,本文模型更加贴近路段行车实际,基本能够准确表征车辆在此区域的速度变化规律。

5 结 语

(1)本文以道路几何线形因素和环境影响因素的多个影响指标为切入点,通过实地路段调研与驾驶模拟仿真分析可知,隧道洞口距离 D 、曲线半径 R 对速度 V 影响显著。以上述指标为自变量分别建立了小型车主线行驶、小型车驶出主线、大型车主线行驶、大型车驶出主线的运行速度预测模型,并加入净距长度指标优化修正,建立了小型车与大型车运行速度模型。

(2)以工程实例二郎山隧道出口-泸定互通出口小净距路段为依托,将构建的出口小净距路段车辆运行速度模型与安评规范速度模型一同用于实际路段车速预测,发现出口小净距路段速度预测模型能够更加真实地反映车辆运行情况,说明本文模型在预测车辆运行速度和表征速度变化规律方面具有参

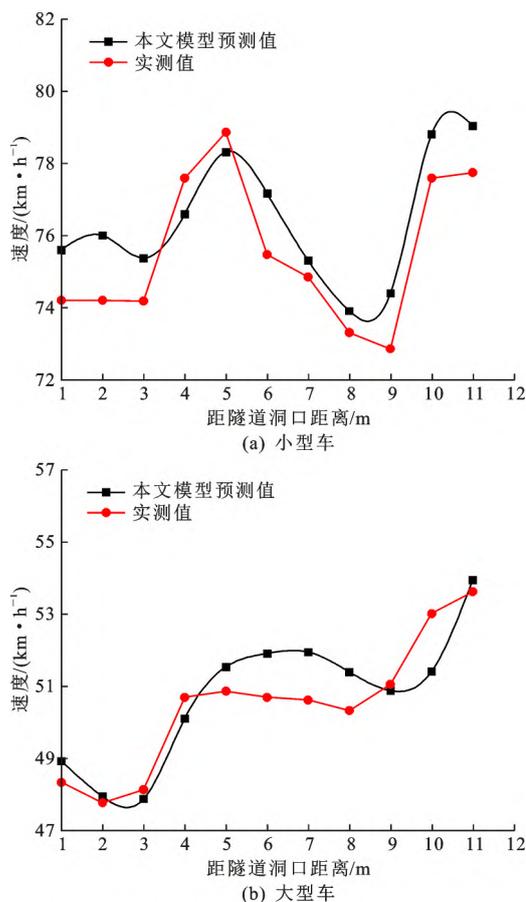


图 20 出口小净距路段运行速度模型预测效果

Fig.20 Prediction effects of running speed model on short distance sections at exits

考价值,可以在一定程度上应用于工程实践。

(3)本文研究对象只涉及双向四车道的隧道出口-互通出口小净距路段,未对互通入口-隧道入口小净距路段进行深入研究,后续应对入口小净距路段进行补充完善;本文用于模型构建的小净距路段工程案例有限,后续可对实际工程展开调研,统计各类工况下的实际速度变化,并结合速度变化规律对本文模型进一步优化和修正。

参考文献:

References:

- [1] 邓国忠,曹帆,吴勇,等.互通式立交与隧道出口小间距路段事故影响因素分析[J].中外公路,2019,39(4):283-287.
DENG Guo-zhong, CAO Fan, WU Yong, et al. Analysis on accidents influence factors of the small spacing section between intersection and tunnel exit [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39 (4):283-287.

- [2] 王方杰.隧道与互通立交小间距路段的交通安全设计[J].山东交通科技,2017(4):80-83.
WANG Fang-jie. Traffic safety design of small spacing section between tunnel and interchange[J]. Shandong Jiaotong Keji,2017(4):80-83.
- [3] 梅家林,杜志刚,王首硕.不同时段高速公路特长隧道入口视觉特性研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(1):50-53,59.
MEI Jia-lin, DU Zhi-gang, WANG Shou-shuo. Study on visual characteristics of the entrance of extra-long tunnel of expressway in different time periods[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2022, 46 (1) : 50-53,59.
- [4] 徐 进,曾 粤.高速条件下隧道出入口行驶速度特性[J].交通运输工程学报,2021,21(4):197-209.
XU Jin,ZENG Yue.Characteristics of driving speed at tunnel entrance and exit at high speed[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2021,21(4):197-209.
- [5] COLLINS K M,KRAMMES R A.Preliminary validation of a speed-profile model for design consistency evaluation[J].Transportation Research Record,1996(1523):11-21.
- [6] CAFISO S,CERNI G.New approach to defining continuous speed profile models for two-lane rural roads [J]. Transportation Research Record, 2012 (2309) : 157-167.
- [7] QU Q Z, YANG K G. Study on minimum clear distance between tunnel exit and expressway mainline toll station[C]//ZPO.IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.London:IOP Publishing, 2021:012129.
- [8] ANDERSON I B,KRAMMES R A.Speed reduction as a surrogate for accident experience at horizontal curves on rural two-lane highways[J].Transportation Research Record,2000(1701):86-94.
- [9] DONNELL E T, NI Y W, ADOLINI M, et al. Speed prediction models for trucks on two-lane rural highways [J]. Transportation Research Record, 2001 (1751):44-55.
- [10] FITZPATRICK K, ELEFTERIADOU L, HARWOOD D, et al. Speed prediction for two-lane rural highways[R]. Mclean; Federal Highway Administration, 2000.
- [11] 袁华智,阎 莹,袁志兵,等.考虑多因素修正的山区二级公路弯坡组合路段小型车运行速度模型[J].中国公路学报,2022,35(1):286-297.
YUAN Hua-zhi, YAN Ying, YUAN Zhi-bing, et al. Operating speed model of small car on combined horizontal and vertical curves of mountain secondary roads considering multi-factor correction [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35 (1) : 286-297.
- [12] 杜锦涛.基于公路线形三维空间几何特征的小客车运行速度预测方法研究[D].广州:华南理工大学,2020.
DU Jin-tao. Research on prediction method of passenger car operating speed based on highway alignment 3D geometric features[D].Guangzhou:South China University of Technology, 2020.
- [13] 田佩汐,符锌砂.基于 VAR 的道路线形三维特征对运行速度的影响分析[J].交通运输研究,2022,8(1):89-98.
TIAN Pei-xi, FU Xi-sha. Analysis of the influence of three-dimensional characteristics of road alignment on running speed based on VAR[J]. Traffic and Transportation Research, 2022, 8(1):89-98.
- [14] 杨少伟,许金良,杨宏志.考虑平、纵、横三方面关系的横向加速度变化率[J].中国公路学报,1999,12(4):12-16.
YANG Shao-wei, XU Jin-liang, YANG Hong-zhi. Lateral change of acceleration according to the relationship of the horizontal, vertical and lateral geometry of highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(4):12-16.
- [15] ALI G, MCLAUGHLIN S, AHMADIAN M. Quantifying the effect of roadway, driver, vehicle, and location characteristics on the frequency of longitudinal and lateral accelerations[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 161:106356.
- [16] JIN Y Y, GAO J S, WANG Z, et al. An operating speed model for the uniform-speed section of interchange ramps[C]//ASCE. Proceedings of COTA International Conference of Transportation Professionals 2019. Reston: American Society of Civil Engineers, 2019:3195-3206.
- [17] 马 聪,张生瑞,王亚群.高速公路隧道路段小客车运行速度预测模型[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(4):95-101.
MA Cong, ZHANG Sheng-ru, WANG Ya-qun. Prediction model of passenger train running speed on expressway tunnel section[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38 (4) :

- 95-101.
- [18] 王亚群.高速公路隧道小客车运行速度预测模型研究[D].西安:长安大学,2011.
WANG Ya-qun. Study of operating speed prediction model for passenger cars in tunnel of expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [19] 祝站东, 荣建, 周伟.高速公路隧道路段小客车运行速度模型研究[J].公路交通科技, 2010, 27(7): 123-127.
ZHU Zhan-dong, RONG Jian, ZHOU Wei. Research on operating speed prediction model for passenger cars in tunnel of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 123-127.
- [20] 方靖, 汪双杰, 祝站东, 等.高速公路隧道路段大型车运行速度模型[J].交通运输工程学报, 2010, 10(3): 90-94.
FANG Jing, WANG Shuang-jie, ZHU Zhan-dong, et al. Operating speed models for trucks at expressway tunnel sections[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 90-94.
- [21] 张晋伟.高速公路隧道及互通区运行车速模型研究[D].重庆:重庆交通大学, 2009.
ZHANG Jin-wei. The study about operating speed model of tunnels and interchange zone in express highway[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [22] 阎莹, 王虹婷, 万利, 等.基于因子分析与熵值法的不同隧道侧向宽度下驾驶负荷模型[J].中国公路学报, 2023, 36(2): 190-202.
YAN Ying, WANG Hong-ting, WAN Li, et al. Driving load model under different tunnel lateral widths based on factor analysis and entropy method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 36(2): 190-202.
- [23] 许金良, 叶亚丽, 苏英平, 等.双车道二级公路纵坡段车辆运行速度预测模型[J].中国公路学报, 2008, 21(6): 31-36.
XU Jin-liang, YE Ya-li, SU Ying-ping, et al. Operating speed prediction model on gradient section for two-lane secondary highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 31-36.
- [24] 潘兵宏, 倪旭, 唐力焦, 等. B型喇叭式立交环圈出口匝道运行速度过渡段长度研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 32-37.
PAN Bing-hong, NI Xu, TANG Li-jiao, et al. Research on the operating speed transition section length at ring off-ramp of B-type trumpet interchange[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(3): 32-37.
- [25] 马向南.高速公路互通立交单车道出入口小客车运行速度模型研究[D].西安:长安大学, 2017.
MA Xiang-nan. Research on prediction model of operating speed for passenger cars on expressway interchange single-lane entrance and exit[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [26] JTG B05—2015, 公路项目安全性评价规范[S].
JTG B05—2015, Highway project safety evaluation specification[S].
- [27] 郝亮.道路运行车辆速度离散对交通安全的影响研究[D].青岛:青岛理工大学, 2011.
HAO Liang. Study on impact of vehicle speed difference on road traffic safety[D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2011.
- [28] 张驰, 闫晓敏, 李小伟, 等.互通式立交单车道出口小客车运行速度模型[J].中国公路学报, 2017, 30(6): 279-286.
ZHANG Chi, YAN Xiao-min, LI Xiao-wei, et al. Operating speed model of passenger car at single-lane exit of interchange[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6): 279-286.
- [29] 张景肖, 刘史诗, 王伟华, 等.基于AIC准则的函数型数据主成分联合选择研究[J].数理统计与管理, 2022, 41(4): 610-622.
ZHANG Jing-xiao, LIU Shi-shi, WANG Wei-hua, et al. Jointly selecting the number of principal components for functional data based on Akaike information criterion[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2022, 41(4): 610-622.
- [30] 罗冬宇, 王江锋, 陈景雅, 等.三维点云环境下基于视野的运行速度预测[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 17-25.
LUO Dong-yu, WANG Jiang-feng, CHEN Jing-ya, et al. Velocity prediction based on dynamic field of view in 3D point cloud environment[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(7): 17-25.