

中国公路学会主办

ISSN 1001-7372
CN 61-1313/U
CODEN ZGXUFN

中国公路学报

CHINA JOURNAL
OF HIGHWAY AND TRANSPORT

第30卷 2017
第6期

Vol. 30 No. 6



ISSN 1001-7372



中国·西安

目次

· 综述 ·

中国汽车工程学术研究综述·2017 《中国公路学报》编辑部(1)

· 道路工程 ·

黄土湿陷对渗透系数影响的试验研究 李喜安,洪 勃,李林翠,王 力(198)

基于表面能理论的沥青与集料黏附性能评价 罗 蓉,郑松松,张德润,涂崇志,冯光乐(209)

土工格栅处治老路拼接的加筋效应分析 观祖保,杨 挺,吴巨贵,陈 鑫(215)

· 桥梁工程 ·

拉挤 GFRP 型材层合板螺栓连接试验 刘玉擎,都 鸷,辛灏辉,左一泽(223)

氯盐干湿循环下 TRC 加固钢筋混凝土柱轴心受压性能 尹世平,李 耀,李贺东,彭 驰,艾珊霞(230)

预应力高强软钢丝加聚合物砂浆抗弯加固性能试验与理论分析 张 阳,徐 朔,姚学昌(239)

弯扭耦合效应下混凝土桥墩的抗震性能 邓江东,刘爱荣,孙 卓,朱文正,彭国杏(249)

公路桥梁车辆荷载截尾分段概率模型及应用 赵少杰,任伟新(260)

· 交通工程 ·

左转短车道对信控交叉口最大通过量影响研究 马万经,刘 焯,刘好德,赵 靖(268)

互通式立交单车道出口小客车运行速度模型 张 驰,闫晓敏,李小伟,潘兵宏,王海君,马向南(279)

基于 Monte Carlo 模拟的公路网络震后连通性与通行时间分析
..... 侯本伟,李小军,韩 强,刘爱文,兰日清(287)

· 汽车工程 ·

考虑表观滑移效应的磁流变液减振器阻尼特性研究 廖昌荣,吴笃华,孙凌逸,谢 磊,简晓春(297)

基于语义细分法的某汽车传动系声品质评价 郭 栋,石晓辉,胡纬庆,李文礼,易 鹏(307)

文章编号:1001-7372(2017)06-0279-08

互通式立交单车道出口小客车运行速度模型

张 驰^{1,2}, 闫晓敏¹, 李小伟³, 潘兵宏¹, 王海君⁴, 马向南⁵

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 湖北省交通投资集团有限公司, 湖北 武汉 430074; 4. 广州市高速公路有限公司, 广东 广州 510028; 5. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:为确定高速公路互通式立交单车道出口小客车运行速度特征和运行速度值,确保车辆在衔接段运行速度协调可控,使车辆安全运行,在分析高速公路互通式立交单车道出口小客车运行速度实测数据的基础上,得出车辆在出口处的运行规律。采用链式开普勒雷达测速仪对出口小客车速度进行实时采集,选取8条匝道特征点(渐变段起点、分流点与小鼻点)处自由流状态下的小客车速度作为分析样本,采用K-S检验对所取样本进行正态分布检验,在满足检验要求并分析渐变段和减速段速度及加速度特性后,确定自变量参数,最后利用SPSS软件进行回归,分别建立了小客车在分流点及小鼻点处运行速度预测模型,并采用4条匝道数据对模型进行了验证。结果表明:分流点处车辆运行速度随渐变段起点速度增大而增大,随渐变段长度增大而减小;小鼻点处车辆运行速度随渐变段起点速度增大而增大,随渐变段长度、渐变段长与减速段长之比 r 的增大而减小;预测模型通过了回归等式及回归参数的显著性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%,建立的回归模型满足精度要求。

关键词:交通工程;运行速度预测模型;SPSS回归分析;匝道出口;渐变段;减速段

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Operating Speed Model of Passenger Car at Single-lane Exit of Interchange

ZHANG Chi^{1,2}, YAN Xiao-min¹, LI Xiao-wei³, PAN Bing-hong¹,
WANG Hai-jun⁴, MA Xiang-nan⁵

(1. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Area of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. Hubei Provincial Communications Investment Group Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei, China; 4. Guangzhou Expressway Ltd., Guangzhou 510028, Guangdong, China; 5. Central and Southern China Municipal Engineering Design Institute Limited, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: In order to determine the characteristics and values of the operating speed of passenger cars at the single-lane exit of the interchange and ensure the coordination of operating speed in the convergence section for vehicle safety, the measured data of the operating speed of passenger cars on the freeway interchange was analyzed, and the operation rules of the vehicle at the exit were obtained. The chain kepler radar velocimeter was used to collect vehicle speed in real-time. The

收稿日期:2016-09-04

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG05B01);交通运输部应用基础研究项目(2014319812170);中国博士后科学基金项目(2016M590915);广东省交通科技项目(2013-02-059);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面上项目(2017JM5013)

作者简介:张 驰(1981-),男,四川宜宾人,副教授,工学博士,E-mail:zhangchi@chd.edu.cn.

feature points (including the starting point of the tapered section, diversion point and the small nose point) of eight ramps were selected as the analysis sample of the vehicle speed in the free flow state. K-S test was used to test the normal distribution of samples. After meeting the requirements and analyzing, the speed and acceleration characteristics in the tapered section and deceleration section, the parameters of the independent variables were determined. Finally, SPSS software was used to make the regression, and the operating speed prediction model of passenger cars at diversion points and small nose points were established. Then the model was verified by data of four ramps. The results show that the operating speed at the diversion point increases with the increasing speed at the starting point in the tapered section, and decreases with the increasing length of the tapered section. The operating speed at the small nose point increases with the increase of operating speed at the starting point in the tapered section and decreases with the increase of length of the tapered section and the ratio of tapered section length and deceleration section length. In addition, predicted model is successfully tested by regression equation, regression parameters and the average relative error. The relative error of the predicted value and measured value is less than 10%, so the established regression model meets the accuracy requirements.

Key words: traffic engineering; operating speed prediction model; SPSS regression analysis; ramp exit; tapered section; decelerating section

0 引言

匝道出口是车辆变速驶出高速的必经之路,同时也是事故多发区,驾驶人在出口处需要根据道路状况与周围环境实时调整车速。相对于固定的设计速度而言,反映道路实际交通运行情况的车辆运行速度受人-车-路-周围环境的影响更大^[1-2],尤其在匝道出口处更为显著,因此有必要针对不同匝道出口开展实地观测和数据调查,根据匝道出口车辆运行速度特性,构建不同特征点处的车辆运行速度预测模型,实现衔接段处车辆运行速度的协调控制,保证行车连续安全运行。

近年来,国内外学者对车辆运行速度特征进行了大量的研究。张智勇等^[3]将匝道分为减速段、匀速段和加速段,通过正交试验选择超高及曲率变化率作为加、减速段影响因素,选择超高及圆曲线曲率作为匀速段影响因素,分别构建匝道各部分与影响因素之间的预测模型;郭唐仪等^[4]实测了出口匝道处自由流状态下的车辆特性,建立了高速减速车道运行速度模型 V_{85-0} 、匝道上半部运行速度预测模型 V_{85-1} 与匝道下半部运行速度预测模型 V_{85-2} ,采用 85 位单车速度差 $85\Delta V$ 作为出口匝道速度一致性指标,发现用 $85\Delta V$ 可以更好地评价速度一致性;柳本民等^[5]以灾害条件下杭州湾大桥为研究对象,借助驾驶模拟试验技术建立了出入口的自回归与时间序

列运行速度模型,并将研究成果应用到杭州湾大桥;许金良等^[6]通过实测双车道二级公路在不同纵断面要素(坡度、坡长)下的车辆速度数据,分别建立了不同车型在上、下坡的运行速度模型,发现车辆运行速度随坡度增大而减小,且变化幅度受坡长影响;方靖等^[7]通过跟车试验,研究不同长度隧道(短隧道、中隧道、长隧道及特长隧道)内驾驶人实际行车及车速变化规律,确定隧道路段运行速度特征点,并建立了长大隧道大车运行速度模型,发现短隧道对大车运行速度影响较小,隧道进口前 200 m 及进出口外 100 m 可作为长大隧道运行速度特征点。Hunter 等^[8]对希腊 20 处匝道出口的几何条件和运行速度进行了观测,运用 SPSS 进行回归分析,得到车辆驶入和驶出匝道的运行速度预测模型;Gibreel 等^[9]基于对二维运行速度模型的分析提出三维条件(平曲线包凹形竖曲线及平曲线包凸形竖曲线),建立三维运行速度模型用于评价乡村双车道设计一致性,结果表明三维运行速度模型较二维运行速度模型更精确;Semeida^[10]采集了埃及四车道公路 78 处平曲线段小车及卡车速度数据,分别采用回归模型和人工神经网络探讨运行速度 V_{85} 与平曲线、道路因素之间的关系,结果表明运用人工神经网络可以得到更好的预测模型;Bella^[11]利用驾驶模拟器对双车道农村公路直圆直路段运行速度进行研究,得出前直线段最后 200 m 处运行速度最大,圆曲线中间处运行

速度最小的结论。

目前国内外对车辆运行速度的研究多集中在高速公路主线及双车道公路上,而对高速公路匝道出口的研究相对较少,对运行速度的研究主要考虑匝道平曲线半径、曲率变化率、坡度、超高等,忽略了车辆在出口处的实际运行规律,还无法对立交出口处的车辆运行速度进行有效的预测与分析,而且现行《公路项目安全性评价规范》(JTG B05—2015)^[12](以下简称《安评规范》)也未对匝道出口段车辆运行速度做出准确的规定,基于出口处渐变段长度和减速段长度的车辆运行速度研究还有待提高,同时中国正处于立交规模建设期,应在设计阶段进行项目安全性审查与评价^[13-14],因此,有必要针对匝道出入口车辆运行速度进行深入研究。本文采用链式开普勒雷达测速仪实时记录车辆运行状态,并提取特征点(渐变段起点、分流点和小鼻点)车辆速度,利用 SPSS 回归分析软件分别得到分流点与小鼻点车辆运行速度预测模型,该模型是匝道设计一致性、出口逐级减速、交通安全设计与评估的基础,对解决现行匝道出口车辆运行速度预测模型缺失具有重要的参考意义。

1 数据采集与检验

1.1 采集条件

本文以西安、广州和佛山三市高速公路立交出口为研究对象,主要研究渐变段长度、渐变段与减速段长度之比 r 对车辆运行特征的影响。采集时主线设计速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;匝道基本路段设计速度为 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;渐变段长度大于等于 100 m ,减速段长度大于等于 90 m ;主线外侧车道宽度为 3.75 m ,路面(单侧)宽度为 $7.5 \sim 15 \text{ m}$;出口位于主线大半径,匝道出口流出角为 $1/25$ 。结合国内外研究,小客车在坡度为 $4\% \sim 5\%$ 时的行驶速度与在平坦公路上正常行驶时相差不大,在选择匝道出口时,要求坡度小于 5% ,平纵线形较好,各立交出口属性见表 1。匝道日交通量约为 $3\,000 \text{ veh}$,昼夜交通量为 $2\,000 \sim 4\,000 \text{ veh}$;研究对象为自由流状态下的小客车(轴数为 2,轴距 $2 \sim 4 \text{ m}$),采集条件为天气晴朗、温度适宜、可见度较高的白天。

1.2 控制条件

测试仪器采用链式开普勒雷达测速仪(以下简称链式雷达),每 50 ms 记录 1 次车辆运行状态,该仪器前部检测区域为以雷达为中心的扇形区域,为

表 1 匝道出口属性

Tab. 1 Attributes of Ramp Exit

出口编号	$V_T/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$Q_T/(\text{veh} \cdot \text{h}^{-1})$	d_1/m	d_2/m	$V_r/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$Q_r/(\text{veh} \cdot \text{h}^{-1})$
1	100	62	135	100	40	150
2	100	48	115	125	40	97
3	100	42	160	125	40	86
4	100	35	160	90	40	94
5	100	52	125	125	40	117
6	100	21	100	90	40	53
7	120	34	130	130	30	66
8	120	24	155	100	40	46

注: $V_T, Q_T, d_1, d_2, V_r, Q_r$ 分别为主线设计速度、主线最外侧小时交通量、渐变段长度、减速段长度、匝道设计速度、匝道小时交通量;出口编号 1, 4, 6, 7, 8 参考《公路路线设计规范》(JTG D20—2006)设计^[15]。

检测到出口处车辆并减少仪器对驾驶人的干扰,将仪器架设于硬路肩上距主线外侧车道外边缘 $1 \sim 2.5 \text{ m}$ 处,出口上游控制距离 L_0 为 $40 \sim 80 \text{ m}$,见图 1。图 1 中: Q_{RL} 为主线外侧行车道总交通量; Q_d 为驶向匝道交通量; $Q_{RL-gone}$ 为仍在主线外侧行车道行驶的交通量。保证链式雷达头水平且大致平行于主线行车方向。该链式雷达可检测 500 m 范围内车辆实时行驶状态,为减少无用数据,检测范围调制到小鼻点后 20 m 范围。仪器架设后,将仪器连接到电脑,并在配套软件 DR3_TMC Configurator 中输入基本信息,主要包括雷达中心距主线外侧车道外边缘的距离(设定为 1.5 m 左右)、雷达架设高度(选取 2 m)、主线车道宽度等。确保车辆在该软件中沿车道中心线行驶,并对采集过程进行全程录像。

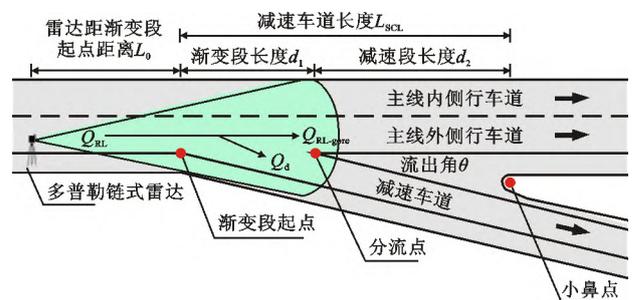


图 1 匝道单车道出口示意

Fig. 1 Single-lane Ramp Exit Schematic

1.3 速度数据正态性检验

在样本量选择时,要对样本量进行控制,以保证观测精度达到要求及反映出口路段的实际情况,根据统计学原理,特征点断面所需最小车辆数可由式(1)确定,即

$$n_{\min} = (\sigma K / E)^2 \quad (1)$$

式中： n_{\min} 为样本量最小值； σ 为标准差，本文取9； E 为车速观测允许误差，一般取 $E=2.5\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ； K 为置信水平系数，其值见表2。

表2 K值^[16]

Tab. 2 Values of K^[16]

置信水平/%	68.3	86.6	90.0	95.0	95.5	98.8	99.7
K	1.00	1.50	1.64	1.96	2.00	2.50	3.00

本文取置信度水平为90.0%， $K=1.64$ ，由式(1)计算可得样本量最小值为35辆。

对每个立交出口的车辆速度数据进行正态性检验，只有车辆速度数据符合正态性，才具有统计特性，利用SPSS回归分析软件对特征点进行K-S正态性检验，结果详见表3。

表3 样本正态性检验

Tab. 3 Sample Normality Test

出口编号	位置	样本量	Z值	渐进显著性水平(双侧)
1	渐变段起点	256	0.574	0.897
	分流点	114	0.567	0.905
	小鼻点	79	0.625	0.830
2	渐变段起点	81	0.739	0.646
	分流点	75	0.622	0.834
	小鼻点	60	0.554	0.918
3	渐变段起点	77	0.674	0.754
	分流点	63	0.494	0.968
	小鼻点	54	0.848	0.469
4	渐变段起点	56	0.298	1.000
	分流点	63	0.594	0.873
	小鼻点	57	0.365	0.547
5	渐变段起点	140	0.790	0.560
	分流点	187	0.921	0.364
	小鼻点	57	0.657	0.780
6	渐变段起点	53	0.904	0.387
	分流点	52	0.986	0.286
	小鼻点	51	0.670	0.760
7	渐变段起点	93	1.269	0.180
	分流点	77	0.918	0.369
	小鼻点	57	0.650	0.793
8	渐变段起点	62	0.539	0.934
	分流点	66	0.581	0.888
	小鼻点	60	0.620	0.836

由表3可得，检验Z值均大于0.05，且渐进显著性水平(双侧)均大于0.10，满足正态性分布要求。

2 基于运行特性出口分段研究

2.1 匝道出口处运行速度特性分析

为了更好地研究车辆在匝道出口的运行状况，

选取4座互通式立交单车道出口速度数据，从渐变段起点开始提取自由流状态下的小客车速度数据，每隔10m提取1次，并计算运行速度 V_{85} ，其运行速度变化趋势如图2所示。

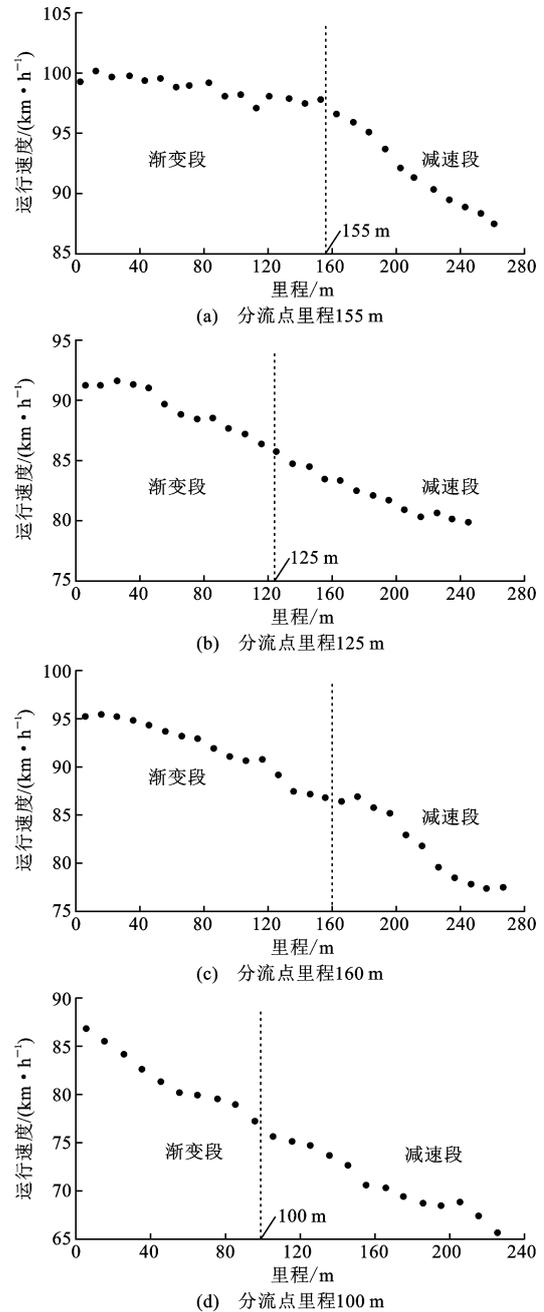


图2 匝道出口处运行速度散点图

Fig. 2 Operating Speed Scatterplots at Ramp Exist

从图2可以看出，出口匝道车辆运行速度存在相似规律，车辆从渐变段起点开始一直减速，其中图2(a)、(b)、(c)二次减速较图2(d)明显，对周围环境进一步分析发现，图2(d)处主线右侧植物较为茂盛，路侧安全净区宽度较小，导致车辆整体速度较低，减速过程主要通过发动机减速即可满足减速要求。

在渐变段,驾驶人主要完成换道行为,减速幅度较小,为 $5\sim 8\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,但整体速度较减速段高;减速段间驾驶人主要进行减速,减速幅度较大,为 $10\sim 15\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。单纯地使用速度变化量无法准确描述车辆运行特性,为此进行车辆减速过程中加速度特性分析。

2.2 匝道出口处加速度特性分析

车辆加速度是驾驶人控速行为最根本的表现形式,传统的加速度测量方法是在车辆上直接安装加速度计等设备,该方法一方面对驾驶人的驾驶行为产生了干扰;另一方面直接安装加速度计等设备的试验车数量、型号有限,试验数据不具有较强的代表性,得出的试验结果存在较大的偏差。鉴于此,本文突破传统的测量方法,使用 CARSIM 动力学仿真软件,建立与被观测车型一致的转向系统、悬架、轮胎、制动系统与道路等模型^[17-18]。通过将实时采集的驾驶人控速行为导入软件中,以期间接获取较为准确的车辆加速度特征,计算结果如图 3 所示。

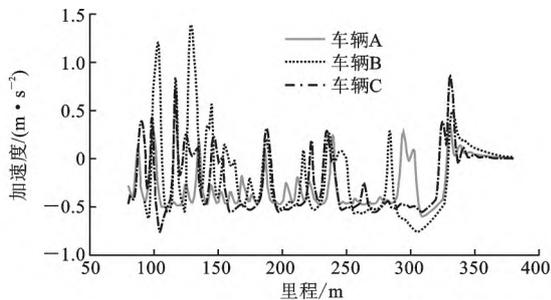


图 3 车辆纵向加速度

Fig. 3 Longitudinal Acceleration of Vehicles

由图 3 可知,车辆在刚开始进入渐变段(里程 $90\sim 150\text{ m}$)时,加速度波动较大,最大加速度可达 $1.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,这是由于部分车辆速度较低,采取了加速,但加速度值随里程增大逐渐减小,最小加速度绝对值为 $0.5\sim 0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;进入减速段(里程 $200\sim 330\text{ m}$)后,车辆加速度整体呈现负值,较渐变段加速度稳定,部分驾驶人采用制动器减速,最大加速度值达 $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;到小鼻点附近(里程 330 m),部分驾驶人采取了制动器点刹措施,加速度值出现正值,最后趋于 0,整体运行速度呈减小状态,最后进入匝道基本路段,完成出口行驶过程。

2.3 匝道出口分段组成

匝道出口是车辆变速、驶出高速公路的必经之路^[19],根据车辆在出口处速度与加速度特性分析可知,渐变段与减速段作用不同,渐变段主要实现车辆由高速公路主线换道至渐变段,减速段主要完成减

速,并为进入匝道做准备。渐变段相对于变速段速度变化量较小,加速度波动较大,减速过程中加速度(绝对值)较小,为此将出口分为渐变段和减速段。

(1)渐变段 L_v :从渐变段起点至分流点,车辆主要从高速公路主线直行车流分离出来,以减少对主线车流的干扰,减速过程主要利用发动机减速。

(2)减速段 L_d :从分流点到小鼻点间,部分驾驶人感觉速度还是较高时,采用制动器进行强制减速至小鼻点附近,之后进入匝道基本路段,完成车辆在出口处行驶过程。

3 小客车运行速度模型建立

以自由流状态下小客车为研究对象,利用链式雷达获取 12 条匝道出口处的小客车实时行驶数据,从渐变段起点开始,每隔 10 m 提取 1 组速度,最终对每个记录点速度信息统计汇总,经排序,以调查数据的第 85% 分位车速 V_{85} 作为车辆在该点的运行速度,其中 8 条匝道的数据用于构建模型,4 条匝道的数据用于模型验证。

(1)统计出口处车辆速度数据的平均值和标准偏差。以立交出口编号 2 为例,统计计算 68 个有效样本的渐变段起点速度和分流点速度的平均值和标准偏差,然后分别计算另外 7 个出口处的车速平均值和标准偏差,见表 4。

表 4 描述性统计

Tab. 4 Descriptive Statistics $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$

出口处车辆运行速度	平均值	标准偏差
渐变段起点速度	89.280	8.649
分流点速度	86.331	8.310

(2)计算特征点处车辆运行速度。由于链式雷达测得的速度单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,将原始数据乘以 3.6 转化成 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,结果如表 5 所示。

表 5 特征点处车辆运行速度统计

Tab. 5 Operating Speed Statistics at Feature Points

L_v/m	L_d/m	L_v/L_d	$V_0/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$V_v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$V_d/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$
160	125	1.28	80.604	74.628	81.360
135	100	1.35	94.518	85.600	80.784
115	125	0.92	99.342	90.136	87.192
130	130	1.00	99.432	92.400	82.368
125	125	1.00	96.480	85.528	77.436
100	90	1.11	84.960	79.560	75.852
160	90	1.78	86.904	70.560	65.610
155	100	1.55	95.238	86.500	77.400

(3)残差独立性检验。以渐变段起点速度和渐变段长度为自变量,以分流点速度为因变量,建立回归模型,判定系数 $R^2 = 0.836 > 0.5$,说明回归结果与原数据拟合程度很好,Durbin-Watson 检验值为 2.368(约为 2),说明回归相邻两点的残差是相互独立的,即完成了残差的独立性检验。

(4)对因变量进行共线性诊断分析,共线性诊断为检查自变量间是否存在近似的线性关系。本文采用“特征值”的方式,特征值主要用来刻画自变量的方差,在实际应用中,特征根太小将对回归系数产生很大的影响,因此本文主要以条件指数来度量共线性。分析见表 6。表 6 中显示条件索引值 $K_1 = 1.000, K_2 = 12.531, K_3 = 39.778$,这几个指数都在 $(0,100)$ 内,可知自变量之间无复共线性。

表 7 系数分析

Tab. 7 Analyses of Coefficients

自变量	非标准化系数		标准系数	t 检验值	显著性	B 的 90% 置信区间		相关性			共线性统计量	
	回归系数/截距	标准误差				下限	上限	零阶系数	偏判定系数	部分判定系数	容差	方差扩大因子
常量	11.906	22.998		0.518	0.627	-34.464	58.248					
渐变段长度	-0.075	0.065	-0.217	-1.145	0.304	-0.206	0.057	-0.467	-0.456	-0.207	0.909	1.100
起点速度	0.882	0.203	0.825	4.344	0.007	0.473	1.291	0.891	0.889	0.786	0.909	1.100

(6)残差诊断分析

以立交出口编号 2 为例,进行残差诊断分析,部分数据分析结果见表 8。由表 8 可知,最大残差不超过 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,相对误差不超过 10%,表明预测模型精度满足要求。

表 8 残差诊断(部分)

Tab. 8 Residual Diagnosis (Partial)

渐变段起点实测值/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	分流点实测值/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	分流点预测值/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	残差/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	标准化残差
87.84	81.72	80.755 88	0.964 12	-0.829 23
106.20	100.80	96.949 40	3.850 60	0.006 33
90.36	82.80	82.978 52	-0.178 52	-1.159 99
88.20	85.68	81.073 40	4.606 60	0.225 17
74.88	70.92	69.325 16	1.594 84	-0.646 65
94.68	91.44	86.788 76	4.651 24	0.238 09

(7)自变量参数之间线性关系检验

按照式(2)求得的速度预测值,转化为均值为 0、方差为 1 的标准正态分布预测值,各点分布无规律,但均匀分布在纵坐标为 0 的直线上下,说明分流点运行速度 V_i 与渐变段长度 L_i 、渐变段起点速度 V_0 之间的线性关系成立。

综上所述,分流点处运行速度预测模型为式(2),通过所有检验,即建立了自由流状态下小客车

表 6 共线性诊断

Tab. 6 Colinearity Diagnosis

维数	特征值	条件索引	方差比例		
			常数	渐变段长度	渐变段起点速度
1	2.979	1.000	0.00	0.00	0.00
2	0.019	12.531	0.01	0.70	0.07
3	0.002	39.778	0.99	0.30	0.93

(5)对回归系数进行分析,结果见表 7,由表 7 可知,分流点运行速度预测模型为

$$V_i = 11.906 - 0.075L_i + 0.882V_0 \quad R^2 = 0.836 \quad (2)$$

回归参数的置信水平都小于 0.1,置信度达到 90%。置信度为 90%时常量 β_0 、渐变段长度系数 β_1 与起点速度系数 β_2 的置信区间分别为 $\beta_0 \in (-34.436, 58.248), \beta_1 \in (-0.206, 0.057), \beta_2 \in (0.473, 1.291)$ 。

在分流点处运行速度预测模型。以分流点预测运行速度 V_i, r 为自变量,以实测小鼻点速度 V_d 为因变量,用同样方法可得小客车在小鼻点处运行速度 V_d 为

$$V_d = 18.208 - 0.068L_i + 0.802V_0 - 4.758r \quad R^2 = 0.790 \quad (3)$$

4 匝道出口运行速度预测模型的验证

建立模型之后,需对两分段进行模型验证,检验该模型是否有异常及精度能否满足要求,采用相对误差的平均值来衡量

$$\Delta = \frac{|y - v|}{v} \quad (4)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum |y_i - v_i| v_i}{n} \quad (5)$$

式中: Δ 为相对误差值; $\bar{\Delta}$ 为相对误差平均值; y 为预测值; v 为样本实测值; y_i 为第 i 个样本预测值; v_i 为第 i 个样本实测值; n 为样本量。

以立交出口 9 为例,按照车号从原始数据中提取车辆渐变段起点速度、分流点速度和小鼻点速度,由式(2)、(3)分别计算得到分流点和小鼻点速度预测值,并按式(4)计算相对误差,结果如表 9 所示。

表 9 相对误差计算(部分)

Tab. 9 Relative Error Calculations (Partial)

出口编号	起点速度/ (km · h ⁻¹)	分流点速度/ (km · h ⁻¹)	分流点速度预测值/ (km · h ⁻¹)	小鼻点速度/ (km · h ⁻¹)	小鼻点速度预测值/ (km · h ⁻¹)	分流点处 Δ/%	小鼻点处 Δ/%
1	73.08	65.88	67.737 56	65.52	64.620 8	2.820	1.372 0
2	81.36	78.84	75.040 52	75.96	71.261 4	4.819	6.185 7
3	83.52	75.60	76.945 64	75.96	72.993 7	1.780	10.797 9
4	84.96	85.68	78.215 72	77.04	74.148 6	8.712	3.753 2
5	85.68	79.92	78.850 76	73.08	74.726 0	1.338	4.834 5
6	94.68	91.44	86.788 76	87.12	81.944 0	5.087	7.470 6
7	109.08	101.52	99.489 56	96.12	93.492 8	2.000	2.733 3

完成四立交出口相对误差计算后,按式(5)对相对误差求平均值,汇总匝道出口处各分段预测模型预测结果与实测运行速度观测值,结果见表 10。

由表 10 可知,该预测模型四出口车辆在分流点处速度的相对误差平均值分别为 5.075%、

5.314%、4.365%和 6.452%;在小鼻点处速度相对误差平均值分别为 7.164%、7.772%、8.645%、9.724%,预测模型的相对误差平均值均小于 10%。总体来看,以上得到的小客车预测模型精度满足要求。

表 10 相对预测误差平均值

Tab. 10 Means of Relative Prediction Errors

出口编号	出口属性		样本量		分流点实测速度/(km · h ⁻¹)		小鼻点实测速度/(km · h ⁻¹)		分流点处 Δ/%	小鼻点处 Δ/%
	渐变段长度/m	减速段长度/m	分流点	小鼻点	极小值	极大值	极小值	极大值		
9	115	125	67	60	61.56	111.24	52.92	106.56	5.075	7.164
10	115	125	134	57	49.32	110.88	59.04	106.72	5.314	7.772
11	120	100	81	63	45.28	116.54	54.24	107.52	4.365	8.645
12	100	125	75	59	63.45	108.32	57.52	98.61	6.452	9.724

5 结 语

(1)本文通过对匝道出口处实测数据的分析研究,以渐变段起点速度、渐变段长度与渐变段长度与减速段长度之比 r 为自变量,建立了分流点运行速度预测模型与小鼻点运行速度模型,该模型相关系数较大,拟合数据好,通过 4 个立交出口进行模型验证,精度均小于 10%,满足要求。

(2)在数据采集时出口处 $100\text{ m} \leq L_i \leq 160\text{ m}$ 及 $90\text{ m} \leq L_d \leq 130\text{ m}$,模型验证时 $70\text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq V_0 \leq 110\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,相对平均误差较小,对于该范围内的出口模型精度较高,具有较高适用性。

(3)现行《安评规范》只介绍了主线的曲线路段、特殊纵坡路段、弯坡组合路段运行速度,缺少对立交出入口部分的研究。本文对高速公路互通式立交单车道出口小客车运行速度预测进行了详实的介绍,可进一步补充《安评规范》中对运行速度的相关规定,为高速公路安全评价研究提供理论支撑。

(4)本文研究成果可为互通式立交单车道出口逐级减速与渐变段长与减速段长之比 r 的合理取值提供了理论依据。

(5)由于该模型是基于自由流状态下的小客车实测数据建立的,对于自由流状态下的大车型,后续可采用与本文相似方法进行运行速度预测模型计算。在其他等级公路出口应用此模型时,需结合实际情况进行参数标定,同时本文仅对高速公路出口的运行速度进行了分析及预测研究,还应开展对高速公路入口及城市立交出入口运行速度分析和预测的研究工作。

参考文献:

References:

[1] 张春笋,吴进良. 基于运行速度的路线设计方法[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(4):552-554.
ZHANG Chun-sun, WU Jin-liang. Discussion on Highway Alignment Design Method Based on Operating Speed[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2008, 27(4): 552-554.

[2] 白轺韬. 基于线形条件的高速公路运行速度预测及控制研究[D]. 天津:天津大学,2013.
BAI Lu-tao. Research on Prediction and Control of Expressway Operating Speed Based on Alignment

- Condition[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [3] 张智勇, 赫晓云, 吴文斌, 等. 互通立交匝道运行速度预测模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(1): 93-99.
ZHANG Zhi-yong, HAO Xiao-yun, WU Wen-bin, et al. The Running Speed Prediction Model of Interchange Ramp[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(1): 93-99.
- [4] 郭唐仪, 邓卫, JOHN L U. 基于速度一致性的高速公路出口安全评价[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6): 76-81.
GUO Tang-yi, DENG Wei, JOHN L U. Safety Evaluation for Freeway Exit Ramp Based on Speed Consistency[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(6): 76-81.
- [5] 柳本民, 董帅, 赵庆鑫, 等. 杭州湾大桥进出口加减速车道运行速度模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(9): 1196-1199.
LIU Ben-min, DONG Shuai, ZHAO Qing-xin, et al. Operating Speed Model for Acceleration and Deceleration Lane of Hangzhou Bay Bridge Passageway[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(9): 1196-1199.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] HUNTER M, MACHEMEHL R, TSYGANOV A. Operational Evaluation of Freeway Ramp Design[J]. Transportation Research Record, 2001(1751): 90-100.
- [9] GIBREEL G M, EASA S M, EI-DIMEERY I A. Prediction of Operating Speed on Three-dimensional Highway Alignments[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(1): 21-30.
- [10] SEMEIDA A M. Application of Artificial Neural Networks for Operating Speed Prediction at Horizontal Curves; A Case Study in Egypt[J]. Journal of Modern Transportation, 2014, 22(1): 20-29.
- [11] BELLA F. Operating Speeds from Driving Simulator Tests for Road Safety Evaluation[J]. Journal of Transportation Safety and Security, 2014, 6(3): 220-234.
- [12] JTG B05—2015, 公路项目安全性评价规范[S].
JTG B05—2015, Guidelines for Safety Audit of Highway[S].
- [13] 陈攻宇. 基于非线性模型法的高速公路互通式立交安全性研究—以潮州至惠州高速公路为例[D]. 西安: 长安大学, 2014.
CHEN Gong-yu. Study on Assessment Method of Interchange Based on Non-linear Fuzzy Model—A Case Study on Chaozhou to Huizhou Expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [14] 施轶峰, 陈康俊, 张延军. 互通式立交匝道车速研究[J]. 公路, 2011(8): 124-128.
SHI Yi-feng, CHEN Kang-jun, ZHANG Yan-jun. Study on the Speed of Interchange Ramp[J]. Highway, 2011(8): 124-128.
- [15] JTG D20—1994, 公路路线设计规范[S].
JTG D20—1994, Design Specification for Highway Alignment[S].
- [16] 邓云潮. 公路长大下坡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, 2009, 29(4): 43-47.
DENG Yun-chao. Speed Prediction Model of Free-flowing Passenger Car on Long and Steep Downgrades[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 43-47.
- [17] 张驰, 孟良, 汪双杰, 等. 高速公路曲线路段小客车制动行为侧滑风险仿真分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 134-142.
ZHANG Chi, MENG Liang, WANG Shuang-jie, et al. Sideslip Risk Simulation Analysis of Passenger Car Braking Behavior on Expressway Curved Sections[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 134-142.
- [18] 孙璐, 游克思, 王易阳, 等. 道路因素对车辆侧翻的影响分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(3): 644-648.
SUN Lu, YOU Ke-si, WANG Yi-yang, et al. Influence Analysis of Road Conditions on Vehicle Rollover[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(3): 644-648.
- [19] 王海君, 杨少伟. 高速公路互通式立交单车道减速车道长度研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(3): 124-128.
WANG Hai-jun, YANG Shao-wei. Research of Length of Deceleration Lane at Expressway Interchange[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(3): 124-128.

检索工具	Ei Compendex Web (美国工程索引)	查证日期	2018年5月11日
收录作者	闫晓敏	署名单位	长安大学公路学院
查证单位	教育部科技查新工作站(G01)	地址	西安市长安大学图书馆信息部 029-82334377
检索人	尹莉	审核人	徐芳

1. Operating Speed Model of Passenger Car at Single-lane Exit of Interchange

Accession number: 20174104263124

Authors: Zhang, Chi (1, 2); Yan, Xiao-Min (1); Li, Xiao-Wei (3); Pan, Bing-Hong (1); Wang, Hai-Jun (4); Ma, Xiang-Nan (5)

Author affiliation: (1) Key Laboratory of Highway Engineering in Special Area of Ministry of Education, Chang' an University, Xi' an; Shaanxi; 710064, China; (2) CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi' an; Shaanxi; 710075, China; (3) Hubei Provincial Communications Investment Group Co., Ltd, Wuhan; Hubei; 430074, China; (4) Guangzhou Expressway Ltd., Guangzhou; Guangdong; 510028, China; (5) Central and Southern China Municipal Engineering Design Institute Limited, Wuhan; Hubei; 430010, China

Source title: Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport

Abbreviated source title: Zongguo Gonglu Xuebao

Volume: 30 Issue: 6 Issue date: June 1, 2017 Publication year: 2017

Pages: 279-286 Language: Chinese ISSN: 10017372 CODEN: ZGXUFN

Document type: Journal article (JA)

Publisher: Xi' an Highway University

Abstract: In order to determine the characteristics and values of the operating speed of passenger cars at the single-lane exit of the interchange and ensure the coordination of operating speed in the convergence section for vehicle safety, the measured data of the operating speed of passenger cars on the freeway interchange was analyzed, and the operation rules of the vehicle at the exit were obtained. The chain kepler radar velocimeter was used to collect vehicle speed in real-time. The feature points (including the starting point of the tapered section, diversion point and the small nose point) of eight ramps were selected as the analysis sample of the vehicle speed in the free flow state. K-S test was used to test the normal distribution of samples. After meeting the requirements and analyzing, the speed and acceleration characteristics in the tapered section and deceleration section, the parameters of the independent variables were determined. Finally, SPSS software was used to make the regression, and the operating speed prediction model of passenger cars at diversion points and small nose points were established. Then the model was verified by data of four ramps. The results show that the operating speed at the diversion point increases with the increasing speed at the starting point in the tapered section, and decreases with the increasing length of the tapered section. The operating speed at the small nose point increases with the increase of operating speed at the starting point in the tapered section and decreases with the increase of length of the tapered section and the ratio of tapered section length and deceleration section length. In addition, predicted model is successfully tested by regression equation, regression parameters and the average relative error. The relative error of the predicted value and measured value is less than 10%, so the established regression model meets the accuracy requirements. © 2017, Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. All right reserved.

Number of references: 19 Main heading: Speed

Controlled terms: Automobiles - Highway engineering - Interchanges - Normal distribution - Regression analysis - Transportation - Vehicles

Uncontrolled terms: Decelerating section - Operating speed - Ramp exit - Tapered section - Traffic Engineering

Classification code: 406.1 Highway Systems
Highway Systems

- 662.1 Automobiles

Automobiles

- 922.1 Probability Theory

Probability Theory

- 922.2 Mathematical Statistics

Mathematical Statistics

Numerical data indexing: Percentage 1.00e+01%

Compendex references: YES

Database: Compendex

Compilation and indexing terms, Copyright 2018 Elsevier Inc.

Data Provider: Engineering Village