

文章编号:1671-8879(2018)04-0071-09

# 互通立交单车道入口小客车运行速度模型

张 驰<sup>1,2</sup>, 宫权利<sup>1</sup>, 马向南<sup>3</sup>, 张 敏<sup>4</sup>, 齐 晨<sup>1</sup>

(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. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 4. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了确定高速公路互通式立交单车道入口小客车运行速度特征,计算小客车在高速公路互通式立交入口处的运行速度模型,确保车辆在衔接段运行速度之间的协调,使车辆安全运行,在分析高速公路互通立交单车道入口处小客车运行速度实测数据基础上,得出小客车在入口处运行规律。使用链式开普勒雷达测速仪对入口处小客车速度进行实时采集,选取 8 条匝道特征点(合流鼻、合流点以及加速车道终点)处自由流状态下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三角区段和加速换道段速度及加速度特性后,确定自变量参数。最后利用 SPSS 软件进行回归分析,分别建立了小客车在合流点及加速车道终点处运行速度预测模型,并用 4 条匝道对模型进行了验证。研究结果表明:合流点处车辆运行速度与合流鼻速度及三角区段长度呈正相关,与平曲线半径倒数呈负相关;加速车道终点处运行速度与合流鼻速度及加速换道段长度呈正相关,与平曲线半径倒数呈负相关;模型通过了回归等式及回归参数显著性和平均相对误差检验,模型预测值与实测值相对误差平均值均小于 10%,所建模型满足精度要求。研究结果对《公路项目安全性评价规范》(JTG B05—2015)中车辆运行速度相关规定进行补充说明,为高速公路安全性评价及设计提供理论支撑与参考。

**关键词:**交通工程;运行速度模型;SPSS 回归分析;匝道入口;三角区段;加速换道段

**中图分类号:**U491 **文献标志码:**A

## Operating speed model of passenger car at single-lane entrance of interchange

ZHANG Chi<sup>1,2</sup>, GONG Quan-li<sup>1</sup>, MA Xiang-nan<sup>3</sup>, ZHANG Min<sup>4</sup>, QI Chen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering 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. Central and Southern China Municipal Engineering Design Institute Limited, Wuhan 430010, Hubei, China; 4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The aim of this study was to determine the characteristics of a car's operating speed at a single-lane entrance of an interchange, and to calculate a running speed model of cars at the entrance of a freeway interchange, to ensure coordination of operating speed in the convergence

收稿日期:2017-12-27

基金项目: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);山西省交通运输厅科技项目(20416-1-11);

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(S2017-ZRJJ-MS-0603)

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。

section for improved vehicle safety. Based on the analysis of the measured data of passenger cars at the entrance of a single lane at an expressway interchange, the law of operation of a passenger car at the entrance was obtained. The speed of the passenger car at the entrance was collected in real time. The chain Kepler radar velocimeter was used to collect vehicle speed at entrance 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 for vehicle speed in the free-flow state. The K-S test was used to test the normal distribution of the samples. When the K-S test requirement was met, the speed and acceleration characteristics in the tapered section and deceleration section were analyzed, and the parameters of the independent variables were determined. Finally, SPSS software was used to perform the regression, and the operation speed prediction model of the passenger cars at the diversion point and the small nose points was developed. Then, the model was verified using data from four ramps. The results show that the running speed at the junction point is positively correlated with the velocity of the converging nose and the length of the triangle section, but negatively correlated with the reciprocal of the horizontal curve radius. The running speed at the end of the acceleration lane is positively correlated with the velocity of the converging nose and the length of the acceleration lane, but negatively correlated with the reciprocal of the horizontal curve radius. In addition, the predicted model was successfully tested using a regression equation, regression parameters, and average relative error checking. The relative error in the predicted value and measured value is less than 10%. The established regression model met the precision requirements. The results of the study are a good supplementary explanation of the relevant regulations of running speed of the standards in *Guidelines for Safety Audit of Highway* (JTG B05—2015). This study provides theoretical support and references for expressway safety evaluation and design. 9 tabs, 4 figs, 23 refs.

**Key words:** traffic engineering; operating speed model; SPSS regression analysis; ramp entrance; triangle segment; accelerate change lane segment

## 0 引言

入口是车辆加速驶入高速公路必经区域,同时也是事故多发区,驾驶人根据道路状况及周围环境调整车速以保证行车安全,致使车速一直发生变化。表征道路实际交通运行情况的运行速度与固定的设计速度相比,其受人-车-路-周围环境多重影响<sup>[1]</sup>,尤其在入口处更为显著,因此有必要针对不同入口开展实测和调查,根据运行速度特性构建车辆在不同处的运行速度模型,确保车辆在衔接段运行速度间协调,保证行车连续安全。

国内外学者针对运行速度开展了大量研究。中国的研究主要有:许金良等以双车道二级公路为研究对象,根据实地调查与监测,获得了在不同纵断面下的行车速度,构建了大型车和小型车在不同纵断面下的运行速度模型<sup>[2]</sup>。王栋等采用车载速度仪监测了西汉(西安—汉中)高速公路直线路段的车速,并建立

了较高精度的高速公路直线路段加速模型<sup>[3]</sup>。张智勇等根据匝道范围内行车速度的特性,将匝道分为减速段、匀速段和加速段,通过正交试验确定影响各段运行速度的因素,并构建两者的关系模型<sup>[4]</sup>。张弛等通过对互通式立交出口匝道车辆运行速度的实时采集,应用数理统计知识对 8 条特征匝道的出口运行速度进行分析计算,建立了出口匝道车辆运行速度预测模型,经过检验得出预测值与实际值相对误差在 10% 之内<sup>[5]</sup>。符铎等基于公路的平纵线形分析,将线形与运行速度相联系,得出基于平纵组合的高速公路运行速度预测模型,研究结果证明,通过公路的平纵线形分析可以对车辆的运行速度进行较好地预测<sup>[6]</sup>。邓云潮通过研究车辆在不同长大下坡过程中的运行状态,得出了长大下坡过程中的小客车速度预测模型,并将预测结果与实际运行结果进行对比,其模型可对车辆的运行速度进行有效预测<sup>[7]</sup>。贺玉龙等对美国与中国的车辆实时运行速度进行了对比分

析,将两国驾驶人限速遵守情况进行了统计分析,结果表明,当高速公路限速时,需要考虑车辆在不同线形条件下可保持的运行速度及设计速度等因素,针对大小车型的行驶特性与运行速度分布特性,应分别对其进行速度控制<sup>[8]</sup>。方靖等通过统计分析车辆在隧道内的运行速度变化,研究了驾驶人在隧道内的行驶特性,根据实车跟踪运行速度调查,建立了隧道内车辆的运行速度预测模型,并对所建模型进行了验证,该模型具有可行性与有效性<sup>[9]</sup>。还有部分学者将运行速度与线形、设计速度等要素进行对比分析,取得了大量研究成果。汪双杰等对青藏公路上的车辆实测运行速度进行分析,研究了不同平曲线半径、直线长度和纵坡坡度的车辆运行速度变化规律,将运行速度与海拔高度相联系,分析了海拔高度对车辆的影响,研究结论可为特殊地区的车辆运行速度预测及评价提供有效参考<sup>[10]</sup>。郑安文等对高速公路上车辆运行过程中设计速度与运行速度不一致的问题进行了研究,提出期望速度概念,并且将三者进行对比联系,分析了运行速度与设计速度不一致的原因,提出在道路设计过程中运行速度与设计速度保持一致的设计原则<sup>[11]</sup>。

国外学者主要从 3 个方面开展研究。①从影响车速的机理入手,如 Jessen 等研究指出,纵坡和交通量对运行速度有显著的影响,并揭示其影响机理,构建了新的运行速度模型<sup>[12]</sup>。②基于实测数据进行车速运行特性分析,提出速度预测模型,如 Ahammed 等分析了合流段行车速度和道路线形数据,指出合流速度受道路合流段几何线形影响较大<sup>[13]</sup>;Misaghi 等监测了多条道路平曲线处的行车速度,并通过数学模型揭示了平曲线半径影响运行速度的机理<sup>[14]</sup>;Boroujerdian 等开展农村双车道公路的车辆速度研究,指出在平直路段的运行速度受车辆起

始速度影响较大<sup>[15]</sup>;Bella 等应用 GPS 对中型客车运行速度进行研究,通过分析 36 个曲线特征点处的速度特征值,对运行速度进行评价,提出一种 85MSR 运行速度预测模型,结果表明,曲线的切线长和偏角是影响运行速度最为显著的因素<sup>[16]</sup>。③针对运行速度提出检验模型,从而对线形与速度进行分析评价,如 Eluru 等提出了一种新的运行速度分析检验模型,该模型综合考虑了公路的几何线性设计、公路沿线设施、交通特性及环境等因素,利用模型对蒙特利尔多条公路进行评价分析,结果表明,该模型能有效地对运行速度进行分析评价<sup>[17]</sup>。

目前国内外研究多集中在公路主线及双车道公路上,忽略了车辆在入口处的实际运行规律。互通式立交入口处行车环境复杂,车辆安全隐患较大,而现阶段对入口处运行速度的定义较为模糊,也缺少准确度高的入口段运行速度预测模型。因此,本文结合入口处三角区段长度和加速换道段长度,通过分析入口段特征点(合流鼻、合流点和加速车道终点)处速度,构建精度较高的运行速度模型,该研究对辅助入口处设计及评估具有重要参考意义。

## 1 数据采集与检验

### 1.1 采集条件

本文选取多个高速公路立交入口为研究对象,调查地点位于陕西和广东,匝道入口属性详见表 1;根据《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)可知,加速车道上坡段最大纵坡坡度为 3%;相关研究表明,当道路纵坡坡度小于 3%及超高较小时,可忽略纵坡坡度和超高对行驶速度的影响<sup>[18]</sup>。本文选取自由流状态下小客车(轴数为 2,轴距 2~4 m)为研究对象,在气候良好的白天采集数据。

表 1 匝道入口属性  
Tab. 1 Attributes of ramp entrance

编号	主线属性			匝道属性			
	设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	外侧交通量/ (veh·h <sup>-1</sup> )	平曲线半径 <i>r</i> / km	渐变段长/m	加速车道长/m	设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	交通量/ (veh·h <sup>-1</sup> )
1	120	65	8.200	80	230	30	135
2	120	78	6.500	80	290	30	46
3	120	85	7.800	80	230	40	84
4	120	67	6.300	80	235	30	76
5	120	35	3.200	90	230	30	37
6	100	67	9.999	90	200	30	25
7	100	56	9.100	90	200	40	89
8	100	49	4.600	90	205	40	92

注:平曲线半径 9.999 表示高速公路互通立交主线为直线。

1.2 控制条件

链式雷达可以检测记录 500 m 范围内车辆运行状况,记录间隔为 50 ms。为了保证链式雷达扇形检测区域对车辆的全程覆盖,确保检测数据的有效性,并降低其对车辆行驶干扰,实地测量时将仪器架设于硬路肩上距主线外侧车道外边缘 1~2.5 m

位置;上游控制距离  $L_0$  为 40~80 m,检测范围可调至渐变段终点后 20 m,并保证链式雷达头处于水平,如图 1 所示。架设仪器后,将基本信息输入到配套软件 DR3\_TMC configurator 中,本文雷达中心距主线外侧车道外边缘距离为 1.5 m,雷达架设高度为 2 m。采集过程全程录像,图 2 为现场采集照片。

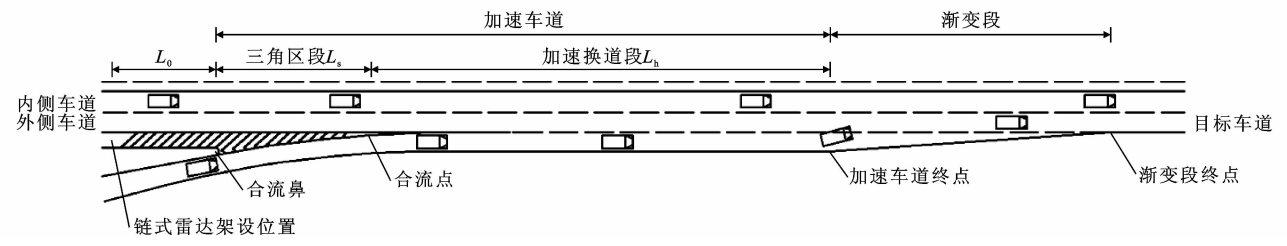


图 1 匝道单车道入口示意  
Fig. 1 Single-lane ramp entrance schematic



图 2 现场采集照片  
Fig. 2 Scene photo collection

1.3 速度数据正态性检验

为保证样本量满足经济、精度的要求,并可反映实际行车状况,按照统计学原理,可由下式确定特征点断面所需最小车辆数,即

$$n=(\sigma K/E)^2 \tag{1}$$

式中: $n$  为样本量最小值; $\sigma$  为标准差,本文取 9; $E$  为车速观测允许误差,本文取  $E=2.5\text{ km/h}$ ;  $K$  为置信水平系数,其值见表 2。

表 2 K 值<sup>[19]</sup>  
Tab. 2 Values of K

置信水平/%	99.70	98.80	95.50	95.00	90.00	86.60	68.30
K	3.00	2.50	2.00	1.96	1.64	1.50	1.00

由表 2 可知,置信水平为 95% 时,  $K=1.96$ , 根据式(1)计算得样本量最小值  $n=50$ 。

利用 SPSS 软件对出口处车速进行正态性检验,结果见表 3。可知,各样本的  $Z$  值均大于 0.05,且渐进显著性均大于 0.1,说明速度数据满足正态分布。

2 基于运行特性入口分段

2.1 运行速度特性分析

选取4个单车道入口处小客车行驶速度数据用

于反映入口处运行状况,以合流鼻为起点,每隔 10 m 为 1 个统计节点,根据实测的各节点速度数据计算运行速度,如图 3 所示。 $r_z$  为主线平曲线半径。

从入口处车辆连续运行速度变化规律可看出:小客车由匝道驶入主线的过程中,运行速度存在较

表 3 样本正态性检验  
Tab. 3 Sample normality test

编号	样本量	位置	Z 值	渐进显著性
1	56	合流鼻	0.652	0.521
		合流点	0.356	0.214
		加速车道终点	0.254	0.541
2	63	合流鼻	0.369	0.124
		合流点	0.568	0.257
		加速车道终点	0.425	0.895
3	108	合流鼻	0.125	0.281
		合流点	1.244	0.354
		加速车道终点	0.854	0.196
4	83	合流鼻	0.175	0.354
		合流点	0.269	0.685
		加速车道终点	0.548	0.512
5	67	合流鼻	0.563	0.254
		合流点	0.259	0.789
		加速车道终点	0.356	0.625
6	91	合流鼻	0.127	0.456
		合流点	0.721	0.324
		加速车道终点	0.531	0.514
7	72	合流鼻	0.857	0.624
		合流点	0.562	0.214
		加速车道终点	0.429	0.521
8	53	合流鼻	0.961	0.254
		合流点	0.451	0.125
		加速车道终点	0.325	0.365

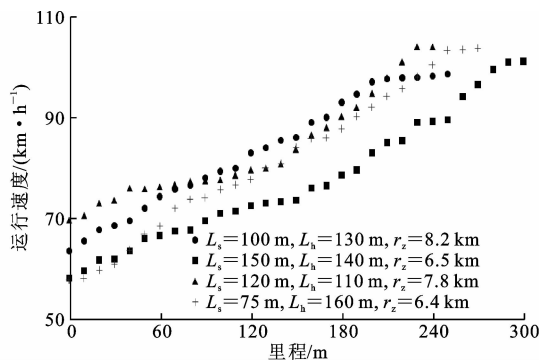


图3 运行速度散点图

Fig. 3 Operating speeds scatterplot figure

为相似的变化趋势,车辆以较低的匝道设计速度转向驶入主线,由于主线车辆行车速度远高于匝道行车速度,驾驶人从视觉感受出发对车辆进行逐渐加速行驶<sup>[20]</sup>。由于车辆从合流鼻到合流点间驾驶人主要进行立交入口周围车辆信息观测,运行速度较低,且变化较小,速度变化幅度为9~15 km/h;随后车辆驶入加速车道,在合流点至加速车道终点间驾驶人会以较高的速度尽快汇入主线车流,速度及加速幅度均较大,加速幅度为18~29 km/h;之后车辆驶入主线同主线车辆保持一致的行车速度,速度变化较小。在小客车由匝道驶入主线的过程中运行速度的变化体现车辆的实时行驶状态,可以直接显示出驾驶人对车辆的控制变化。为了研究车辆的瞬间响应,需进一步对车辆在汇入主线过程中的加速度进行特性分析。

## 2.2 加速度特性分析

本文使用 CarSim 动力学仿真软件,仿真小客车行驶状态模型<sup>[21-23]</sup>,替代传统的加速度测量法。通过定量分析4个入口的速度,以运行速度作为小客车行驶速度,获取较为准确的加速度特征,如图4所示。

从图4可知:在车辆汇入主线的过程中,4个入口处的纵向加速度变化趋势相似,总体加速度均为正值,说明在汇入主线的过程中驾驶人均未采取减速操作,降低行车速度。不同区段的行车特征不同:三角区段(里程0~150 m)行车速度的改变主要取决于驾驶人对入口处的环境观测和判断,该区段加速度小于加速换道段(里程75~290 m)的加速度,最大加速度只有0.08g~0.14g,  $g$  为重力加速度;为了满足合流需要,驾驶人会在加速换道段内持续加速,此过程中加速度较大,可达到0.25g~0.28g,且变幅也较大,当车辆达到加速车道终点附近时小客车完成加速换道过程。

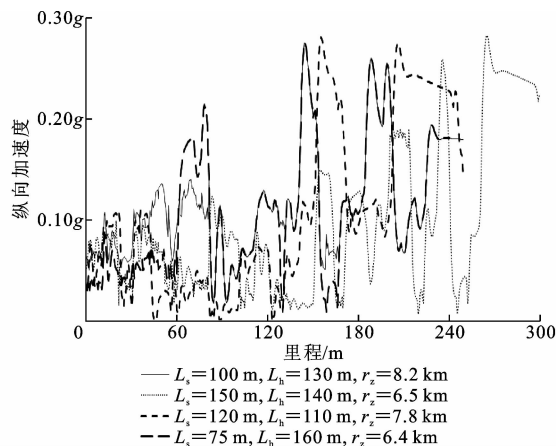


图4 纵向加速度

Fig. 4 Longitudinal acceleration

## 2.3 入口分段组成

通过对小客车在立交入口速度及加速度运行特性分析可知,车辆在三角区段内速度小,速度变幅也不大,但进入加速换道段后,为了给安全合流提供必要的行驶速度和加速度,驾驶人会采用更大的速度和加速度完成加速和换道行为。本文结合国内外研究成果,综合考虑小客车运行速度影响因素间的相关性,以及车辆运行速度散点图和加速度图,将研究对象划分为:三角区段  $L_s$ ,即驶出匝道基本路段进入三角区段,从合流鼻以较小速度及较小加速度加速至合流点;加速换道段  $L_h$ ,即从合流点至加速车道终点间。为了使小客车速度达到安全合流要求,驾驶人会在该区段采用较大的速度和加速度完成加速和换道行为,直至小客车换道后进入主线完成整个合流过程。

## 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个入口小客车实时行驶速度,提取合流鼻速度  $V_0$ 、合流点速度  $V_s$  及加速车道终点速度  $V_h$ 。以调查数据85%车速作为车辆在该点运行速度  $V_{85}$ ,其中以8个入口用于构建模型,4个入口用于模型验证。

### (1) 描述性统计

描述性统计可用于表征车辆速度集中性及离散程度,利用描述性统计计算各入口速度数据平均值和标准偏差,计算结果如表4所示。

### (2) 特征点运行速度计算

特征点处运行速度计算结果如表5所示。可以看出,车辆在合流鼻、合流点以及加速车道终点的运行速度依次增大,且合流点至加速车道终点段的速

度增加量大于合流鼻至合流点段。

表 4 描述性统计  
Tab. 4 Descriptive statistics

编号	样本量	$V_0/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$		$V_s/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$		$V_h/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	
		均值	标准偏差	均值	标准偏差	均值	标准偏差
1	56	57.588	5.830	74.346	8.142	92.529	9.222
2	63	53.214	8.126	69.248	9.954	96.561	7.125
3	108	63.254	8.257	74.251	7.129	98.519	9.124
4	83	52.184	10.254	69.124	5.624	97.125	7.124
5	67	50.214	9.012	59.124	7.568	85.153	8.167
6	91	57.568	9.651	68.158	8.185	94.216	9.161
7	72	48.257	5.693	58.147	8.624	85.652	9.942
8	53	53.217	4.218	71.208	9.214	91.204	6.548

表 5 特征点处运行速度统计  
Tab. 5 Operating speed statistics at feature points

$L_s/\text{m}$	$L_h/\text{m}$	$r^{-1}$	$V_0/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$V_s/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$V_h/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$
100	130	0.122	63.148	78.956	97.592
150	140	0.154	57.781	73.215	100.622
120	110	0.128	69.256	79.215	103.671
75	160	0.159	57.361	73.356	102.841
50	180	0.313	55.372	63.325	91.838
80	120	0.100	62.263	72.154	98.508
85	115	0.110	53.315	63.017	89.172
135	70	0.217	58.175	75.314	96.959

(3)残差独立性检验

以  $V_0$ 、 $L_s$ 、 $r^{-1}$  为自变量,以  $V_s$  为因变量,建立合流点速度回归模型,模型拟合优度  $R^2=0.779>0.5$ ,回归结果与原数据拟合程度较好,DW 检验值

表 7 回归系数分析  
Tab. 7 Analyses of coefficients analysis

自变量		非标准化系数		标准系数	$t$ 检验值	Sig 值	B 的 95%置信区间		相关性			线性统计量	
		B	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	VIF 值
三角区段系数分析 <sup>a</sup>	C	15.648	20.482		0.764	0.487	-41.219	72.516					
	$V_0$	0.839	0.321	0.687	2.614	0.059	-0.052	1.731	0.806	0.794	0.615	0.801	1.248
	$L_s$	0.069	0.046	0.374	1.491	0.210	-0.060	0.198	0.586	0.598	0.351	0.880	1.137
	$r^{-1}$	-1.365	22.819	-0.016	-0.060	0.955	-64.721	61.991	-0.392	-0.030	-0.014	0.815	1.228
三角区段系数分析 <sup>b</sup>	C	37.628	20.057		1.876	0.134	-18.058	93.314					
	$V_s$	0.749	0.232	0.921	3.226	0.032	0.105	1.394	0.811	0.850	0.807	0.769	1.301
	$L_h$	0.052	0.043	0.344	1.216	0.291	-0.067	0.171	-0.055	0.519	0.304	0.783	1.278
	$r^{-1}$	-5.245	20.052	-0.074	-0.262	0.807	-60.920	50.429	-0.307	-0.130	-0.065	0.791	1.264

注: B 为回归系数; Sig 值为显著性; VIF 值为方差扩大化因子; <sup>a</sup> 因变量为合流点速度; <sup>b</sup> 因变量为加速车道终点速度。

(6)残差诊断分析

残差诊断分析结果见表 8。由表 8 可见,最大残差不超过 10 km/h,相对误差不超过 10%,表明

为  $2.458 \approx 2$ ; 以  $V_s$ 、 $L_h$ 、 $r^{-1}$  为自变量,以  $V_h$  为因变量,建立回归模型时,  $R^2=0.750>0.5$ ,拟合程度较好,DW 检验值为  $1.673 \approx 2$ ;残差独立性检验表明回归相邻 2 点残差相互独立。

(4)因变量共线性诊断分析

共线性诊断分析结果见表 6。由表 6 可知,条件索引值均在 (0,100) 内,表明自变量间无复共线性。

表 6 共线性诊断分析  
Tab. 6 Collinearity diagnostics analysis

维数		特征值	条件索引值	方差比例			
				C	$V_0$	$L_s$	$r^{-1}$
三角区段	1	3.800	1.000	0.00	0.00	0.01	0.01
	2	0.155	4.953	0.00	0.00	0.16	0.49
	3	0.042	9.479	0.02	0.03	0.82	0.29
	4	0.002	39.619	0.98	0.97	0.01	0.21
加速换道段	1	3.850	1.000	0.00	0.00	0.00	0.01
	2	0.108	5.977	0.00	0.01	0.00	0.73
	3	0.040	9.845	0.01	0.02	0.81	0.16
	4	0.002	43.317	0.99	0.97	0.19	0.10

注:三角区段的因变量为合流点速度;加速换道段因变量为加速车道终点速度; C 为常数。

(5)回归系数分析。

回归系数分析见表 7,由表 7 可知:

合流点运行速度模型为

$$V_s=15.648+0.839V_0+0.069L_s-1.365/r \quad (2)$$

加速车道终点运行速度模型为

$$V_h=37.628+0.749V_s+0.052L_h-5.245/r \quad (3)$$

回归参数的置信水平都小于 0.05,置信度达到 95%。

模型精度满足要求。

(7)自变量参数间线形关系检验

按照合流点及加速车道终点运行速度模型求得

表 8 残差诊断  
Tab. 8 Residual diagnostics

编号	$V_0$	实测值		预测值		残差	
		$V_s$	$V_h$	$V_s$	$V_h$	$V_s$	$V_h$
1	67.26	74.36	100.37	78.81	102.78	4.45	2.42
	55.62	73.65	93.62	69.05	95.48	-4.60	1.85
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	69.13	76.38	98.62	80.38	103.95	4.00	5.33
2	62.36	75.64	105.95	78.11	102.63	2.47	-3.32
	62.38	76.33	100.26	78.13	102.64	1.80	2.38
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	54.68	68.68	93.64	71.67	97.80	2.98	4.16
3	75.62	86.33	105.64	87.20	108.00	0.87	2.35
	68.36	77.66	107.37	81.11	103.44	3.45	-3.93
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	78.33	85.36	106.55	89.47	109.69	4.11	3.15
4	65.62	78.36	105.95	75.67	101.79	-2.70	-4.17
	56.69	72.63	99.73	68.17	96.17	-4.46	-3.56
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	69.74	76.33	109.63	79.12	104.37	2.79	-5.26
5	65.72	72.63	96.33	73.81	100.62	1.19	4.30
	56.52	63.40	91.65	66.10	94.85	2.70	3.20
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	70.36	78.66	102.37	77.70	103.54	-0.95	1.17
6	75.36	81.39	105.37	84.26	106.45	2.87	1.08
	48.36	64.37	96.32	68.29	89.49	3.92	-6.82
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	56.33	63.68	93.35	61.61	94.50	-2.08	1.14
7	43.56	59.36	83.65	57.91	86.42	-1.45	2.77
	54.36	65.91	91.68	66.97	93.20	1.06	1.52
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	52.96	61.58	91.68	65.80	92.32	4.22	0.64
8	46.68	59.92	86.33	63.83	87.96	3.91	1.63
	65.68	75.95	100.67	79.78	99.90	3.83	-0.78
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	58.49	70.75	94.68	73.74	95.38	2.99	0.70

速度预测值,转化成均值为 0,方差为 1 的标准正态分布预测值,再绘制出标准化残差-预测值散点图。根据散点可知: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  $V_s$  与  $V_0$ 、 $L_s$ 、 $r^{-1}$ ,  $V_h$  与  $V_s$ 、 $L_h$ 、 $r^{-1}$  间成线形关系。

综上所述,合流点及加速车道终点运行速度模型通过所有检验,将  $V_s$  代入  $V_h$  整理可得加速车道终点运行速度模型为

$$V_h = 49.348 + 0.628V_0 + 0.052L_s + 0.052L_h - 6.267/r \quad R^2 = 0.750 \quad (4)$$

## 4 运行速度模型验证

为使所建模型更具说服力,采用相对误差平均值来衡量模型是否异常及精度能否满足要求。

相对误差值  $\Delta$

$$\Delta = \frac{|y_i - v_i|}{v_i} \times 100\% \quad (5)$$

相对误差平均值  $\bar{\Delta}$

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum |y_i - v_i| / v_i}{n'} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $y_i$  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。

从原始数据中提取合流鼻速度、合流点速度及加速车道终点处速度实测值,由运行速度模型[式(2)和式(4)]分别计算出特征点运行速度预测值,由式(5)和式(6)分别计算运行速度相对误差值及相对误差平均值,如表 9 所示。

由表 9 可知:合流点小客车运行速度的相对误差平均值分别为 5.138%、4.628%、6.562%、4.686%;加速车道终点小客车运行速度相对误差平均值分别为 8.126%、7.215%、8.615%、7.628%;其相对误差平均值均小于 10%,说明所建模型具有良好的预测精度,该模型能满足高速公路互通立交单车道入口运行速度的预测。

## 5 结 语

(1)以陕西省、广东省高速公路的 8 处互通式立交入口为研究区域,使用链式雷达采集了单车道入口匝道小客车运行速度及行驶轨迹数据,对采集数据进行了正态性检验。对所测其中 4 处入口处小客车运行速度及加速度特性进行了详细分析,并且确定了匝道入口分段的组成。

(2)以自由流状态下小客车为研究对象,利用链式雷达获取 12 处入口小客车实时行驶速度,提取合流鼻、合流点及加速车道终点速度;以调查数据 85%车速作为车辆在该点运行速度  $V_{85}$ ,建立了高速公路互通立交单车道入口小客车运行速度模型,数据采集时选择单车道入口处  $75\text{ m} \leq L_s \leq 150\text{ m}$  及  $110\text{ m} \leq L_h \leq 180\text{ m}$ ;模型验证时  $50\text{ km/h} \leq V_0 \leq 70\text{ km/h}$ ,相对误差较小,该范围内模型精度较高,具有较强适用性。

(3)研究结果可进一步对规范<sup>[19]</sup>中运行速度相关规定进行补充说明,为高速公路安全性评价及设计提供理论支撑与参考。但是本文只建立了自由流

表 9 相对误差计算  
Tab. 9 Relative error calculation

编号	属性	样本量	$V_o/$ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	实测值/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )		预测值/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )		绝对误差/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )		$\Delta/\%$		$\bar{\Delta}/\%$	
				$V_s$	$V_h$	$V_s$	$V_h$	$V_s$	$V_h$	$V_s$	$V_h$	$V_s$	$V_h$
1	$L_s=70 \text{ m},$ $L_h=130 \text{ m},$ $r=6.7 \text{ km}$	75	56.182	66.591	97.215	67.411	94.095	0.820	-3.120	1.231	3.209	5.138	8.126
			46.257	65.814	90.314	59.084	87.862	-6.730	-2.452	10.226	2.715		
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		
			54.326	62.357	94.205	65.854	92.929	3.497	-1.276	5.608	1.354		
2	$L_s=90 \text{ m},$ $L_h=110 \text{ m},$ $r=7.2 \text{ km}$	89	65.316	79.035	98.053	76.469	99.896	-2.566	1.843	3.247	1.880	4.628	7.215
			47.621	59.136	92.018	61.622	88.784	2.486	-3.234	4.205	3.515		
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		
			56.154	70.035	91.358	68.782	94.142	-1.253	2.784	1.790	3.048		
3	$L_s=120 \text{ m},$ $L_h=140 \text{ m},$ $r=5.8 \text{ km}$	51	69.135	82.564	106.215	81.697	105.204	-0.867	-1.011	1.050	0.952	6.562	8.615
			49.127	59.125	95.314	64.910	92.639	5.785	-2.675	9.785	2.806		
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		
			56.137	73.021	94.324	70.792	97.042	-2.229	2.718	3.053	2.881		
4	$L_s=80 \text{ m},$ $L_h=140 \text{ m},$ $r=9.999$	63	62.059	75.364	102.361	73.099	99.654	-2.265	-2.707	3.005	2.644	4.686	7.628
			53.019	68.192	95.091	65.514	93.977	-2.678	-1.114	3.927	1.171		
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		
			67.264	75.164	99.126	77.466	102.923	2.302	3.7970	3.063	3.831		

状态下小客车运行速度模型,对于其他车型后续可采用本文方法计算运行速度模型;其他等级公路入口应用此模型时,需结合实际情况重新进行参数标定。

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] 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.

[3] 王 栋,邓北川,仇建华,等. 山区高速公路直线段车速预测方法[J]. 交通科学与工程,2014,30(3):81-86.  
WANG Dong,DENG Bei-chuan,QIU Jian-hua, et al. The method of the straight section speed prediction on the mountainous freeway[J]. Journal of Transport

Science and Engineering,2014,30(3):81-86.

[4] 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, HE 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.

[5] 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 model of passenger car at single-lane exit of interchange[J]. China Journal of Highway and Transport,2017,30(6):279-286.

[6] 符铎砂,刘 震. 基于平纵组合线形的理论运行速度预测模型[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(3):24-27.  
FU Xin-sha, LIU Zhen. Prediction model of theoretical operating speed based on combination alignment of cross and vertical section [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3):24-27.

[7] 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.
- [8] 贺玉龙,汪双杰,孙小端,等. 中美公路运行速度与交通安全相关性对比研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增1): 73-78.
- HE Yu-long, WANG Shuang-jie, SUN Xiao-duan, et al. Operating speed and highway safety in China and the United States[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(S1): 73-78.
- [9] 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.
- [10] 汪双杰,方 靖,韩 艳. 青藏公路运行速度特性研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 13-18.
- WANG Shuang-jie, FANG Jing, HAN Yan. Research on operating speed characteristics of Qinghai-Tibet Highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 13-18.
- [11] 郑安文,牛倬民. 高等级公路运行速度与设计车速匹配研究[J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2003, 26(3): 273-275.
- ZHANG An-wen, NIU Zhao-min. Research on coordination between motorway operation speed and design speed[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2003, 26(3): 273-275.
- [12] JESSEN D, SCHURR K, MCCOY P, et al. Operating speed prediction on crest vertical curves of rural two-lane highways in Nebraska[J]. Transportation Research Record, 2001(1751): 67-75.
- [13] AHAMMED M A, HASSAN Y, SAYED T A. Modeling driver behavior and safety on freeway merging areas[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(9): 370-377.
- [14] MISAGHI P, HASSAN Y. Modeling operating speed and speed differential on two-lane rural roads[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 131(6): 408-418.
- [15] BOROUJERDIAN A M, SEYEDABRISHAMI E, AK-BARPOUR H. Analysis of geometric design impacts on vehicle operating speed on two-lane rural roads[J]. Procedia Engineering, 2016, 161: 1144-1151.
- [16] BELLA F, CALVI A, D'AMICO F. Predictive speed models for two-lane rural roads using GPS equipment[J]. International Journal of Mobile Network Design and Innovation, 2014, 5(4): 187-194.
- [17] ELURU N, CHAKOUR V, CHAMBERLAIN M, et al. Modeling vehicle operating speed on urban roads in Montreal: A panel mixed ordered probit fractional split model[J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 59: 125-134.
- [18] 周荣贵,孙家凤,吴万阳,等. 高速公路纵坡坡度与运行速度的关系[J]. 公路交通科技, 2003, 20(4): 34-37.
- ZHOU Rong-gui, SUN Jia-feng, WU Wan-yang, et al. Relationship between running speed and gradient of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(4): 34-37.
- [19] JTG B05—2015, 公路项目安全性评价规范[S].
- JTG B05—2015, Specifications for highway safety audit[S].
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 孙 璐,游克思. 基于多失效模式可靠度的曲线路段行车风险分析[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 36-42.
- SUN Lu, YOU Ke-si. Reliability-based risk analysis of vehicle moving on curved sections considering multiple failure modes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 36-42.