

高速公路互通立交主线影响区段 重型货车运行速度预测模型*

张 驰^{1▲} 蔡竹萱¹ 王茜茹² 白浩晨³ 聂渝涵⁴

- (1. 长安大学公路学院 西安 710064;
2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 西安 710075;
4. 长安大学运输工程学院 西安 710064)

摘 要:为明确互通立交主线路段重型货车个体运行速度变化特征,选取中国西部地区4条高速公路中13座典型互通立交为对象,基于高精度车载GNSS设备获取1 200余车次的连续轨迹数据,系统探究单辆重型货车在立交主线路段的行驶特性,并构建基于道路几何参数的运行速度预测模型。根据立交主线段的结构特征,将主线划分为出口影响区、中间过渡段与入口影响区。通过Spearman秩相关分析筛选出相关系数绝对值 >0.6 的关键几何参数作为候选变量,结合F检验与决定系数 $R^2>0.6$ 、 $p<0.05$ 的统计标准,筛选出最具解释力的预测变量。最终采用逐步回归法建立“减速后加速”与“二次减速”2种状态下的运行速度模型。结果表明:模型置信水平达95%;预测值与实际观测值一致性良好,最大残差绝对值为5.498 km/h;融合模型平均绝对误差为2.15 km/h,显著优于规范推荐的静态折减模型,误差稳定在 $\pm 3\%$ 以内,具有优良拟合与预测性能。研究通过揭示鼻端间距、渐变率、加速车道长度等关键几何参数对重型货车速度演化的影响机制,丰富了复杂节点下重型车辆行驶行为的理论认知,有助于完善基于运行速度协调性的设计验证体系;成果可应用于新建立交方案比选、既有立交安全风险识别,以及重型交通主导路段的精细化管理。

关键词:道路工程;GNSS数据;互通立交主线;重型货车;运行速度预测模型

中图分类号:U491

文献标识码:A

doi: 10. 3963/j. jssn. 1674-4861. 2026. 02. 005

A Predictive Model for the Operating Speeds of Heavy Goods Vehicles on the Main Carriageway Sections Affected by Motorway Interchanges

ZHANG Chi^{1▲} CAI Zhuxuan¹ WANG Xiru² BAI Haochen³ NIE Yuhan⁴

- (1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China;
3. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, China;
4. College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To clarify the individual speed variation characteristics of heavy trucks on mainline sections of interchange overpasses, 13 typical interchange overpasses from four expressways in western China were selected. Based on continuous trajectory data from over 1 200 trips captured by high-precision vehicle-mounted GNSS devices, this study systematically investigates the driving characteristics of individual heavy trucks on mainline sections of interchange overpasses and constructs a speed prediction model based on road geometric parameters. Based on the structural characteristics of the interchange mainline sections, the mainline was divided into the exit influence zone, inter-

收稿日期:2025-08-08

* 国家自然科学基金面上项目(72371036)、陕西省社会科学基金项目(2025R018)、四川省交通运输科技项目(2023-A-10)资助

▲ 第一作者(通信作者)简介:张 驰(1981—),博士,教授。研究方向:交通安全与道路数字化研究等。

E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

mediate transition zone, and entrance influence zone. Spearman's rank correlation analysis identified key geometric parameters with absolute correlation coefficients >0.6 as candidate variables. Combining F-tests with statistical criteria of $R^2 > 0.6$ and $p < 0.05$, the most explanatory predictive variables were selected. Stepwise regression ultimately established operational speed models for two states: "deceleration followed by acceleration" and "secondary deceleration." Results indicate: the model achieved a 95% confidence level; predicted values showed good consistency with actual observations, with a maximum residual absolute value of 5.498 km/h; the average absolute error of the integrated model was 2.15 km/h, outperforming the static reduction model recommended by current specifications, with errors consistently within $\pm 3\%$, demonstrating excellent fitting and predictive performance. By elucidating the influence mechanisms of key geometric parameters—such as nose-to-nose spacing, gradient rate, and acceleration lane length—on heavy truck speed evolution, this study enriches theoretical understanding of heavy vehicle behavior at complex intersections. It contributes to refining design verification systems based on operational speed coordination. The findings can be applied to evaluating new interchange designs, identifying safety risks in existing interchanges, and implementing refined management on heavy-traffic-dominated sections.

Keywords: road engineering; GNSS data; interchange mainline; heavy-duty trucks; operating speed prediction model

0 引言

根据《中国统计年鉴 2024》数据显示:2023 年中国共发生 25.5 万起道路交通事故,造成 6 万多人死亡。高速公路是 1 种适应交通量大、全封闭、完全控制出入的高等级公路,而互通立交是高速公路上的“阀门”,可调节与控制车辆的驶入、驶出,其设置位置与间距、出入口形式与布置直接影响互通立交主线的交通流特性^[1]。互通立交主线路段与匝道路段在几何设计、交通流特征,以及行车行为方面存在显著差异,研究主线路段的行车特征对于提升互通立交的整体通行效率和安全性具有重要意义。在立交区域各类车辆中,重型货车因其特殊的动力学特性和典型的外侧车道集聚现象,成为安全风险的主要载体^[2]。此外,互通立交路段运行速度控制不均衡,也是诱发追尾和侧向碰撞事故频发的重要原因。运行速度作为衡量设计安全性的核心指标,其预测的准确性直接影响互通立交的安全性能^[1]。JTG B05—2015《公路项目安全性评价规范》^[3]采用静态折减系数来估算立交段运行速度。然而,由于数据采集设备和技术的受限、货车性能差异扩大等原因,导致模型过度简化,普适性和精确性难以权衡。此方法未充分考虑平纵曲线组合、视距条件等几何线形参数的动态影响,且折减模型未考虑主线不同区段的速度分布特征,难以准确评估重型货车在互通立交复杂环境下的真实运行状态。

目前,研究者们已通过大量的数据统计分析,建立了适用于不同路段类型的运行速度预测模型^[4,7],针对不同线形特征分车道对不同影响因素进行研究^[8]。张驰等^[5]基于无人机航拍数据构建的分车道速度模型,实现了小净距出口路段的主线、匝道速

度协同预测。张驰等^[9]通过对西南地区某高速公路连续长大下坡路段断面车速数据进行分析,建立重型货车运行速度预测修正模型,该模型相对现有运行速度预测模型误差降低了 4%~14%。许金良等^[10]采用回归分析方法,将坡长、纵坡坡度、坡底速度作为自变量,建立车辆在纵坡路段上的运行速度模型,得出坡度、坡长与速度变化的关系;阎莹等^[11]考虑隧道侧向宽度对驾驶心理及行为的影响机理,建立速度差值与过渡指标间的运行速度模型;祝站东等^[12]对大小型车开展跟车试验,考虑了不同长度隧道对驾驶人的行车规律和隧道路段的车速变化规律的影响,建立了高速公路长大隧道特征点运行速度模型。选取互通立交主线段作为研究场景,主要基于以下考虑:①互通立交是高速公路几何线形变化最剧烈的节点,包含渐变段、鼻端、加减速车道等复杂要素,相较于普通路段,此处几何参数对重型货车速度行为的制约与诱导作用更为显著;②立交区域是重型货车事故高发区,研究该场景下的速度规律对于提升节点安全性具有更高的工程紧迫性与应用价值。综上,关于立交区域运行速度模型的研究主要集中于匝道部分和主线段的出入口连接区,通过分析匝道的几何设计、交通流特性,以及驾驶行为特征,建立了多种运行速度预测模型。而针对在立交区域主线段行驶车辆的研究相对较少,且现有模型普遍以轻型客车为建模主体^[13],缺乏针对重型车群体的速度演化规律刻画。

研究场景的拓展同步驱动着模型技术革新,随着技术的发展,GNSS 设备^[14]、交通监控摄像头^[15]、各类传感器^[16]等数据源得到广泛应用,也扩展了运行速度的研究场景。相较于传统的车辆速度数据采集方式,GNSS 数据能够提供高精度的定位信息,覆盖

范围广,且更新频率高,适用于实时交通流量分析和路径规划^[17]。因此,相较于无人机数据,较高的路网覆盖率和采样频率使得GNSS轨迹数据成为交通信息的重要数据源,为动态交通流的探测奠定了基础^[18]。在高速公路标准路段,交互式道路安全设计模型(IHSDM模型)通过速度曲线平顺性检测优化设计方案,成为工程实践的基准工具^[19]。IHSDM模型不断迭代升级,通过整合更多维度的数据,提高了运行速度预测的精度^[20-21]。运行速度模型的应用不再局限于公路设计阶段,而是拓展到交通管理、事故预防、环境保护等多个领域。更值得关注的是,研究范畴已经扩展到了智能交通系统领域,罗冬宇等^[22]结合驾驶人动视野构建的三维线形模型,为自动驾驶轨迹规划提供了理论支撑;马聪等^[23]提出的隧道路路段曲率变化率-弯坡-曲度的多元统计回归运行速度组合模型,被应用于车路协同系统的实时风险预警。这些研究表明: V_{85} 模型正从设计辅助工具向智慧交通决策中枢演进。

当前运行速度预测方法主要包括跟驰模型、机器学习模型和经验回归模型。跟驰模型侧重车辆间的交互行为,较少体现道路几何要素对速度的直接影响;机器学习模型虽具有较强预测能力,但可解释性不足,难以直接服务工程设计。针对互通立交主线段自由行驶状态下重型货车的速度预测,现有方法在几何参数与运行速度定量关系表征方面仍显不足。本文采用基于相关性分析的逐步回归方法,以兼顾预测精度、模型可解释性和工程适用性。

综上所述,本文聚焦于单体车辆层面的运行速度演化规律,基于高频GNSS轨迹提取重型货车在关键断面的瞬时速度,建立其与路段几何特征之间的定量关系模型。为明确互通立交主线路段重型货车运行速度规律,首先将研究区域划分为出口影响范围、入口影响范围和中间过渡段,分析不同区段速度分布规律,识别出重型货车存在“减速后加速”和“二次减速”2种运行状态,并进一步分析速度变化趋势及加速度分布特征,揭示不同主线段区域内重型货车的速度差异特性。在此基础上,构建基于道路几何参数的运行速度预测模型,为互通立交的优化设计和安全管理提供了重要的理论支撑和技术手段。

1 数据采集与处理方法

1.1 数据来源与采集

车载GNSS数据是指由安装在车辆上的全球定

位卫星系统接收模块所采集和记录的数据^[24]。目前,GNSS数据是研究城市道路车辆运行特征与路径选择的重要依据^[25]。

本文使用的数据来源于中国某物流公司2023年7—9月的重型货车时空GNSS轨迹,采集路段位于中国西部某4条高速公路,涵盖了13个互通立交,包括26条主线路段,共收集了1200辆重型货车的行车轨迹数据。高频GNSS数据采集频率为1次/s,能够实时动态地记录重型货车运行时细微的轨迹状态,以满足本文对于车辆运行特征与路径选择分析的数据需求。

所采集到的原始GNSS轨迹数据中包含了丰富的重型货车运行状态信息,主要字段包括“车辆ID”“时间”“速度”“方向角”“经纬度坐标”,总计近6000万条记录,数据以“.csv”s表格形式存储。这些数据能够全面反映车辆的实时位置、运动状态和行驶轨迹,通过清洗数据后,可以实现对车辆真实行驶状态最大程度的还原。重型货车轨迹数据结构如表1所示,详细展示重型货车轨迹数据的结构,并直观列出了数据所包含的关键信息及其字段说明。数据采集所涉及的高速公路及正常通行立交的地理位置分布如图1所示。

表1 数据来源路段基本信息		
Tab. 1 Basic information about road sections from data sources		
字段	示例	字段说明
imei	869 218 067 728 921	车辆ID
locationTime	1 688 272 752 000.0	时间戳/ms
lat	25.496 56	纬度/(°)
lon	110.431 23	经度/(°)
speed	23	车辆瞬时速度/(m/s)
bearing	78.260 01	方向角/(°),即车辆行驶时车头方向与正北方向的顺时针夹角

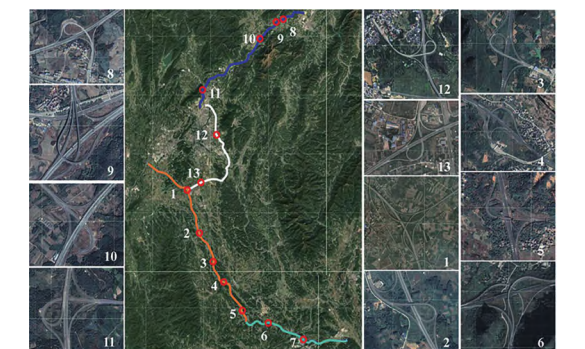


图1 数据采集高速公路及正常通行立交的地理位置图

Fig. 1 Geographic location of data collection highways and normal access interchanges

通过匹配车辆 ID 与连续时间戳,识别单次完整行驶记录;再依据道路桩号区间对轨迹点进行空间筛选,提取车辆在互通立交主线段范围内的完整行车轨迹^[26]。只有在立交主线全段范围内连续存在的数据,才是重型货车在该主线路段行驶的数据,以此区分同一范围内驶出或进入的车辆。重型货车轨迹横纵向位置的典型样例如图 2 所示,其中纵向位置通过桩号计算获得,并以出口鼻端位置作为基准零点。

1.2 数据处理

表 2 详细列出了数据来源路段的基本信息,包括高速公路名称、立交主线路段编号、各立交对应的 GNSS 轨迹样本数据量,以及数据采集时的路段状态,如正常通行或改扩建等,为后续分析提供了清晰的数据背景。当前数据以 Y 形和喇叭形为主,主要源于中国西部山区高速公路常用立交形式的真实建

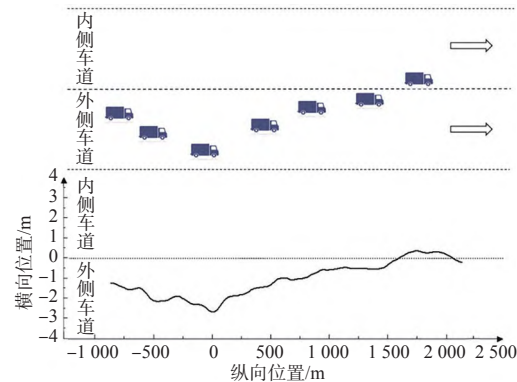


图2 重型货车轨迹横纵向位置样例
Fig. 2 Sample horizontal and vertical positions of heavy truck trajectory

设情况。尽管喇叭形立交轨迹占比略高,但在地形条件、设计速度和车道配置等方面具有较高一致性,且模型经过标准化与交叉验证处理,本文认为该样本构成尚未造成显著的模型偏倚。

表 2 数据来源路段基本信息
Tab. 2 Basic information on the road sections from which the data were obtained

高速公路	设计速度/(km/h)	横断面	立交编号	立交类型	主线路段编号	路段方向	路段状态	样本数量
GY	120	双向 4 车道,车道宽 3.75 m	1	Y 型	I ₁₋₁	正	正常通行	54
					I ₁₋₂	反	正常通行	83
			2	喇叭	I ₂₋₁	正	正常通行	110
					I ₂₋₂	反	正常通行	67
			3	喇叭	I ₃₋₁	正	正常通行	39
					I ₃₋₂	反	正常通行	62
			4	喇叭	I ₄₋₁	正	正常通行	21
					I ₄₋₂	反	正常通行	36
			5	喇叭	I ₅₋₁	正	正常通行	28
					I ₅₋₂	反	正常通行	14
			6	Y 型	I ₆₋₁	正	正常通行	66
					I ₆₋₂	反	正常通行	34
YP	120	双向 4 车道,车道宽 3.75 m	7	喇叭	I ₇₋₁	正	改扩建	47
					I ₇₋₂	反	改扩建	36
			8	喇叭	I ₈₋₁	正	正常通行	24
					I ₈₋₂	反	正常通行	32
			9	Y 型	I ₉₋₁	正	正常通行	27
					I ₉₋₂	反	正常通行	46
GX	120	双向 4 车道,车道宽 3.75 m	10	喇叭	I ₁₀₋₁	正	正常通行	124
					I ₁₀₋₂	反	正常通行	74
			11	喇叭	I ₁₁₋₁	正	正常通行	26
					I ₁₁₋₂	反	正常通行	32
			12	喇叭	I ₁₂₋₁	正	正常通行	12
					I ₁₂₋₂	反	正常通行	37
LS	120	双向 4 车道,车道宽 3.75 m	13	喇叭	I ₁₃₋₁	正	正常通行	24
					I ₁₃₋₂	反	正常通行	47

本研究针对 GNSS 轨迹数据的特点,从空间坐标、速度特征和基础数据质量 3 个维度构建系统化的清洗体系。鉴于数据源为物流重型货车,其行驶时段具有非高峰特性,交互概率相对较低。在清洗

过程中,进一步剔除了速度标准差过大且无对应几何线形变化的异常片段,以最大程度减少跟驰、拥堵等交互行为对单一几何参数分析的干扰。结合道路设计图纸和实地勘测数据,对高速公路主线及互通立交线形进行恢复,并通过几何特征对 GNSS 轨迹数据与主线段设计要素数据库进行匹配。经匹配后,可实现如图 3 所示的 GNSS 轨迹与道路单元空间位置关系的可视化。

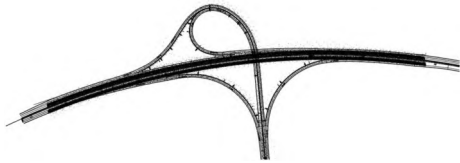


图 3 真实轨迹在立交场景中的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of actual trajectory in an interchange scenario

在空间坐标异常处理方面,首先对大距离离群点进行识别和剔除,采用 10 m 道路边线阈值标准,与点群距离相当远的异常偏移点为大距离离群点,本文设定大距离离群点的阈值是距离道路边线 10 m 及以上^[27],这些点直接删除,大距离离群点如图 3 所示,过滤因设备故障或信号干扰导致的明显偏移点。针对小距离跳点问题,基于运动连续性假设,结合道路限速(120、100、80 km/h)计算最大理论位移(33.3、27.8、21.2 m/s),并通过球面距离计算验证相邻点位移的合理性,对超出阈值的异常点采用线性插值修正,以保持轨迹的时空连续性。

速度异常处理则分为持续性异常和瞬时突变 2 种情况。对于因车辆故障导致的渐进减速-停滞-低速模式异常数据段,采用车辆 ID 和时间戳组合定位并整体剔除。而对于单个速度值的突变,若其前后速度数据均正常,且考虑到数据采集连续,可采用均值替换法进行处理:计算各速度值与相邻速度值的差值,找出与相邻数据相差较大的数据点,一般设定阈值为差值超过 40 km/h^[28]。对于找出的异常数据点,取其前后相邻速度值的均值,用该均值替换该异常速度值。

针对缺失的数据,本文采用逐一判定插值法进行修正。然后,假定上 1 个轨迹点的经纬度坐标为正确值;其次,根据轨迹数据中相邻轨迹点的车辆瞬时速度和采集时间间隔,计算出下 1 个轨迹点的最大可能运动距离;最后,将这个理论距离与实际经纬度坐标计算出的定位距离进行比较,如果实际定位距离超出理论距离,则视为异常数据,并通过替换公式进行修正。这种方法既保留了轨迹数据的连续

性,又有效处理了异常数据,提高了数据的准确性和可靠性,见式(1)。

$$\begin{cases} s = v_{\max} \times \Delta t \\ v_{\max} = \mu \cdot v_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为最大可能运动距离,单位 m; $v_{\max}$ 为 GNSS 数据漂移的速度阈值,单位 m/s; Δt 为 2 个相邻轨迹点采集时间间隔,单位 s; v_k 为当地道路最大限速值; μ 为调整系数,根据当地道路实测数据和交通状态决定,这里取 1。

此外,针对基础数据质量问题,本研究直接剔除关键字段(如时间戳、速度)缺失的记录,避免插值引入额外偏差。同时,通过全字段比对机制识别并删除完全重复的记录,确保数据集的唯一性和有效性。

1.3 立交主线段影响范围划分

互通立交作为高速公路的重要节点,其主线路段与匝道路段在几何设计、交通流特征,以及行车行为方面存在显著差异。主线路段通常具有较高的设计速度,一般为 80~120 km/h,线形以直线或大半径曲线为主,交通流相对稳定;而匝道路段设计速度较低,一般为 40~60 km/h,线形复杂,包含小半径曲线和较大纵坡,交通流受汇入和分流行为的影响较大。此外,主线路段的车辆运行速度较高,速度变化较为平缓,但由于与匝道的连接区域存在交通流交织,其行车安全性面临更大挑战。相比之下,匝道路段的车辆运行速度较低,但加减速行为更为频繁,驾驶操作复杂度较高。因此,研究主线路段的行车特征对于提升互通立交的整体通行效率和安全性具有重要意义。

根据《公路通行能力手册》,高速公路的分流区与合流区主要由匝道路段及其与主线的连接处 2 个部分构成。匝道路段内的行车环境相对单一,车辆运行状态也趋于稳定。然而,在匝道与主线的连接区域,车辆需在确保安全的前提下完成驶入或驶出动作,这一过程不可避免地会对高速公路主线上的直行交通流造成干扰,使得该区域的交通流特征变得复杂且成为分析的重点对象。

入口匝道作为车流输入的通道,与主线相接形成合流区。在此区域内,来自匝道的车辆需寻找主线车流中的间隙以安全汇入。由于匝道通常位于主线的右侧,因此路肩车道首当其冲受到合流车辆的影响。为了应对合流车辆的汇入,主线上的车辆往往会在进口匝道上游提前调整行驶车道,导致交通量在车道间的分布打破原有的平衡状态,并在主线

范围内重新分配。根据研究,合流区的影响范围界定为合流匝道末端上游 150 m 至下游 750 m 之间,系因车辆在汇入主线过程中,加减速行为集中发生于该区域,且减速累计值呈现二次下降特征。当 2 个相邻鼻端间距 ≥ 300 m 时,其间存在相对稳定的中间过渡段,可用于分析速度恢复过程。其中受影响最为显著的是最外侧的 2 条车道,构成了合流影响范围的核心区域。

出口匝道承担车流驶出的功能,与主线相接形成分流区。在分流区内,计划驶出的车辆需先从主线交通流中分离,逐渐进入与匝道相邻的车道,这个过程同样会导致交通量在车道间的重新分布。分流区的影响范围被确定为分流匝道始端上游 750 m 至下游 150 m 之间,其中最外侧的 2 条车道构成了分流影响范围的关键部分。该范围的确定依据来自多条主线路段的减速累计曲线观测结果:重型货车普遍在上游 750 m 左右开始出现明显减速趋势,且最大减速累计值多出现在下游 150 m 以内区域,表明该区间为车辆应对出口匝道的主要运行调整区。立交段出口影响范围 W_1 示意图与入口影响范围 W_2 示意图如图 4 和图 5 所示。

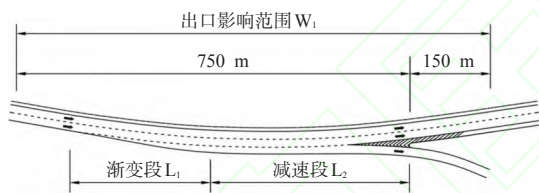


图 4 出口影响范围示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the export impact area

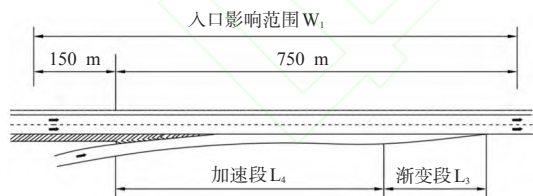


图 5 入口合流影响范围示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the inlet merge impact area

基于互通立交主线的空间结构特征,研究区域可依据出入口位置划分为出口影响范围和入口影响范围 2 个主要区域。通过分析 2 个鼻端之间的空间距离,当间距超过 300 m 时,2 个影响范围并无重叠现象,存在中间过渡段;反之,则说明 2 个影响范围存在重叠现象。本研究基于以下假设构建模型:在立交主线段影响范围内,重型货车的速度演化主要受道路几何线形的诱导与约束。尽管该场景客观存在交通流交互,但通过数据清洗机制剔除高饱和度样本后,可认为保留的数据主要反映几何约束下的

驾驶行为,从而确保场景特征与几何参数主导的模型假设保持一致。

2 行驶特征分析

2.1 速度分布特性分析

根据美国 AASHTO 的二次减速理论,一般情况下,车辆分流减速过程可以分为分流阶段、第 1 次减速阶段和第 2 次减速阶段。根据跟驰理论相关研究,结合实际安全驾驶行为和实测数据,车辆在遇到前车减速时并非瞬间刹停,而是遵循“减速-调整-加速”的 2 阶段行为逻辑。第 1 阶段:后车判断前车减速后,以中等减速度平稳制动,速度从 v 降至 v' ,避免因急刹导致交通流震荡;第 2 阶段:若前车恢复正常行驶,后车加速恢复至期望速度,形成完整的“减速后加速”速度曲线^[29]。车辆以主线分流点的行车速度通过三角渐变段转移车道后进入减速车道,在分流点进入减速车道后,先松开油门让行驶阻力来减小车速,减速 3 s 后再利用刹车进行二次减速直到车速达到匝道分流鼻端速度。

在高速公路主线上,立交构造物的存在会对重型货车的行驶状态产生一定影响。尽管主线车道通常是直线或平缓曲线,但匝道车辆汇入或分离可能会对重型货车的速度控制提出更高要求。研究立交主线段重型货车速度特性,能够直观了解驾驶人在这条路段的驾驶行为特征。

本文绘制了 14 个主线路段的重型货车减速累计图,如图 6~7 所示。减速累计图展示了 5%、15%、25%、50%、75%、85%、95% 这 7 个分位值速度的减速累计值随距离的变化趋势。减速值表示车辆在某位置处相对于前 1 个位置的速度降低值,大于 0 表示减速、小于 0 表示加速。而速度累计值表示车辆在某一位位置相对于初始位置的减速累积量,该值不断增加为减速、不断减小为加速,不变则速度趋于平稳。与速度-距离图相比,减速累计值-距离图能够直观体现出车辆在某位置速度变化的具体量值。图中有 2 条竖向红色虚线,距离等于 0 的位置代表出口小鼻端对应主线位置,另 1 条代表入口小鼻端对应主线位置。同时将出口小鼻端对应主线位置前 750 m、后 150 m 的出口影响范围 W_1 ,和入口小鼻端对应主线位置前 150 m、后 750 m 的入口影响范围 W_2 进行标注。

对于主线路段 I_{i-1} , W_1 范围为 -750~150 m, W_2 范围为 1 150~2 050 m。由图 7(a)可见:从趋势特征看,主线路段 I_{i-1} 各分位值速度的减速累计值变化趋

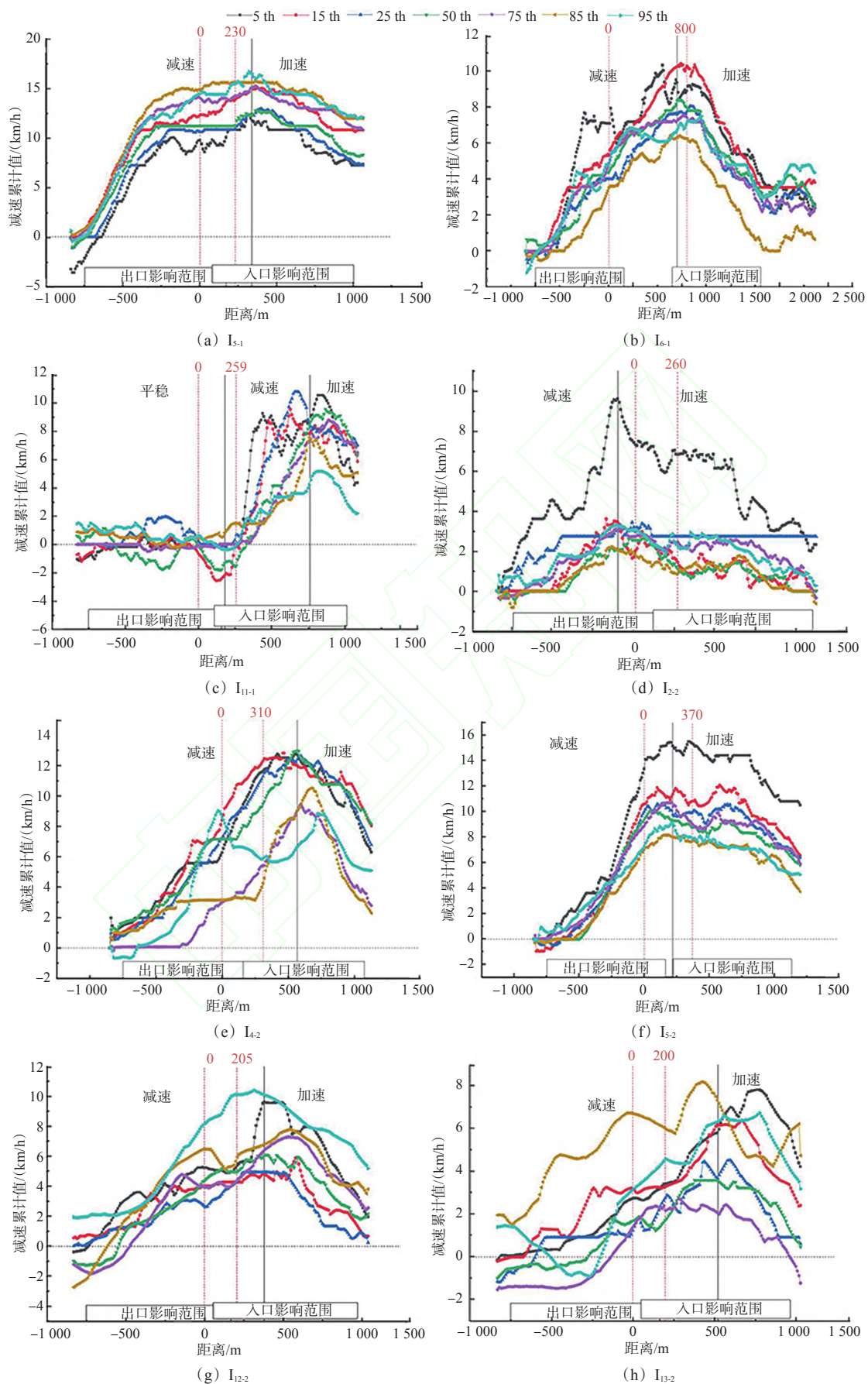


图6 “减速后加速”主线路段重型货车车减速累计图

Fig. 6 “Deceleration followed by acceleration” accumulation of deceleration of heavy vehicles on the mainline section

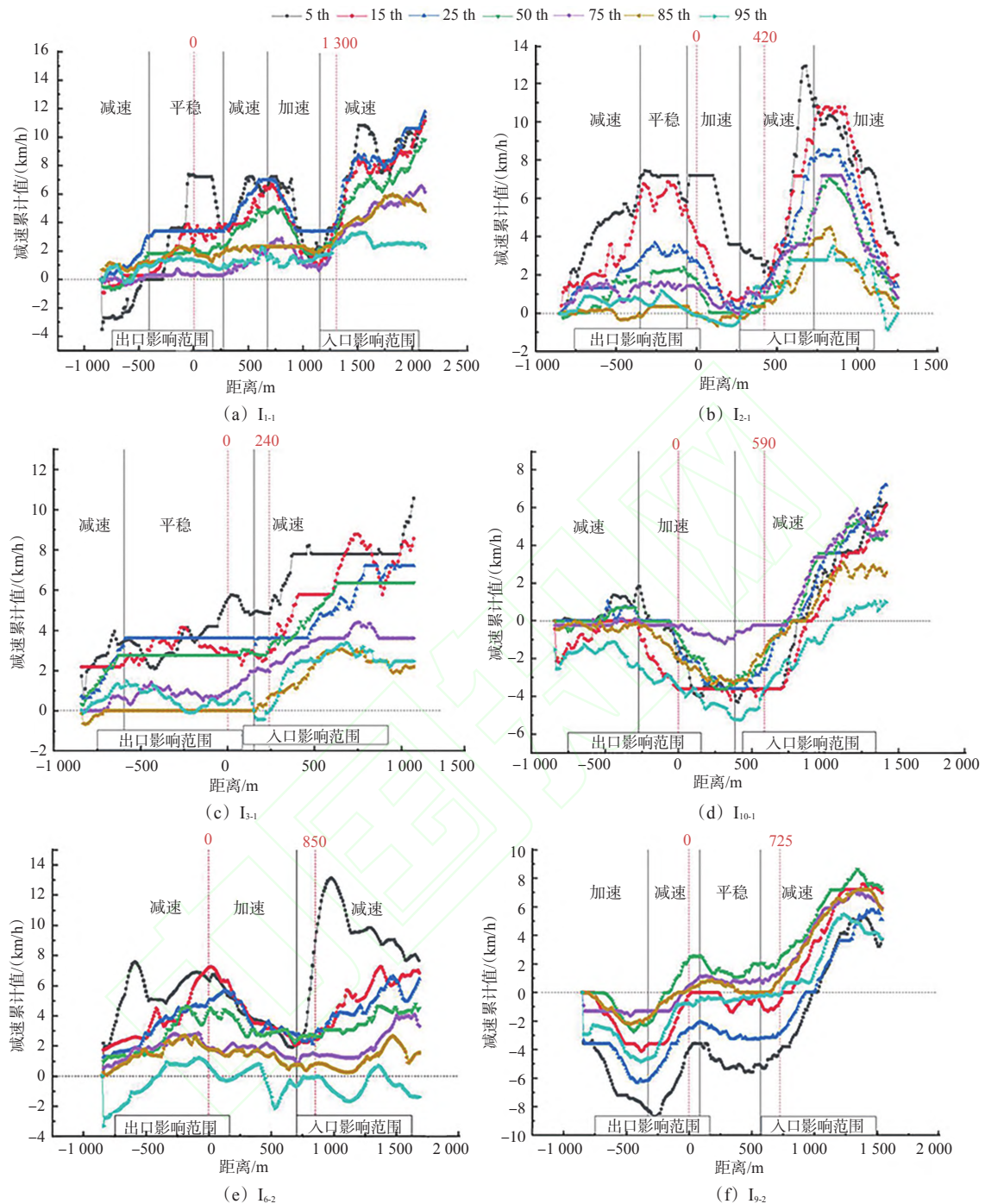


图7 “二次减速”主线路段重型货车减速累计图

Fig. 7 “Secondary deceleration” accumulation of heavy vehicle decelerations on mainline sections

势一致,呈现速度越低变化幅度越显著的特点。从空间分布特征看,各分位值速度在通过立交区域时经历了2次明显的减速过程,最大减速累计值均出现在 W_2 区域内;另外,在 W_1 区域内各分位值速度均呈现明显减速趋势,这种趋势一直持续到750 m附近,之后承接一段减速趋势,到接近入口影响区才再次加速。主线路段 I_{1-1} 各分位值速度,2次减速的最大累计值及出现位置。第1次减速发生在 W_1 及其下游的中间过渡段,各分位值速度的最大减速累计值

中, V_5 最大为 10.002 km/h, 并出现在 -50 m 位置处, 处于 W_1 内; $V_{15} - V_{95}$ 最大减速累计值出现在 W_1 下游的中间过渡段。低速车辆 V_5 的减速幅度达到高速车辆 V_{95} 的 7 倍以上, 表明低速车辆对出口匝道的影响更为敏感。第 2 次减速则集中在 W_2 范围内, 最大减速累计值较第 1 次明显增大, 第 2 次减速的幅度是第 1 次的 1.3~4 倍, 其中 V_{50} 的增幅最大, 增加 3.952 km/h, 而 V_{95} 的增幅最小, 增加 1.025 km/h。

各分位值速度的最大减速累计值位置基本集中在2 040 m附近,即入口影响区的末端位置。 V_5 和 V_{95} 的最大减速累计值位置分别出现在1 510 m和1 520 m,其他分位值速度的位置为2 040~2 050 m,这反映出低速车辆更早开始应对入口匝道的汇流影响,而高速车辆则保持较长时间稳定行驶后才进行减速调整。类似地,对其他13个立交主线路段进行分析,可以得到以下结论。

1)图6和图7展示各路段的分位值 V_5 、 V_{15} 、 V_{25} 、 V_{50} 、 V_{75} 、 V_{85} 、 V_{95} ,减速累计值的变化趋势是类似的。其中绝大部分路段 V_5 速度变化最明显,即低速重型货车对立交主线的影响更敏感,但这14条立交主线路段各分位值速度的变速趋势一致,可以用 V_{85} 的变化趋势来看整条路段上重型货车的变化趋势。

2)部分主线路段出口影响范围和入口影响范围存在重叠现象,即2个鼻端间距<300 m。

3)在整个立交主线段内, I_{2-2} 、 I_{4-2} 、 I_{5-1} 、 I_{5-2} 、 I_{6-1} 、 I_{11-1} 、 I_{12-2} 、 I_{13-2} 路段速度变化相似,在整个立交范围内,呈现“减速后加速”的趋势。这8个“先减速后加速”主线路段中,路段 I_{6-1} 、 I_{4-1} 、 I_{5-2} 鼻端间距 ≥ 300 m, I_{5-1} 、 I_{11-1} 、 I_{2-2} 、 I_{12-2} 、 I_{13-2} 鼻端间距<300 m。

4)整个立交范围内,路段 I_{1-1} 、 I_{2-1} 、 I_{3-1} 、 I_{10-1} 、 I_{6-2} 、 I_{9-2} ,都展现出类似于出口影响范围减速后趋于平稳或加速,到入口影响范围再进行减速的“二次减速”行为。存在二次减速行为的6个立交路段路段中。除路段 I_{3-1} 外,鼻端间距均 ≥ 300 m。

综上所述,通过对高速公路互通立交主线路段重型货车的行车特征进行了系统分析,结果表明:立交主线路段的重型货车速度分布呈现显著的空间异质性特征。鼻端间距作为连接出口与入口的核心空间指标,在2类运行状态中均表现出显著相关性。当鼻端间距 ≥ 300 m时,多数车辆可在出口减速后完成速度平稳过渡,并在进入入口前形成一定加速准备;而当鼻端间距<300 m时,驾驶人往往尚未完成速度调整即面临新的合流需求,导致出现“二次减速”行为。这也解释了为何在部分紧凑型立交中,重型货车频繁发生急刹、变道等高风险操作,并非单纯驾驶习惯问题,而是几何设计压缩了重型货车必要的运行时空缓冲区。

2.2 相关性检验与关键几何参数筛选

根据互通立交主线的功能分区特征,可将其划分为3个典型区段:出口影响范围、中间过渡段和入

口影响范围。其中,出口影响范围包含减速车道、出口渐变段,以及出口小鼻端等关键构造要素;入口影响范围则由加速车道、入口渐变段和入口小鼻端等要素构成。中间过渡段因2个鼻间距是否 ≥ 300 m而存在,为了使其具有普遍性,直接用2个鼻间距 d_b 来代替。基于此划区,结合几何线形特征与关键设计指标,初步筛选出影响运行速度的自变量,如表3所示。

表3 特征点运行速度模型可能自变量

Tab.3 Feature point running speed model possible independent variables

自变量	含义	自变量	含义
d_b	鼻端间距/m	L_3	入口渐变段长度/m
R	圆曲线半径/m	L_4	入口加速段长度/m
i	主线纵坡/m	K_1	出口渐变率
L_1	出口渐变段长度/m	K_2	入口渐变率
L_2	出口减速段长度/m	V_{eq}	出口影响范围起点位置速度/(km/h)
q_1	立交出口匝道车道数	q_2	立交入口匝道车道数
z	主线车道数/m	D	硬路肩宽度/m

注:根据竣工时的设计资料,本文所用到的互通立交皆为单车道出入口、双向4车道、硬路肩宽度为3.5 m,故这些常量参数不纳入变量分析范畴。

上述关键几何参数对重型货车运行速度的影响并非孤立存在,而是通过改变车辆的动力响应过程、驾驶人的操作预期,以及主线交通流的干扰强度,形成系统性的速度控制机制。① d_b 是决定立交主线路段是否具备足够空间完成速度调整的核心指标。当 $d_b \geq 300$ m时,多数重载货车在完成出口减速后,可在中间过渡段逐步恢复部分速度,为后续汇入主线创造有利条件;而当 $d_b < 300$ m时,出口减速尚未结束即进入入口合流区,导致驾驶人被迫提前启动第二次制动动作,从而出现“二次减速”现象。这个行为特征表明:短间距压缩了重型货车必要的速度调节时空窗口,迫使驾驶操作趋于被动和紧张,增加了追尾与侧向冲突风险。② L_1 与主线纵坡 i 共同决定了重型货车在分流前的可控减速能力。较长的渐变段允许车辆以较小减速度平稳驶离主线,减少急刹引发的交通扰动;而在下坡路段,由于重力加速度作用,即使轻踩刹车也易造成车速快速下降,且制动效能受限,进一步加剧速度波动。③ K_2 与 L_3 对入口末端速度具有显著正向影响。较小的 K_2 有助于降低方向变换带来的横向加速度突变,使驾驶人更愿意保持较高车速完成汇入;而较长的 L_3 则为重型货车提供了充足的加速距离,弥补其加速度低、爬

坡能力弱的固有缺陷。特别是在上坡加速段,若 L_3 不足,车辆往往无法达到主线最低推荐汇入速度,成为主线车流的“移动障碍物”。

综上所述,各几何参数的作用本质在于调节“车辆动态性能-驾驶人反应-道路空间供给”三者之间的匹配关系。本研究识别出的关键变量不仅是统计意义上的显著因子,更是反映重型货车在复杂节点中运行连续性与安全性的重要物理控制维度。

3 模型构建与验证

3.1 相关性分析及自变量选取

为准确刻画重型货车在互通立交主线段的运行速度演化过程,本文提出 1 种基于功能分区的运行速度预测模型。该模型以驾驶人对道路几何特征的认知响应为核心假设,认为车辆在出口影响区、中间过渡段与入口影响区的行为逻辑存在显著差异,需分别建模。模型整体架构遵循“变量筛选-相关性检验-函数形式设定-回归拟合-显著性验证”的五步构建流程。

为准确评估各自变量与 7 个特征点运行速度之间的相关性,同时考虑变量间可能存在的线性或非线性关系,本文计算了斯皮尔曼秩相关系数。斯皮尔曼秩相关系数作为 1 种非参数统计方法,通过将原始数据转换为秩次来计算变量间的单调关系,对数据的分布形态无严格要求,且对异常值具有较强的鲁棒性,能够有效捕捉变量间的非线性依赖关系。“减速后加速”和“二次减速”这 2 种运行状态下各特征点运行速度相关系数矩阵图如图 8 所示,可以更全面地判断变量间的相关性类型。这个分析策略不仅能够明确变量间的关联性质,还可为后续建模提供更可靠的相关性评估依据。相关系数的取值范围均为 $(-1, 1)$,根据相关系数的绝对值对相关性强弱进行划分:0.00~0.19,极弱相关性或无相关性;0.20~0.39,弱相关性;0.40~0.59,中等相关性;0.60~0.79,较强相关性;0.80~1.00,强相关性。其中 1 表示完全正相关, -1 表示完全负相关, 0 表示无相关性。

本文基于变量相关性分析结果,选取与特征断面运行速度具有显著统计学关联的自变量进行建模。具体筛选标准为:仅保留斯皮尔曼秩相关系数绝对值 ≥ 0.6 ,即达到较强相关及以上水平的预测变量。通过图 8 所示的相关系数计算结果,分别识别出“减速后加速”和“二次减速”2 种运行状态下与各特征断面运行速度显著相关的自变量,详细筛选结

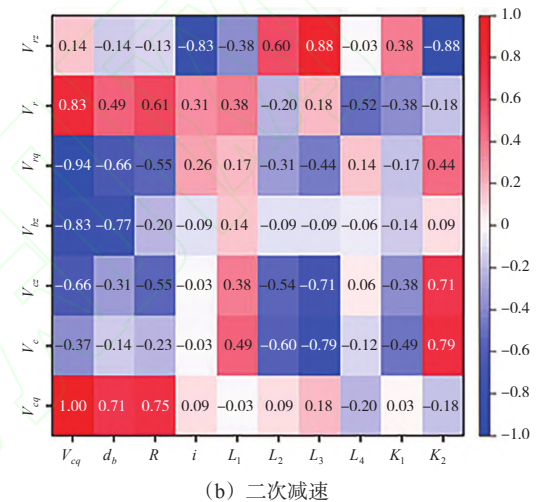
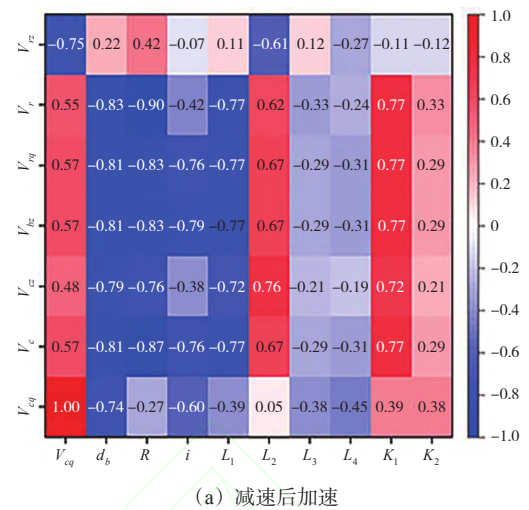


图 8 2 种运行状态各特征点运行速度相关系数矩阵图

Fig. 8 Correlation coefficient matrix diagram of running speeds at characteristic points for two operating states

果如表 4 和表 5 所示。

3.2 模型构建步骤

研究拟采用线性回归模型对线性强相关的变量对进行拟合分析,刻画变量间的函数关系,并评估模型的拟合优度与预测性能。具体步骤如下。

1) 数据标准化。数据标准化是指将数据按比例缩放,使其落入 1 个特定的范围,如 $[0, 1]$ 或 $[-1, 1]$,或使其均值为 0、标准差为 1。标准化的目的是消除数据的量纲和取值范围差异,使不同特征或变量具有可比性。在回归建模中,标准化可以显著提高模型的稳定性和收敛性。本节利用最小-最大标准化方法,将数据线性地映射到 $[0, 1]$ 范围,见式(2)。

$$x_i^b = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, y_i^b = \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (2)$$

式中: x_i^b 为标准化后的自变量; y_i^b 为标准化后的因变量; x_i 为第 i 个自变量值; y_i 为第 i 个因变量值; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 为自变量中的最大值和最小值; $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 为因变量中的最大值和最小值。

表4 “减速后加速”运行状态自变量选取结果
Tab. 4 Results of selecting independent variables for the “deceleration followed by acceleration” operating state

运行速度	自变量	斯皮尔曼秩相关系数	相关性程度
V_{cq}	d_b	-0.74	较强非线性负相关
	i	-0.60	较强非线性负相关
	d_b	-0.81	强非线性负相关
	V_{cq}	0.57	强线性正相关
	R	-0.87	强线性负相关
V_c	i	-0.76	较强线性负相关
	L_1	-0.77	较强线性负相关
	L_2	0.67	较强非线性正相关
	K_1	0.77	较强线性正相关
	V_{cq}	0.48	强线性正相关
V_{cz}	d_b	-0.79	较强非线性负相关
	R	-0.76	较强线性负相关
	L_1	-0.72	较强线性负相关
	L_2	0.76	较强非线性正相关
	K_1	0.72	较强线性正相关
V_{bz}	V_{cq}	0.57	强线性正相关
	d_b	-0.81	强非线性负相关
	R	-0.83	强非线性负相关
	i	-0.79	较强线性负相关
	L_1	-0.77	较强非线性负相关
V_{rq}	L_2	0.67	较强非线性正相关
	K_1	0.77	较强线性正相关
	V_{cq}	0.55	强线性正相关
	d_b	-0.83	强非线性负相关
	R	-0.90	强非线性负相关
V_r	i	-0.42	较强线性负相关
	L_1	-0.77	较强线性负相关
	L_2	0.62	较强非线性正相关
	K_1	0.77	较强线性正相关
	V_{cq}	-0.75	强线性正相关
V_{rz}	L_2	-0.61	较强线性负相关

$y_{\min}$ 为因变量中的最大值和最小值。

2) 定义函数形式。对于线性相关的变量,采用一次函数进行拟合,函数形式见式(3)。

$$y = n + m \cdot x \quad (3)$$

式中: n 为 y 轴截距; m 为斜率,表示 x 每增加 1 个单位时 y 的变化量。

采用非线性回归模型对非线性强相关的变量对进行拟合分析,刻画变量间的函数关系,并评估模型

表5 “二次减速”运行状态自变量选取结果
Tab. 5 Results of selecting independent variables for the “secondary deceleration” operating state

运行速度	自变量	斯皮尔曼秩相关系数	相关性程度
V_{cq}	d_b	0.71	较强线性正相关
	R	0.75	较强非线性正相关
	L_2	-0.60	较强线性负相关
V_c	L_3	-0.79	较强线性负相关
	K_2	0.79	较强线性正相关
	V_{cq}	-0.66	较强非线性负相关
V_{cz}	L_3	-0.71	较强线性负相关
	K_2	0.71	较强线性正相关
	V_{cq}	-0.83	强非线性负相关
V_{bz}	d_b	-0.77	较强非线性负相关
	i	-0.09	较强线性负相关
	V_{cq}	-0.94	强非线性负相关
V_{rq}	d_b	-0.66	较强非线性负相关
	V_{cq}	0.83	强线性正相关
	d_b	0.49	较强线性正相关
V_r	R	0.61	较强线性正相关
	i	-0.83	强线性负相关
	L_2	0.60	较强线性正相关
V_{rz}	L_3	0.88	强线性正相关
	K_2	-0.88	强线性负相关

注: V_{cq} 为出口影响区起点位置运行速度; V_c 为出口鼻端对应主线位置运行速度; V_{cz} 为出口影响区终点位置运行速度; V_{bz} 为 2 个鼻端中点对应主线位置运行速度; V_{rq} 为入口影响区起点位置运行速度; V_r 为入口鼻端对应主线位置运行速度; V_{rz} 为入口影响区终点运行速度。

的拟合优度与预测性能。在进行变量间非线性相关性分析时,仍按照式(2)对变量进行标准化。利用 python 进行非线性模型回归建模,通过筛选后选择最优模型,其中涉及到的非线性函数见式(4)~(5)。式(4)为标准二次函数,式(5)为指数衰减函数,式(6)为幂函数,式(7)为平移的对数函数。

$$y = A_1 + A_2 \cdot x + A_3 \cdot x^2 \quad (4)$$

$$y = B_1 \cdot e^{-\frac{x}{B_2}} + B_3 \quad (5)$$

$$y = C_1 \cdot x^{C_2} \quad (6)$$

$$y = D_1 \cdot \ln(x - D_2) \quad (7)$$

式中: A_1 、 A_2 、 A_3 为系数; B_1 为初始幅度; B_2 为衰减时间系数,决定衰弱的快慢; B_3 为基线值; C_1 为比例系数; C_2 为幂指数; D_1 控制曲线的斜率; D_2 控制对数函数的水平平移。

3) 模型拟合与结果解释。本文利用 Origin 软件进行回归拟合,使用软件自动估计初始值。基于最小二乘法优化模型参数,使拟合曲线与实验数据的残差平

方和最小。然后本文采用方差分析(ANOVA)并结合 F 检验,检验模型是否能够显著解释因变量的变异。在 F 检验中的 $p < 0.05$ 时,表明模型整体显著。

根据单因素分析结果,本文筛选决定系数 $R^2 > 0.6$ 且 p 值 < 0.05 的自变量判定为对特征点具有显著影响的因素,变量选择结果如表 6 和表 7 所示。值得注意的是,在“减速后加速”运行状态下,变量 $V_{rq}^b - V_{cq}^b$ 的决定系数达到 0.991 ($F = 157.899$, $p < 0.001$),表明重型货车在整个立交主线路段的速度恢复能力高度依赖于初始行驶状态。这个现象反映出:重型货车一旦在出口区域完成减速动作,其后续能否顺利提速并回归主线自由流速度,关键取决于车辆动力性能与道路线形条件之间的匹配程度。由于重型货车惯性大、加速度低,若加速车道不足或纵坡不利,将难以实现有效增速,从而形成长距离低速拖行,干扰主线交通流。此外,入口渐变率 K_2 和加速车道长度 L_3 对入口段末速度具有强解释力(R^2 分别为 0.888 和 0.895),说明渐变设计的平顺性直接影响重载货车汇入主线的安全性和效率。过陡的渐变率会迫使车辆提前降速,限制其汇入时机选择,增加与主线车流冲突概率。因此,现行设计规范中对匝道端部线形的规定,对于重载交通占比较高路段可能需要进一步细化和提高标准。

表 6 “减速后加速”状态下相关变量拟合和方差分析结果

Tab. 6 Fitting results and analysis of variance results for relevant variables in the “deceleration followed by acceleration” state

变量	F 值	p	R^2	变量	F 值	p	R^2
$V_c^b - V_{cq}^b$	28.855	0.002	0.828	$V_{bz}^b - L_1^b$	5.462	0.055	0.686
$V_c^b - d_b^b$	6.199 85	0.044	0.713	$V_{rq}^b - V_{cq}^b$	25.882	0.002	0.812
$V_c^b - R^b$	7.509	0.031	0.750	$V_{rq}^b - d_b^b$	6.206	0.044	0.713
$V_{cz}^b - V_{cq}^b$	25.694	0.002	0.811	$V_{rq}^b - R^b$	6.577	0.040	0.725
$V_{cz}^b - d_b^b$	6.067	0.046	0.708	$V_r^b - V_{cq}^b$	28.838	0.002	0.828
$V_{bz}^b - V_{cq}^b$	26.827	0.002	0.817	$V_r^b - d_b^b$	7.040	0.035	0.738
$V_{bz}^b - d_b^b$	6.159	0.045	0.711	$V_r^b - R^b$	6.341	0.043	0.717
$V_{bz}^b - R^b$	7.333	0.033	0.746	$V_{rz}^b - V_{cq}^b$	55.240	3.054E-4	0.902

表 7 “二次减速”状态下相关变量拟合和方差分析结果

Tab. 7 Fitting and analysis of variance results for relevant variables under “secondary deceleration” conditions

变量	F 值	p	R^2	变量	F 值	p	R^2
$V_{cq}^b - d_b^b$	13.472	0.021	0.771	$V_r^b - V_{cq}^b$	39.696	0.003	0.908
$V_{cz}^b - V_{cq}^b$	13.019	0.033	0.897	$V_{rz}^b - i^b$	18.146	0.013	0.819
$V_{bz}^b - V_{cq}^b$	20.423	0.018	0.932	$V_{rz}^b - L_3^b$	34.067	0.004	0.895
$V_{rq}^b - V_{cq}^b$	157.899	9.129E-4	0.991	$V_{rz}^b - K_2^b$	31.711	0.005	0.888

3.3 特征点运行速度逐步回归

针对特征点运行速度的模型构建,采取了以下

策略:对于单因素分析中仅有 1 个自变量拟合效果较好的情况,直接基于该自变量构建模型;而对于存在多个自变量拟合效果较好的情况,则采用前向逐步回归法进行模型优化。具体而言,通过迭代过程逐步纳入对模型解释力贡献最大的自变量,从而构建最优回归模型。

模型选择过程中,采用决定系数(R^2)和 Akaike 信息准则(ATC)作为评价指标,以评估不同模型在给定数据集下的相对质量与预测效果。其中,ATC 统计量的计算见式(8)。

$$H_{AIC} = -2 \ln(L) + 2k \quad (8)$$

式中: L 为似然值; k 为估计参数个数。

3.4 模型构建结果

2 种运行状态下各特征点运行速度预测模型构建结果如表 8 所示。

1)在“减速后加速”运行状态下,针对不同特征点运行速度的回归模型构建如下:对于 V_{cq}^b 和 V_{cz}^b ,分别建立了关于 d_b^b 的单变量回归模型;而对于 V_c^b 、 V_{bz}^b 、 V_{rq}^b 和 V_r^b ,则构建了关于 d_b^b 和 R^b 的双变量回归模型, V_{rz}^b 建立了关于 V_{cq}^b 的单变量回归模型,在优化 V_{bz}^b 的模型时,尝试引入变量 L_1^b 后发现其对模型性能的提升不显著,因此最终将该变量剔除,以简化模型结构并提高模型的解释效率。

2)在“二次减速”运行状态下,针对不同运行速度特征点的回归模型构建如下:对于 V_{cq}^b ,建立了关于 d_b^b 的单变量回归模型;对于 V_{cz}^b 、 V_{bz}^b 、 V_{rq}^b 和 V_r^b ,则分别构建了关于 V_{cq}^b 的回归模型。在优化 V_{rz}^b 的模型时,通过逐步增加变量发现入口加速车道渐变段的渐变率 K_2^b 对模型性能的贡献较小,因此将该变量剔除。

综上所述,互通立交主线段重型货车运行速度预测模型构建结果,“减速后加速”运行状态见式(9),“二次减速”运行状态见式(10)。

$$\begin{cases} V_{cq}^b = 0.779e^{-\frac{d_b^b}{0.053}} + 0.015 \\ V_c^b = 0.049e^{\frac{d_b^b}{0.386}} + 0.956e^{-\frac{R^b}{0.045}} + 0.044 \\ V_{cz}^b = 0.738e^{\frac{d_b^b}{0.04}} + 0.046 \\ V_{bz}^b = 0.486e^{-\frac{d_b^b}{0.006}} + 0.793e^{-\frac{R^b}{0.05}} + 0.072 \\ V_{rq}^b = 0.478e^{-\frac{d_b^b}{0.007}} + 0.742e^{-\frac{R^b}{0.053}} + 0.104 \\ V_r^b = 0.502e^{-\frac{d_b^b}{0.011}} + 0.664e^{-\frac{R^b}{0.055}} + 0.096 \\ V_{rz}^b = 0.011 + 0.917V_{cq}^b \end{cases} \quad (9)$$

表8 2种运行状态各特征点运行速度预测模型构建结果

Tab. 8 The results of constructing the prediction model of running speed at each characteristic point of the two running states

运行状态	运行速度标准值	序号	模型	变量	R^2	AIC
减速后加速	V_{cq}^b	1*	$V_{cq}^b = 0.779e^{-\frac{d_b^b}{0.053}} + 0.015$	d_b^b	0.760	-23.1
	V_c^b	1	$V_c^b = 0.752e^{-\frac{d_b^b}{0.039}} + 0.029$	d_b^b	0.713	-21.7
		2*	$V_c^b = 0.049e^{\frac{d_b^b}{0.386}} + 0.956e^{-\frac{R^b}{0.045}} + 0.044$	d_b^b 、 R^b	0.986	-41.9
	V_{cz}^b	1*	$V_{cz}^b = 0.738e^{-\frac{d_b^b}{0.04}} + 0.046$	d_b^b	0.708	-21.7
	V_{bz}^b	1	$V_{bz}^b = 0.733e^{-\frac{d_b^b}{0.042}} + 0.052$	d_b^b	0.711	-22.0
	V_{bz}^b	2*	$V_{bz}^b = 0.486e^{-\frac{d_b^b}{0.006}} + 0.793e^{-\frac{R^b}{0.05}} + 0.072$	d_b^b 、 R^b	0.976	-37.7
		3	$V_{bz}^b = 0.485e^{-\frac{d_b^b}{0.004}} + 0.857e^{-\frac{R^b}{0.048}} - 0.82e^{-\frac{L_1^b}{0.521}} + 0.073$	d_b^b 、 R^b 、 L_1^b	0.976	-33.7
	V_{rq}^b	1	$V_{rq}^b = 0.715e^{-\frac{d_b^b}{0.044}} + 0.081$	d_b^b	0.713	-22.4
		2*	$V_{rq}^b = 0.478e^{-\frac{d_b^b}{0.007}} + 0.742e^{-\frac{R^b}{0.053}} + 0.104$	d_b^b 、 R^b	0.966	-35.6
	V_r^b	1	$V_r^b = 0.733e^{-\frac{d_b^b}{0.043}} + 0.074$	d_b^b	0.738	-23.0
		2*	$V_r^b = 0.502e^{-\frac{d_b^b}{0.011}} + 0.664e^{-\frac{R^b}{0.055}} + 0.096$	d_b^b 、 R^b	0.974	-37.5
	V_{rz}^b	1*	$V_{rz}^b = 0.011 + 0.917V_{cq}^b$	V_{cq}^b	0.902	-10.1
二次减速	V_{cq}^b	1*	$V_{cq}^b = -0.052 + 0.953d_b^b$	d_b^b	0.771	-0.55
	V_c^b	1*	$V_c^b = 0.087 + 0.957V_{cz}^b$	V_{cz}^b	0.869	-4.05
	V_{cz}^b	1*	$V_{cz}^b = 0.856 - 3.694V_{cq}^b + 3.36(V_{cq}^b)^2$	V_{cq}^b	0.897	-16.3
	V_{bz}^b	1*	$V_{bz}^b = 0.884e^{-\frac{V_{cq}^b}{0.061}} + 0.11$	V_{cq}^b	0.932	-23.4
	V_{rq}^b	1*	$V_{rq}^b = 0.959e^{-\frac{V_{cq}^b}{0.072}} + 0.035$	V_{cq}^b	0.991	-34.8
	V_r^b	1*	$V_r^b = 0.014 + 1.055V_{cq}^b$	V_{cq}^b	0.908	-4.89
	V_{rz}^b	1	$V_{rz}^b = 0.044 + 0.952L_3^b$	L_3^b	0.895	-5.03
		2	$V_{rz}^b = 0.332 + 0.644L_3^b - 0.303K_2^b$	L_3^b 、 K_2^b	0.897	-3.15
		3*	$V_{rz}^b = 0.401 + 0.614L_3^b - 0.419i$	L_3^b 、 i^b	0.987	-15.5
		4	$V_{rz}^b = 0.651 + 0.347L_3^b - 0.264K_2^b - 0.418i$	L_3^b 、 K_2^b 、 i^b	0.989	-14.3

注:序号中带*的模型即为最优回归模型。

$$\begin{cases}
 V_{cq}^b = -0.052 + 0.953d_b^b \\
 V_c^b = 0.087 + 0.957V_{cz}^b \\
 V_{cz}^b = 0.856 - 3.694V_{cq}^b + 3.36(V_{cq}^b)^2 \\
 V_{bz}^b = 0.884e^{-\frac{V_{cq}^b}{0.061}} + 0.11 \\
 V_{rq}^b = 0.959e^{-\frac{V_{cq}^b}{0.072}} + 0.035 \\
 V_r^b = 0.014 + 1.055V_{cq}^b \\
 V_{rz}^b = 0.401 + 0.614L_3^b - 0.419i
 \end{cases} \quad (10)$$

的重要步骤,许多统计方法,如 t 检验、 F 检验、置信区间和预测区间,都依赖于残差的正态性假设。如果残差服从正态分布,说明模型假设合理,结果具有统计意义。

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i \quad (11)$$

式中: ε_i 为 i 点的残差; y_i 为第 i 个实测值; $\hat{y}_i$ 为模型对第 i 个实测值的预测值。

本文基于标准化数据构建了重型货车运行速度预测模型,数据标准化方法见式(12)。

$$x_i^b = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad y_i^b = \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (12)$$

式中: x_i^b 为标准化后的自变量; y_i^b 为标准化后的因

3.5 残差检验

残差是观测值与模型预测值之间的差异,见式

(11)。验证残差的正态性是评估模型假设是否成立

变量; x_i 为第 i 个自变量值; y_i 为第 i 个因变量值; $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 为自变量中的最大值和最小值; $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 为因变量中的最大值和最小值。

在模型验证阶段,可通过式(12)的反向转换计算得到实际运行速度值。为验证模型的有效性,本文对 2 种运行状态下的运行速度进行了实际值与预测值的对比分析。通过计算得到 2 种运行状态下运行速度的实际值与预测值残差,详细残差结果数据如表 9 所示。分析结果表明:模型预测值与实际观测值具有良好的一致性,残差最大绝对值为 5.498 km/h,出现在“减速后加速”运行状态下的出口影响范围起点位置。

表 9 残差结果
Tab. 9 Residual results

运行状态	$V_{cq}/$ (km/h)	$V_c/$ (km/h)	$V_{cz}/$ (km/h)	$V_{bz}/$ (km/h)	$V_{rq}/$ (km/h)	$V_r/$ (km/h)	$V_{rz}/$ (km/h)
	1.502	-0.552	-5.498	-0.528	-0.443	-0.401	-3.757
	-0.448	-1.184	-0.852	-2.100	-3.102	-2.876	1.258
	-3.623	0.003	2.300	-0.040	-0.032	-0.452	-3.203
减速后加速	-3.256	0.531	0.050	1.480	1.817	2.160	0.231
	0.910	2.323	2.874	2.821	2.996	2.227	1.633
	3.180	-1.120	-1.349	-1.570	-1.239	-0.752	0.519
	3.531	0	5.374	0.403	0.004	0.140	4.811
	-3.663	0	-3.665	0.001	0	-0.049	-5.605
	0.108	0.819	0.708	-0.384	-0.043	0.045	-0.254
	0.125	-0.566	-1.334	0.601	0.116	0.317	0.091
二次减速	0.158	-1.270	-1.852	-0.160	-0.116	0.224	-0.014
	-0.287	1.981	2.834	0.021	0.017	-0.355	0.164
	0.113	0.139	0.481	-0.064	-0.100	0.298	-0.050
	-0.220	0.211	0.939	-0.010	0.120	-0.530	0.064

在回归分析中,残差的正态性是 1 个基本假设。为了验证模型的合理性,本文对残差进行了正态性检验。通过 Shapiro-Wilk 检验,评估残差是否服从正态分布。Shapiro-Wilk 检验是 1 种适用于小样本数据的正态性检验方法,能够检测数据与正态分布之间的轻微偏离。检验的原假设 H_0 为残差服从正态分布,备择假设 H_1 为残差不服从正态分布。通过计算 W 统计量和对应的 p 值,判断残差是否满足正态性假设。 W 统计量是 Shapiro-Wilk 检验的核心指标,用于衡量样本数据与正态分布之间的拟合程度,见式(13)。 p 值是在原假设(残差服从正态分布)成立的条件下,观察到当前样本数据或更极端数据的概率。Shapiro-Wilk 检验结果如表 10 所示。

W 值越接近 1,说明数据越接近正态分布。如果 p 值 > 显著性水平(通常为 0.05),则不能拒绝原假

表 10 Shapiro-Wilk 检验结果
Tab. 10 Results of Shapiro-Wilk test

运行状态	特征点运行速度	W 统计量	p 值
减速后加速	V_{cq}	0.971	0.907
	V_c	0.870	0.150
	V_{cz}	0.928	0.494
	V_{bz}	0.943	0.642
	V_{rq}	0.950	0.710
	V_r	0.900	0.287
	V_{rz}	0.806	0.330
	V_{cq}	0.751	0.202
二次减速	V_c	0.975	0.922
	V_{cz}	0.808	0.069
	V_{bz}	0.881	0.274
	V_{rq}	0.884	0.288
	V_r	0.926	0.548
	V_{rz}	0.934	0.611

设,认为样本数据服从正态分布;如果 p 值 $\leq$ 显著性水平(通常为 0.05),则拒绝原假设,认为样本数据不服从正态分布。

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i \cdot \varepsilon_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \quad (13)$$

式中: a_i 为与样本量 n 相关的常数,其计算方法见式(14)~(15); ε_i 为残差样本数据的第 i 个顺序统计量; $\bar{\varepsilon}$ 为残差均值。

$$m_i = \phi^{-1} \left(\frac{i - 0.375}{n + 0.25} \right) \quad (14)$$

$$a_i = \frac{m_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^n m_j^2}} \quad (15)$$

式中: ϕ^{-1} 为标准正态分布的反函数; i 为顺序统计量的索引 ($i = 1, 2, \dots, n$); n 为样本量; m_i 为理论分位数,是标准正态分布的分位数。

由表 10 可见:“减速后加速”状态和“二次减速”状态下,所有特征点的残差数据均服从正态分布,这表明模型未捕捉到的变异因素主要表现为随机噪声,而非系统性偏差。结合模型较高的决定系数,可以认为在所选样本范围内,道路几何参数是驱动重型货车速度变化的主导因素,车辆交互行为引入的噪声未显著削弱几何参数与速度之间的定量关系。

3.6 方差分析

对“二次减速”运行状态下 V_c^b 的回归模型,与多因素变量决定的运行速度回归模型进行方差分析补充,具体结果如表 11 所示。

表 11 多因素控制的运行速度模型方差分析结果

Tab. 11 ANOVA results of running speed model with multi-factor control

运行状态	特征点运行速度标准值	SST	SSR	SSE	MSR	MSE	F	p
减速后加速	V_c^b	0.878	0.866	0.012	0.216	0.004	53.677	0.004
	V_{bc}^b	0.836	0.816	0.020	0.204	0.007	30.023	0.009
	V_{rq}^b	0.792	0.765	0.027	0.191	0.008	21.470	0.015
二次减速	V_c^b	0.700	0.609	0.092	0.609	0.023	26.508	0.007
	V_{rz}^b	0.742	0.732	0.010	0.366	0.003	114.206	0.001

表 11 中列出了总平方和(SST)、回归平方和(SSR)、残差平方和(SSE)、均方回归(MSR)、均方误差(MSE)、 F 统计量,以及 p 值等关键统计量。由分析结果可知:本文构建的运行速度模型置信水平为 95%。

4 模型对比

现行规范 JTG B05—2015《公路项目安全性评

表 13 各主线路段运行速度规范模型测算结果与误差计算表

Tab. 13 Calculation results and error calculation table of the standard model of running speed of each main line section

特征点运行速度	路段编号									
	I _{1,2}		I _{3,2}		I _{9,1}		I _{11,2}		I _{13,1}	
	$\Delta/\%$	MAPE/ $\%$	$\Delta/\%$	MAPE/ $\%$	$\Delta/\%$	MAPE/ $\%$	$\Delta/\%$	MAPE/ $\%$	$\Delta/\%$	MAPE/ $\%$
V_{cq}	13.194		13.312		9.791		11.032		11.684	
V_c	9.478		10.866		7.560		11.069		6.001	
V_{cz}	10.422		11.217		7.740		9.964		6.466	
V_{bc}	11.968	11.840	10.954	11.483	6.601	7.858	11.156	10.707	6.522	7.128
V_{rq}	12.758		10.583		7.982		12.099		6.568	
V_r	12.158		11.752		7.697		11.032		6.087	
V_{rz}	12.902		11.693		7.635		8.598		6.571	

由表 13 和图 9 可见:本文模型的预测结果更好。其中,预测值 1 是基于“减速后加速”运行状态特征点的运行速度回归模型计算所得;预测值 2 则是基于“二次减速”运行状态特征点的运行速度回归模型计算所得;对于新建的立交主线段,无法直接预判车辆运行状态。因此,本文采用 2 种模型预测结果的平均值作为最终预测值,折中对新建路段主线运行速度进行预测。规范所用模型的预测值 Δ 范围为 6.001%~13.312%;相比之下,模型 1、模型 2 和融合模型的预测精度更高,其 Δ 范围分别为 0.172%~6.526%、0.178%~6.982% 和 0.145%~4.779%。显然,规范所用模型的 Δ 整体高于模型 1、模型 2 和融合模型。此外,规范所用模型在所有路段中的 MAPE 为 7%,而模型 1、模型 2 和融合模型的最大 MAPE 值分别为 5.064%、4.231%和 3.505%,均低于规范所用模型的最小 MAPE 值。

价规范》中关于高速公路立交区域主线段运行速度的规定为:主线路段运行速度宜在不考虑划分互通式立体交叉分析单元之前的运行速度预测基础上,按表 12 进行折减。

表 12 互通式立体交叉主线路段运行速度折减值

Tab. 12 Depreciation of the running speed of the interconnected three-dimensional intersecting main line section

车型	最大折减值/(km/h)
小型车	-8
大型车	-5

按照规范要求,利用纬地安全分析软件^[30]对各主线路段运行速度进行分析测算,由于验证立交主线路段平纵组合指标比较好,并不需要进行弯坡组合折减,测算出重型货车在立交主线路段的运行速度均为 75 km/h。因此,按照规范模型测算的运行速度相对误差与平均绝对误差值如表 13 所示。模型预测对比如图 9 所示。

本文构建的互通立交主线段运行速度模型在捕捉复杂交通特性方面表现更为优越,尤其是在实际工程应用中的适应性和稳定性更强。因此,综合考虑预测精度和实际适用性,本文模型在互通立交主线段运行速度预测中具有明显优势。

5 结束语

本文基于高频 GNSS 轨迹数据,将互通立交主线划分为出口、入口及过渡段这 3 类区段,揭示了重型货车速度分布规律,并识别出“减速后加速”与“二次减速”2 种典型运行状态。研究成果可为平纵线形协同设计提供量化依据。本模型主要基于自由流或低饱和度交通状态数据构建,适用于几何线形对速度起主导作用的场景。

本文解析了关键特征点的速度分布及差异特性,考察了 2 种典型运行状态下的加速度分布,为理

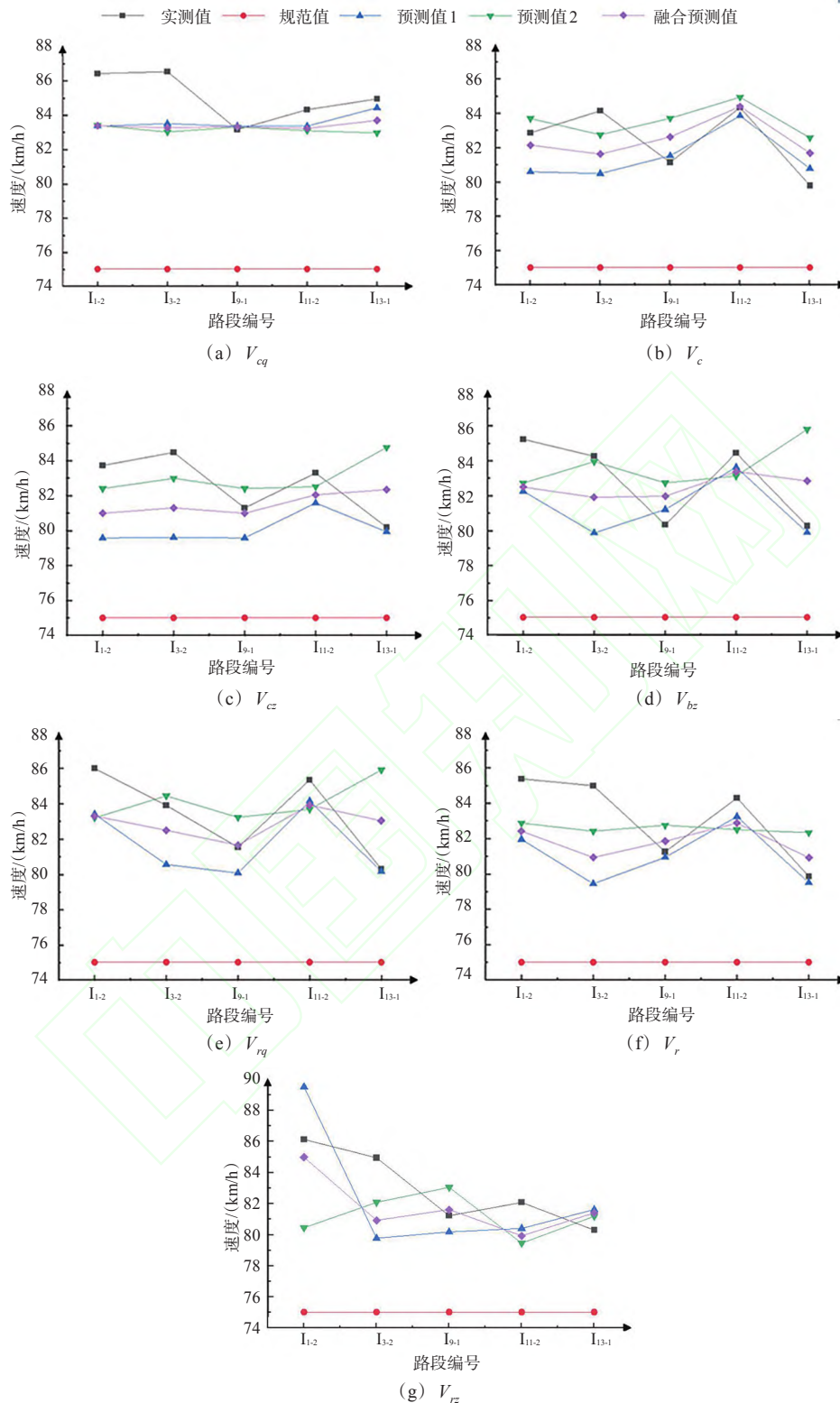


图9 模型预测对比图

Fig. 9 Comparison of model predictions

解重型货车动力学特性提供了数据支撑。鉴于当前尚未建立运行状态的自动判别方法,未来研究拟结合机器学习技术,融合道路几何、交通流、历史速度数据,构建运行状态分类模型以实现立交主线路段运行状态的自动识别与分类。

本文在现有研究基础上,拓展了研究范围,将立交区域主线段纳入研究体系,构建了覆盖主线段全范围的运行速度预测模型。通过单变量分析与逐步回归方法,系统性地考虑了主线段几何特征的影响,建立了适用于不同运行状态下的速度预测模

型。本文研究深化了对立交区域运行速度特征的认识,为主线段与匝道的协同优化设计提供了理论支撑,对完善立交区域运行速度研究体系具有积极意义。

本文的数据主要来源于设计速度为80~120 km/h、主线为双向4~6车道的西部地区高速公路互通立交,车辆类型限定为总质量 ≥ 25 t的重型货车。西部地区地势起伏较大,山区高速公路占比高,而东部地区则以平原为主,道路线形条件相对平缓;此外,西部地区重型货车的比例可能高于东部地区,且车辆载重和运输模式也可能存在差异。因此,对于设计速度高于120 km/h、主线车道数大于6车道,或平原微丘区域等更宽畅线形条件下的场景,其适用性受到限制。

模型分析结果表明:预测值与实际观测值之间具有良好的一致性,其中残差最大绝对值为5.498 km/h,且2种运行状态下的各特征点运行速度模型残差均符合正态分布。方差分析进一步证实了模型具有良好的预测精度与可信度。该模型揭示了道路几何特征与重型货车速度的定量关系及参数敏感性,可为既有立交安全改造提供理论支撑,有效弥补现行规范静态折减方法的不足。

参考文献

References

- [1] 胡江碧,何禄诚,王荣华.高速公路互通立交安全性评价研究综述[J].中国公路学报,2020,33(7):17-28.
HU J B, HE L C, WANG R H. Review of safety evaluation research for expressway interchanges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 17-28. (in Chinese)
- [2] 张敏,刘锴,张驰,等.基于GPS数据的互通立交匝道货车运行速度预测模型[J].交通运输工程学报,2024,24(4):228-242.
ZHANG M, LIU K, ZHANG C, et al. Prediction model for truck operating speed on interchange ramps based on GPS data[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(4): 228-242. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国交通运输部.公路项目安全性评价规范:JTG B05-2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [4] 田林,许金良,贾兴利,等.基于运行速度的高海拔地区一级公路长直线路段限速值[J].公路交通科技,2019,36(1):138-142.
TIAN L, XU J L, JIA X L, et al. Speed limit value for long straight sections of first-class highways in high-altitude areas based on operating speed[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(1): 138-142. (in Chinese)
- [5] 张驰,王茜茹,向宇杰,等.基于平纵组合的山区高速公路连续下坡路段行车安全评价方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(5):78-90.
ZHANG C, WANG Q R, XIANG Y J, et al. Safety evaluation method for continuous downhill sections of mountain expressways based on horizontal and vertical alignment combination[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2024, 43(5): 78-90. (in Chinese)
- [6] 王延鹏,张杰,潘存书,等.高速公路小净距互通立交车辆纵向运行特性[J].交通信息与安全,2024,42(2):147-157.
WANG Y P, ZHANG J, PAN C S, et al. Longitudinal operating characteristics of vehicles at expressway short-spacing interchanges[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(2): 147-157. (in Chinese)
- [7] 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 C, GAO Y Y, YANG R W, et al. Operating speed model for short-spacing sections of interchange tunnels based on aerial survey data[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(2): 136-150. (in Chinese)
- [8] 邹峰,张驰,李超同,等.高原山区双车道公路超车车道设置条件与参数[J].公路交通科技,2024,41(8):114-128.
ZOU F, ZHANG C, LI C T, et al. Setting conditions and parameters of overtaking lanes for two-lane highways in plateau mountainous areas[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(8): 114-128. (in Chinese)
- [9] 张驰,任士鹏,王博,等.长大下坡路段货车运行速度特性及预测[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(3):38-49.
ZHANG C, REN S P, WANG B, et al. Operating speed characteristics and prediction of trucks on long downhill sections[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(3): 38-49. (in Chinese)
- [10] 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 J L, YE Y L, SU Y P, et al. Operating speed prediction model for vehicles on grade sections of two-lane class-II highways[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 31-36. (in Chinese)
- [11] 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 Y, WANG H T, WAN L, et al. Driving workload model under different tunnel lateral widths based on factor analysis and entropy method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(2): 190-202. (in Chinese)

- [12] 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 Z D, RONG J, ZHOU W. Operating speed model for passenger cars in expressway tunnel sections[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 123-127. (in Chinese)
- [13] 柯星安, 赵丹, 王秋鸿, 等. 基于模型群的重型货车交通安全风险因素分析[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(4): 72-80.
KE X A, ZHAO D, WANG Q H, et al. Analysis of traffic safety risk factors for heavy trucks based on model ensemble[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(4): 72-80. (in Chinese)
- [14] LI Y, ZHAO L, RILETT L R. Driving performances assessment based on speed variation using dedicated route truck GPS data[J]. IEEE Access, 2019(7): 51002-51013.
- [15] GALINSKI M, DANYLOV V, LEHOCZKY P, et al. Ultra-fast visible lane distance estimation using a single camera[J]. IEEE Access, 2024, 12: 79251-79263.
- [16] BACHMANN C, ABDULHAI B, ROORDA M J, et al. A comparative assessment of multi-sensor data fusion techniques for freeway traffic speed estimation using microsimulation modeling[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 26: 33-48.
- [17] JIANG Z, LIU Y, FAN X L, et al. Understanding urban structures and crowd dynamics leveraging large-scale vehicle mobility data [J]. Frontiers of Computer Science, 2020, 14(5): 145310.
- [18] 唐炉亮, 赵紫龙, 杨雪, 等. 大数据环境下道路场景高时空分辨率众包感知方法[J]. 测绘学报. 2022, 51(6): 1070-1090.
TANG L L, ZHAO Z L, YANG X, et al. Crowdsensing method with high spatiotemporal resolution for road scenes in big data environment[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 1070-1090. (in Chinese)
- [19] PREMIER N N N. 基于交互式道路安全设计模型的山区双车道公路事故预测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
PREMIER N N N. Research on accident prediction for mountainous two-lane highways based on interactive road safety design model[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [20] ZHENG S, MENG Y, CAI H, et al. Research on highway accident prediction based on interactive highway safety design mode[C]. The International Conference on Smart Transportation and City Engineering, Zhengzhou, China: SPIE, 2021
- [21] TOLA A M, DEMISSIE T A, SAATHOFF F, et al. A predictive approach to identify geometrically hazardous road segments and evaluate the relative safety effects of design alternatives[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 3026.
- [22] 罗冬宇, 王江锋, 陈景雅, 等. 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(自然科学版), 2021, 49(7): 17-25.
LUO D Y, WANG J F, CHEN J Y, et al. Operating speed prediction based on dynamic sight distance in 3D point cloud environment[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(7): 17-25. (in Chinese)
- [23] 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 C, ZHANG S R, WANG Y Q. Operating speed prediction model for passenger cars in expressway tunnel sections[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(4): 95-101. (in Chinese)
- [24] GRENGS J, WANG X, KOSTYNIUK L. Using GPS data to understand driving behavior[J]. Journal of Urban Technology, 2008, 15(2): 33-53.
- [25] YANG Y, JIA B, YAN X Y, et al. Identifying intracity freight trip ends from heavy truck GPS trajectories[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 136: 103564.
- [26] ZHANG X, WANG X, BAO Y, et al. Safety assessment of trucks based on GPS and in-vehicle monitoring data[J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 168: 106619.
- [27] JASPER S, JACQUELINE K, SCOTT D, et al. Dynamic accuracy of GPS receivers for use in health research: a novel method to assess GPS accuracy in real-world settings [J]. Frontiers in Public Health, 2014.
- [28] 付元. 基于轨迹数据的异常驾驶行为与道路交通安全风险辨识方法[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
FU Y. Identification method of abnormal driving behavior and road traffic safety risk based on trajectory data[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [29] 袁胜强, 景啸, 史程祥. 城市地下互通立交通行能力计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 236-242.
YUAN S Q, JING X, SHI C X. Capacity calculation of urban underground interchanges[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(2): 236-242. (in Chinese)