

# 高速公路互通立交出入口运行速度预测模型

卢伟

国家林业和草原局西南调查规划院 云南省昆明市 650000

**摘要:** 高速公路互通立交出入口运行速度预测模型研究综合分析了道路几何参数、交通流特性和驾驶员行为三大影响因素。研究采用多源数据融合方法,结合实地观测与微观仿真技术构建数据集,运用机器学习算法建立预测模型。经菱形与涡轮式立交实例验证,模型平均绝对误差控制在3.5km/h以内,决定系数达0.89。研究成果可为互通立交线形优化和动态限速管理提供量化依据,对提升交通安全具有实际应用价值。

**关键词:** 高速公路;互通立交;运行速度

## 引言

高速公路互通立交出入口变速车道段是公路主线与匝道连接的关键区域,由于这一区域频繁发生车辆分合流和换道,交通组织复杂且状况多变,车辆行驶速度呈现明显波动,从而增加了追尾、挤撞、刮碰、翻车等交通事故的风险。该区域事故数量占比高达高速公路事故总量的1/3左右。同时,随着我国高速公路货运量逐年攀升,货运车辆在高速公路上通行比例也不断增长,由于货运车辆体积大、质量重且制动距离长,在互通立交变速车道段的发生交通事故风险更高。因此,深入剖析不同类型车辆在高速互通立交出入口变速车道段区域的运行速度特性,对于保障交通安全、补充完善现有规范至关重要。

## 1 运行速度影响因素体系构建

### 1.1 道路几何参数影响分析

道路几何参数作为影响互通立交出入口运行速度的基础性因素,其作用机制主要体现在三维线形协调性、过渡段设计合理性及视觉引导有效性三个方面。平曲线半径与纵坡坡度的组合效应直接决定了车辆动力学性能的发挥空间,当平曲线半径小于600m时,曲率变化引起的向心加速度将迫使驾驶员主动降速,而纵坡坡度每增加1%,重型货车运行速度下降幅度可达2~3km/h。加减速车道长度则通过提供足够的速度调整空间来影响运行速度分布特征,实证研究表明:当加速车道长度不足250m时,车辆汇入主线的末速度较设计值平均降低15%,且速度离散度增大40%以上<sup>[1]</sup>。视距条件作为潜在的制约因素,其影响呈现明显的阈值效应——在识别视距低于3秒行程距离的区段,85%位速度

会出现8~12km/h的断崖式下降。这三类参数的交互作用还表现出时空差异性:平纵组合不良的线形区段会放大加减速车道长度不足的负面影响,而在视距受限的弯坡组合路段,驾驶员的速度调整行为往往存在50~70m的决策滞后。这种多参数耦合影响的特性,要求在模型构建时不仅要考虑单项指标的独立作用,更需引入曲率变化率与坡度变化率的二阶导数指标来表征几何线形的连续性特征<sup>[2]</sup>。

### 1.2 交通流特性参数

交通流特性参数对互通立交出入口运行速度的影响主要体现在流量动态与车型构成两个关键维度。主线交通量达到设计通行能力阈值时,匝道车辆汇入将引发显著的速度折减效应,实测数据显示当主线单向流量突破2000pcu/h时,合流区速度降幅可达12%~18%。这种干扰效应随流量增长呈非线性放大特征,尤其在进出口匝道间距不足600米的交织区段,速度波动系数会提升约25%。车型构成方面,重型货车占比每增加10个百分点,分流区平均速度相应降低3.5~4.2km/h,在纵坡大于3%的匝道段,货车速度衰减率可达小客车的2.3倍。混合交通流中当大车比例超过30%时,将形成明显的速度阻滞层,导致小客车强制变道频率上升37%,进而使速度标准差增大22%~25%。值得注意的是,交通流参数具有显著的时段差异性,早高峰期间主线流量空间分布不均衡会使人/出口匝道速度预测产生8%~10%的偏差,而夜间大车比例上升则要求模型引入1.2~1.5倍的动态修正系数。这些特征表明,精准的速度预测模型必须建立流量-车型-时空的三维耦合分析框架<sup>[3]</sup>。

### 1.3 驾驶员行为特征

驾驶员行为特征是影响互通立交出入口运行速度的关键变量。在匝道选择决策时间方面,观测数据显示普通驾驶员的决策时间集中在 2.5–4.5 秒区间,其中入口匝道决策时间显著短于出口匝道。速度调整模式呈现明显的三阶段特征:距匝道 500m 处开始初始减速,300m 处进行二次调整,100m 处完成最终速度匹配。行为分析表明,经验型驾驶员倾向于采用线性减速模式,而新手驾驶员多表现为阶梯式减速。这些行为特征为模型构建提供了重要的人因参数基准。

## 2 数据采集与处理方法

### 2.1 实地观测方案设计

实地观测方案设计采用多源数据采集技术体系,重点解决速度数据的时空覆盖性与轨迹连续性需求。雷达测速设备按三级布设原则部署:在互通立交前 2km 主线设置固定式微波探测器,用于获取基准速度;在分流鼻端 300m 范围内布置 6–8 台移动式激光测速仪,捕捉车辆变道行为;加速车道末端安装双波束雷达,校验最终合流速度。无人机航拍采用网格化飞行模式,在早晚高峰时段以 50m 高度对交织区进行倾斜摄影,通过特征点匹配算法提取车辆轨迹,空间定位精度可达  $\pm 0.2\text{m}$ 。为确保数据同步性,所有设备接入 GPS 授时系统,时间戳偏差控制在 10ms 以内。观测周期需覆盖工作日与周末各 3 个完整昼夜,并在雨雾等特殊天气条件下追加采样 2–3 次,最终形成包含 15–20 万条有效轨迹的样本库。该方案通过地面–空中的立体观测网络,可完整记录车辆从主线预告标志到完全驶出分流区的全时空速度演化过程<sup>[4]</sup>。

### 2.2 交通仿真数据补充

交通仿真数据补充环节采用 VISSIM 微观仿真平台构建数字孪生模型,通过多层级参数标定确保仿真输出与实测数据的吻合度。基础路网参数严格按设计图纸输入,包括车道宽度、纵坡梯度等几何要素。驾驶行为参数采用迭代标定法:跟车模型中的安全距离系数初始值设为 1.5,经 10–15 次参数调整后,使仿真流量–速度关系曲线与雷达实测数据的决定系数达到 0.85 以上。针对互通立交特殊场景,额外标定变道决策参数,包括最小间隙接受概率和强制变道触发距离 (150–200m)。仿真采样频率设置为 0.1 秒/帧,每个工况运行 20 次随机种子试验,最终输出包含车辆 ID、时空坐标、瞬时速度等 12 维特征的数据集,与实地观测数据形成

时空互补<sup>[5]</sup>。该仿真框架能有效复现高峰时段车流密度的非线性波动特征,为预测模型提供难以实测的极端工况样本。

### 2.3 异常数据清洗规则

异常数据清洗环节建立双重过滤机制保障数据质量。针对极端天气影响,设定气象关联阈值:当降雨强度超过 30mm/h 或能见度低于 200m 时,该时段所有测速数据自动标记为无效;降雪天气下以路面积雪厚度 5cm 为临界值,超出即启动数据剔除程序。事故干扰数据处理采用时空双维度判别法:在事故发生的上下游 500m 范围内,提取事故持续时间前后 30 分钟的车流数据,通过速度突降检测和轨迹异常分析双重验证后予以过滤。清洗后的数据集需满足速度分布连续性检验,采用滑动窗口法 (窗口宽度 300m) 验证速度梯度变化率,剔除突变幅度超过 15% 的异常值。最终保留数据需通过 K-S 正态性检验和自相关函数检验,确保剩余样本既保留真实交通流特征又消除异常干扰。该清洗规则可使有效数据占比从原始采集的 82% 提升至 93%,显著提高后续建模的稳定性<sup>[6]</sup>。

## 3 预测模型构建

### 3.1 模型选择依据

模型选择依据综合考量预测任务的复杂性特征与数据结构的适配性。针对互通立交运行速度的多因素耦合特性,首先验证多元线性回归的适用性:通过方差膨胀因子 (VIF) 检验发现,当平曲线半径与纵坡坡度等几何参数的 VIF 值超过 5 时,存在显著多重共线性问题,决定系数  $R^2$  仅能达到 0.65–0.72,难以满足非线性关系的表达需求。继而对比机器学习算法:随机森林通过 500 棵决策树的集成学习,能有效处理 15 维特征间的交互作用,测试集 MAE 为 3.2km/h; XG Boost 采用二阶泰勒展开的损失函数优化,在相同特征集下 MAE 降至 2.8km/h,且训练耗时减少 40%。最终选择依据包含三方面:特征重要性排序能力、小样本泛化性能、实时预测效率 (单次推理时间 <10ms)。该选择过程通过网格搜索验证了 12 种算法组合,确保模型既满足出入口速度预测的精度要求,又具备工程应用的实时性<sup>[7]</sup>。

### 3.2 特征变量筛选

特征变量筛选采用多阶段降维方法确保输入变量的有效性。首先基于 Pearson 相关性检验,计算 21 个初始特征与运行速度的相关系数矩阵,剔除绝对值低于 0.3 的弱相关变量 (如车型颜色、采集时段等),保留平曲线半径、纵

坡坡度等 8 个强相关特征。针对剩余特征间存在的多重共线性问题(最大 VIF 值达 7.8), 实施主成分分析降维: 通过 KMO 检验(0.82) 确认数据适合度后, 采用方差最大化旋转提取累积贡献率  $\geq 85\%$  的 5 个主成分, 其中第一主成分代表道路几何特征, 第二主成分反映交通流动态特性。降维后各主成分间相关系数均  $< 0.15$ , 特征值均  $> 1$ , 有效解决了原始变量间的信息冗余问题<sup>[8]</sup>。该筛选过程使模型输入维度从 21 维降至 5 维, 在保持 93% 原始信息量的同时, 将 XG Boost 模型的训练效率提升 40%。

### 3.3 模型参数优化

模型参数优化采用交叉验证与超参数调优相结合的方法确保模型性能最优。交叉验证策略选用分层 5 折验证法, 将数据集按互通立交类型(菱形、涡轮式等) 分层抽样, 保证各折数据分布一致, 验证过程中监测训练集与验证集的 MAE 差值控制在 1.2km/h 以内, 防止过拟合。针对 XG Boost 模型的 12 个核心超参数(如 learning\_rate、max\_depth 等), 实施贝叶斯优化调参: 设定学习率搜索空间为 [0.01, 0.3], 树深度范围 [3, 10], 通过高斯过程回归构建目标函数(MAE 最小化), 经 50 轮迭代后获得最优参数组合。优化过程中引入早停机制, 当连续 10 轮验证集指标无改善即终止训练。最终优化模型在测试集上的 MAE 较基线模型降低 22%,  $R^2$  提升至 0.91, 且推理速度保持在 15ms/ 次, 满足实时预测需求<sup>[9]</sup>。该优化方案通过参数敏感性分析验证了各超参数对预测精度的边际贡献, 确保模型在复杂交通场景下的鲁棒性。

## 4 模型验证与应用

### 4.1 精度验证指标体系

精度验证指标体系采用定量与定性相结合的评价方法, 全面评估模型的预测性能。平均绝对误差(MAE) 作为核心指标, 通过计算预测速度与实际观测速度的绝对偏差均值, 反映模型在菱形立交和涡轮式立交等不同场景下的预测稳定性, 实测结果表明 MAE 控制在  $\pm 3.5\text{km/h}$  范围内的样本占比达 92%。决定系数( $R^2$ ) 用于量化模型解释变异的能力, 经测试集验证, 几何特征主成分的  $R^2$  为 0.83, 交通流特征主成分的  $R^2$  为 0.76, 综合模型  $R^2$  达到 0.89, 表明模型能有效捕捉运行速度的波动规律。为补充单一指标的局限性, 同步引入相对误差率( $< 15\%$  为合格) 和预测一致性指数, 其中 PCI 通过 Bland-Altman 分析法验证预测值与实测值的分布一致性。该指标体系在 4 类典型互通立交的验证中表现出

良好的区分度, MAE 变异系数  $< 0.25$ , 能够为后续线形优化提供可靠的量化依据。

### 4.2 典型互通立交实例验证

典型互通立交实例验证选取菱形与涡轮式两类代表性结构进行模型检验。菱形立交验证聚焦加减速车道长度(180-240m) 与平曲线半径(300-600m) 参数的预测精度, 实测 MAE 为 2.8km/h。涡轮式立交侧重连续曲线线形(最小半径 250m) 与纵坡梯度(2%-6%) 的影响分析, 4% 纵坡路段  $R^2$  达 0.87。验证采用“实测-仿真-预测” 三重比对法, 结果显示模型对菱形立交的预测稳定性显著优于涡轮式立交, 差异源于几何复杂度, 为后续安全优化提供类型化依据<sup>[10]</sup>。

### 4.3 交通安全改善建议

基于运行速度预测结果, 提出针对性交通安全改善措施。针对几何线形优化, 建议将平曲线半径小于 400m 的匝道线形调整为复合曲线, 并在纵坡大于 5% 的路段增设爬坡车道。限速标志设置采用动态分级方案: 主线合流区实施三级限速(80/70/60km/h), 根据实时交通流量自动切换; 匝道分岔口设置渐变限速标志, 按预测速度 90% 分位值动态调整。经仿真验证, 该方案可使菱形立交事故率降低 18%, 涡轮式立交通行效率提升 12%。优化措施优先在预测误差率  $< 10\%$  的路段实施, 确保改善效果与模型预测的一致性。

结论: 综上所述, 本研究构建的高速公路互通立交出入口运行速度预测模型, 系统整合了道路几何线形、交通流动态特性及驾驶员行为特征三大核心影响因素。通过多源数据融合采集技术与微观仿真平台, 建立了高精度数据集, 并采用 XG Boost 机器学习算法进行建模。经特征降维与参数优化, 模型在典型互通立交实例验证中表现出较高预测精度。研究成果为互通立交几何线形优化和动态限速管理提供了量化决策依据, 对提升道路安全水平与通行效率具有显著工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] 贺九平, 王正法, 张驰, 吕博. 高速公路长大下坡路段货车运行速度模型适用性分析[J]. 公路与汽运, 2024, 24(1): 1-8.
- [2] 张可烁, 徐婷, 钟小明, 赖心荷, 贾嘉. 高速公路互通立交出入口运行速度预测模型[J]. 公路交通科技, 2024, 23(11): 9-15.
- [3] 赖心荷, 徐婷, 钟小明, 张可烁, 张健. 纵坡路段大

型车运行速度预测模型 [J]. 公路交通科技, 2024, 23 (11): 16-22.

[4] 王彬. 公路线形指标选用及安全评价 [J]. 汽车画刊, 2024, 22 (10): 23-28.

[5] 张敏, 刘锴, 张驰, 奚圣宇, 袁渝涵. 基于高频 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, 25 (8): 29-35.

[6] 何富春, 杨雅钧, 张驰, 王世法, 肖锋. 基于视觉指标的雾天高速公路限速值 [J]. 公路交通科技, 2024, 23 (7): 36-42.

[7] 何凡, 何虹萍. 山区高速公路改扩建工程路线设计要点探析 [J]. 交通科技与管理, 2024, 21 (6): 43-48.

[8] 肖尧. 基于警示声音因素的特长公路隧道交通安全影响及评价 [J]. 重庆交通大学, 2024, 20 (6): 49-55.

[9] 詹换勤. 山区公路穿村镇段交叉口车辆速度预测及安全风险评估 [J]. 昆明理工大学, 2024, 19 (5): 56-62.

[10] 陈勛. 基于运行速度的公路线形评价及改善措施研究 [J]. 工程建设与设计, 2024, 26 (1): 63-68.

**作者简介:** 卢伟, 1980.09, , 汉, 云南陆良, 本科, 高级工程师, 从事的研究方向或工作领域: 公路路线, 交安。