

基于 v/C 比和载重汽车混入率的高速公路基本路段车辆平均行程时间预测模型

景立竹¹, 李群善², 许金良¹, 贾兴利¹, 刘江³, 韩跃杰¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 青海省交通建设工程造价管理站, 青海 西宁 810003;
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:为了研究高速公路交通流状态对车辆通行时间的影响,以路段交通流饱和度 v/C 比(v 为路段交通量, C 为通行能力)和载重汽车混入率 P 作为综合反映交通流状态的基本指标。在 P 保持一致的前提下,在西安绕城高速公路选择满足特定几何条件的基本路段作为试验路段,采用基于媒体访问控制(MAC)地址的交通数据采集设备开展行程时间测定试验,采集小客车和两轴轻型载重汽车在不同 v/C 比下的行程时间数据。在此基础上,提出单位距离平均行程时间概念,采用 SPSS 回归分析法,分别建立适用于小客车和载重汽车的单位距离平均行程时间随 v/C 比呈指数变化的关系模型,并通过对比试验,对模型在不同线形条件下的适用性和预测结果准确性进行检验。以参数敏感性分析为依据,利用正交试验对 VISSIM 软件中的最小车头时距、平均停车距离、驾驶人期望车头时距 3 个仿真参数进行校准与修正,在此基础上开展不同 P 条件下的车辆平均行程时间仿真试验。结果表明:当 P 不同时,车辆单位距离平均行程时间预测模型中的 3 个修正系数也不相同;在 $P \in [0\%, 50\%]$ 、 $v/C \in [0.15, 1.25]$ 条件下, P 越大,同一车型在同一 v/C 比状态下的单位距离平均行程时间也越大;与载重汽车相比, v/C 比改变对小客车单位距离平均行程时间的影响更显著。研究结论可以为降低出行者时间成本、提高区域交通运行效率提供指导。

关键词:交通工程;行程时间;预测模型;高速公路基本路段; v/C 比;载重汽车混入率;通行效率
中图分类号:U491.1 **文献标志码:**A

Average travel time prediction model in basic expressway sections based on v/C ratio and truck percentage

JING Li-zhu¹, LI Qun-shan², XU Jin-liang¹, JIA Xing-li¹, LIU Jiang³, HAN Yue-jie¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Qinghai Province Traffic Construction Project Cost Management Station, Xining 810003, Qinghai, China; 3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: To reveal how traffic flow conditions influence travel time, traffic flow volume to capacity (v/C) ratios (where, v and C is traffic volume and capacity of road section) and truck percentages P were selected as indices to reflect traffic flow status. Several basic expressway sections that met specific geometric requirements were chosen as test sections along the Xi'an

Loop Expressway. Traffic travel time data for both passenger cars and two-axle light-duty trucks with different v/C ratios were collected using MAC-address-based equipment. Based on this, the concept of average travel time per kilometer was proposed, and SPSS regression analysis was used to establish prediction models of the exponential travel time that could be applied to trucks and passenger cars. The accuracies of the prediction models and their applicability under different geometric conditions were also tested and verified through comparative experiments. Based on parameter sensitivity analysis, the values of minimum headway, average stopping distance, and driver's expected headway in VISSIM were calibrated using the method of orthogonal experimental design. The results show that the values of the 3 correction factors in travel time prediction models are different with respect to different truck percentages. The greater the P , the longer the average travel time per kilometer for a given v/C ratio. The change in v/C ratio has a greater influence on a passenger car's average travel time per kilometer than on a truck's. Based on the simulation experiments, travel time prediction models were proposed for v/C ratios from 0.15 to 1.25 and truck percentages from 0% to 50%. The results of this study contribute toward saving travel time and improving traffic efficiency. 3 tabs, 4 figs, 23 refs.

Key words: traffic engineering; travel time; prediction model; basic expressway section; v/C ratio; truck percentage; traffic efficiency

0 引言

行程时间是反映道路运行状态的重要指标,也是道路使用者安排出行计划、选择出行路径的重点考虑因素之一。排除道路几何指标、路面条件、天气状况、突发事件、车辆动力性能等方面的差别^[1-4],交通流状况,特别是路段负荷程度和车流中的车型分布情况亦是影响车辆行驶速度及行程时间的重要因素^[5-6]。对于一些使用年限较长、吸引交通量较大、重载交通所占比例较高的高速公路路段,其通行效率降低、公路功能不能得到充分发挥的问题已愈发引起重视。如何估算不同交通流状态下的车辆通行时间,进而提出以降低出行时间成本、提高路网整体运行效率为首要目标的高速公路车流管理策略以及改扩建决策,成为现阶段的研究目标之一。

国内外学者在车辆通行效率预测领域已取得了相对成熟的研究成果,通过理论推导、回归分析、软件仿真等多种方式建立了交通流参数、车辆行驶速度、行程时间的相关关系。在理论模型研究方面,从最初的 Greenshields 模型、Greenberg 模型、Underwood 模型^[7-8],到后来的美国联邦公路局模型^[9],都是研究交通流宏观特性的基础性模型。在此基础上,Kachroo 等^[10]、Pirc 等^[11]分别采用改进的贝克曼公式和稀疏车辆轨迹法推导了交通流密度与行程时间的相关关系。Coifman 利用双闭环数据采集设备采集高速公路路段行车速度,揭示了平均行驶速

度随交通流密度的变化规律^[12]。Yeon 等运用离散马尔科夫链提出了路段发生拥堵时车辆行程时间的估算方法^[13]。Lu 等研究了高速公路车流组成对车辆行程时间的影响^[14]。杨兆升等以交通流量和占有率为自变量,确定了二者的权重,基于 Fuzzy 回归建立了适用于城市快速路的行程时间预测模型^[15]。李继伟以车辆 GPS 信息为基础,针对城市主次干道建立了交通量与车辆瞬时速度的关系模型,进而推导出交通量与行程时间的相关关系^[16]。刘利娟等借助 MITSIM 仿真软件,揭示了路段长度、交通流量对行程时间波动性的影响规律^[17]。梁国华等借助 VISSIM 模型研究了大型车混入率对行程时间平均延误率的影响^[18]。

上述研究存在的问题包括但不限于:①相比于延误率、行程时间标准差、最小行程时间等与行程时间可靠性相关的参数,以及平均行驶速度、瞬时速度等与速度相关的参数,对于道路使用者,行程时间最容易理解和直接作为出行参考指标,因此,选择以平均行程时间作为因变量能使研究成果更具直观性和实用性;②单纯以交通量或交通流密度作为自变量并不能全面反映道路交通流状态,车道数的不同、交通组成的差异都可能对车辆的变道、跟驰、加减速行为产生影响,进而影响其行驶速度及行程时间;③以交通流饱和度衡量路段交通状态可在一定程度上消除车道数的影响,但还需考虑交通组成的影响。由于载重汽车的运行速度普遍低于小客车,如果载重

汽车在交通组成中所占比例较大,则对其他车辆运行效率及行程时间的影响不容忽视。

针对目前研究成果中存在的不足,本文以变量直观、易于采集、运算简洁为原则,选用 v/C 比和载重汽车混入率 P 作为综合反映道路交通流状态的基本指标, v 为路段交通量, C 为通行能力。采用现场试验与仿真模拟相结合的方法,利用实测数据建立模型,用仿真软件验证并改进模型,研究车辆行程时间随 v/C 比和载重汽车混入率的变化规律,从而实现快速预测车辆平均行程时间的目的。

1 车辆行程时间测定试验

VISSIM、Paramics、TranStar、MITSIM 等软件都可以从宏观层面模拟交通量、交通流密度以及车辆行驶速度之间的关系^[19-22],但软件仿真往往会因为边界条件参数的准确性难以保证而导致仿真结果与实际情况有一定误差。随着现代信息技术的不断发展,交通数据采集设备已越来越趋于自动化、精确化、高效化,本文采用现场实测方法采集车辆行程时间数据,真实反映道路交通状况及车辆运行状态。

1.1 试验路段及试验对象

为了尽可能多获取多种交通流饱和度数值对应的行程时间数据,在西安绕城高速公路不同时段进行数据采集。为了确保车辆行程时间在试验路段范围内能呈现出明显差别,同时避免起终点处的数据采集设备之间的信号干扰,要求试验路段长度不能小于 3 km。为保证试验变量单一性,试验路段设计速度均为 120 km/h,载重汽车混入率 P (两轴及以上平车、自卸车、牵引车、箱车、半挂车等货车在路段车辆总数中所占的比例)约为 15%,变化范围不超过 2%。试验路段起终点选择在高速公路基本路段范围内,即不受立体交叉匝道附近合流、分流和交织影响的高速公路路段,以确保车辆在试验路段内保持稳定的行驶状态。考虑到在隧道路段行驶时,驾驶人受到光线明暗变化、车道数变化等因素的影响,其行驶速度特征区别于一般路段,因此试验路段内不含有隧道,且距隧道出入口至少 1 km。研究表明,当圆曲线半径不小于 2 000 m,纵坡坡度不超过 2%时,高速公路线形对车辆行驶速度及行程时间的影响可忽略不计^[23]。本文确定西安绕城高速公路 K1+489~K4+850、K9+016~K12+195、K33+130~K37+000、K48+540~K52+003、K75+450~K78+450 这 5 个路段为试验路段,其圆曲线半径为 3 000~5 500 m、纵坡坡度为 -1.5%~1.5%。试

验期间无不良天气,驾驶人视野清晰,无车祸、紧急停车带被占用等突发事件。可以认为在本文试验条件下, v/C 比是引起车辆行驶速度改变,造成行程时间变化的唯一影响因素。

西安绕城高速公路阿房宫收费站、曲江收费站 2017 年 11 月 11 日至 12 日的车流量及车型分布统计数据显示,核定载客人数 9 人以下的小型载客汽车及车身长度小于 6 000 mm、总质量 1.8~6.0 t 的两轴轻型载重汽车在交通量中所占比例最大,分别为 73.4%和 8.1%。这 2 种车型的动力性能、载重量等参数存在很大差异,在相同交通条件下,其速度特征呈现明显差别。因此,本文以这 2 种车型作为试验路段客车、货车的典型代表车型,研究分析其交通流饱和度对行程时间的影响。

1.2 数据采集原理及试验方案

采用 RoadTrend 交通数据采集器获取车辆行程时间数据。当行驶车辆上载有能发出蓝牙信号或 WiFi 信号的手机、数码相机、笔记本电脑、GPS 导航系统或其他电子设备,且出现在采集器 30 m 范围内时,采集器便自动捕获该设备独有的媒体访问控制(MAC)地址信息和相应的地址获得时刻。在试验路段的起、终点分别架设一台 RoadTrend 采集器,隐蔽性要好,避免分散驾驶人注意力,干扰正常驾驶。以西安绕城高速公路河池寨立交—西高新立交试验路段为例,说明数据采集原理,如图 1 所示。根据数理统计原理,当置信水平为 95%时,试验样本量分别达到 176 和 88 时即可满足小客车、载重汽车行程时间实测数据的精度要求,因此,本试验要求在每组 v/C 比条件下采集的有效数据量不能小于最小样本量。



图 1 数据采集原理示意

Fig. 1 Sketch of data collection process

本文选择 AxleLight RLU 11 型路侧激光车辆

分型统计系统采集交通量数据,根据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)规定方法,确定试验路段的通行能力,进而计算得出 v/C 比。

1.3 数据准备

将起、终点设备采集的原始数据利用 Excel 中的 VLOOKUP 函数进行 MAC 地址配对,经过一定筛选后,才可将其列为有效数据。针对本试验特点,按以下原则剔除异常或可疑数据:①剔除 MAC 地址无匹配对象的数据;②剔除因人为操作或试验设备差错而出现明显错误的数据,如通过起终点行程时间过大的车辆数据;③为排除试验路段对向车辆数据的干扰,剔除通过起点时刻大于等于通过终点时刻的试验数据;④为避免严重超速车辆和低速车辆对试验结果的影响,规定限速值的 1.15 倍,即 138 km/h 为最大速度阈值,对应的行程时间为最小行程时间阈值,比该值更小的数据应剔除。假设车辆行程时间数据服从正态分布,可以认为出现与所有数据平均值之差超过 3 倍标准差的数据为小概率事件,应将其剔除。

本次试验是在多条长度不同的试验路段进行,为使数据具有可比性,本文提出车辆单位距离平均行程时间指标,即相同车型的车辆通过 1 km 路段所需行程时间的平均值。计算不同 v/C 比条件下该指标数值,即可横向对比车辆通行时间随道路负荷程度的变化规律。计算方法为

$$T_{pc} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ipc}}{nl} \quad (1)$$

$$T_{tr} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{jtr}}{ml} \quad (2)$$

式中: T_{pc} 为小客车单位距离平均行程时间实测值 (s/km); T_{tr} 为载重汽车单位距离平均行程时间实测值 (s/km); n 为试验时间内通过试验路段的小客车总数量; m 为试验时间内通过试验路段的载重汽车总数量; t_{ipc} 为第 i 辆小客车通过试验路段的行程时间 (s); t_{jtr} 为第 j 辆载重汽车通过试验路段的行程时间 (s); l 为试验路段总长度 (km)。

根据数理统计原理,在 95% 置信水平下,当试验现场观测样本量达到 33 时即可满足回归分析的精度要求。本文最终确定的样本量为 35,即在 35 种不同交通流饱和度条件下采集行程时间数据,将每组数据分别代入式(1)、式(2),即可得到不同 v/C 比对应的车辆单位距离平均行程时间。

2 基于 v/C 比的行程时间预测模型

2.1 模型比选及模型建立

根据《公路工程技术标准》(JTG B 01—2014),高速公路服务水平依据 v/C 比分为 6 个等级。为确保试验数据的完整性,要求在每个服务水平下都要采集到试验数据。

通过观察试验数据散点图(图 2),可看出 2 种车型的单位距离平均行程时间随 v/C 比的增大呈增大的趋势,初步判断可采用指数函数或线性函数作为拟合函数。2 种函数的拟合曲线如图 2 所示。

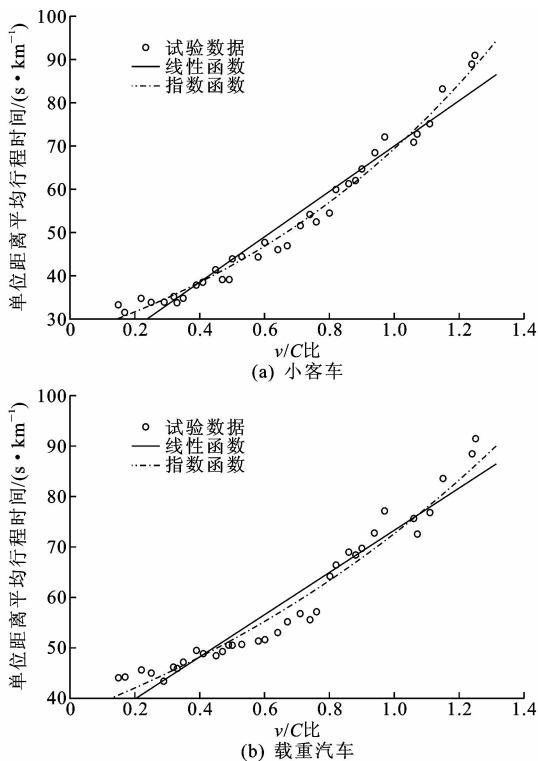


图 2 v/C 比与车辆单位距离平均行程时间拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of v/C ratios and average travel time per kilometer

对比 2 种车型的线性函数和指数函数拟合结果,显著水平均小于 0.05,说明在 95% 置信水平下方方程回归显著;判定系数 R^2 相近且都接近 1,说明 2 种曲线对行程时间观测值的拟合程度较高,且指数函数拟合优度略高于线性函数(小客车和载重汽车采用指数函数拟合的判定系数分别为 0.982 和 0.953)。以赤池信息量准则和贝叶斯信息准则检验时发现,采用指数函数拟合时模型的 AIC 和 BIC 值都远小于线性函数。因此,本文选用指数函数作为拟合函数。由此得到高速公路基本路段内小客车和载重汽车的单位距离平均行程时间预测模型为

$$t_{pc} = 26.025e^{0.979v/C} \quad (3)$$

$$t_{tr} = 36.742e^{0.682v/C} \quad (4)$$

式中: $v/C \in [0.15, 1.25]$; t_{pc} 为小客车单位距离平均行程时间预测值(s/km); t_{tr} 为载重汽车单位距离平均行程时间预测值(s/km)。

2.2 模型验证

上述模型建立是以行程时间采集数据为基础,而试验过程中为了避免道路线形对车辆运行速度和行程时间的干扰,对试验路段的线形指标进行了理想化筛选。为了进一步确定模型的适用范围,本文在试验路段中选择 K20+000~K23+084、K37+000~K40+000、K60+240~K64+000、K70+985~K74+011 这 4 个路段作为对比路段。这些路段均满足高速公路基本路段的要求,但其中有超过 2% 的最大纵坡坡度,也有半径小于 2 000 m 的圆曲线路段。利用对比路段采集的 15 组数据对式(3)、式(4)进行验证,模型预测值和试验实测值对比结果如图 3 所示。计算预测值和实测值的相对误差,得到小客车、载重汽车相对误差平均值 $\bar{\delta}_{pc}$ 、 $\bar{\delta}_{tr}$ 分别为 3.05%、3.20%,均小于 5%。可以认为,针对 2 种车型建立的行程时间预测模型可适用于各种线形条件的高速公路基本路段,且预测准确性较高。

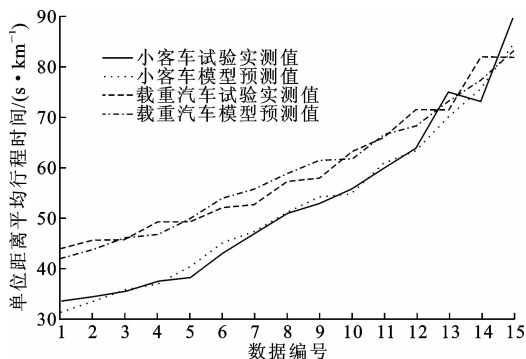


图 3 2 种车型的单位距离平均行程时间
预测模型准确性检验

Fig. 3 Accuracy test of passenger car's and
truck's travel time prediction models

3 不同载重汽车混入率条件下车辆行程时间模型的验证与修正

式(3)、式(4)给出的单位距离平均行程时间预测模型是以 P 约为 15% 时试验路段的试验数据为基础建立的,需要验证其在不同载重汽车混入率情况下的适用性,必要时采用 VISSIM 软件仿真对模型做出修正。

3.1 仿真参数校准

由于 VISSIM 软件中部分参数的默认设置与中

国实际道路、交通条件和本文研究对象的特征有一定偏差,因此在仿真试验前需先对与交通流特征、交通控制、驾驶行为特征等相关参数进行校准。为了确定哪些参数需要校准,需要对各参数做敏感性分析。若参数变化对仿真结果影响程度大于随机数变化的影响程度,说明需要对该参数进行校准。敏感性分析结果表明,最小车头时距、平均停车距离、驾驶人期望车头时距 3 个参数对仿真结果影响最大。根据经验和试验路段实测数据,设置最小车头时距为 0.5~2.0 s,每 0.5 s 划分一个水平;设置平均停车距离为 1.5~3.0 m,每 0.5 m 划分一个水平;设置驾驶人期望车头时距为 1.0~2.5 s,每 0.5 s 划分一个水平。

为了确定上述参数的具体数值,本文根据正交试验原理设计了三因素、四水平的正交试验,采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表,其中 2 列作为误差列。将正交表中的 16 种参数组合依次输入 VISSIM 软件,分别模拟 P 为 15%, v/C 比为 0.15、0.65、1.15 时的车辆运行情况。输出检测点的瞬时速度和行程时间数据,并与试验阶段的实测数据进行对比,若二者的相对误差在 10% 以内,则认为仿真参数的设置与实际情况相符。完成所有正交试验后,当最小车头时距、平均停车距离、驾驶人期望车头时距分别为 1.0 s、2.5 m、2.0 s 时,仿真结果与实测数据相对误差最小,且方差分析结果满足数理统计原理要求,因此确定以此为校准值。

3.2 模型仿真及验证

利用 VISSIM 软件模拟不同载重汽车混入率下车辆行程时间随 v/C 比的变化情况。仿真中固定参数的设置包括:按照上述校准值输入仿真参数数值;根据试验路段的实际情况输入道路属性数据数值;其他参数可采用缺省值或经验值。可变参数的设置主要包括:① 交通量,为了模拟 $v/C \in [0.15, 1.25]$ 状况,在设置车道基准通行能力为 2 200 pcu/h 前提下,交通量取值 330~2 750 pcu/h,间隔 220 pcu/h;② 载重汽车混入率 P ,为了避免仿真工作量过大,考虑到实际交通条件下大部分高速公路基本路段的 P 不超过 50%,则 P 取 0%~50%,间隔 5%。

在 5 km 路段范围内进行仿真试验,其中前 1 km 为过渡段,后 4 km 为仿真段。仿真时间设置为 2 700 s,数据采集时间为第 700~2 700 s。每 1 km 设置 1 个数据采集点,分别输出通过 1 km 路段的平均行程时间数据。对 4 个数据采集点的数据

取平均值,作为该试验条件下的单位距离平均行程时间仿真结果。

将仿真试验所得数据与式(3)、式(4)的预测值进行对比,其相对误差平均值如表 1 所示。

表 1 单位距离平均行程时间仿真值与模型预测值的相对误差平均值

Tab. 1 Average relative errors of average travel time per kilometer between simulated and predicted values

%

车型	不同 P 下的相对误差									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
小客车	3.99	4.52	2.99	3.74	9.80	14.50	11.20	14.77	17.84	16.01
载重车	4.75	2.90	3.80	4.02	4.96	4.81	11.50	11.67	16.12	14.59

从验证结果可以看出:对于小客车,当 $P \leq 20\%$ 时,预测模型具有较好的适用性;当 $P > 20\%$ 时,仿真值与模型预测值的相对误差平均值普遍超过 10% ,甚至超过 15% 。对于载重汽车, P 的临界值为 30% 。由此可以推断,式(3)、式(4)并非适用所有 P 。因此,应将 P 按照 10% 的间隔进行划分,并在每个区间内分别建立 2 种车型的行程时间预测模型。

3.3 模型修正

对仿真结果做回归分析,并按式(3)、式(4)的模型基本形式,得到不同 P 条件下小客车、载重汽车单位距离平均行程时间修正模型的通用表达式

$$t_{pc}|(P)=26.025e^{0.979\alpha_1(v/C+\beta_1)}+\gamma_1 \tag{5}$$

$$t_{tr}|(P)=36.742e^{0.682\alpha_2(v/C)+\beta_2}+\gamma_2 \tag{6}$$

式中: $t_{pc}|(P)$ 为在 P 条件下小客车单位距离平均行程时间预测值(s/km); $t_{tr}|(P)$ 为在 P 条件下载重汽车单位距离平均行程时间预测值(s/km); α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 、 γ_1 、 γ_2 均为模型修正系数。

经过对预测模型拟合优度及预测精度的检验,最终确定不同 P 时的修正系数取值,如表 2 所示。

表 2 预测模型修正系数值

Tab. 2 Values of correction factors

载重汽车混入率 P	α_1	α_2	β_1	β_2	γ_1	γ_2
[0%,20%]	1.000	1.000	0	0	0	0
(20%,30%]	0.950	1.000	0.065	0	0.356	0
(30%,40%]	1.003	1.035	0.078	0.019	0.301	0
(40%,50%]	1.023	1.145	0.093	-0.013	-0.240	0.911

在已知路段长度条件下,还可以预测车辆通过该路段的平均行程时间,其计算方法为

$$t_{pc}^L|(P)=Lt_{pc}|(P) \tag{7}$$

$$t_{tr}^L|(P)=Lt_{tr}|(P) \tag{8}$$

式中: $t_{pc}^L|(P)$ 为在 P 条件下小客车平均行程时间预测值(s); $t_{tr}^L|(P)$ 为在 P 条件下载重汽车平均行程时间预测值(s); L 为路段长度(km)。

3.4 模型对比分析

图 4 为不同 P 下 2 种车型的单位距离平均行程时间回归曲线。由图 4 可以看出:不论 P 如何改

变, v/C 比由最小值变化至最大值的过程中,小客车单位距离平均行程时间的变化幅度都比载重汽车大,即交通流饱和度对小客车通行效率的影响更显著; P 对 2 种车型的单位距离平均行程时间都有影响,随着 P 的增大,同一 v/C 比条件下的单位距离平均行程时间也会增大,且小客车增幅略大,表明小客车通行效率对 P 的变化更为敏感;随着 P 的增大,同一 v/C 比下 2 种车型的单位距离平均行程时间之差呈减小趋势,即交通组成中载重汽车比例越大,小客车行驶的自由度就越可能受到载重汽车的限制和干扰,2 种车型在交通流中彼此交织或跟随行驶,因而其单位距离平均行程时间差距变得不再明显,整个车流的运行速度基本维持在同一水平。

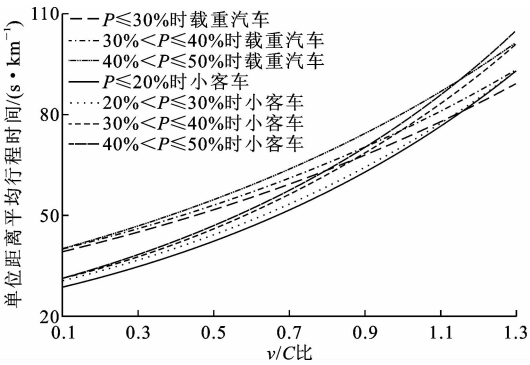


图 4 不同 P 时的单位距离平均行程时间回归曲线对比

Fig. 4 Comparisons of average travel time per kilometer fitting curves under different truck percentages

4 车辆行程时间预测模型的应用

为了直观反映高速公路基本路段 v/C 比对车辆行程时间的影响程度,以 $P \leq 20\%$ 为例,分别计算 v/C 比变化(记为 $|\Delta v/C|$)时小客车和载重汽车的单位距离平均行程时间的变化率,计算结果如表 3 所示。从表 3 可看出, $|\Delta v/C|$ 越大,2 种车型的单位距离平均行程时间变化率也越大,且小客车的变化率均大于载重汽车。

从实际应用角度出发,若能精确测定 v/C 比,就可利用本文模型直接计算车辆通过某路段的行程

表 3 单位距离平均行程时间随 $|\Delta v/C|$ 的变化率
Tab. 3 Changes rates of average travel time per kilometer according to $|\Delta v/C|$

$ \Delta v/C $	小客车单位距离平均行程时间变化率/%		载重汽车单位距离平均行程时间变化率/%	
	增大 ($\Delta v/C > 0$)	减小 ($\Delta v/C < 0$)	增大 ($\Delta v/C > 0$)	减小 ($\Delta v/C < 0$)
0.05	5.02	4.78	3.74	3.35
0.10	10.29	9.33	7.06	6.59
0.15	15.82	13.66	10.77	9.72
0.20	21.63	17.78	14.61	12.75
0.25	27.73	21.71	18.59	15.68
0.30	34.14	25.45	22.70	18.50
0.35	40.87	29.01	26.96	21.23
0.40	47.93	32.40	31.36	23.88
0.45	55.36	35.63	35.92	26.43
0.50	63.15	38.71	40.64	28.89

时间。而在某些情况下， v/C 比的具体数值并不容易直接获得，但可以通过历史数据或类似路况大致估测 v/C 比的变化幅度。这种情况下，可以参考表 3 中的相关信息，简便快速地估计车辆通行时间的变化范围，并将该信息实时发布给道路使用者，方便其及时调整出行安排，优化出行路径。例如，对于某路段，根据历史统计数据可知，其晚高峰时段的 v/C 比要比平峰时段大 0.35，根据表 3 可知，晚高峰的平均行程时间将比平峰时段增长 40.87%。驾驶小客车出行如果计划在晚高峰时段通过该路段，就要比平峰时段多预留约 40% 的出行时间，才能保证按时到达目的地。此外，驾驶人还可依据路网中其他路段的交通流饱和度信息决定是否改变出行路径，躲避拥堵路段，从而以更短的时间到达目的地。

从交通管理部门的角度出发，提前判断通勤及节假日高峰或突发状况发生时路段通行效率的受影响程度，通过将车流引导至交通饱和度较低路段的方法，或通过控制载重汽车比例、限制载重汽车行驶时段的策略，就可达到优化路网交通流分配、提高整体运行效率的目的。本文研究结果还可以指导高速公路的改扩建决策，辅助改扩建工程，特别是扩建工程，节约出行时间，降低用户的出行时间成本。

5 结 语

(1)以现场试验实测车辆行程时间以及交通流数据为基础，针对两轴轻型载重汽车和小客车 2 种车型，分别建立了以 v/C 比为自变量的单位距离平均行程时间预测模型，证明了预测模型在不同几何

条件的高速公路基本路段具有普遍适用性，且预测结果精度较高。

(2)通过正交试验方法对 VISSIM 软件中最小车头时距、平均停车距离、驾驶人期望车头时距 3 个仿真参数进行了校准，并以试验实测数据为基准修正了参数的取值。在此基础上，借助仿真试验提出了载重汽车混入率 $P \in [0\%, 50\%]$ 条件下车辆单位距离平均行程时间预测模型的通用表达式。

(3)在 v/C 比已知，根据历史数据和类似路况，大致推测 v/C 比变化幅度，本文给出了建立的行程时间预测模型应用方法，该研究结果可指导道路使用者合理安排出行计划，也为交通管理部门科学实施交通流管理和道路改扩建提供决策依据。

(4)高速公路交织区和匝道路段的车辆行驶特征有别于基本路段。本文建立的行程时间预测模型仅适用于高速公路基本路段，且 $v/C \in [0.15, 1.25]$ ，是否适用于其他等级公路以及更大或更小的 v/C 比状况还有待进一步研究。借鉴本文研究思路，后续可以采用试验与软件仿真相结合的方法，首先在保证变量唯一的前提下通过试验采集车辆行程时间基础数据，然后以试验数据校准仿真参数，用仿真软件建立适用范围更广的预测模型。

参考文献:

References:

[1] 高 坤,涂辉招,李 浩,等.出行者对不同交通方式行程时间可靠度和车内拥挤度的感知差异性[J].中国公路学报,2017,30(7):126-133.
GAO Kun, TU Hui-zhao, LI Hao, et al. Travelers' perception differences in travel time reliability and crowding of mode-choice in multimodal networks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (7):126-133.

[2] MORI U, MENDIBURU A, ALVAREZ M, et al. A review of travel time estimation and forecasting for advanced traveller information systems [J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2015, 11 (2): 119-157.

[3] 孙 健,张 纯,陈书恺,等.基于季节模型及 Kalman 滤波的道路行程时间[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(6):145-151.
SUN Jian, ZHANG Chun, CHEN Shu-kai, et al. Route travel time estimation based on seasonal model and Kalman filtering algorithm [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(6):145-151.

- [4] 李庆奎,吕志平,葛智杰.基于模糊综合评判的智能行程时间预测算法[J].华东交通大学学报,2012,29(2):6-9.
LI Qing-kui, LU Zhi-ping, GE Zhi-jie. Research on the intelligent travel time estimation method based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2012, 29(2): 6-9.
- [5] 刘克.高速公路的路段行程时间估计与预测方法研究[D].北京:北京交通大学,2013.
LIU Ke. Estimation prediction of link travel time for freeways[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [6] SAW K, DAS A K, KATTI B K, et al. Travel time estimation modelling under heterogeneous traffic: A case study of urban traffic corridor in Surat, India[J]. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 2018, 42(1): 1-7.
- [7] DEL-CASTILLO J M, BENITEZ F G. On the functional form of the speed-density relationship I: General theory[J]. Transportation Research Part B, 1995, 29(5): 373-389.
- [8] XU C, QU Z, CHEN X. Analysis of traffic flow speed-density relation model characteristics[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: English Edition, 2014, 8(4): 104-110.
- [9] YAO Chen, LI Cheng-bing, GAO Chao, et al. Study on speed-flow relationship model of urban roadways traffic flow in China[J]. Metallurgical & Mining Industry, 2015(9): 1048-1051.
- [10] KACHROO P, SASTRY S. Traffic assignment using a density-based travel-time function for intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(5): 1438-1447.
- [11] PIRC J, TURK G, ZURA M. Highway travel time estimation using multiple data sources[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2016, 10(10): 649-657.
- [12] COIFMAN B. Estimating travel times and vehicle trajectories on freeways using dual loop detectors[J]. Transportation Research Part A, 2002, 36(4): 351-364.
- [13] YEON J, ELEFTERIADOU L, LAWPHONGPANICH S. Travel time estimation on a freeway using discrete time Markov chains[J]. Transportation Research Part B, 2008, 42(4): 325-338.
- [14] LU Z, MENG Q, GOMES G. Estimating link travel time functions for heterogeneous traffic flows on freeways[J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50(8): 1683-1698.
- [15] 杨兆保,保丽霞,朱国华.基于Fuzzy回归的快速路行程时间预测模型研究[J].公路交通科技,2004,21(3):78-81.
YANG Zhao-sheng, BAO Li-xia, ZHU Guo-hua. An urban express travel time prediction model based on fuzzy regression[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(3): 78-81.
- [16] 李继伟.城市主次干路的路段行程时间估计与预测方法研究[D].长春:吉林大学,2012.
LI Ji-wei. Estimation and prediction of link travel time for urban trunk and secondary streets[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [17] 刘利娟,张宁.弹性需求下路段行程时间波动的收敛性[J].交通运输系统工程与信息,2016,16(1): 169-175.
LIU Li-juan, ZHANG Ning. Convergence of travel time fluctuations in elastic demand[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(1): 169-175.
- [18] 梁国华,程国柱,王春艳,等.高速公路大型车混入率与交通流稳定性关系[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(4):120-126.
LIANG Guo-hua, CHENG Guo-zhu, WANG Chun-yan, et al. Relationship between mixing rate of freeway large vehicles and traffic flow stability[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(4): 120-126.
- [19] KSONTINI F, MANDIAU R, GUESSOUM Z, et al. Affordance-based agent model for road traffic simulation[J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2015, 29(5): 821-849.
- [20] 陈涛,魏朗.人-车-路互动模式虚拟仿真系统[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(1):67-71.
CHEN Tao, WEI Lang. Driver-vehicle-road virtual simulation with interaction mode[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(1): 67-71.
- [21] 《中国公路学报》编辑部.中国交通工程学术研究综述·2016[J].中国公路学报,2016,29(6):1-161.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's traffic engineering research progress, 2016[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(6): 1-161.
- [22] 伍朝辉,郭瑜,王辉,等.虚拟现实交通运输应用研究综述[J].系统仿真学报,2016,28(10):2289-2297,2303.
WU Zhao-hui, GUO Yu, WANG Hui, et al. Virtual reality in transportation: A survey[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2289-2297, 2303.
- [23] LUQUE R, CASTRO M. Highway geometric design consistency: Speed models and local or global assessment[J]. International Journal of Civil Engineering, 2016, 14(6): 347-355.