

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.029

山区双车道公路运行速度预测模型的加速度标定

徐进¹, 杨奎², 罗骁¹, 汪旭¹, 邵毅明¹, 彭金栓^{1,3}

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031; 3. 汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室, 西安 710004)

摘要: 为标定运行速度模型中的汽车加速度值, 在山区双车道公路上开展小客车连续行驶实验, 采集轴向加速度的连续数据, 并通过断面观测得到大客车和大货车的加速度值, 获得峰值加速度的累积频率曲线以及统计分布特性, 并建立加速度-道路几何参数关系模型. 结果表明: 小客车的入弯减速度幅值要比出弯加速度高一倍左右, 不宜将加、减速度简化成同一个值, 应该分别进行标定; 加速度和减速度累积频率曲线的斜率突变点都不是发生在 85th 百分位, 而是临近 95th, 应重新考虑 85th 百分位的使用价值; 大客车的加、减速度幅值非常接近, 而重载货车的减速度要明显大于加速度, 同时, 重载货车的加速度和减速度值要双双低于大型客车; 小客车的加速度与弯道半径负相关, 而与弯道转角正相关.

关键词: 运行速度; 自然驾驶; 加速度; 减速度; 轴向加速度; 纵向加速度

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)03-0181-08

Calibrating of acceleration and deceleration rate for the operating speed prediction models of two-lane roads in a mountainous area

XU Jin¹, YANG Kui², LUO Xiao¹, WANG Xu¹, SHAO Yiming¹, PENG Jinshuan^{1,3}

(1. College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Traffic and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Key Laboratory for Automotive Transportation Safety Enhancement Technology of the Ministry of Communication, Xi'an 710004, China)

Abstract: To determine the acceleration and deceleration rate for the operating speed prediction model, the continuously driving tests of passenger car, bus, and heavy trucks were carried out on two-lane roads in a mountainous area. Longitudinal acceleration of vehicles was collected, and the cumulative frequency curves of peak acceleration and deceleration rate were analyzed. The statistical distribution and the eigenvalues of acceleration (a_x) and deceleration (a_b) were obtained, and the models of a_x and a_b with road geometry parameters as independent variables were established. The results show that: due to that the magnitude of a_b of passenger cars is about twice higher than a_x , the a_x and a_b could not be simplified to a same fixed value. Slope breakpoint of cumulative frequency curve of a_x and a_b does not appears on the 85th percentile but near the 95th percentile. The a_x and a_b of large buses display very close amplitude, and a_b of heavy-duty trucks is significantly greater than a_x . a_x and a_b of heavy-duty trucks are lower than large buses'. There is a negative correlation between longitudinal acceleration of passenger car and curve radius, and a positive correlation with curve deflection angle.

Keywords: operating speed; natural driving; acceleration; deceleration; longitudinal acceleration; axial acceleration

近 20 年来, 基于运行速度曲线的协调性分析由于其快速、有效、便捷的特点和优势, 一直是公路几何线形安全性评价的主要手段, 在减少山区公路事故发生率和降低事故多发路段的形成上发挥了重要作用. 运行速度模型的功能是预测出汽车沿公路行驶时的连续行驶速度曲线, 它可以只针对平面线形, 也可以综合考虑空间三维线形的影响, 它的合理性

决定了速度预测值的精度, 进而决定了评价结果的可靠性, 因此对模型的持续改进以及不断提出新的预测模型是道路工程领域的一个研究热点. 由于公路线形可在空间上投影成平、纵、横等 3 个剖面, 单就平面而言, 又可以分解成直线、缓和曲线和圆曲线, 因此现有的模型大都是针对某种特定的路段单元, 或是一个/几个几何要素, 比如平曲线模型^[1-3]、直线路段模型^[4]、弯坡组合路段模型^[5-6]、期望速度模型^[7]、路侧干扰模型^[8]、交通量影响模型^[9]、隧道路段模型^[10]、立交匝道模型^[11]等, 以上模型共同组成了目前的运行速度模型体系.

一条公路上的运行速度连续变化特征由两个因

收稿日期: 2015-10-20

基金项目: 交通运输部应用基础研究项目(2015319814050); 重庆市科技计划项目(cstc2014jcyjA30024); 汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室开放课题(2014G1502015)

作者简介: 徐进(1977—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 徐进, yhnl_996699@163.com

素决定:一是不同形式路段单元上的通过速度;二是速度在相邻单元之间的调整,比如进入曲线时的减速,驶出曲线时的加速,而这种调整可以用汽车加(减)速度来描述.为了解决这个问题,国内外研究者作出了很多假设,比如将减速度和加速度都假定为 0.85 m/s^2 ^[12];为加速度设定一个区间 $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$,然后结合当前速度在该区间内线性取值,通常是速度越高、加速度越小^[13-14];假设车辆在相邻单元之间作匀加速或是匀减速运动,因此加(减)速度值取决于路段单元间的速度差和距离^[15-16];还有学者根据实测数据建立了加速度-速度模型^[17]、加速度-加速距离模型^[18]等.但以上模型没有对加速度和减速度进行区分,忽略了由汽车动力特性导致的加、减速度之间的显著差异,偏离了实际的汽车运行特点.还有学者根据小规模实测数据建立了加(减)速度-半径模型^[19-20],但由于道路样本数少,模型的适用场合受到局限.也有研究者通过速度或加速度数据观测,得到了加(减)速度值的分布特性,比如文献[21]采集了平曲线路段和弯坡组合路段时的汽车加(减)速度,得到了加(减)速度随行驶距离的变化关系;文献[22]获取了小客车在山区公路连续行驶时的加(减)速度,分析了昼夜、冬夏、电子导航等因素对驾驶行为的影响;文献[23]根据不同断面的速度实测值以及相邻断面的间距,得到了曲线路段的汽车平均减速度及其分布特征.

根据上述分析,现有关于汽车加(减)速度的相关研究存在以下几方面的局限:其一,很多假设不是从道路上的真实驾驶行为出发,而是为了计算方便,因此与现实情况偏差很大;其二,一些研究者虽建立了加(减)速度回归模型,但由于样本数据少,可靠性和合理性有待提高,难以应用到同类型的其他道路;其三,现有的研究几乎都是以小客车作为分析对象,尚未有关于山区公路尤其是山区双车道公路重型货车和大型客车行车加(减)速度特性的文献报道.为此,本文在山区双车道公路上开展了自然驾驶实验(路上实验)和路外观测实验,采集了小客车、重载汽车和大型客车的加速度数据,由此获得了不同车型的加(减)速度的统计特性和指标值,并建立了加(减)速度与道路几何要素之间的关系模型,为山区公路运行速度模型中的加(减)速度值的标定提供了不同的解决方案,弥补了现有研究的不足.

1 实验方案

1.1 实验道路

在山区地形条件下尤其是中高山区,双车道公路是最主要的道路形式,本文在重庆辖域内选择 6 条山区双车道公路作为研究对象,见表 1.其中双车道公路均具有地形条件艰险、线形组合复杂、路侧危险度大、事故发生率/致死率高的特点,图 1 为 S102 巫溪至云阳段其中一小段路的平面线形.

表 1 试验道路的主要信息

Tab.1 Main information of the test roads

实验道路地点	设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	技术等级	车道数	路面状况等级	地形条件	试验车型
S102 巫溪-云阳段	20~40	4~3	2	中-良	山岭	丰田海狮改装版
G212 北碚-合川段	30	3	2	中-良	山岭	别克陆尊
G319 黔江-秀山段	30~60	3~2	2	中-良	山岭	丰田海狮
S103 万州-奉节段	20~40	4~3	2	中-良-优	山岭	三菱劲炫
S201 奉节-巫溪段	20~40	4~3	2	次-中	山岭	三菱劲炫
S205 大足-潼南段	40~60	3~2	2	次-中	山岭	丰田海狮改装版

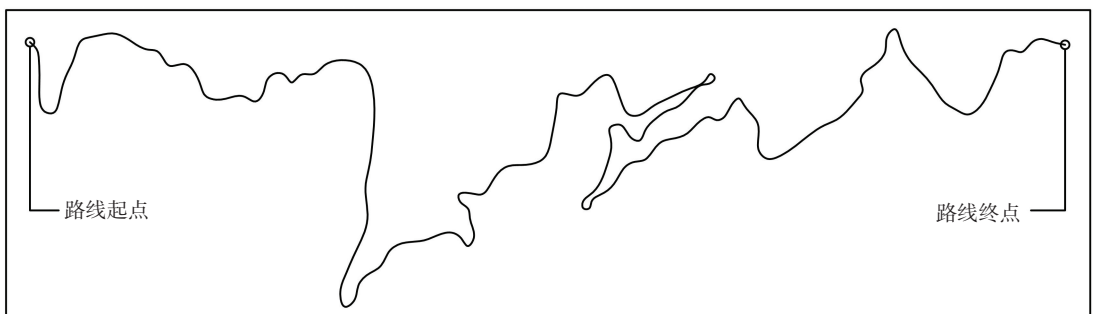


图 1 山区双车道公路 1 处测试路段的平面线形

Fig.1 Plane alignment of one test section of two-lane mountain roads

1.2 实验方法

采用两种不同的方法来获取汽车加(减)速度数据,第1种是基于移动测试车技术的路上连续行驶实验,让被试驾驶员在自然驾驶状态下(维持其平日的驾驶习惯)操纵汽车沿道路行进,连续采集汽车的运行状态参数,包括轨迹、速度、加速度、姿态以及周围环境,如图2(a)~(d),此方法主要是针对小客车。其中轨迹和速度是用厘米级精度 DGPS 获取;使用微机械式航姿参考系统(即惯性测量单元 IMU)采集加速度和行驶姿态数据;用3个500万像素的行车记录仪分别摄录正前方、右侧和后方的环境信息。第2种是路外观测,主要是针对大型车,如图2(e)~(h)。先在公路上选取观测区段,然后根据线形特点确定出观测断面,在每个断面附近设置1个观测点,实验人员用雷达测速仪记录大客车和重型货车两种车型驶过该断面的行驶速度。车辆驶过第1个断面时,此位置的实验员用对讲机播报该车辆的特征,后续断面同时记录车速并对该车辆进行

编号,以保证同一车辆驶过各个断面时的速度能够一一对应,即得到数据 $\{(i, V_{pi}) \mid i = 1, 2, \dots, N_p\}$,其中 N_p 为观测断面数量, V_{pi} 为某辆车在断面 i 的速度观测值,然后计算相邻断面 $i \sim i - 1$ 之间的平均加(减)速度,计算公式为

$$a_{xi} = 0.5(V_{pi}^2 - V_{pi-1}^2)/L_{pi} \quad (1)$$

式中 L_{pi} 为断面 i 与断面 $i - 1$ 之间的行驶距离。然后在大于零的各 a_{xi} 中选出最大值作为峰值加速度,再从小于零的各个 a_{xi} 中选出最小值作为峰值减速度。需要说明的是,由于小客车是用航姿参考系统连续记录汽车轴向加速度,采样频率为 10 Hz,试验过程中每个弯道可以采集 100 个以上的数据点,而大型车是用路外观测法,根据观测断面的速度和间距计算出加速度值,每个弯道 7 个观测断面。小客车由于采样点密集,能够捕捉到加速度的峰值,而大型车的加速度计算结果是相邻两个观测断面之间的平均值,因此在幅值上要低于两断面之间的峰值。

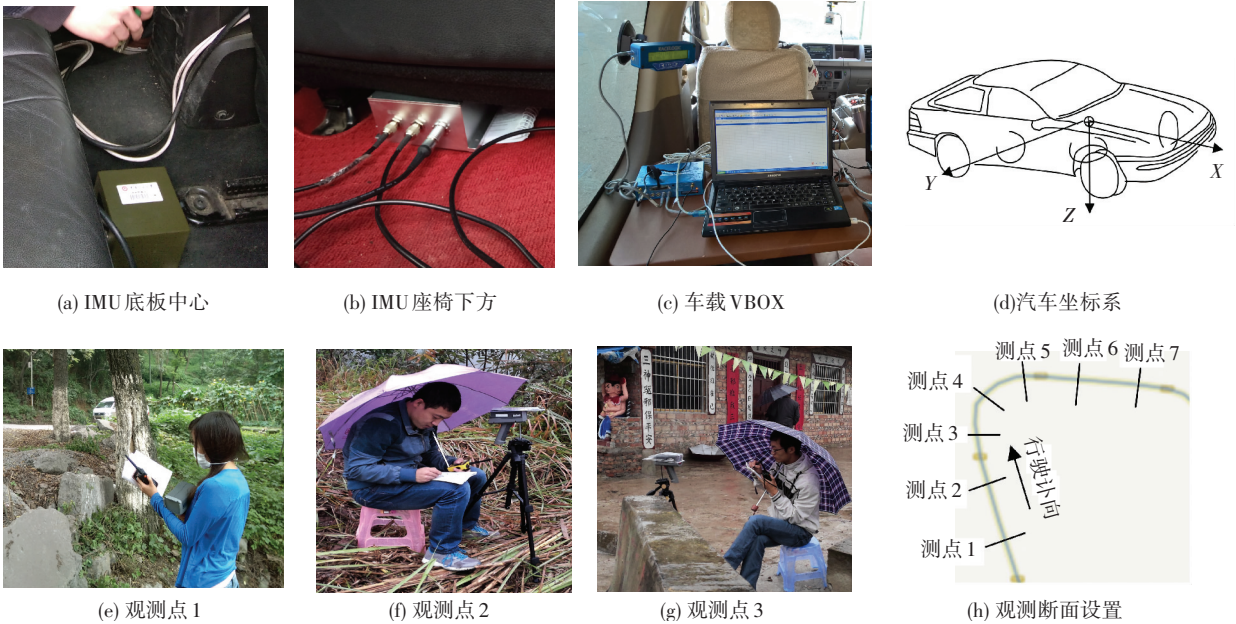


图2 山区道路的汽车轴向加速度采集

Fig.2 Collecting the longitudinal acceleration of traveling vehicles on a mountain road

1.3 试验车辆以及被试驾驶员

开展路上连续行驶实验时,实验用车为三菱劲炫(2.0 L,自动四驱,4座)、别克陆尊(2.4 L,7座)、丰田海狮(2.7 L手动版)、海狮改装版(2.7 L手动改装版9座)。共有16名技术熟练的驾驶员参与本项实验,每人的实际驾龄均在2~31 a之间,平均驾龄13.9 a,年龄在22~59岁之间,平均年龄38.2岁。每个测试路段配备3~4名被试驾驶员,每名驾驶员以平日的自然驾驶习惯往返行驶1次,同时,在行驶过程中车上实验人员不对驾驶员发出指令或者进行

任何提示。

2 小客车加(减)速度的分布特征

在很多运行速度模型中,加(减)速度常被简化成一个固定值,国外文献大都是将加、减速度统一设置成 0.85 m/s^2 (针对双车道公路的小客车),我国公路项目安全性评价规范^[24]给出的是一个取值区间,即小客车的加、减速度为 $0.15 \sim 0.5 \text{ m/s}^2$,大货车的为 $0.2 \sim 0.25 \text{ m/s}^2$,也是假设汽车的加速特性与减速特性相同。

为了得到能够适应我国山区道路条件、汽车运行特性以及驾驶行为特征的汽车加(减)速度值,本文对车载航姿参考系统输出的纵向加速度连续数据曲线(路上实验),先进行平滑滤波处理,去掉信号噪声和毛刺,然后设计了峰值提取算法,得到汽车驶入平曲线时的减速度峰值和驶出曲线时的加速度峰值;之后按加速、减速分别汇总并排序,得到数据 $\{(j, a_{xj}) \mid j=1, 2, \dots, N\}$ 和 $\{(i, a_{bi}) \mid i=1, 2, \dots, M\}$, 其中 a_{xj} 和 a_{bi} 分别为峰值加速度和峰值减速度, N, M 分别为加、减速度峰值的个数;最后得到每一款试验车型的加(减)速度累积频率曲线。

图 3(a) 和 3(b) 分别给出了各实验车型的加、减速度的累积频率曲线,同时对 85th、90th 和 95th 等特征百分位进行了标注。从图中可以观察到几个明显的特征:1) 汽车减速度的最大值要比加速度高一倍左右,差异非常显著,这是由于汽车的制动减速度是由路面附着系数 f 来决定,其峰值可以接近甚至达到 $f \cdot g$, 这里 g 为重力加速度,而加速度在良好路面条件下是由发动机扭矩和传动/驱动机构来决定,在目前的技术条件下,小客车的加速度要明显低于减速度,因此现有的一些研究和规范对加、减速度不加区分的做法显然是不合理的。2) 累积频率曲线的斜率突变点并不是之前一直认为的 85th 百分位,而是临近 95th 百分位,由于现行运行速度设计方法的设计理念是以 85th 百分位(曲线斜率发生突变的百分位)的驾驶行为来控制道路几何设计,因此根据本文结果需要对其进行修正。3) 不同车型之间的加(减)速度幅值存在一定的差异,比较图 3(a) 和 3(b) 能发现加速度幅值高的车型其减速度幅值也高,单就加速度而言,除了座位数较多的丰田海狮之外(比功率偏低),其他 3 款车型的 85th 百分位加速度

值都在 1 m/s^2 之上,85th 百分位减速度值更高,因此一些文献将加、减速度简化成 0.85 m/s^2 显然不符合双车道公路的实际情况。

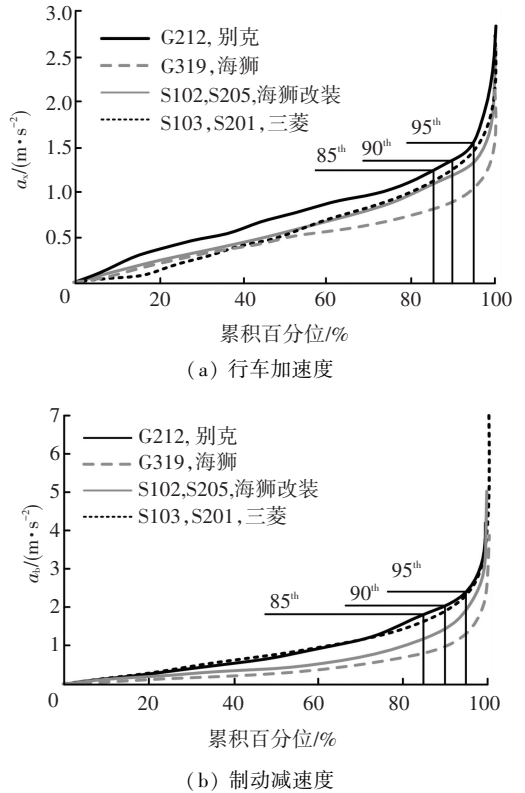


图 3 小客车的加(减)速度累积频率曲线

Fig.3 Cumulative frequency curves of acceleration and deceleration for passenger cars

从累积频率曲线的数据中提取出 50th、85th、90th、95th 百分位特征值和最大值,同时计算出均值,见表 2。表中的特征分位值可以用于山区公路运行速度预测模型中的小客车加、减速度值标定,在标定时可以根据道路条件和车型进行适当调整;表中的最大值可用于汽车行驶仿真中边界条件的设定。

表 2 小型车的加(减)速度的统计值

Tab.2 Statistical results of acceleration and deceleration of passenger cars

试验对象代号	行车加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)						行车减速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)					
	最大值	均值	50 th	85 th	90 th	95 th	最大值	均值	50 th	85 th	90 th	95 th
I	2.850	0.774	0.742	1.233	1.337	1.571	4.745	0.943	0.722	1.828	2.084	2.481
II	2.094	0.489	0.478	0.795	0.894	1.030	3.827	0.428	0.280	0.800	0.988	1.327
III	2.562	0.617	0.544	1.083	1.212	1.350	5.191	0.643	0.419	1.219	1.491	1.934
IV	2.818	0.611	0.598	1.138	1.266	1.475	7.132	0.913	0.764	1.619	1.917	2.355

注:I—G212 北碚至合川段,别克陆尊;II—G319 黔江至秀山段,丰田海狮;III—S102 和 S205,丰田海狮改装;IV—S103 和 S201,三菱劲炫。

3 大型车加(减)速度的分布特性

国外学者提出的运行速度模型几乎都是针对小客车,这是由于小客车在欧、美、澳等发达国家的公路交通组成中占主要比例,并且行驶速度快,事故后

果严重;而大货车和大客车的驾驶员经过极为严格的教育培训,遵守交通法规的意识高,事故率非常低。而我国近年来严峻的交通安全形势却表明,大型车辆事故尤其是其导致的重特大群死群伤事故已经成为威胁道路用户生命安全的最突出因素^[25],为此

非常有必要建立大型车运行速度模型,进而检验大型车辆-路线设计之间的协调性.

图4为重载货车(20 t以上)在双车道公路上的轴向加速度实测结果(路外观测),大于零时为加速度,小于零时为减速度,从图4(a)的散点图中能看到轴向加速度与行驶速度之间存在负相关关系.图4(b)为轴向加速度累计频率曲线,把减速度取绝对值后,与加速度累计频率曲线叠加在一起后,得到图4(c),可以观察到重型货车的减速度幅值要略高于加速度.

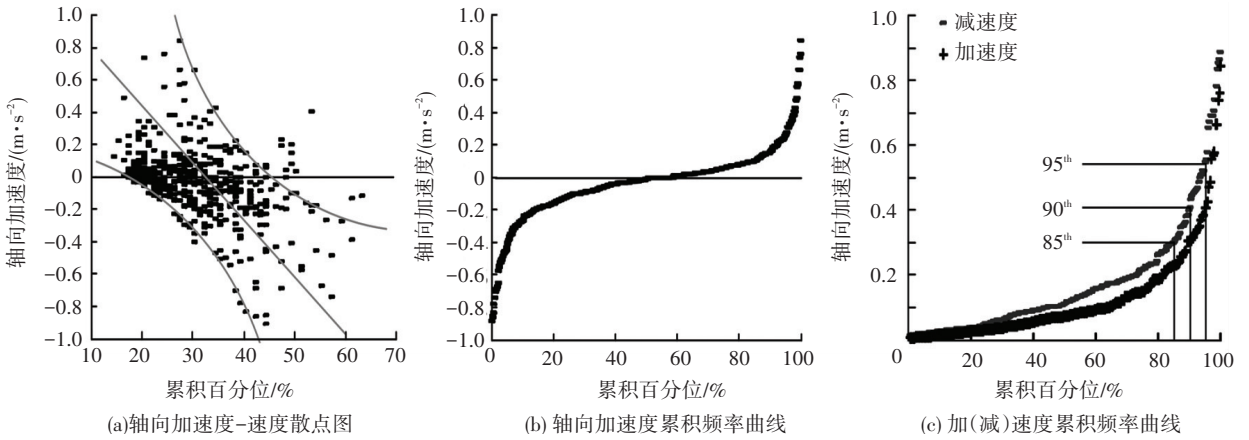


图4 大货车的加(减)速度实测结果

Fig.4 Measured acceleration and deceleration of heavy trucks

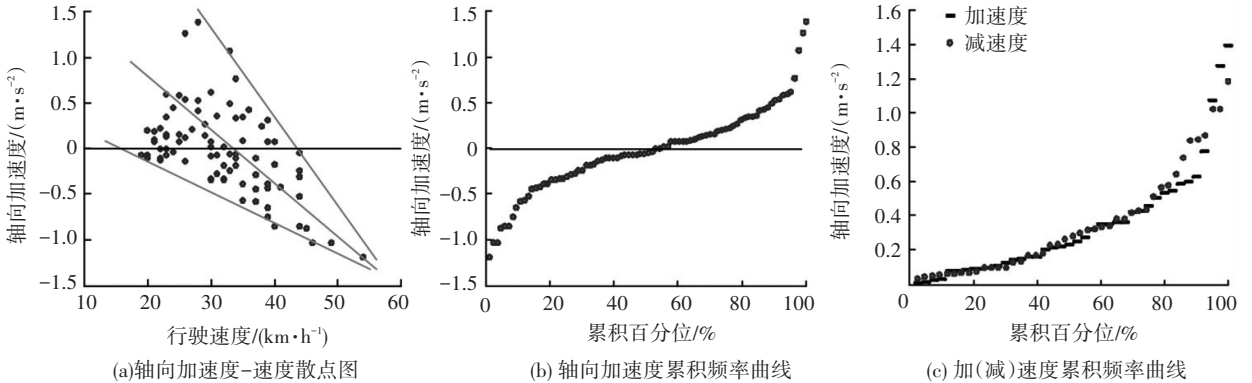


图5 大客车的加(减)速度实测结果

Fig.5 Measured acceleration and deceleration of buses

表3 大型车的加(减)速度统计值

Tab.3 Statistical results of acceleration and deceleration of large vehicles

车辆类型	行车加速度/ $(m \cdot s^{-2})$						行车减速度/ $(m \cdot s^{-2})$					
	最大值	均值	50 th	85 th	90 th	95 th	最大值	均值	50 th	85 th	90 th	95 th
大型客车	1.396	0.342	0.230	0.584	0.627	1.075	1.187	0.354	0.280	0.690	0.845	1.026
载重货车	0.847	0.127	0.075	0.231	0.309	0.408	0.888	0.172	0.112	0.303	0.407	0.548

4 加(减)速度与道路几何要素关系

驾驶员在山区公路上调整行驶速度的一个主要目的是适应不断变化的平面线形曲率,以使行驶速

图5为用同样方法得到的大客车(37座以上)轴向加速度结果,呈现两个特点:其一,加、减速度的幅值要比重载货车高出50%以上,这是由于大客车的载质量比大货车低,具有更大的单位质量比功率,因此加速性能和制动性能要优于重载货车;其二,加、减速度之间的差别非常小,即针对大客车这种车型,可以用同一个值来统一标定加、减速度.表3给出了两种车型的特征分位值、最大值和均值,可用于山区公路大型车辆运行速度模型中加(减)速度值的标定,以及大型车辆行驶仿真的边界条件设置.

度不超过平曲线尤其是小半径平曲线的临界安全速度,且同时能够维持一定的行驶舒适性.图6为S102巫溪至云阳方向其中一小节具有复杂线形的连续弯道路段,图7为小客车在该路段的行驶速度和轴向

加速度变化,从中可以看到每个弯道的出现都引起了行驶速度的变化,进而导致轴向加速度的发生,因此弯道几何参数与轴向加速度之间存在紧密的关联性.

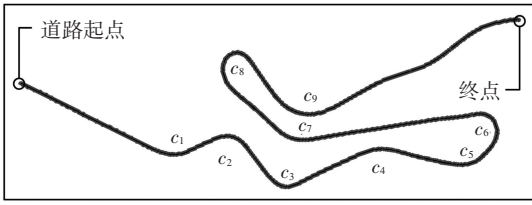
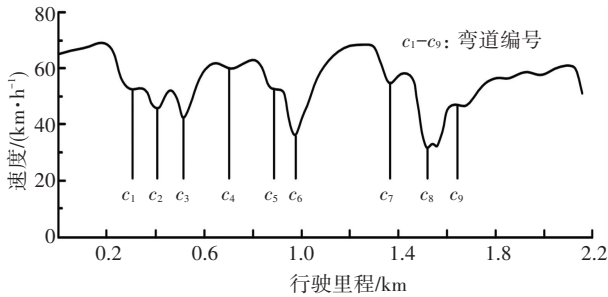
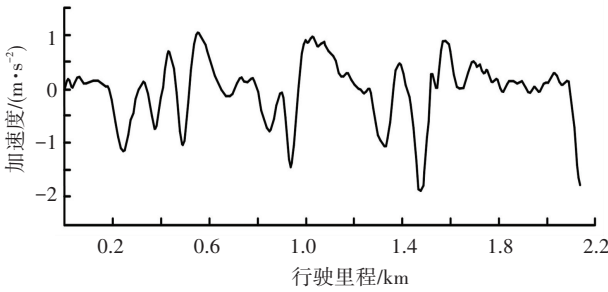


图 6 山区公路的连续弯道

Fig.6 Consecutive bends of road in a mountainous area



(a) 行驶速度



(b) 轴向加速度

图 7 小客车的行驶速度以及轴向加速度

Fig.7 Traveling speed and longitudinal acceleration of passenger cars

图 8 为从小客车路上连续行驶实验数据中整理得到的散点图,从中可以观察到加(减)速度与弯道半径之间存在较强的负相关性,即弯道半径越小,车辆进弯时驾驶员采取的制动强度越大,同时出弯时驾驶员的加速意愿也越强烈.其原因为半径越小,弯道的临界安全速度越低,进弯时需要驾驶员降低的速度幅值越大,因此减速度值更高;而出弯时由于弯道通过速度与驾驶员期望速度之间的差值更大,驾驶员往往采用较大的加速度以尽快提高行驶速度.图中呈现的趋势性为建立加(减)速度和半径 R 关系模型提供了合理依据.通过比较不同函数形式的拟合精度,以下两式具有较好的效果.

$$a_x = 0.429e^{-0.405R} + 0.384e^{-0.00198R}, R^2 = 0.418; \quad (2)$$

$$a_b = 0.884e^{-0.284R} + 0.338e^{-0.00152R}, R^2 = 0.407. \quad (3)$$

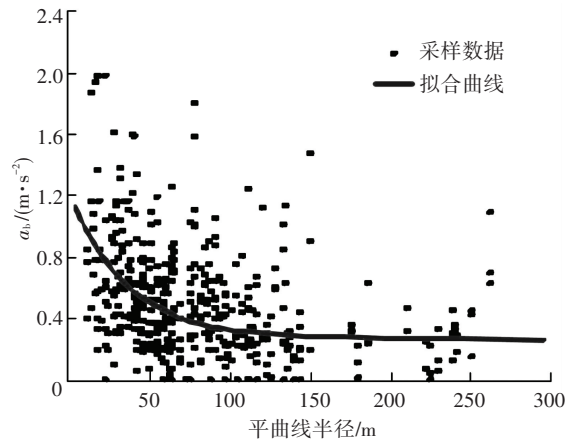
图 9 给出的是加(减)速度与弯道转角之间的

散点数据,与弯道半径的影响正好相反,加(减)速度是随着弯道转角的增加而增大,即弯道回转角度越大,驾驶员采取的制动强度越大,同时加速出弯的倾向越明显,这是由于转角越大,弯道给驾驶员带来的视觉感受是越“急”,同时转角的增加通常还会导致行车视距变差,此种情况下驾驶员会选择更低的速度来通过弯道,因此减速度值增加.根据散点数据回归得到的模型表达式为

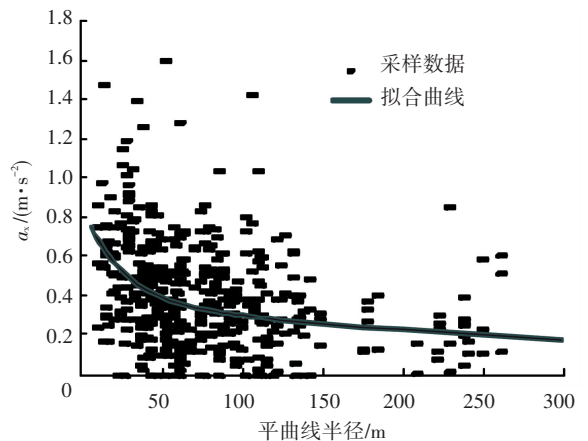
$$a_x = -1.11 \times 10^{-5} \Delta^2 + 0.0047 \Delta + 0.0134, R^2 = 0.435; \quad (4)$$

$$a_b = -3.32 \times 10^{-6} \Delta^2 + 0.00486 \Delta + 0.212, R^2 = 0.482. \quad (5)$$

式(2) ~ (5) 中的 a_b 和 a_x 分别为汽车进弯时的减速度和出弯时的加速度, R 为平曲线半径, Δ 为平曲线转角,以($^\circ$)为单位.以上 4 式可用于山区双车道公路运行速度模型小客车加、减速度值的计算和标定,进而与圆曲线速度模型、直道模型、期望速度模型相互补充,构成一个完整的运行速度模型体系.



(a) 减速度-半径散点图及模型



(b) 加速度-半径散点图及模型

图 8 小客车的加(减)速度-弯道半径散点数据

Fig.8 Scatter plot of acceleration and deceleration versus curve radius of passenger cars

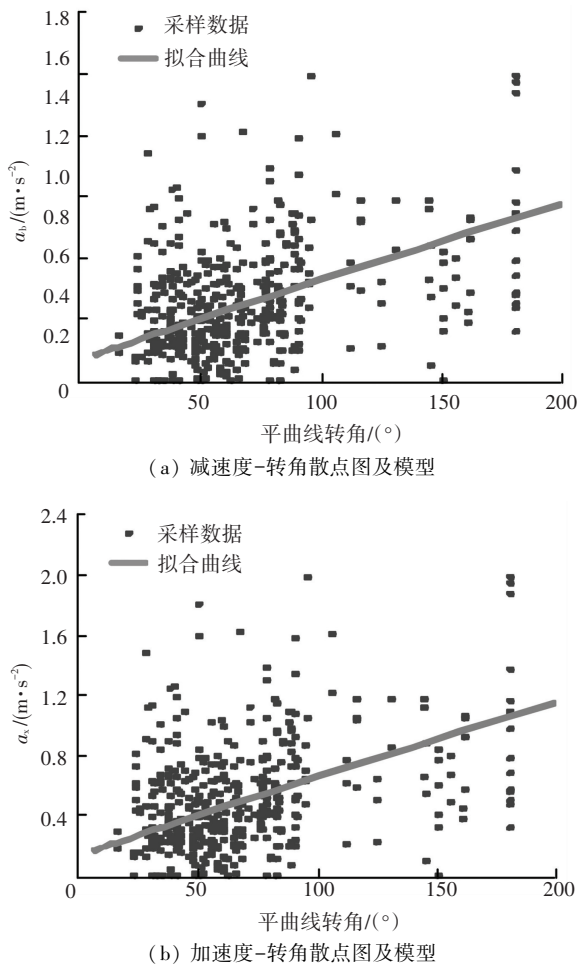


图9 小客车的加(减)速度-弯道转角散点数据

Fig.9 Scatter plot of acceleration and deceleration versus curve deflection angle of passenger cars

5 结论

1)小客车的减速度幅值要显著高于加速度,因此将加、减速度简化成同一个值显然不合理,应该分别进行标定,并且现有文献的标定值明显偏低。

2)加(减)速度累积频率曲线的斜率突变点都不是发生在85th百分位,而是出现在临近95th的某一点,因此应重新考虑85th百分位的使用意义。

3)大客车的加、减速度幅值非常接近,而重载货车的减速度要明显大于加速度;同时,重载货车的加(减)速度值要双双低于大型客车。

4)小客车加(减)速度与弯道半径之间呈负相关,而与弯道转角正相关,本文根据散点数据分别建立了加(减)速度-半径模型和加(减)速度-转角模型。

参考文献

[1] CHRISTOPHER M, MASON J M. Geometric design guidelines to achieve desired operating speed on urban streets[C]//Institute of Transportation Engineers, 65th ITE Annual Meeting. Washington DC: Institute of Transportation Engineers, 1995: 70-74.

[2] 许金良, 胡圣能, 杨宏志. 基于曲率变化率的运行速度模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31(5): 1-6.
XU Jinliang, HU Shengneng, YANG Hongzhi. Operating speed prediction models based on curvature changing rate[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31(5): 1-6.

[3] 钟小明, 元海英, 荣建, 等. 用于路线设计的小客车速度模型研究[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(2): 155-160.
ZHONG Xiaoming, YUAN Haiying, RONG Jian, et al. Research on operating speed models of free flowing passenger car for alignment design of highway[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, 31(2): 155-160.

[4] LUCA M D, RUSSO F, COKORILLO O, et al. Modeling operating speed using artificial computational intelligence (aci) on low-volume road[C]//Transportation Research Board, TRB 93rd annual meeting. Washington DC: Transportation research board, 2014: 1-14.

[5] 孟祥海, 王丹丹, 张志召. 高速公路平纵组合路段运行速度分析与预测[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(2): 150-157.
MENG Xianghai, WANG Dandan, ZHANG Zhizhao. Analysis and prediction of operating speed on horizontal curve combined with longitudinal slope for expressway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(2): 150-157.

[6] 徐进, 邵毅明, 赵军, 等. 山区道路弯坡组合路段重载车辆行驶速度模型[J]. 长安大学学报, 2015, 35(2): 67-74.
XU Jin, SHAO Yiming, ZHAO Jun, et al. Speed prediction model of heavy truck driving on curved segment with a slope of mountainous highway[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(2): 67-74.

[7] CRISMAN B, MARCHIONNA A, PERCO P, et al. Operating speed prediction model for two-lane rural roads[C]//Transportation Research Board, 3rd International Symposium on Highway Geometric Design. Chicago: Transportation Research Board, 2005: 1-9.

[8] 祝站东, 荣建, 方靖. 双车道公路路侧净空与街道化对运行速度的影响[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增刊1): 79-82.
ZHU Zhandong, RONG Jian, FANG Jing. Influence of roadside clear zone and roadside development on operating speed of two-lane highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(Sup1): 79-82.

[9] 徐进, 罗庆, 毛嘉川, 等. 考虑弯道几何要素和交通量影响的汽车行驶速度预测模型[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 47-57.
XU Jin, LUO Qing, MAO Jiachuan, et al. Speed prediction model of car/truck considering the effect of curve geometric features and traffic volume[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 47-57.

[10] 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 Shuangjie, ZHU Zhandong, et al. Operating speed models for trucks at expressway tunnel sections[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 90-94.

[11] 张智勇, 郝晓云, 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 Zhiyong, HAO Xiaoyun, WU Wenbin, et al. The Running Speed Prediction Model of Interchange Ramp[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(1): 93-99.

[12] LAUREL R, TAREK S. Effect of speed prediction models and per-

- ceived radius on design consistency[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 32(2): 388-399.
- [13] 刘建蓓, 林声, 高晋生. 公路平直路段运行速度模型分析与优化[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增刊1): 83-88.
LIU Jianpei, LIN Sheng, GAO Jinsheng. Analysis and optimization for operating speed model on straight section on highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(Sup1): 83-88.
- [14] 林声. 基于变加速度的高速公路平直路段运行速度模型优化[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(3): 75-79.
LIN Sheng. Research on accelerate function for operating speed on the straight road sections on highway[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(3): 75-79.
- [15] 屠书荣, 姚阳, 张泽良. 双车道公路运行速度计算与安全性评价方法研究[J]. 公路交通技术, 2013(2): 120-125.
TU Shurong, YAO Yang, ZHANG Zeliang. Research on running speed calculation and safety evaluation methods of double-lane highways[J]. Technology of Highway and Transport, 2013(2): 120-125.
- [16] 高建平, 郭忠印. 基于运行车速的公路线形设计质量评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(7): 906-911.
GAO Jianping, GUO Zhongyin. Evaluation of highway alignment design quality based on operating speed[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004, 32(7): 906-911.
- [17] 祝站东, 李冰, 吕英志. 双车道公路直线路段运行速度模型研究[J]. 公路工程, 2013, 38(5): 119-123.
ZHU Zhandong, LI Bing, LÜ Yingzhi. Research on the operating speed models of tangents of two-lane highway[J]. Highway Engineering, 2013, 38(5): 119-123.
- [18] 高建平, 孔令旗, 郭忠印, 等. 高速公路运行车速研究[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(4): 78-81.
GAO Jianping, KONG Lingqi, GUO Zhongyin, et al. Study on operating speed of vehicles on expressway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(4): 78-81.
- [19] 邵毅明, 毛嘉川, 刘胜川, 等. 山区公路上驾驶人的车速控制行为分析[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(1): 79-88.
SHAO Yiming, MAO Jiachuan, LIU Shengchuan, et al. Analysis of speed control behavior for driver on mountain highway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 79-88.
- [20] FITZPATRICK K, ELEFTERIADOU L, HARWOOD D W, et al. Speed prediction for two-lane rural highways[R]. Texas: Texas Transportation Institute, 2000.
- [21] ALTAMIRA A, GARC Y, ECHAVEGUREN T, et al. Acceleration and deceleration patterns on horizontal curves and their tangents on two-lane rural roads[C]// Transportation Research Board, TRB 93rd Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Board, 2014: 1-15.
- [22] TOKUNAGA R A, ASANO M, MUNEHIRO K, et al. Effects of curve designs and road conditions on driver's curve sharpness judgment and driving behavior[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005(6): 3536-3550.
- [23] PERCO P, ROBBA A. Evaluation of the deceleration rate for the operating speed-profile model[EB/OL]. (2012-07-06) [2015-09-28]. <http://www.siiv.net/site/sites/default/files/Documenti/bari2005/060.pdf>.
- [24] 华杰工程咨询有限公司. 公路项目安全性评价规范: JTG B05—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
CHELBI Engineering Consultants, Inc.. Specification for highway safety audit: JTG B05—2015[S]. Beijing: China Communication Press, 2015.
- [25] 杜博英, 方守恩, 迟爽. 货车制动在公路长大下坡安全研究中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4): 656-659.
DU Boying, FANG Shouen, CHI Shuang. Using of truck braking in security research of long and steep downgrade on highway[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(4): 656-659.

(编辑 魏希柱)

(上接第 180 页)

- [18] HOWE M S. The genetically optimized tunnel-entrance hood[J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23(8): 1231-1250.
- [19] 牛纪强, 周丹, 李志伟, 等. 高速列车通过峡谷风区时气动性能研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(6): 9-14.
NIU Jiqiang, ZHOU Dan, LI Zhiwei, et al. Research on aerodynamic performance of high-speed train through canyon wind zone[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(6): 9-14.
- [20] 张英朝, 张喆, 傅立敏, 等. 轿车客车隧道中会车过程的瞬态 CFD 仿真[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(9): 105-108.
ZHANG Yingchao, ZHANG Zhe, FU Limin, et al. Transient aerodynamic computational simulation on vehicles crossing each other in tunnel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(9): 105-108.
- [21] 牛纪强. 高速列车通过隧道时产生的列车风研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1268-1276.
NIU Jiqiang. Research on gusts caused by high-speed trains passing through tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1268-1276.
- [22] 张雷, 田红旗, 杨明智, 等. 帽檐斜切式洞门斜率对隧道气动性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(2): 817-822.
ZHANG Lei, TIAN Hongqi, YANG Mingzhi, et al. Influence on tunnel aerodynamic effects by slope of hat oblique tunnel portal[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(2): 817-822.
- [23] 张雷, 杨明智, 张辉, 等. 高速铁路隧道洞门对隧道空气动力效应的影响[J]. 铁道学报, 2013, 35(11): 92-97.
ZHANG Lei, YANG Mingzhi, ZHANG Hui, et al. Influence of tunnel portals on tunnel aerodynamic effects in operation of high-speed railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(11): 92-97.
- [24] Railway Applications—Aerodynamics—Part 4: Requirements and Test Procedures for Aerodynamics on Open Track: BS EN 14067-4: 2005+A1: 2009[S].
- [25] 京沪高速铁路设计暂行规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

(编辑 魏希柱)