

文章编号:1671-8879(2018)05-0162-06

山区高速公路上坡路段合理速差研究

王贤良^{1,2}, 张晓冬¹, 许金良¹, 贾兴利¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 安康市住房和城乡建设局, 陕西 安康 725000)

摘 要:为了明确山区高速公路上坡路段,货车行驶速度与路段上交通流平均速度的差值对通行效率和安全影响,研究了客车和货车合理速差范围,在西汉(西安—汉中)高速 K1185+120~K1185+820 段进行实测试验。利用 AxleLight RLU11 便携式路测激光交通调查仪,实时收集车辆位置、类型、速度、车头时距、时间间隔等交通数据。根据车头时距筛选车队,分别建立速差、平均速度数据库。利用 SPSS 软件进行正态分布检验,在确保数据有效性的前提下,建立以速差为自变量、以平均速度为因变量的非线性回归模型,通过与无货车混行车队的平均速度进行比较,得到影响通行效率的客货车速差最大阈值。研究结果表明:货车的混行对通行效率有较大影响,与无货车混行相比,其平均速度减小 13.6%;速差与平均速度呈二次相关的关系,随着速差的增大,平均速度呈现出先增大后减小的趋势;为了保持良好的通行效率,速差的最大阈值为 21 km/h。

关键词:交通工程;合理速差;回归分析;山区高速公路;通行效率

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Reasonable speed difference on uphill section of mountainous freeways

WANG Xian-liang^{1,2}, ZHANG Xiao-dong¹, XU Jin-liang¹, JIA Xing-li¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Ministry of Housing and Urban-rural Development of the Ankang City, Ankang 725000, Shaanxi, China)

Abstract: Aimed to study the traffic efficiency and safety enabled by the speed difference between trucks and regular traffic flow on the uphill section of a mountainous freeway. A field experiment was carried out in Xihan (Xi'an to Hanzhong) Freeway from K1185+120 to K1185+820. Traffic data consisting of location, speed, headway time, interval and vehicle type, which were collected on a timely basis using AxleLight RLU11. Platoons were chosen according to vehicular headway, and then, the database comprising speed difference and average speed were built. After the normal distribution test, the regression model was established with the speed difference as the independent variable, and the average speed as the dependent variable through SPSS. The threshold value of speed difference influencing traffic efficiency was further determined, compared to the platoon without trucks. The results show that mixed driving with trucks has a considerable influence on traffic efficiency. The average speed of a platoon with trucks shows a significant decrease, about approximately 13.6% compared to a platoon without trucks. Speed reduction has a quadratic correlation with the dispersion of average speed, traffic efficiency can be well maintained by limiting the allowable speed reduction to approximately 21 km/h. 5 tabs, 7 figs,

收稿日期:2018-05-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802208);陕西省自然科学基金研究计划项目(2017JQ5122)

作者简介:王贤良(1971-),男,陕西安康人,安康市住房和城乡建设局教授级高级工程师,长安大学工学博士研究生,E-mail:389710050@qq.com。

18 refs.

Key words: traffic engineering; reasonable speed difference; regression analysis; mountainous freeway; traffic efficiency

0 引言

2016年,中国公路已达469.63万km,其中,高速公路为13.1万km,位居世界第一,覆盖约98%的20万以上城镇人口的城市。中国山区的面积约占陆地面积的三分之二,山区高速总公路里程约占高速总公路里程的38%。山区高速公路上坡路段,货车爬坡时需要克服较大的坡度阻力,使输出功率与车重比值降低。车速下降,大型车与小型车的速差变大,超车频率增加,对行车安全不利^[1]。因此,确定合理的速差值有利于驾驶人安全、高效行驶。

山区高速公路上坡路段坡度对货车速度的影响比客车速度显著^[2],因此在确定临界坡长时,主要考虑载重货车在无不合理减速的情况下能够行驶的最大长度。在纵断面设计中,速差用于确定临界坡长,该速差为货车速度与车队全部车辆平均速度的差值。考虑到行车安全,文献[3]中推荐采用15 km/h的速差确定临界坡长。目前关于速差的研究,多针对其与纵坡设计指标、事故率的关系开展,一般以低于平均速度15~20 km/h或设计速度的50%~60%作为速差^[4]。Solomon最先提出了速度模型,指出路段事故率与断面的运行车速与平均运行车速的差值为二次相关关系^[5]。研究表明,无论高速公路上的平均车速如何,车辆偏离平均车速越多,发生车祸的可能性就越大^[6],速度标准偏差与碰撞率之间具有正相关关系^[7-8]。目前,关于速差与通行效率的研究较少。王涛研究发现,较高的平均速度水平下,速度离散性会影响交通效率^[9]。现有研究给出了速度离散性的范围,但并未给出具体值。在拥挤状态的中密度区域中,车流速率随着速度离散度的增加而减小^[10]。在高服务水平下,速度离散与实际流量之间没有明显的关系,而在中低服务水平下,实际流量低于速度分散效应下的理论流量^[11]。杨剑通过VIS-SIM仿真发现,随着交通量以及货车混入率的增加,小型车行驶速度出现明显变化,并且最终接近货车的行驶速度^[12]。目前研究中的速差为2个相邻车辆的速度差,速度离散度为相邻车辆速度差绝对值的均值,不能直接反映货车与客车之间的相互作用,而本文研究的速差与AASHTO一致,是货车速度与车队全部车辆平均速度的差值,其更能反映货

车与小客车之间的相互影响。

本文采用AxleLight便携式路侧仪实时记录车辆运行状态,提取车辆速度、车头时距等数据。通过Visual Basic和Excel进行数据处理,筛选有货车混行和没有货车混行的车队,分别计算其平均速度和速差。利用SPSS软件进行正态分布检验,建立以速差为自变量、平均速度为因变量的非线性回归模型,通过与无货车混行车队的平均速度进行比较,得到影响通行效率的客货车速差最大阈值,综合考虑基于通行效率与安全的速差阈值,确定的临界坡长更加合理,对高速公路上坡路段的限速和通行效率提高具有重要意义。

1 数据采集

1.1 试验路段选择

本文通过试验得到速度、车型和车头时距等数据,分析速差对通行效率的影响,在选取试验路段时应注意排除其他因素对试验结果的影响。为保证试验结果的可靠性,应尽量选取平面线形良好、汽车爬坡特性仅受纵坡影响的路段。已有研究表明,当曲线半径大于1 000 m时对运行速度的影响不明显^[13]。根据AASHTO货车爬坡时的速度-距离曲线,速度折减值小于20 km/h时,纵坡坡度小于2%^[14]。本次试验选取平面线形为直线或平曲线半径大于100 m、纵坡坡度大于2%的路段。通过实地调查,选择西汉(西安—汉中)高速公路作为试验道路。西汉高速公路为双向四车道,该公路北起户县涝峪口,途经纸坊、朱雀、皇冠、宁陕,路线主线全长258.65 km,地形条件复杂,桥梁隧道多,根据地形条件分级设计行车速度为60~100 km/h,最大纵坡坡度为5%。为了避免桥隧对汽车运行的影响且尽量满足试验条件,本次试验路段选取西汉高速K1185+120~K1185+820,限速为80 km/h,纵坡坡度2.5%,坡长700 m,平曲线半径为2 500 m,与相邻隧道木瓜园隧道的间距为1 200 m,排除道路条件和相邻构造物对试验路段的影响。

1.2 数据采集

AxleLight路测仪在交通调查中应用较为广泛,它可以快捷、准确的获得交通量数据,其优势在于车辆自动分型,车型按轴距划分。该设备采用非

接触方式安装在路侧,可实时检测交通流量、车速、车型等交通参数。路测仪安置在西汉高速公路 K1185+570 路侧,见图 1。设备调试完成后,将人员及警示标撤离,避免对驾驶人造成影响。试验于 2017 年 10 月 20 日起在西汉高速公路进行,10 月 24 日结束,共计 5 d(工作日 3 d,非工作日 2 d),观测期内天气晴朗,无大风和雾,不会对驾驶人产生不良影响。观测时间为上午 9:00~12:00,下午 13:30~18:30,试验时间内车流较稳定,无其他干扰因素。本次试验共收集数据 16 283 组,其中货车 2 605 组,重车混入率为 16%^[15],采集的部分数据如表 1 所示。

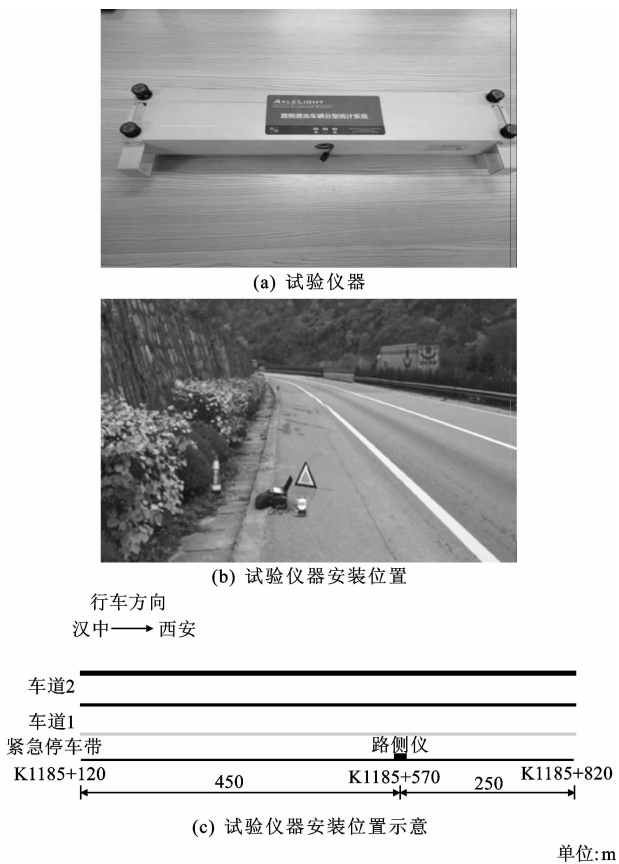


图 1 试验仪器及安装位置

Fig.1 Experimental detector layout

2 合理速差值的确定

2.1 数据分析与检验

为了体现货车与小客车的相互影响,本文速差为货车速度与车组全部车辆平均速度的差值,表征货车速度与平均速度的离散程度。平均速度计算为

$$V_a = \sum_{i=1}^n V_i / n \tag{1}$$

$$\Delta V = V_\tau - V_a \text{ 有货车混行} \tag{2}$$

表 1 路测仪数据

Tab. 1 Data collected by AxleLight

序号	位置/m	速度/(km·h ⁻¹)	车型	车头时距/s	时间间距/s
1	6.9	69.99	10	58.24	57.20
2	6.4	91.29	8	65.18	64.52
3	6.3	62.65	10	2.44	2.20
4	6.6	73.97	4	1.32	1.06
5	6.6	86.12	3	35.14	34.17
6	6.8	91.14	3	9.61	9.29
7	6.3	84.56	6	7.04	6.65
8	5.5	50.99	3	4.53	4.23
9	5.8	75.42	6	29.59	29.40
10	5.7	56.07	3	26.97	26.62

注:行车方向为汉中到西安,2 车道;车型 10 为 6 轴半挂车;车型 3、4 为小客车;车型 6 为 3 轴货车;车型 8 为 3 轴半挂车;位置为车辆右轮与路测仪的距离。

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n |V_i - V_{i+1}| / n - 1 \text{ 无货车混行} \tag{3}$$

式中: V_a 是车队平均速度; ΔV 为速差; V_τ 为货车速度; V_i 为第 i 辆车的速度; n 为车队长度。

为了获得速差与平均速度,对收集到的 16 283 组数据进行筛选。根据已有研究成果^[16-17],车头时距小于 5 s 时定义为跟车状态,筛选出车队中有货车混行的 164 组,车队长度为 6~12 veh,车队中货车数量为 1~3 veh,分布较为均匀,车队的组成对结果的影响不大。计算车队的平均速度及速差如表 2、表 3 所示。

表 2 有货车混行的车队平均速度与速差

Tab. 2 Average speed difference and speed of platoons with trucks

序号	速差/ (km·h ⁻¹)	平均速度/ (km·h ⁻¹)	车队 长度/veh	货车 数量/veh
1	0.07	65.16	8	2
2	6.20	75.12	6	1
3	13.04	72.86	7	2
4	19.87	73.23	9	2
5	24.69	67.19	6	1
6	2.30	66.42	6	1
7	8.31	69.17	9	2
8	14.72	77.18	8	2
9	20.83	73.28	10	2
10	26.54	69.89	9	1

在选择样本时,要对样本进行检验,确保其有效性。应用统计学方法,需采集的最小车辆数为

$$n_{\min} = (\sigma K / E)^2 \tag{4}$$

式中: n_{\min} 为最小样本量; σ 为估计的样本标准差,本文取 8; E 为车速观测值允许误差,其值取决于平均车速要求的精度,一般可取 $E = 2 \text{ km/h}$; K 为置信

表 3 无货车混行的车队平均速度与速差

Tab. 3 Average speed and speed difference of platoons without trucks			
序号	速差/(km·h ⁻¹)	平均速度/(km·h ⁻¹)	车队长度/veh
1	3.54	88.73	7
2	3.58	74.94	8
3	4.01	84.28	7
4	4.08	82.21	9
5	5.93	78.06	6
6	5.97	83.67	10
7	6.38	83.04	7
8	6.46	82.00	8
9	9.92	81.59	9
10	11.65	86.69	10

度水平系数,本文取 95%的置信度水平, $K=1.96$ 。
由式(4)计算可得样本量最小值为 62 veh,因此本文样本量符合最小样本量的要求。

对有、无货车混行的速差、平均速度进行正态分布检验^[14],结果见表 4。由表 4 可知,检验的变量显著水平平均大于 0.05,满足正态分布要求。

表 4 正态性检验

Tab. 4 Samples normality Kolmogorov-Smirnova Test			
参数	Kolmogorov-Smirnova 检验		
	统计量	自由度	显著水平
平均速度(无货车混行)	0.077	85	0.200
速度容许降低值(有货车混行)	0.094	85	0.053
平均速度(有货车混行)	0.096	85	0.050

回归模型按有货车混行和无货车混行分别分析,平均速度在一定程度上能反应车队的通行情况,本文车组的长度、组成分布较为均匀,因此分析时以车组的平均速度表征其通行效率。具体的分析变量分布、独立变量和因变量分布和回归模型,最后通过两者的对比分析确定合理速差值。

2.2 有货车混行的车队

有货车混行车队的平均速度分布如图 2 所示。受限速 80 km/h 以及货车混行的影响,小客车的平均速度主要集中在 70~76 km/h。车队速差的分布如图 3 所示。可知,其速差均小于 40 km/h,当速差小于 32 km/h 时分布相对均匀。经计算,85 分位平均速度为 75.09 km/h,85 分位速差为 28.87 km/h,货车与小客车之间的速差普遍较大。

速度和平均速度如图 4 所示。对于有货车混行的车队,速差与平均速度呈明显的非线性关系。选择二次函数、三次函数和幂函数进行非线性分析,模型和参数如表 5 所示。

由表 5 可知,各模型的显著性水平平均小于 0.05,

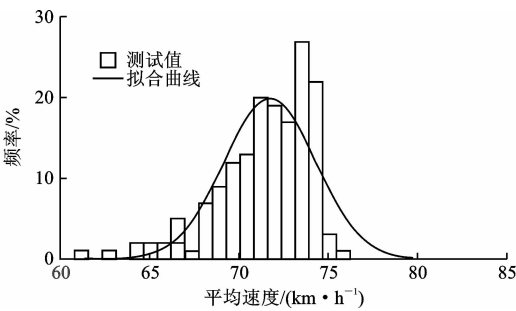


图 2 平均速度分布(有货车)
Fig. 2 Distributions of average speeds (with trucks)

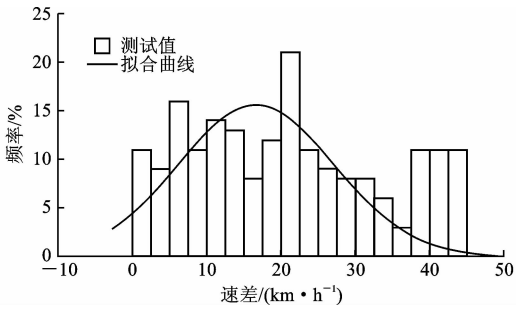


图 3 速差分布(有货车)
Fig. 3 Distributions of speeds difference

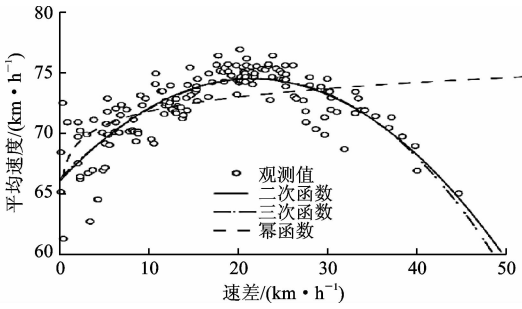


图 4 速差与平均速度(有货车)
Fig. 4 Distributions of speeds difference and average speeds (with trucks)

因此 3 个模型的独立变量与因变量差异显著。各模型的拟合曲线如图 4 所示。由表 5 和图 4 可知:二次和三次函数的回归结果与试验结果接近,但二次回归曲线的拟合效果最好,故本文采用二次函数对速差与平均速度的关系进行回归分析。

随着速差的增大,平均速度呈现先增大后减小的趋势。当速差较小时,货车和小客车的速度接近,小客车受货车的影响较小,此时平均速度约为 70 km/h。随着速差的增大,平均速度也逐渐增大,平均速度在 75 km/h 时达到峰值,对应的速差为 21 km/h。随着速差继续增加,客车与货车之间速差过大,导致小客车超车频率增加,通行效率逐渐下降,货车对小客车的影响较大,平均速度逐渐下降。

表 5 模型参数
Tab. 5 Parameters of model

模型	判定系数	<i>F</i> 值	自由度 1	自由度 2	显著水平	常数项	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>b</i> ₃
二次函数	0.780	170.226	2	161	0.000	66.036	2.781	−2.501	
三次函数	0.774	113.274	3	160	0.000	66.264	0.725	−0.014	−6.596×10 ^{−5}
幂函数	0.328	80.689	1	162	0.000	68.021	0.024		

注:*b*₁、*b*₂、*b*₃ 均为模型参数。

2.3 无货车混行的车队分析

无货车混行车队平均速度和速差的分布如图 5、图 6 所示。可以看出,平均速度主要集中于 75~90 km/h,速差均小于 15 km/h,且主要集中于 2~10 km/h。经计算,85 分位平均速度为 86.9 km/h,85 分位速差为 7.57 km/h,速差明显小于有货车混行时的速差。

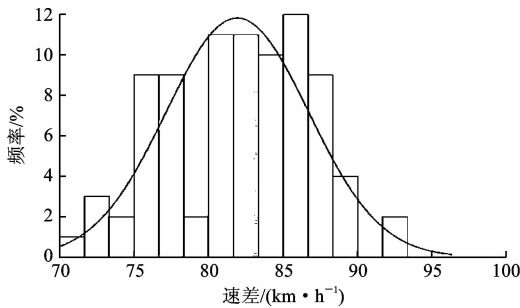


图 5 平均速度分布(无货车)

Fig. 5 Distributions of average speeds (without trucks)

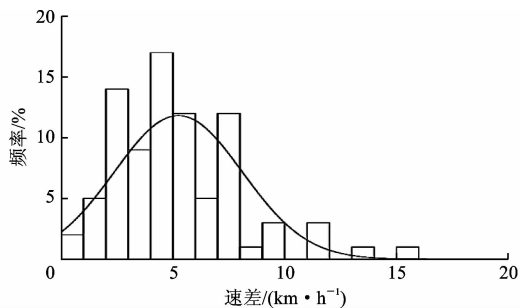


图 6 速差分布(无货车)

Fig. 6 Distributions of speeds difference (without trucks)

速差和平均速度分布如图 7 所示,可以看出,仅有小客车的车队,其速差与平均速度之间没有明显的关系,平均速度约为 80 km/h,没有货车的影响,小客车车队保持相近的速度行驶,即使有超车行为,其影响也较小。

2.4 对比分析

通过对比有无货车混行的结果,进一步分析速差与通行效率之间的关系,可知:在山区高速公路上坡路段,有货车混行时,车队的 85 分位平均速度为 75.09 km/h,速差为 28.87 km/h;而无货车混行

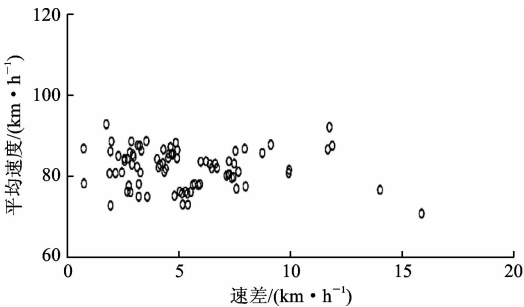


图 7 速差-平均速度关系(无货车)

Fig. 7 Relationships of speeds difference and average speeds (without trucks)

时,同一路段 85 分位平均速度为 86.9 km/h,速差仅为 7.57 km/h。货车的混行导致车队平均速度下降 13.6%,小客车的运行速度由 92.5 km/h 下降到 83.7 km/h,小客车运行速度降低 9.5%。此外,货车混行导致速差增加 21.3 km/h,是无货车混行时的 3 倍,对通行效率影响显著。考虑最佳通行效率时的合理速差值为 21 km/h,其对应的累积频率约为 65%,即可以减少 35% 由于速差过大引起的混行,对提高山区高速公路爬坡路段的通行效率具有重要意义。

3 结 语

- (1)对于仅有小客车行驶的车队,相邻车辆的速差对平均速度的影响不明显。
- (2)当小客车和货车混行时,速差与平均速度之间存在显著的二次函数关系,随着速差的增加,平均速度呈现出先增加后减小的趋势。
- (3)山区高速公路上坡路段,货车混行对通行效率影响显著,车队平均速度下降较大,西汉高速特定路段车队平均速度下降 13.6%。
- (4)为了保持较好的通行效率,山区高速公路上坡路段的合理速差应限制为 21 km/h。
- (5)下一步可以综合考虑通行效率、安全、经济等因素,确定更加合理的速差限制值,修正临界坡长,为相关规范的修订提供依据。

参考文献:

References:

- [1] 潘兵宏,孙元琪,曹杰.基于恢复速度的山区高速公路连续上坡缓坡设计参数研究[J].公路,2014(2):77-84.
PAN Bing-hong, SUN Yuan-qi, CAO Jie. Research on gentle slope design parameters of continuous uphill slope section of mountainous highway based on speed recovery[J]. Highway, 2014(2): 77-84.
- [2] GILLESPIE T D. Methods for predicting truck speed loss on grades[R]. Dearborn: The University of Michigan, 1985.
- [3] GLENNON J C. An evaluation of design criteria for operating trucks safely on grades[J]. Highway Research Record, 1970 (312): 93-112.
- [4] 许金良,雷天,贾兴利,等.基于典型汽车爬坡的高海拔地区公路最大纵坡[J].同济大学学报:自然科学版,2017,45(6):854-860.
XU Jin-liang, LEI Tian, JIA Xing-li, et al. Maximal gradient of highway in high-altitude area based on typical truck's climbing performance[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2017, 45(6), 854-860.
- [5] SOLOMON D. Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1964.
- [6] 钟连德,孙小端,陈永胜,等.高速公路大、小车速度差与事故率的关系[J].北京工业大学学报,2007,33(2):185-188.
ZHONG Lian-de, SUN Xiao-duan, CHEN Yong-sheng, et al. The relationships between crash rates and average speed difference between cars and large vehicles on freeway[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(2): 185-188.
- [7] 李志斌,金茂菁,刘攀,等.提高高速公路通行效率的可变限速控制策略[J].吉林大学学报:工学版,2013,43(5):1204-1209.
LI Zhi-bin, JIN Mao-jing, LIU Pan, et al. Evaluation of impact variable speed limits on improving traffic efficiency on freeways[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(5): 1204-1209.
- [8] HOU D, HAN J, SUN X, et al. Study on the relationship between speed difference and crash rate on freeway[J]. American Society of Civil Engineers, 2010 (382): 354-359.
- [9] 王涛.车速离散性对高速公路通行效率的影响研究[D].南京:东南大学,2016.
WANG Tao. Effects of speed dispersion on capacity of freeways[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [10] 王昊,王炜,陈竣.车速离散性对高速公路实际通行能力的影响[J].北京工业大学学报,2010,36(10):1389-1395.
WANG Hao, WANG Wei, CHEN Jun. Effects of speed dispersion on capacity of freeways[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(10): 1389-1395.
- [11] WANG H, WANG W, CHEN X, et al. Experimental features and characteristics of speed dispersion in urban freeway traffic[J]. Transportation Research Record, 2007(1999): 150-160.
- [12] 杨剑.高速公路低速货车混入率对小型车的影响[J].交通运输研究,2014,42(15):73-75.
YANG Jian. Impact of low speed trucks mixing rate on small cars on highway[J]. Transportation Standardization, 2014, 42(15): 73-75.
- [13] 郑柯,荣建,任福田.高速公路平曲线半径与车辆行驶速度之间的关系分析[J].公路交通科技,2003,20(2):28-30.
ZHENG Ke, RONG Jian, REN Fu-tian. Analysis of relation between curve's radius and steering speed on expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(2): 28-30.
- [14] AASHTO. A policy on geometric design of highway and streets[S].
- [15] OTA H. Distance headway behavior between vehicles from the viewpoint of proxemics[J]. IATSS Research, 1994, 18(2): 5-14.
- [16] PUAN O C. Driver's car following headway on single carriageway roads[J]. Malaysian Journal of Civil Engineering, 2004, 16(2): 15-27.
- [17] 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 speed model of passenger car at single-lane exit of interchange[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6): 279-286.
- [18] 吴国雄,崔强,杨奎,等.基于自然驾驶的山区高速公路行驶舒适性分析[J].科学技术与工程,2017,17(20):101-108.
WU Guo-xiong, CUI Qiang, YANG Kui, et al. Ride comfort analysis on mountain expressway based on naturalistic driving data[J]. Science Technology & Engineering, 2017, 17(20): 101-108.