

文章编号:1671-1637(2013)06-0099-08

基于驾驶负荷的山区高速公路长大下坡路段安全性评价模型

林 声¹, 刘建蓓², 阎 莹³, 罗 京², 袁振洲¹

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:分析了已有的驾驶心生理指标与安全性评价方法,进行了典型山区高速公路连续长大下坡路段实车试验,采集了22个试验路段27名货车驾驶人的23 549个心率变异性指标。以心率变异性表征驾驶负荷,建立了关于纵坡坡度、坡长和行车速度的驾驶负荷模型,确定了长大下坡路段驾驶舒适度的区间范围。基于驾驶负荷的阈值划分范围,分析了长大下坡路段驾驶负荷与纵坡指标的关系,并进行了实例验证。验证结果表明:当车速不大于 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,坡度范围在 $-6\% \sim -3\%$ 之间时,利用建立的模型确定的风险路段包含所有事故多发路段;确定的高风险路段发生交通事故38起,确定的较高风险路段发生交通事故11起,2个路段的死亡人数占总死亡人数的84%。评价结果与实际交通事故分布相吻合,提出的模型有效。

关键词:交通安全;长大下坡路段;评价模型;驾驶负荷;事故率

中图分类号:U491.2

文献标志码:A

Safety evaluation model of long-steep downgrade section for montane highway based on driving workload

LIN Sheng¹, LIU Jian-bei², YAN Ying³, LUO Jing², YUAN Zhen-zhou¹

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;

3. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The existing psychological and physiological driving indexes and safety evaluation methods were analyzed, the practical vehicle test on the continuous long-steep downgrade sections of typical montane highway was put out, and the 23 549 heart rate variability(HRV) indexes of 27 truck drivers on 22 test sections were collected. Heart rate variability was taken as driving workload, the driving workload model related with longitudinal slope degree, slope length and vehicle speed was set up, and the interval range of driving comfort level on long-steep downgrade section was determined. Based on the threshold division range of driving workload, the relationship between driving workload and longitudinal slope index was analyzed, and example verification was carried out. Verification result indicates that when vehicle speed is not more than $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and slope degree is from -6% to -3% , the determined risk sections contain all the

收稿日期:2013-07-18

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2011 318 490 790);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012JC042, 2013G1221025)

作者简介:林 声(1972-),男,内蒙古通辽人,北京交通大学工学博士研究生,从事道路交通安全研究。

导师简介:袁振洲(1966-),男,辽宁朝阳人,北京交通大学教授,工学博士。

accident frequent sections by using the proposed model. There are 38 traffic accidents on the determined highest-risk section and 11 traffic accidents on the determined higher-risk section, and the ratio of the death toll on the two risk sections to the total death toll is 84%. The evaluation result is consistent with the actual traffic accident distribution, so the proposed model is effective. 7 tabs, 8 figs, 22 refs.

Key words: traffic safety; long-steep downgrade section; evaluation model; driving workload; accident rate

Author resumes: LIN Sheng(1972-), male, doctoral student, +86-10-62667895, linsheng@cchmet.com; YUAN Zhen-zhou(1966-), male, professor, PhD, +86-10-51688502, zzyuan@bjtu.edu.cn.

0 引 言

山区高速公路受复杂地形地貌、自然环境等因素限制,在公路布线时为克服地形高差通常易出现连续长大单向坡展线情况。近年来,随着多条具有连续长大下坡路段的山区高速公路的开通运营,发现长大下坡路段事故较多且伤害程度严重。通过驾驶人的问卷调查结果也表明:山区高速公路连续长大下坡路段是驾驶人普遍认为的危险路段和事故多发路段。山区高速公路安全性评价中,对于连续长大下坡路段,通常采用运行速度协调性、一致性等评价方法,但是由于运行速度模型在连续长大坡路段具有局限性,持续达到最大运行速度的分布特征使评价结果失去意义。由此,有学者从研究行车过程中连续长大下坡路段线形指标对驾驶人心生理的影响入手,分析复杂公路条件引起驾驶人的心率、血压、眼动等指标的变化规律,构建能够表征行驶条件难易程度的心生理值域,是进行长大下坡路段安全性评价的有效手段。

Waard 等采用眼动指标研究了不同道路视觉任务的难易程度和变化规律^[1-2];Musa 研究了道路条件与驾驶负荷间的相互关系,建立了采用关注度表征的驾驶负荷模型^[3];Chung 等基于韩国 2 条高速公路研究确定了表征驾驶人心生理的 12 个重要指标,建立了驾驶人的能力-需求模型^[4];潘晓东等研究驾驶人的心率和血压的变动规律,用定量分析的方法研究了道路线形构造与驾驶人心理压力和生理负担间的相关性^[5-6];郑柯从驾驶人心生理的角度出发,通过测量不同驾驶人在同一段高速公路上行车的心率反应,建立了线形与心率、速度等指标的关系模型,得出适合驾驶人心生理需求的高速公路线形指标^[7];乔建刚研究了在平顺、单一纵坡路段上的驾驶人心率的变化规律,提出了满足驾驶舒适性的

山区双车道公路线形设计参数^[8];王书灵基于山区双车道公路的驾驶人心率增长率模型的基础上,提出了山区三级公路的极限坡度和坡长建议值^[9];唐登科基于动态心电图和血压计建立了心率与车速、平曲线半径之间的回归模型^[10];阎莹等进行了驾驶人在不同坡度和弯坡组合段的行车试验,得出了驾驶人在下坡路段上行驶时的纵坡与车速、心率增量的回归模型^[11];曹新涛采用 LFNU 作为评价驾驶负荷的指标,研究了纵坡路段行车过程中驾驶人心生理反应和速度、道路线形的关系,并建立了相应的关系模型^[12],但纵坡段模型中并未考虑坡长的影响;廖军洪等以心率增长率作为表征驾驶人心理变化的指标,建立了驾驶人心率增长率与车辆行驶距离、坡度指标和车辆运行速度的关系模型^[13]。

由于在实际行车条件下受外界环境干扰性较大,表征驾驶负荷的心生理变量的相关数据精度不足,导致上述研究评价模型难以在实际应用中推广。胡江碧等提出了采用心率变异性表征驾驶负荷,并给出驾驶负荷的安全阈值^[14-15],在工程应用研究中具有一定实用性。本文基于心率变异性,建立了与高速公路连续长大下坡路段坡度、坡长和车速相关的驾驶负荷模型。在常规驾驶负荷安全分级阈值基础上,提出了下坡段驾驶负荷舒适性的纵坡指标范围,并在评价案例事故分布分析中加以验证。

1 驾驶负荷

在行车过程中,受道路线形、交通状况和环境条件影响,驾驶人在精神压力下支撑工作信息的能力称为驾驶负荷^[14]。在高速公路行车过程中,驾驶人接收的道路信息量大,路线线形、交通流特征以及较高的行车速度均导致驾驶人的工作负荷升高,当处于这种紧张状态的驾驶时间越长就易出现驾驶人驾驶能力难以胜任驾驶负荷需求的情况,从而带来交

通安全隐患。同样的,在道路线形单调、信息量较少的路段,单一枯燥的行驶环境使驾驶人长时间保持低驾驶负荷的状态,容易导致驾驶疲劳。只有在道路线形条件提供的驾驶需求与驾驶人的驾驶负荷相匹配时,驾驶人的驾驶负荷处于可接受的最佳标准驾驶负荷范围内时,事故率最低,合理的驾驶负荷实现了安全行车^[15-16]。驾驶人驾驶负荷与事故率间的关系见图 1。

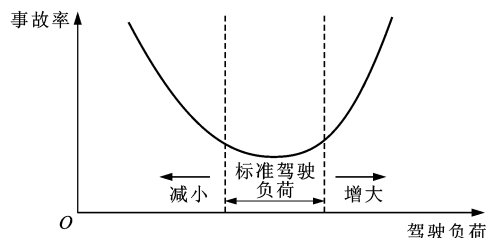


图 1 事故率与驾驶负荷关系

Fig. 1 Relation of accident rate and driving workload

表征驾驶人工作负荷的心生理指标有多种方式,例如心率、皮肤电阻、ECG、EEG、眼动、瞳孔变化和呼吸变化等。从实际行车条件对心生理的影响程度、指标的可靠性以及观测获取方法的可实现性考虑,本文采用路段断面运行速度对应的驾驶人心率变异性(HRV)指标来表征驾驶负荷^[14-18]。

参考文献[14],采用 HRV 指标变化值和运行速度之比作为评价驾驶人驾驶负荷的指标 K_{ij} ,即

$$K_{ij} = (A_{ij} - A_i)/V_{ij} \tag{1}$$

式中: K_{ij} 为驾驶人*i*在道路*j*上的驾驶负荷; A_{ij} 为驾驶人*i*在道路*j*上的 HRV 值; A_i 为驾驶人*i*正常驾驶时的 HRV 值; V_{ij} 为驾驶人*i*在道路*j*上的车速。

参考文献[15],货车驾驶人的驾驶负荷分级阈值见表 1, K 为驾驶负荷。

表 1 驾驶负荷划分

Tab. 1 Division of driving workloads

路段安全级别	驾驶负荷种类	阈值范围
高风险路段	高	$K>0.070$
	低	$K\leq-0.011$
较高风险路段	较高	$0.035<K\leq0.070$
	较低	$-0.011<K\leq-0.001$
安全路段	正常	$-0.001<K\leq0.035$

2 数据采集与分析

2.1 驾驶人样本

根据试验目的,选择身体健康、驾驶反应正常的驾驶人在高速公路连续长大下坡路段进行实车试

验,以采集下坡过程中驾驶人生理指标数据和车辆运行速度数据。在 2 条典型山区高速公路分别选取货车驾驶人 12、15 名,驾驶人信息见表 2。

表 2 驾驶人信息

Tab. 2 Driver information

试验路	驾驶人数量	年龄分布/%		驾龄分布/%	
高速公路 1	12	20~29 岁	33	5 年以下	15
		30~39 岁	52	5~9 年	44
		40~49 岁	11	10~15 年	23
高速公路 2	15	50 岁以上	4	16~20 年	11
				20 年以上	7

2.2 心生理观测设备

试验采用的 KF2 型动态多参数生理检测仪见图 2。生理检测仪可监测驾驶人驾驶过程中的心率、心电、呼吸以及体表温度等心生理指标,同时搭配多功能视距仪观测驾驶人对于公路行驶条件的关注度,目的是有效剔除其他因素对驾驶人驾驶心生理的影响^[19-22]。



图 2 生理检测仪

Fig. 2 Physiological detector

2.3 纵坡路段数据采集样本量

根据高速公路纵坡路段的划分原则,将平曲线半径大于 1 000 m、坡度大于 3%、坡长大于 300 m 的路段划分为纵坡路段。选取曲线半径 800 m 以上、纵坡 3% 以上、坡长 80 m 以上的路段作为试验路段,划分范围略大于规定要求,以便于保证基于驾驶人心生理反应的路段划分边界阈值的精度要求。选取符合试验要求的路段 22 段,坡度范围为-6.0%~-2.8%,坡长范围为 80~936 m,有效样本量见表 3。

2.4 试验有效样本数据

采集上述 2 条高速公路 22 段试验路段 27 名货车驾驶人的心率变异性指标共计 23 549 个,剔除环境干扰影响后,得到有效试验数据 38 组,货车运行

速度值均不大于 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 根据式(1)计算得到不同驾驶人在各试验路段不同运行速度下的驾驶负荷, 试验数据见表 4。

表 3 有效样本量

Tab. 3 Effective sample size

试验路段	坡度/%	坡长/m	试验路段数量	驾驶人有效样本量
高速公路 1	-4.5~-2.8	80~299	8	12
高速公路 2	-6.0~-2.8	135~936	14	15
总计			22	27

表 4 试验数据

Tab. 4 Test data

坡度/%	坡长/m	驾驶负荷	坡度/%	坡长/m	驾驶负荷
-6.00	135	0.047 113	-5.30	270	0.054 801
-6.00	135	0.065 738	-5.30	270	0.064 087
-6.00	204	0.068 939	-5.30	270	0.075 952
-6.00	204	0.071 919	-4.50	235	0.057 280
-6.00	936	0.070 962	-4.50	235	0.058 500
-6.00	936	0.083 171	-4.30	299	0.057 804
-6.00	936	0.079 278	-4.30	299	0.063 932
-5.75	207	0.051 134	-4.00	158	0.038 031
-5.75	207	0.056 430	-4.00	158	0.048 206
-5.58	275	0.040 084	-4.00	158	0.052 523
-5.58	275	0.069 965	-3.81	97	0.036 588
-5.58	275	0.072 187	-3.80	470	0.054 664
-5.50	175	0.046 591	-3.80	470	0.056 067
-5.50	175	0.048 881	-3.80	470	0.058 730
-5.50	175	0.049 556	-3.40	156	0.036 644
-5.50	619	0.071 771	-3.24	480	0.040 735
-5.50	619	0.069 065	-3.24	480	0.053 040
-5.50	619	0.067 763	-3.24	480	0.052 492
-5.50	619	0.069 142	-3.00	108	0.034 014

3 关系模型

3.1 影响因素分析

模型的影响因素分析包括驾驶负荷与纵坡路段线形指标(坡度、坡长)关系的定性与定量分析。驾驶负荷与纵坡坡度的散点分布见图 3, 从中可以看出, 驾驶人在下坡行驶时, 随着坡度的增加, 驾驶负荷随之增大, 驾驶人在下坡时的驾驶负荷与纵坡坡度存在明显正相关关系。

驾驶负荷与纵坡坡长的散点分布见图 4, 从中可以看出, 驾驶人在下坡行驶时, 随着坡长的增加,

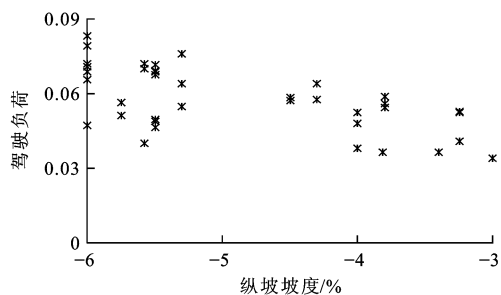


图 3 驾驶负荷与纵坡坡度的关系

Fig. 3 Relationship between driving workload and longitudinal slope degree

驾驶负荷随之增加, 驾驶人在下坡时的驾驶负荷变化与纵坡坡长存在明显正相关关系。

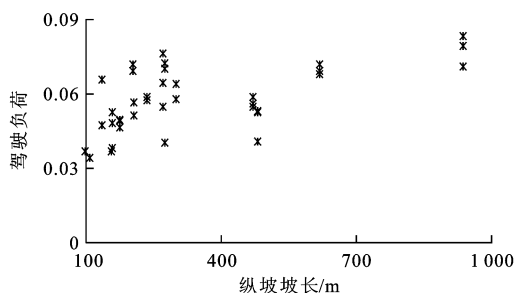


图 4 驾驶负荷与纵坡坡长的关系

Fig. 4 Relationship between driving workload and longitudinal slope length

3.2 模型的建立

驾驶负荷主要受道路线形条件、行车状态、交通状况、气候环境以及驾驶人安全态度等因素的影响, 其中道路线形条件是较为重要的影响因素, 考虑上述影响因素的驾驶人驾驶负荷模型为

$$K = f_1(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5) \quad (2)$$

式中: β_1 为道路线形指标; β_2 为行车状态指标; β_3 为交通状况指标; β_4 为气候条件指标; β_5 为驾驶人安全态度指标。

道路线形指标主要包括道路的平曲线半径 R 、纵坡坡度 i 、纵坡坡长 L 等线形指标; 行车状态指标主要指车辆在该路段的运行速度。为简化模型, 剔除交通状况、气候环境等因素对驾驶人行车驾驶负荷的影响, 得到驾驶人驾驶负荷模型为

$$K = f_2(\beta_1, \beta_2) \quad (3)$$

通过对驾驶人在下坡路段的驾驶负荷规律分析可知, 在车速不大于 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 坡度在 $-6\% \sim -3\%$ 之间时, 驾驶人的驾驶负荷与坡度、坡长呈现出双因素相关。应用试验数据, 采用 Origin Pro 8.6 统计分析软件回归分析得到大型车下坡时驾驶负荷与坡度和坡长的关系模型为

$$\begin{cases} K=-6.82\times10^{-3}i+0.011\ln(L)-0.039 \\ R^2=0.653 \end{cases} \quad (4)$$

式中: R^2 为拟合优度。

4 驾驶负荷与纵坡指标关系

根据表 1 可知,当 $K>0.070$ 时,驾驶人会出现高负荷工作状态,当 $K\leq-0.011$ 时,驾驶人会出现低负荷工作状态,此时的路段均为高风险路段,在高速公路设计中应避免出现该路段;当 $K\in(0.035,0.070]$ 时,驾驶人会出现较高负荷的工作状态;当 $K\in(-0.011,-0.001]$ 时,驾驶人会出现较低负荷的工作状态,此时的路段均为较高风险路段,在较高风险路段,道路线形具有可识别性,能够满足驾驶人的工作负荷能力;当 $K\in(-0.001,0.035]$ 时,驾驶人工作负荷状态正常。高速公路长大下坡路段纵坡坡度、坡长指标与驾驶负荷的舒适度关系见图 5。

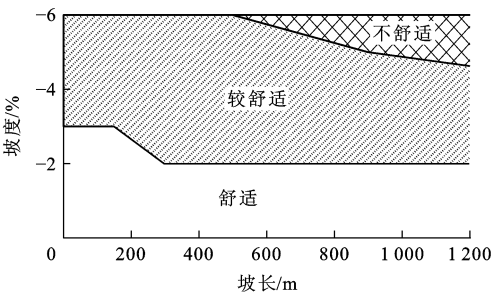


图 5 驾驶负荷舒适度
Fig. 5 Driving workload comfort level

5 评价案例

驾驶负荷能够很好地反映驾驶人的不同工作状态,驾驶负荷过大或者过小都是比较危险的。以试验路段高速公路 1 为例,进行驾驶负荷分析。高速公路 1 为典型山区高速公路,沿线 K25~K48 段处于越岭线。在 K39+300 附近处于哑口位置,哑口两侧均处于连续长大下坡路段,纵断面见图 6,对应的坡度与线长见表 5(K27+510~K34+370 为路段 1, K41+370~K46+000 为路段 2),驾驶负荷分析见图 7、8。

正向(右幅车道行驶)最大驾驶负荷处为 K44~K45,位于正向下坡段坡底位置,驾驶人需要频繁完成制动等操作,持续处于高驾驶负荷状态,根据事故统计资料,该处为正向事故数最高处,事故严重程度也最高,与驾驶负荷计算结果吻合。反向(左幅车道行驶)最大驾驶负荷处为 K29~K30,位于反向下坡段中下游位置,根据事故统计资料,该处为反向事故数最高处,且事故严重程度也较高,与驾驶负荷计算

结果一致。正、反两方向处于高风险和较高风险路段事故见表 6、7,根据驾驶负荷判别得到的高风险与较高风险路段与实际事故发生位置吻合度较好,驾驶负荷评价得到的高风险与较高风险路段包含实际事故多发路段或与事故多发路段位置接近。

表 5 坡度和坡长

Tab. 5 Slope degrees and slope lengths			
起点桩号	终点桩号	坡度/%	坡长/m
K27+510	K28+150	5.75	640
K28+150	K28+350	3.00	200
K28+350	K29+000	5.00	650
K29+000	K29+540	2.57	540
K29+540	K30+170	5.50	630
K30+170	K30+370	3.00	200
K30+370	K31+050	5.50	680
K31+050	K31+260	3.00	210
K31+260	K31+910	5.75	650
K31+910	K32+210	3.00	300
K32+210	K32+870	5.50	660
K32+870	K33+020	3.00	150
K33+020	K33+620	6.00	600
K33+620	K33+770	3.00	150
K33+770	K34+370	6.00	600
K41+370	K41+970	-6.00	600
K41+970	K42+200	-3.00	230
K42+200	K42+800	-6.00	600
K42+800	K43+010	-3.00	210
K43+010	K43+610	-6.00	600
K43+610	K43+790	-3.00	180
K43+790	K44+390	-6.00	600
K44+390	K44+680	-3.00	290
K44+680	K45+340	-5.20	660
K45+340	K46+000	-2.50	660

表 6 正向交通事故分布

Tab. 6 Distribution of forward traffic accidents			
风险等级	负荷评价路段	事故分布情况	事故数量
高风险路段	K41+149~K43+556	K42+600、K43+400	2
	K44+183~K45+748	K44+300、K44+600、K44+920、K45+612(事故多发路段)	8
较高风险路段	K41+029	K41+100、K41+750	2
	K44+048	K44+000	1
	K46+275	K46+182	1
合计			14

根据该路段 2008~2011 年事故统计资料,剔除与道路线形明显无关原因引起的事故后,该高速公路事故多发路段共计 3 处,事故多发路段均

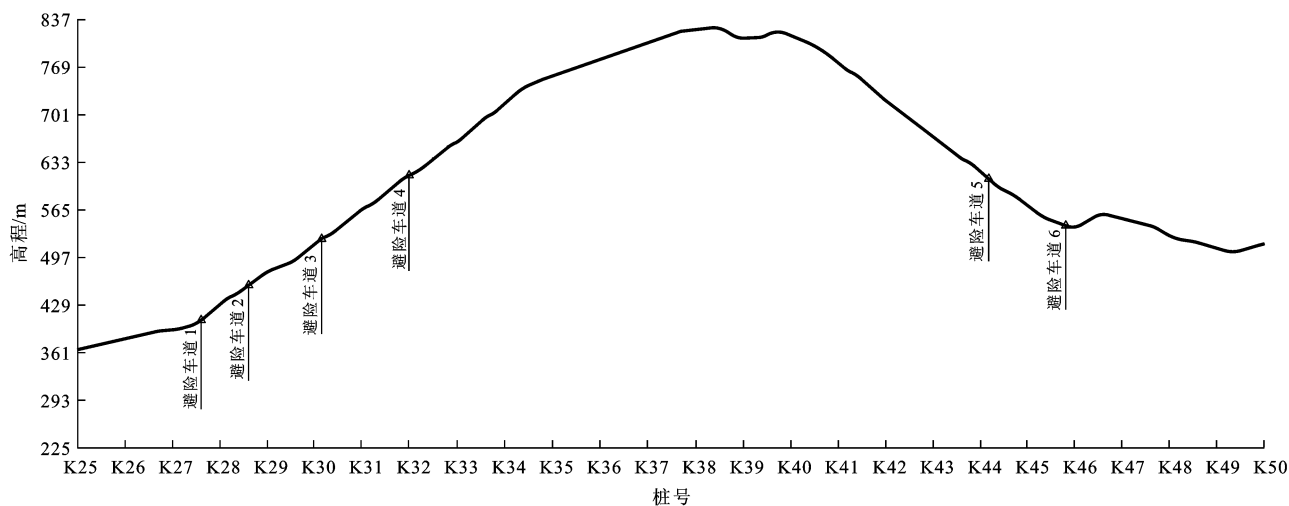


图 6 纵断面

Fig. 6 Vertical section

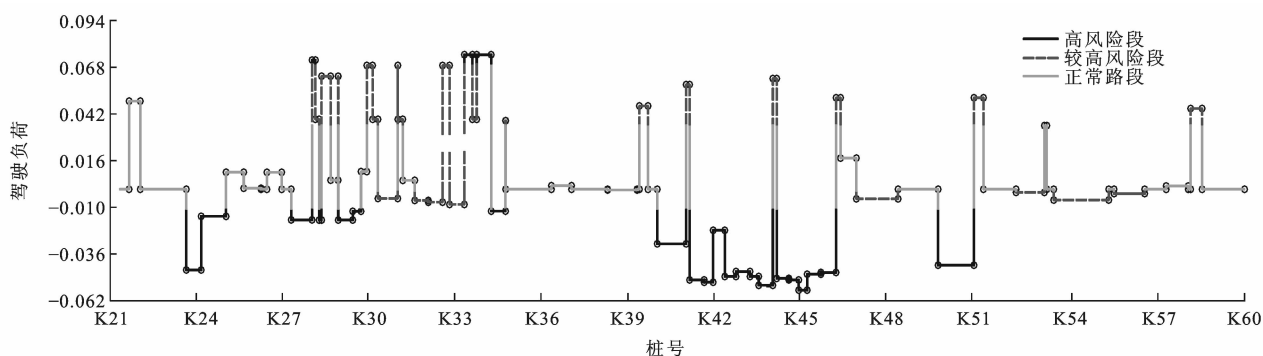


图 7 正向驾驶负荷

Fig. 7 Forward driving workload

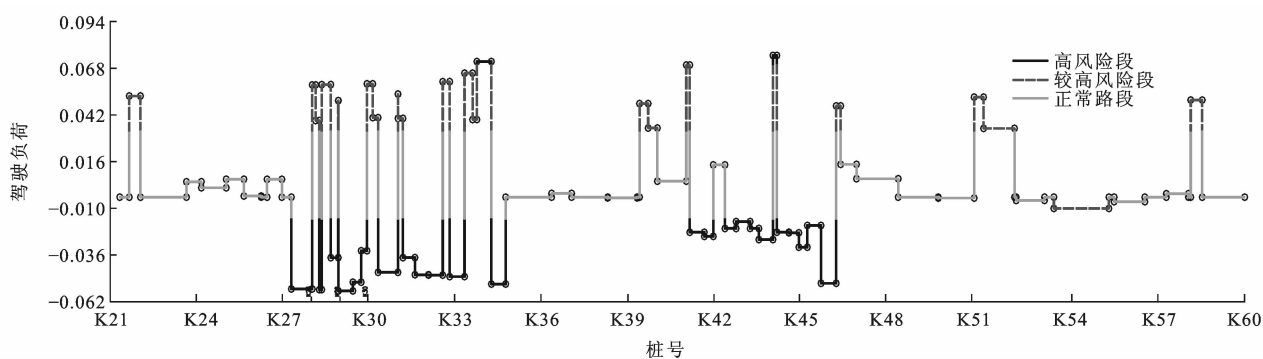


图 8 反向驾驶负荷

Fig. 8 Reverse driving workload

位于高风险路段。该路段发生死伤交通事故 63 起,位于高风险和较高风险路段的事故 49 起,占总事故的 78%,其中位于高风险路段的事故 38 起,占总事故的 60%,位于较高风险路段的事故 11 起,占总事故的 18%;高风险路段事故死亡人数占总死亡人数的 74%,较高风险路段事故死亡人数占总死亡人数的 10%,高风险路段事故严重程度高于较高风险路段。基于驾驶负荷的安全

性评价模型对连续长大下坡路段的评价结果与实际交通事故分布相吻合。

6 结 语

通过驾驶负荷与长大下坡路段线形指标的相关性分析,发现货车驾驶员的驾驶负荷与长大下坡段坡度、坡长存在较好的相关性。通过对试验采集到的 22 个长大下坡试验路段 27 名驾驶员所测得的

表 7 反向交通事故分布

Tab. 7 Distribution of reverse traffic accidents

风险等级	负荷评价路段	事故分布情况	事故数量
高风险路段	K28+034	K28+000	2
	K28+366	K28+500、K28+530	2
	K28+940	K28+700~900 (事故多发路段)	5
	K29+450~K29+969	K29+350~K29+900 (事故多发路段)	9
	K31+640~K32+607	K31+100~K31+900	2
	K32+824	K32+900	4
	K33+340	K33+100	1
	K34+275	K34+270	1
	K34+765	K34+800	2
较高风险路段	K28+150~K28+281	K28+100、K28+130	2
	K28+680	K28+620、K28+636	1
	K30+170~K30+357	K30+100~K30+900	2
	K31+050~K31+222	K31+100	1
合计	K33+770	K33+900	1
			35

38 组有效试验数据进行分析,建立了与纵坡坡度、坡长和车速相关的驾驶负荷模型,提出了纵坡坡度与坡长的驾驶负荷舒适度区间范围。通过试验路段交通事故数据的统计分析,本文提出的驾驶负荷模型可预测连续长大下坡路段事故相对集中的位置。本文模型适用范围为车速不大于 $75\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,坡度范围在 $-6\%\sim-3\%$,对于超出模型适用范围的长大下坡路段模型也是后续研究的重点。

参考文献:

References:

[1] WAARD D. The measurement of drivers' mental workload[D]. Groningen: University of Groningen, 1996.

[2] VICTOR T W, HARBLUK J L, ENGSTROM J A. Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2005, 8(2): 167-190.

[3] MUSA P T. Dynamic driver workload assessment and its implications for highway design and operations[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2003.

[4] CHUNG B J, PARK J B, KIM J Y, et al. A study on analysis methodology of driver's psycho-physiological signal to evaluate road safety level[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2003, 5(10): 2607-2617.

[5] 潘晓东,杨 轸,朱照宏. 驾驶员心率和血压变动与山区公路曲线半径关系[J]. 同济大学学报:自然科学版,2005,33(7): 900-903.

PAN Xiao-dong, YANG Zhen, ZHU Zhao-hong. Relationship between variation of drivers' heart rate and systolic blood pressure and curvature radius of mountainous highways[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(7): 900-903. (in Chinese)

[6] 张 菁,巨永锋. 快速路交织区交通流模型研究[J]. 中国公路学报,2011,24(5):89-93.

ZHANG Jing, JU Yong-feng. Research on traffic flow model of expressway weaving area[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 89-93. (in Chinese)

[7] 郑 柯. 基于驾驶员心理生理反应的高速公路线形研究[D]. 北京:北京工业大学,2003.

ZHENG Ke. Freeway alignment research based on driver's physiological and psychological reaction[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003. (in Chinese)

[8] 乔建刚. 基于驾驶员因素的山区双车道公路关键参数研究[D]. 北京:北京工业大学,2006.

QIAO Jian-gang. Study on the key parameter of two-lane highway in mountain area based on driver's factors[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. (in Chinese)

[9] 王书灵. 基于驾驶员心理生理反应的山区双车道公路极限坡度坡长研究[D]. 北京:北京工业大学,2005.

WANG Shu-ling. Research of limited slope grade and length of two-lane mountainous highway based on driver's psychological and physiological reflection [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005. (in Chinese)

[10] 唐登科. 驾驶员驾车生理、心理反应与道路线形关系的研究[D]. 南京:东南大学,2006.

TANG Deng-ke. Research on the relationship of driver's physiological and mental reaction, and road linetype [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)

[11] 阎 莹,刘浩学. 山区公路纵坡路段线形指标对驾驶员心理生理影响研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2008,32(6):1013-1016.

YAN Ying, LIU Hao-xue. Study on effect of alignment index of longitudinal slop sections of mountain roads on drivers' psychology and physiology[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2008, 32(6): 1013-1016. (in Chinese)

[12] 曹新涛. 基于驾驶工作负荷的高速公路纵坡路段线形安全评价研究[D]. 北京:北京工业大学,2009.

CAO Xin-tao. Study on safety evaluation of longitudinal highway section alignment based on driving workload [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. (in Chinese)

[13] 廖军洪,邵春福,郭洪波,等. 连续长大下坡心率与线形指标关系模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2012,12(4):184-189.

LIAO Jun-hong, SHAO Chun-fu, WU Hong-bo, et al. Modeling drivers's heart rate and highway alignment relationship on long steep downgrades[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(4): 184-189. (in Chinese)

[14] 胡江碧,杨 洋,张美杰. 山区高速公路弯坡组合段安全性评

- 价方法[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增): 89-92.
- HU Jiang-bi, YANG Yang, ZHANG Mei-jie. Safety evaluation method of combination of vertical and horizontal curves for mountainous expressway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(S): 89-92. (in Chinese)
- [15] 刘建蓓, 郭忠印, 胡江碧, 等. 公路路线设计安全性评价方法与标准[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增): 28-35.
- LIU Jian-bei, GUO Zhong-yin, HU Jiang-bi, et al. Safety evaluation method and standard of highway alignment design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(S): 28-35. (in Chinese)
- [16] 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 Jia-chuan, 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. (in Chinese)
- [17] BROOKHUIS K A, WAARD D. Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures[J]. Accident Analysis and Prevention, 2010, 42(3): 898-903.
- [18] JAHN G, OEHME A, KREMS J F, et al. Peripheral detection as a workload measure in driving: effects of traffic complexity and route guidance[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2005, 8(3): 255-275.
- [19] CAFISO S, GRAZIANO A, CAVA G. Actual driving data analysis for design consistency evaluation[J]. Transportation Research Record, 2005(1912): 19-30.
- [20] 邵海鹏, 杨雪峰. 面向公路线形评价的驾驶人方向控制模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(3): 84-88.
- SHAO Hai-peng, YANG Xue-feng. Modeling of driver direction control for road alignment evaluation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 84-88. (in Chinese)
- [21] 丁光明, 刘浩学, 赵炜华, 等. 高速公路长隧道出口段驾驶人视觉特征变化规律[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(2): 77-80, 85.
- DING Guang-ming, LIU Hao-xue, ZHAO Wei-hua, et al. Variation of driver's visual features in expressway tunnel exit[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 77-80, 85. (in Chinese)
- [22] 赵建有, 何 操, 郑明明. 高速公路隧道纵坡对驾驶人速率的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 80-83, 100.
- ZHAO Jian-you, HE Cao, ZHENG Ming-ming. Effect of longitudinal slope of tunnel of freeway on heart beat of drivers[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 80-83, 100. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 89 页)
- 力特性[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 31-39.
- HUANG Xiang-jing, XU Gui-lin, PENG Li. Failure surface and bearing capacity character of combined reinforced gabion retaining wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 31-39. (in Chinese)
- [13] 裴玉龙, 张树升. 区域干线公路网规划理论的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995, 28(2): 106-114.
- PEI Yu-long, ZHANG Shu-sheng. Research on the planning theory of highway network[J]. Journal of Harbin University of Architecture and Engineering, 1995, 28(2): 106-114. (in Chinese)
- [14] 周 伟, 向前忠. 公路网规划后评价的理论与方法[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 99-103.
- ZHOU Wei, XIANG Qian-zhong. Theory and method for post-evaluation of highway network planning [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 99-103. (in Chinese)
- [15] 王江平, 李继锐. 基尼系数与公路发展均衡性分析[J]. 交通世界, 2006(11): 66-69.
- WANG Jiang-ping, LI Ji-rui. Analysis of Gini coefficient and highway development balance[J]. Transpworld, 2006 (11): 66-69. (in Chinese)
- [16] 赵牡丹, 陈正江, 晋 锐. DEM 提取地面平均坡度误差的量化模拟[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 55-57.
- ZHAO Mu-dan, CHENG Zheng-jiang, JIN Rui. A math-simulation on accuracy of gradient extracted from DEMs[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(3): 55-57. (in Chinese)
- [17] 封志明, 唐 焰, 杨艳昭, 等. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J]. 地理学报, 2007, 62(10): 1073-1082.
- FENG Zhi-ming, TANG Yan, YANG Yan-zhao, et al. The relief degree of land surface in China and its correlation with population distribution[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 62(10): 1073-1082. (in Chinese)
- [18] 朱 辉, 李沛才, 陈绍莹. 公路网现状综合评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(5): 79-82.
- ZHU Hui, LI Pei-cai, CHEN Shao-ying. Synthetic evaluation of highway network actuality[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 79-82. (in Chinese)
- [19] 张长生, 马荣国. 高原山区公路网均衡性评价及发展对策研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(8): 114-119.
- ZHANG Chang-sheng, MA Rong-guo. Equilibrium evaluation and development strategies for highway network in plateau mountain[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(8): 114-119. (in Chinese)