

基于驾驶员心率变化的山区旅游公路线形安全性研究

王清洲^{1,2}▲ 陈佳梦¹ 范鑫³ 国腾飞¹

(1.河北工业大学土木与交通学院 天津 300401;2.河北省土木工程技术研究中心 天津 300401;

3.天津铁道职业技术学院铁道运输系 天津 300240)

摘 要 为研究山区旅游公路密集复杂线形及突破规范极限值的部分线形带来的行车安全问题,选用多名驾驶员进行实车实验,采集行车过程中驾驶员的心率增长率 N ,路线线形指标(纵坡坡度 i ,圆曲线半径 r)和运行速度 v 等数据,运用SPSS和Matlab软件分析 i, r, v 对心率增长率的影响规律,建立 $N(i), N(r), N(i, r, v)$ 关系模型。实验结果表明,随着半径减小、纵坡增大,心率增长率整体上升,大部分心率增长率在25%~45%之间,且速度对心率增长率的影响高于半径和纵坡;建议山区旅游公路圆曲线极限最小半径 ≥ 20 m,最大纵坡 $\leq 8.5\%$,圆曲线半径 ≤ 15 m时,限速值不应超过20 km/h。根据心率增长率及速度差等指标,提出敏感路段具有的特征,及敏感路段应采取的限速值和安全防护措施。

关键词 山区旅游公路;心率增长率;线形指标;关系模型;敏感路段

中图分类号:X951 **文献标志码**:A **doi**:10.3963/j.issn.1674-4861.2018.03.003

A Study on Alignment Security of Tourist Highways in Mountain Areas Based on Heart Rate Change of Drivers

WANG Qingzhou^{1,2}▲ CHEN Jiameng¹ FAN Xin³ GUO Tengfei¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering,

Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China;

3. Railway Transportation Department, Tianjin Railway

Technical and Vocational College, Tianjin 300240, China)

Abstract: In order to study problems of traffic safety of tourist highways in mountain areas caused by complex alignments, especially which broke criteria limits, multiple drivers are selected for filed experiments. Growth rate of heart rate N , highway alignment indices (slope grade i , circle radius r), and running speed v are collected during driving. A relational model of $N(i), N(r), N(i, r, v)$ is established using SPSS and Matlab to analyze the influences of i, r , and v on the growth rate of heart rate. The result shows that as the radius decreases or the slope grade increases, the growth rate of heart rate increases as a whole, and most of which is 25%—45%. The influences of speed on heart rate growth are higher than the radius and vertical slope. It suggests that the minimum radius of the circle of tourism highways in mountain areas should be greater than 20 m, and the steepest slope less than 8.5%. The limit of speed should not over 20 km/h when the radius is less than 15 m. According to the growth rate of heart rate and speed differences, characteristics, speed limits, and safety precautions for risky road sections is proposed.

Key words: tourist highways in mountain areas; growth rate of heart rate; alignment index; relational model; risky road sections

0 引 言

近 10 年国内旅游产业发展迅速,山区旅游公路因线形复杂,导致交通事故频发,自驾游的安全性亟待关注。山区旅游公路为避免破坏原有地貌、植被和景致顺势而建,舍弃高技术等级、高桥隧比作为路线设计的目标^[1],因此,常出现技术等级低、路窄、坡陡、弯急的路段,甚至突破设计规范中部分参数的极限值以克服复杂地形,加重驾驶员的生理负荷,易造成交通事故,危及司乘人员的生命财产安全。

国内外对普通公路、山区公路的安全性研究,以及对驾驶员生理心理负荷的研究取得许多成果。美国、英国和澳大利亚的专家学者 P. Bhal-la, S. Tripathi 和 S. Palria^[2] 经过对大量事故的深入研究,认为人作为影响因素之一,影响程度最大,均超 50%。S. F. Kazemi 和 Y. Shafahi^[3] 对道路线形的设计理念提出灵活使用,顺应地形,兼顾考虑汽车动力和车身设计与道路周围环境、所处地形、驾驶员操作行为等因素,制定宽泛线形指标,根据实际地形特征选用。S. Kang 和 S. M. Lee^[4] 通过 1996—2000 年的大量观测数据及地理信息系统(GIS)辅助测试和研究,提出在交通事故中的风险因子,发现平曲线与事故率显著相关。曹友露^[5] 利用 Smart Eye Pro 5.7 型眼动仪及 GNSS 接收机进行双车道公路驾驶员眼动试验,记录了行驶过程驾驶员眼动参数,确定视觉负荷强度值,根据视觉负荷强度对双车道公路线形进行安全评价。潘晓东^[6] 研究人体信息技术,通过驾驶员脉搏数和血压值建立评价驾驶员心理生理上的反应指标,研究道路交通环境对驾驶员形成的心理上的影响和生理上的负担,用以评价道路线形的安全视距及优劣性,并提出改善方案。

已有研究成果主要针对高速公路、山区干线公路驾驶员生理负荷与线形的关系,对于线形更复杂且有较多不满足规范设计值的旅游公路的安全性评价鲜有报道,使山区旅游公路的线形设计缺少可参考的理论依据。通过分析山区旅游公路驾驶员心率变化与道路线形、运行速度的关系,研究双向 2 车道山区旅游公路几何线形布置对驾驶员心理的影响,揭示驾驶员、道路线形指标、运行速度相互作用机理,建立 $N(i), N(r), N(i, r, v)$ 的关系模型,提出敏感路段的技术特征,为山区旅游公路安全性研究提出理论依据。

1 山区旅游公路的特点

旅游公路的概念与设计标准在我国尚未统一,综合目前研究成果^[7-9],满足下述之一者且修建于山岭之上的公路便可认为广义的山区旅游公路:连接景区与景区或景区内部各个景点的道路;通往景区入口的道路,虽不直接通往景区入口,但旅游车辆在该道路的交通量组成中超过一定的比例;车流量具有明显的旅游淡旺季差别;道路本身是等级公路、国省道或县乡道,但沿途风光别致优美,带给乘客和驾驶员愉快的旅途感受。

1.1 特点

1) 线形复杂,个别路段超过规范极限最小半径。平面线形中,直线线形较少,多以缓和曲线、圆曲线组成,且圆曲线半径基本小于 200 m,主要分布在 20~60 m 半径范围内,但由于小汽车转弯时的行驶速度多集中在 30~40 km/h,使得极限最小半径不满足设计要求;纵断面线形中,与平面线形组合出现很多弯坡线形,纵坡坡度分布在 3%~15%,甚至更高,常见纵坡坡度分布在 4%~10%。与 JTG B01—2014《公路工程技术标准》^[10] 中规定的各级公路圆曲线极限最小半径及最大纵坡(见表 1)相比,一些山区旅游公路线形指标已突破规范。

表 1 各级公路圆曲线极限最小半径及最大纵坡
Tab.1 Minimum radius of the limit of road circle and maximum vertical slope at all levels

设计速度/(km/h)	120	100	80	60	40	30	20
极限最小半径/m	650	400	250	125	60	30	15
最大坡度/%	3	4	5	6	7	8	9

2) 车型组成单一。根据已有文献^[11]和对实验路车流量调查发现,山区旅游公路的车型以轿车为主,占总车流量的 80% 以上。车辆间速度差较小,同向行驶的车辆协调性较好,通行效率较高。

3) 车流量与旅游淡旺季紧密相关。由于旅游公路主要为景区和旅客服务,受旅游淡旺季影响较大。

4) 驾驶员对路况陌生。由于大部分驾驶员为初次行驶在山区旅游公路上,线形复杂多变,对驾驶员有极大考验,道路安保设施及标志标线的合理布设尤为重要。

2 实验方案

2.1 实验目的

以驾驶员心率增长率作为生理负荷的评价指

标^[12],通过驾驶员在典型山区旅游公路上根据路况自由行驶,测得心率增长率与道路线形、运行速度的关系,提出山区旅游公路线形设计指标的合理取值,并根据心率变化率及速度差提出敏感路段的确定依据。

2.2 主要实验设备

实验采用 VBOX GPS 数据采集器和 TCL5000 动态心电图仪。VBOX 用于测量移动汽车的速度和距离并且提供横纵向加速度值,减速度,MFDD,时间和制动、滑行、加速等距离的准确测量。TCL5000 动态心电图仪可实现 12 导联心电波形的同步采集,连续记录时间可达 24 h,对心电信号进行无压缩存储,通过自带分析软件,可计算得到心率增长率。

2.3 实验驾驶员信息

为模拟大部分游客第一次进入景区,对道路环境陌生的情景,实验选用的实验驾驶员均为初次驾车行驶实验路段,驾驶员相关信息见表 2。

表 2 实验驾驶员信息

Tab.2 The drivers' information of the experiment

编号	性别	年龄/岁	驾龄/年	职业	驾照类型	对试验路段熟悉情况	是否有山区公路驾驶经验	健康状况
1	男	39	10	教师	A ₂	否	是	良好
2	男	51	22	教师	A ₂	否	是	良好
3	男	32	7	教师	B ₁	否	是	良好
4	男	27	5	职员	C ₁	否	否	良好
5	女	28	5	职员	C ₁	否	否	良好
6	女	24	3	职员	C ₁	否	否	良好

2.4 实验路段及测量指标

实验选取太行山保定辖区、燕山山脉承德辖区 2 段典型山区旅游公路作为实验路段,编号 1,2,由 VBOX 采集的定位信息可以在 Google Earth 软件中识别并绘制,图 1 为 1 号实验路部分路段,图 2 为 2 号实验路部分路段,2 处均为国家 4A 级景区,旅游旺季交通量大。其中 1 号实验路长 25 km,纵坡坡度分布范围为 2.3%~6.5%,平均纵坡 5.2%,圆曲线半径分布范围为 14~252 m,多集中于 20~60 m,双向两车道,沥青路面,直接连通景区入口,主导车型为家用轿车,根据暑期高峰小时车流量观测,占 90% 以上。2 号实验路长 30 km,纵坡坡度分布范围为 5%~15%,平均纵坡 9.2%,圆曲线半径分布范围为 10~170 m,多集中于 15~30 m,双向 2 车道,水泥路面,景区内部道路,车型全部为家用轿车及中型巴士。实验车辆选用大众新捷达牌汽车,排量

1.6 L。

心率、视觉行为参数是目前量化驾驶员的紧张度常用指标。其中视觉行为参数主要通过眼动仪进行测量,对外界光线及环境变化敏感。而视觉环境及公路线形复杂、光线多变是山区旅游公路的显著特征,与其他类型公路相比,不易获取与线形变化相关的视觉行为参数。随着科学技术的进步,对心率的监测设备趋向于便捷化,使用动态心电图仪实时测量驾驶员在驾驶过程中的心率,可以在不干扰驾驶员驾驶操作的基础上准确地采集心率数据。故选取心率为测试指标

通过分析,实验安排 6 名驾驶员驾驶实验车均完成全部实验路上下行行驶路程,全程记录驾驶员心率(bpm)、运行速度(km/h)、圆曲线半径(m)、纵坡坡度(%)等参数。

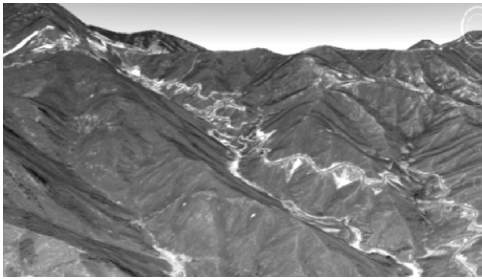


图 1 1 号实验路部分路段

Fig.1 Sections of No.1 experimental road

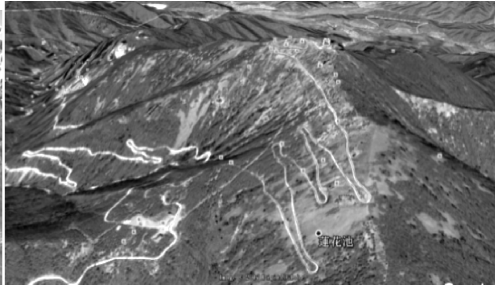


图 2 2 号实验路部分路段

Fig.2 Sections of No.2 experimental road

3 数据分析

3.1 平面线形对驾驶员心率的影响

山区旅游公路直线线形较少,小半径圆曲线($r<100\text{ m}$)较多,且半径常突破设计极限值,因此,着重研究小半径对驾驶员心率的影响。将测得的有效实验数据,应用 SPSS 软件分析,小半径与心率增长率显著相关,拟合图形如图 3。

由图 3 可知,2 条实验路的小半径路段的设计半径 r 为 40~60 m 的圆曲线较多,心率增长率 N 大部分落入 25%~45% 之间。当半径 $<40\text{ m}$

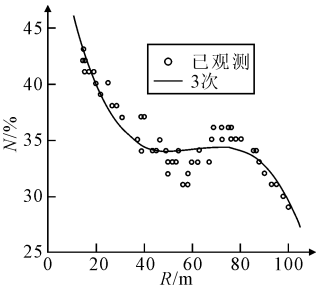


图3 心率增长率与圆曲线半径变化关系
Fig.3 The relationship of the change of heart rate and the change of radius of the circle

时,心率增长率随半径的增加而快速降低;当半径介于40~80 m之间时,心率增长率介于30%~38%之间,心率增长率较为稳定,且随着半径的增大有轻微上升趋势;当半径介于80~100 m时,心率增长率随半径的增加快速下降,心率介于25%~35%之间。心率增长率随半径的增大,整体呈下降趋势,但在圆曲线半径介于40~80 m之间时出现小幅度上升,对比分析车辆速度曲线发现,由于进入圆曲线前提前降速,到达中部后可观察到更多的道路信息,伴随着视距的改善和半径区间的允许,出现2~6 s加速行为,如图4(图中曲线为VBOX记录的速度曲线),出弯时为调整方向又迅速减速,速度在短时间内的增加后又降低,使得驾驶员在相对较小但又允许短时加速的半径范围内,心率增长率有小幅上升。

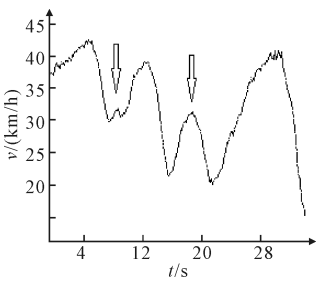


图4 圆曲线中部加速行为
Fig.4 Acceleration in the middle of the circular curve

驾驶员心率增长率与圆曲线半径之间的回归模型见式(1),对回归模型进行F检验, $R^2=0.864$,适用于山区旅游公路小半径($r<100\text{ m}$)分析与设计。

$$N = 55.957 - 1.13r + 0.019r^2 - 1.03E - 4r^3 \quad (1)$$

式中: N 为心率增长率,%; r 为圆曲线半径,m。
根据已有研究成果^[13],心率增长率大于40%后,驾驶员生理负荷进入危险阈值,故建议山区旅游公路圆曲线半径 $r>20\text{ m}$ 。

3.2 纵面线形对驾驶员心率变化的影响

3.2.1 上坡方向纵坡坡度对驾驶员心率变化的影响

在山区旅游景区,由于保护景区景观生态及整体性的要求,设置隧道穿过山体无法实现,在严格的环境限制中,纵坡坡度突破极限值克服高差也较为常见。应用SPSS对实验数据中坡度和心率增长率的进行多次回归发现,当纵坡坡度介于3%~7.5%之间时(山区旅游公路的常见纵坡坡度),心率增长率与纵坡坡度的相关性差, $R^2=0.167$,如图5;但当纵坡坡度大于7.5%时,心率增长率与纵坡坡度相关性大幅提高, $R^2=0.755$,见图6。

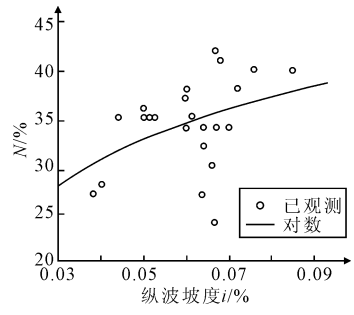


图5 纵坡坡度介于3%~7.5%之间N值变化
Fig.5 N variation as slope between 3% and 7.5%

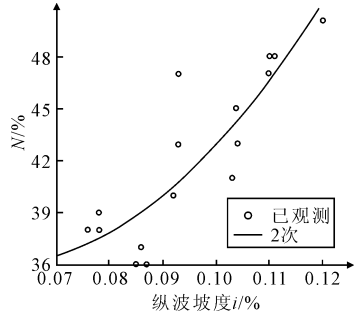


图6 纵坡坡度大于7.5% N值变化
Fig.6 N variation as slope greater than 7.5%

可见,上坡方向行驶时,当纵坡坡度介于3%~7.5%之间,对驾驶员心率变化的影响不显著,即影响较小;当纵坡坡度大于7.5%,对驾驶员心率变化发生显著影响。说明当坡度大于驾驶员心理承受值之后,驾驶员的主要生理负荷集中在对大纵坡的处理上,最大纵坡坡度心理承受值应在7.5%~9%之间,因人而异。

当纵坡坡度大于7.5%时,驾驶员心率增长率与圆曲线半径之间的回归模型见式(2),模型汇总和参数估计值见表4.2, $R^2=0.775$ 。

$$N = 0.49 - 4.53i + 39.17i^2 \quad (2)$$

式中: N 为心率增长率,%; i 为纵坡坡度。

3.2.2 下坡方向纵坡坡度对驾驶员心率变化的影响

与上坡方向的分析方法相同,通过 SPSS 对坡度和心率增长率的多次回归发现,当纵坡坡度介于 3%~7% 之间时,心率增长率与纵坡坡度的相关性差, $R^2=0.370$,如图 7;但当纵坡坡度大于 7% 时,心率增长率与纵坡坡度相关性大幅提高, $R^2=0.792$,见图 8。

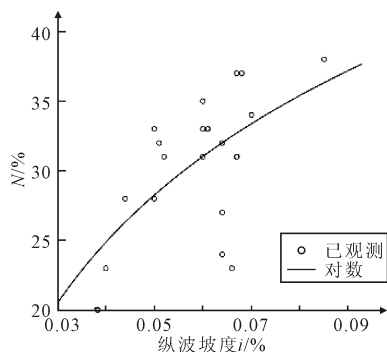


图 7 纵波坡度介于 3%~7% 之间 N 值变化
Fig.7 N variation as slope between 3% and 7%

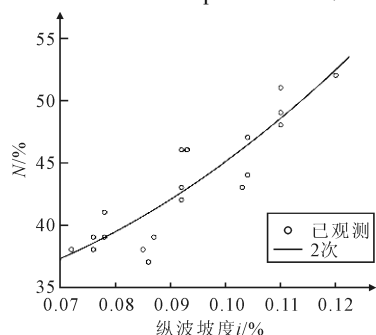


图 8 纵波坡度大于 7% N 值变化
Fig.8 N variation as slope greater than 7%

可见,下坡方向行驶时,当纵坡坡度介于 3%~7% 之间,对驾驶员心率变化的影响不显著,但相关水平 R^2 高于上坡方向,说明相同纵坡坡度,下坡对驾驶员的影响比上坡对驾驶员的影响大;当纵坡坡度大于 7%,对驾驶员心率变化发生显著影响,且 R^2 大于下坡方向,分界坡度小于上坡方向,主要是因为下坡时车辆速度明显高于上坡时,驾驶员处理时间短于上坡时,对陡坡的纵坡值比上坡更加敏感,因此,对驾驶员来说,下坡方向生理负荷更大,危险度更高。根据数据分析,下坡方向最大纵坡坡度心理承受值应在 7%~8.5% 之间,因人而异。

当纵坡坡度大于 7% 时,驾驶员心率增长率与圆曲线半径之间的回归模型见式(3)。

$$N = 0.344 - 1.113t + 21.828t^2 \quad (3)$$

式中: N 为心率增长率,%; i 为纵坡坡度。

为保证心率增长率不超过 40% 的危险阈值,建议山区旅游公路纵坡坡度 $< 8.5\%$ 。

3.3 平面线形及运行速度对驾驶员心率的影响

平、纵组合所展现的立体线形是道路线形设计的最终成果。驾驶员行车过程中不断对立体线形进行综合分析判断,决定操作行为,选择实际车速。也就是说平、纵线形组合的优劣最后会在驾驶员的心理生理指标的变化上以及车辆的运行速度上集中反映。由于直坡路段较少且相对安全,现分析弯坡路段。缓和曲线对驾驶员生理负荷强度起到调节作用,对行车安全有益,所以主要对坡度和圆曲线半径进行分析。将坡度 i 与圆曲线半径 r 综合为一个指标弯坡度 $M = i/r (0.1\%)$,分析弯坡度 M 与驾驶员心率增长率 N 的关系。采用 MATLAB 软件对自变量为弯坡度 M (对应 x 轴)、车辆运行速度 v (对应 y 轴),因变量为心率增长率 N (%) (对应 z 轴)进行拟合,由拟合运行结果可得在 95% 置信区间内, $R^2=0.7646$ 的 3 个变量的函数关系式,如式(4),拟合图形见图 9。

$$N = -17.8 + 10.78M - 0.081v - 0.896M^2 - 0.083Mv - 0.007v^2 \quad (4)$$

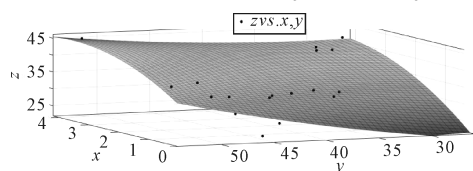


图 9 M, v, N 关系变化图
Fig.9 M, v, N relation graph

由拟合公式(4)及图 9 可见, $v, i/R$ 在显著影响心率增长率 N 的大小。其中,弯坡度 M 值一定时,速度 v 越高,心率增长率 N 越大;速度 v 一定时,弯坡度 M 值越高心率增长率 N 越大;速度 v 和弯坡度 M 值都减小(或增加)时,心率增长率 N 减小(或增加);根据图形曲面可以看出,速度对心率的影响高于弯坡度对心率的影响,因此山区旅游公路中的限速标志及减速设施对于保障行车安全至关重要,而这些恰恰是多数旅游公路所缺失的。

3.4 敏感路段特征及防护措施

3.4.1 敏感路段特征

心率是评价驾驶员生理负荷的代表性指标,心率增长率越大,对于驾驶员危险度越高,故心率变化大的路段可能是线形复杂的敏感路段。但不排除在线形良好路段由于驾驶员处理会车或自身

原因等偶然事件对心率产生较大波动。速度差对交通安全有较大影响,常常引起追尾、碰撞等事故,它反应了速度协调性,从本质上反应了线形的协调性及安全性^[16]。所以同时选用速度差作为评价条件。当速度差大于表 3 的评价标准后,应重新调整平、纵面设计^[17]。

表 3 道路连续性(运行速度协调性)评价标准

Tab.3 Evaluation criteria of road continuity		(velocity coordination)				km/h
运行速度	80	60	40	30\20		
速度差	20	18	15	12		

在 1,2 号实验路有效测试数据中,心率增长率 $\geq 40\%$ 及 1 号实验路速度差 ≥ 15 km/h、2 号实验路速度差 ≥ 12 km/h 的路段共出现 18 个。部分敏感路段特征信息见表 4。

表 4 部分敏感路段特征信息

Tab.4 Characteristic information of partial sensitive section			
纵坡/%	半径/m	前后线形组合	
8.7	15	前接直线,后接反向曲线,坡差=1%	
9.2	20	前后线形相对顺直,坡差=1%	
7.2	30	前后线形相对顺直,前方坡差 $>3\%$	
9.0	15	前后线形相对顺直,坡差 $>1\%$	
9.2	20	前后线形相对顺直,坡差 $>1\%$	
7.8	30	前后接反向曲线,坡差 $>2\%$	
8.5	15	前后线形相对顺直,坡差 $>1\%$	
8.7	15	前后线形相对顺直,坡差 $>1\%$	
9.3	15	前后线形相对顺直,坡差 $>1\%$	
10.0	20	前接反向曲线,后接直线,坡差=1%	
10.3	60	前后线形相对顺直,坡差 $>1\%$	

根据 18 个敏感路段的特征信息发现,敏感路段为陡坡或急弯路段,或陡坡急弯的情况同时存在,陡坡坡度 $>8\%$,急弯处半径 <30 m。在半径小于 20 m 的圆曲线且前后线形相对顺直处的路段,速度差最大,平均速度差达到 20 km/h 以上,速度协调性最差,同时心率增长率也会迅速升高。根据实地调研发现,小半径弯道处超高和加宽设计严重不足或根本不设。故小半径圆曲线且前后线形相对顺直的道路容易因超速、视距不良造成侧翻、占道碰撞等交通事故。

其次,当敏感路段前后坡差太大时,会造成驾驶员频繁进行换挡操作,且路段本身为圆曲线半径较小(60 m)的转弯处,视距较差,驾驶员需要及时调整车速及方向才能平稳通过,这样的路段给驾驶员的生理、心理造成较大的负荷,使得前后坡差 $\geq 2\%$ 的转弯路段也成为敏感路段。

通过 Google Earth 软件对敏感路段的立体展

现可以看到,处于山区的旅游公路,当车辆行驶于靠山体一侧,视距条件差,如图 10 箭头位置,弯坡度较大时,侧向和前方的路况均不易看到,非常危险;当车辆行驶于靠深沟或悬崖一侧,见图 11 箭头位置,且路侧险要路段缺少护栏等设施,容易使驾驶员紧张慌乱,发生事故。

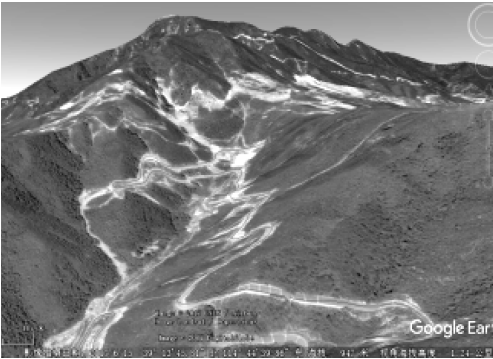


图 10 靠山体一侧
Fig.10 On the mountain side



图 11 靠深沟或悬崖一侧
Fig.11 On the side of a deep trench or cliff

3.4.2 敏感路段防护措施

1) 在半径小于 20 m 的圆曲线且前后线形相对顺直处的路段,尽可能在道路内侧加宽弯道,并严格限速。根据横向力系数 μ 的定义式,设 $\mu=0.15$ (驾驶员较低心理负荷的取值^[18]),计算得到限速的建议值,见表 5。

表 5 对应半径的限速建议值

Tab.5 Recommended velocity limit of corresponding radius											
r_0	10	15	20	30	45	50	60	70	80	100	
V	15	20	20	25	30	35	40	40	45	50	

注: r_0 为圆曲线半径,m; V 为限速建议值,km/h。

2) 在小半径圆曲线处合理设置醒目标志,在小半径曲线位置之前不短于 50 m 处外侧设置轮廓标或示警桩;根据路侧危险程度设置护栏,建议山区旅游公路中使用缆索护栏^[19]或选择外观自然、与周围环境相融合的护栏形式,但不得降低护栏防撞等级,同时应增加护栏高度至 120 cm。并设置限速标志、减速振动标线或减速带。

4 结 论

1) 建议山区旅游公路圆曲线极限最小半径大于 20 m,最陡纵坡小于 8.5%。提出对应半径下的限速建议值,特别是圆曲线半径 ≤ 15 m 时,限速不应超过 20 km/h。

2) 建立了速度、纵坡坡度、圆曲线半径三因素影响驾驶员心率增长率的关系模型,速度对心率的影响高于半径及纵坡。

3) 敏感路段具有以下特征:陡坡($i>8\%$)、急弯($r<30$ m)、坡差大($>2\%$)、临崖、视距不良路段,建议敏感路段采取速度限制和安全防护措施。

4) 山区旅游公路对驾驶员心电特征影响的试验研究中,未考虑海拔高度变化、夜间或不良天气等因素对驾驶员生理心理负荷的影响,需做进一步研究,丰富研究成果

参考文献

References

- [1] 阎莹,王晓飞,蒋威锋,等.旅游公路景观协调性评价指标权重模型研究[J].中国安全科学学报,2011,21(5):35-39.
YAN Ying, WANG Xiaofei, JIANG Weifeng, et al. Research on landscape coordination evaluation index weight model of scenic highway [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(5):35-39. (in Chinese)
- [2] BHALLA P, TRIPATHI S, PALRIA S. Road traffic accident analysis of ajmer city using remote sensing and GIS Technology [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, XL-8(8):1455-1462.
- [3] KAZEMIS F, SHAFABI Y. An integrated model of parallel processing and pso algorithm for solving optimum highway alignment problem [C]. Conference on Modelling and Simulation, Banff, Canada: IASTED, 2013.
- [4] KANG S, LEE S M. Introducing alignment based risk indices into the highway traffic accident analysis [C]. International Workshop on Computing in Civil Engineering, Pittsburgh: ASCE, 2007.
- [5] 曹友露.基于驾驶员自然引导的双车道公路几何线形安全性研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
CAO Youlu. Study on geometry alignment safety of two-lane road based on natural guidance of driver [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [6] 潘晓东.人体信息技术在道路交通环境与安全性评价中的应用[J].中国公路学报,2001,14(增刊1):109-111.
PAN Xiaodong. The application of body information technology on road and traffic environment and safety evaluation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(S1):109-111. (in Chinese)
- [7] 涂万堂,张曙光.旅游公路网布局规划研究[J].中外公路,2012,32(3):10-13.
TU Wantang, ZHANG Shuguang. Study on layout planning of tourism road network [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(3):10-13. (in Chinese)
- [8] 丁华,陈杏,张运洋.中国旅游公路概念类型及其效应[J].长安大学学报(自然科学版),2013,33(1):67-70.
DING Hua, CHEN Xing, ZHANG Yunyang. Concept, type and effect of tourism highway in China [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33(1):67-70. (in Chinese)
- [9] 徐进,舒华,毛嘉川,等.山区复杂地形条件下旅游公路安全性设计方法以及工程范例[J].公路,2015(8):1-14.
XU Jin, SHU Hua, MAO Jiachuan, et al. Design method of safety and demonstration example of mountainous tourist highway in complex terrain conditions [J]. Highway, 2015(8):1-14. (in Chinese)
- [10] 公路工程技术标准:JTG B01—2014[S].北京:人民交通出版社,2014.
Highway engineering standard specifications: JTG B01—2014 [S]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese)
- [11] 米晓艺,吴京梅,郭占洋,等.山区双车道旅游公路交通特性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(1):78-80.
MI Xiaoyi, WU Jingmei, GUO Zhanyang, et al. Analysis on traffic characteristics of two-lane tourist highways in mountainous area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2011, 30(1):78-80. (in Chinese)
- [12] 张娟.基于驾驶员因素的公路连续长坡路段线形研究[D].西安:长安大学,2012.
ZHANG Juan. Continuous long slope road alignment research based on driver's factors [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [13] 王书灵,陈金川,刘小明,等.基于驾驶员心理反应的安全坡度研究[J].公路交通科技,2007,24(2):

126-129.

WANG Shuling, CHEN Jinchuan, LIU Xiaoming, et al. Research on safety slope grade based on driver's psychological response[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(2):126-129. (in Chinese)

- [14] 吴华金, 郭海龙, 袁望方, 等. 驾驶员行车紧张度评价试验[J]. 交通运输工程学报, 2009(2):100-104. WU Huajin, GUO Hailong, YUAN Wangfang, et al. Evaluating experiment of driving tensity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009(2):100-104. (in Chinese)

- [15] 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 Jiangang. 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)

- [16] 赵磊. 山区公路运行速度协调性评价方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.

ZHAO Lei. Research on the speed coordination evaluation method on mountain area highway [D].

Chengdu: South Jiaotong University, 2010. (in Chinese)

- [17] 杨少伟. 道路勘测设计[M]. 3版. 北京: 人民交通出版社, 2009.

YANG Shaowei. Road survey and design[M]. 3rd Ed. Beijing: People Communications Press, 2009. (in Chinese)

- [18] 潘晓东, 林涛, 杨轸. 驾驶员心率血压与山区公路横向力系数关系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(6):748-751.

PAN Xiaodong, LIN Tao, YANG Zhen. Relationship between the variation of drivers' heart rate and systolic blood pressure and the coefficient of transverse force of mountainous highways [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2006, 34(6):748-751. (in Chinese)

- [19] 杨培君. 山区旅游公路防撞护栏的选择与应用[J]. 科技创新导报, 2007(14):79-79.

YANG Peijun. The selection and application of collision barrier for mountain tourist road[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2007(14):79-79. (in Chinese)

(上接第7页)

- [9] 李力, 王飞跃, 郑南宁, 等. 驾驶行为智能分析的研究与发展[J]. 自动化学报, 2007(10):1014-1022.

LI Li, WANG Feiyue, ZHENG Nanming, et al. Research and development of intelligent driving behavior analysis [J]. Acta Automatica Sinica, 2007(10):1014-1022(in Chinese).

- [10] 李平凡. 驾驶行为表征指标及分析方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.

LI Pingfan. Research on indices and analysis of driving behavior [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)

- [11] 袁伟. 城市道路环境中汽车驾驶员动态视觉特性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2008. (in Chinese)

YUAN Wei. Study on car driver's dynamic visual characters test on city road [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)

- [12] 王武宏, 曹琦, 刘东明. 汽车驾驶员操作可靠性分析及评定[J]. 汽车工程, 1994(4):207-213.

WANG Wuhong, CAO Qi, LIU Dongming. Reliability analysis and evaluation of automobile driver's operation [J]. Automotive Engineering, 1994(4):207-213. (in Chinese)

- [13] BHANDARI J, ABBASSI R, GARANIYA V, et al.

Risk analysis of deepwater drilling operations using Bayesian network [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015(38):11-23.

- [14] YAN L, HUANG Z, ZHANG Y, et al. Driving risk status prediction using bayesian networks and logistic regression [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(7):431-439.

- [15] 殷炬元, 李铁男, 孙剑. 基于贝叶斯空间相关模型的城市快速路安全影响因素研究[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(3):27-33.

YIN Juyuan, LI Tienan, SUN Jian. An analysis on effective factors of safety for urban expressways based on Bayesian spatial models [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2016, 34(3):27-33. (in Chinese)

- [16] HÄNNINEN M, KUJALA P. Influences of variables on ship collision probability in a Bayesian belief network model [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012(102):27-40.

- [17] YAN L, ZHANG Y, HE Y, et al. Hazardous traffic event detection using markov blanket and sequential minimal optimization (MB-SMO) [J]. Sensors, 2016, 16(7):1084.