

DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2024.05.11

基于平纵组合的山区高速公路连续下坡路段 行车安全评价方法

张驰^{1,2}, 王茜茹¹, 向宇杰³, 高艳阳¹, 冉光炯⁴

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 道路基础设施数字化教育部工程研究中心, 陕西西安 710064;
3. 九江市交通运输局, 江西九江 332018; 4. 四川智慧高速公路科技有限公司, 四川成都 610094)

摘要:受制于地理和经济条件,山区高速公路在建设中不可避免会存在连续下坡路段,其中平纵组合路段对车辆稳定性和安全性提出了更高的要求。为分析山区高速公路连续下坡平纵组合路段的行车安全,利用西南山区高速公路数据,以80 km/h的设计速度,在连续下坡路段的不同位置、不同平纵组合工况构建了驾驶仿真实验。根据驾驶者的心理数据、车辆速度变化数据和横向偏移数据推出综合评价指标;将综合评价指标与平曲线半径和纵坡进行相关性分析;再通过累计频率图划分评价阈值;提出了基于平纵组合的连续下坡路段行车安全评价方法,并依托评价方法提出了连续下坡路段坡顶、坡中和坡底位置的平纵组合设计建议值;并以西南山区某高速公路为例对该评价方法进行了应用与验证。研究表明:该方法能为高速公路连续下坡路段的行车安全评价提供有效的参考依据。

关键词:道路工程;高速公路连续下坡;平纵组合;行车安全;评价方法

中图分类号:U412.3

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2024)05-078-13

Driving Safety Evaluation Method for Continuous Downhill Section of Mountainous Expressway Based on Longitudinal-Transverse Combination

ZHANG Chi^{1,2}, WANG Xiru¹, XIANG Yujie³, GAO Yanyang¹, RAN Guangjiong⁴

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

2. MOE Engineering Research Center of Digital Road Infrastructure, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

3. Jiujiang Municipal Transportation Bureau, Jiujiang 332018, Jiangxi, China;

4. Sichuan Smart Highway Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610094, Sichuan, China)

Abstract: Subjected to geographical and economic constraints, the construction of mountainous expressways inevitably involves continuous downhill sections, among which the longitudinal-transverse combination section places higher demands on vehicle stability and safety. In order to analyze the driving safety in continuous downhill sections of mountainous expressways, a driving simulation experiment was constructed at a design speed of 80km/h at different positions and under different longitudinal-transverse combination conditions in a continuous downhill section by utilizing the data from a southwestern mountainous expressway. The comprehensive evaluation index was derived according to psychological data of drivers, vehicle speed variation data and lateral deviation data. Subsequently, a correlation analysis between the comprehensive evaluation index and the horizontal curve radius and longitudinal slope was carried out. Then, the threshold value was divided and evaluated through the cumulative frequency graph. A driving safety evaluation method for continuous downhill sections based on longitudinal-transverse combinations was proposed, and based on the proposed evaluation method, the recommended values for the longitudinal-transverse combinations design at the crest, middle, and bottom of slope of the continuous downhill section were proposed. Finally, the proposed evaluation method was applied and validated by taking a certain expressway in the

收稿日期:2023-09-21;修订日期:2023-11-17

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-391;2021JQ-239);国家重点研发计划资助项目(2020YFC1512005);四川省科技计划资助项目(2022YFG0048);四川省交通运输科技项目(2022-ZL-04)

第一作者:张驰(1981—),男,四川宜宾人,教授,博士,主要从事交通安全与信息化方面的研究。E-mail:zhangchi@chd.edu.cn

southwestern mountainous region as an example. The research results indicate that the proposed method can serve as an effective reference for evaluating the driving safety of continuous downhill sections of expressways.

Key words: highway engineering; continuous downhill of expressway; longitudinal-transverse combination; driving safety; evaluation method

0 引言

山区高速公路受限于复杂的地形地质条件,往往会采取较大纵坡和展线的方法来克服巨大高差,这就形成了较多的连续下坡路段;同时为了顺应复杂地形和避让不良地质,也会设计较多的曲线路段或是小半径曲线路段,因此连续下坡中的平纵组合路段会占有山区高速公路较大比例。平纵组合路段对交通安全影响要远远大于单个平、竖曲线影响或是这两者影响的简单相加^[1]。针对这一现象,需要对连续下坡平纵组合路段的行车安全进行深入研究,以提出针对性的评价方法。

针对连续下坡安全评价与风险评估,国内外学者主要从连续下坡驾驶安全性、交通风险评估和货车制动温升性能等3方面进行研究。

在驾驶安全性方面,行车压力通常根据驾驶者的情绪变化来评价^[2-3],主要是利用驾驶者心/生理来设定心率、视点轨道与道路参数之间的关系及其他负荷测量指标与量化模型。郑柯等^[4]对驾驶者的生/心理特性和公路线形关系进行了分析,建立了相关模型,并对行车速度、驾驶者心理等指标变化规律进行了研究;刘圆圆等^[5]建立了连续下坡路段的安全评价模型,该模型引入了驾驶者瞳孔变化百分比和有效视域空间平均变化速率两个评价指标。在交通风险评估方面,学界多采用传统或改良数理统计方法来分析路段上曾发生的交通事故数据,以此来识别和评价事故风险致因。周晓光^[6]对比了当前主流连续下坡路段事故预测模型,最终选用多元回归分析法进行研究;M.REZAPOUR等^[7]通过建立有序Logit模型,对影响下坡路段事故严重程度的因素进行了分析,通过该模型对单车和多车事故分别进行了校准,以明确影响这两类事故的不同因素;陈立辉等^[8]通过车载GPS设备,在长下坡路段采集了试验车辆的速度数据,分析纵坡参数对货车在连续下坡路段运行速度的影响,建立运行车速与纵坡参数的关系模型;陈斌等^[9]将连续下坡划分为急弯陡坡、连续陡坡和连续缓坡等3种路段,发现连续陡坡的事故率最高。在货车制动温升性能方面,制动失效是引发连续下坡路段货车失控事故的主要原

因。张驰等^[10-12]采用实地实验,参照GSRS方法,建立了六轴半挂货车制动毂温升模型,提出了以制动毂温升为指标的连续下坡安全性设计方法;雷斌等^[13]根据货车在下坡路段行驶特性及温度变化规律,对连续下坡坡度的危险度进行了分级。

针对平纵组合路段研究,分为道路设计理论、设计指标研究和线形安全性评价两大领域。

在设计理论、设计指标方面,基于汽车理论角度,毛大德等^[14-15]给出了不同限制条件下的平纵组合设计方法。基于动力学原理角度,慕慧等^[16]获得了坡长-坡度-速度的关系,并得出了平曲线半径取值可通过图内速度确定的结论。基于风压影响角度,辛强等^[17]算出了陡坡急弯路段的设计极限值;田林等^[18]和徐进等^[19]分别基于平纵组合路段的仿真实验,提出了小半径平纵组合路段的限速建议值和不协调线形单元的改进方法。

在道路线形安全性方面,基于指标评价方法角度,颜强等^[20]建议采用半径、离心力变化和离心力导数来评价路段线形组合,并提出了定量评价标准;向红艳等^[21]以山区高速公路上行驶的车辆为研究对象,通过超高与轮胎分析来评价行车安全。基于事故影响分析方法角度,孟祥海等^[22]通过收集山区高速公路事故数据和几何线形数据,分析了平纵线形指标与事故率的关系,建立了事故率与线形指标的关系模型;胡江碧等^[23]采用事故分析法,为山区平纵组合路段的安全评价提供了新思路。基于驾驶技术仿真方法角度,王雪松等^[24]通过模拟驾驶实验,对组合线形的几何特征与车速变化关系进行了分析,研究了平纵组合路段上车辆制动需求变化的情况;黄晓明等^[25]讨论了基于CarSim等仿真软件在道路工程领域安全评价技术的实用性与适用性。基于运行速度评估方法角度,R.LAMM等^[26]认为可通过速差和车辆稳定这两个指标来评价路段线形组合,基于此又延伸出了车速降低系数等评价指标。

综上,学者们基于连续下坡路段环境、驾驶者心/生理、事故情况和车辆特性提出了相应的安全评价方法。针对平纵组合路段,学者们基于运行速度、车辆位移、行车动力学等多种指标,对平纵组合路段的设计理论和安全性进行了大量研究,取得了一定

成果。随着社会发展,高速公路连续下坡路段的里程数也逐年增多,其中平纵组合路段的比例也随之增加;其次我国货运车辆保有量不断增多,公路货运所占比例日趋提高,随之而来的安全问题也越发重要。在连续下坡平纵组合路段高占比情况下,车速难以控制,驾驶者心理负担增大,对车辆稳定需求上升,这两者叠加导致该路段成为了重点风险位置;在连续下坡平纵组合路段,车辆往往需要较高的刹车性能,连续下坡路段会导致货车的制动性能严重衰退,因此该路段作为关键风险区应引起高度关注。为提高连续下坡路段行车安全,降低行车风险,对连续下坡平纵组合路段进行深入研究具有重要的现实意义。

1 连续下坡平纵组合路段现状

1.1 数据来源

笔者主要研究对象是平曲线与纵坡组合路段,故平纵组合路段主要指代平曲线与纵坡组合路段。为了解国内连续下坡平纵组合路段的情况,笔者选

择西南山区某高速公路连续下坡路段作为研究路段。西南山区海拔较高,地势险峻,高差较大,故选择 3 处具有代表性的连续下坡路段,其道路参数如表 1。笔者收集了这 3 处路段的交通事故、道路数据、交通环境等数据,从 2013—2020 年这 3 处路段交通事故数据共 951 起。

表 1 连续下坡道路参数

Table 1 Continuous downhill road parameters

路段编号	道路参数			
	高差/m	平均纵坡/%	连续坡长/km	最大纵坡/%
连续下坡①	670	-2.57	26.09	-4.00
连续下坡②	759	-2.30	32.97	-3.90
连续下坡③	1515	-2.91	52.12	-4.95

1.2 路段划分

为准确分析连续下坡路段的线形分布情况,在划分路段过程中运用同质法,以平面线形变化点和纵断面变坡点作为分割点,将公路几何线形划分成道路属性固定的最小线形单元并进行编号,通过编程为各单元匹配事故数,建立路段单元数据库,如图 1。

序号	起点桩号	终点桩号	路段长度	平面单元参数	平面单元长度	纵面单元参数	纵面单元长度	路段公里事故数	全线公里事故数	事故密度比	桥梁路
187	26442.528	26568.381	125.85300000...	0	504.86499999...	0.0294999999...	460	0	558	0	0
188	26568.381	26840	271.61899999...	0	504.86499999...	0.0049999999...	580	0	558	0	0
189	26840	27073.246	233.24599999...	-500	170	0.0049999999...	580	0	558	0	0
190	27073.246	27243.246	170	500	355.681	0.0049999999...	580	0	558	0	0
191	27243.246	27420	176.75400000...	500	355.681	0.0130000000...	550	0	558	0	0
192	27420	27598.927	178.927	-500	170	0.0130000000...	550	0	558	0	0
193	27598.927	27768.927	170	0	330.07800000...	0.0130000000...	550	0	558	0	0
194	27768.927	27970	201.073	0	330.07800000...	0.024	600	0	558	0	0
195	27970	28099.005	129.00500000...	-1350	150	0.024	600	0	558	0	0
196	28099.005	28249.005	150	1350	504.45000000...	0.024	600	2	558	5.0527691517...	0
197	28249.005	28570	320.99499999...	1350	504.45000000...	0.018	550	2	558	2.3611438681905	0
198	28570	28753.455	183.45500000...	-665	190.75499999...	0.018	550	0	558	0	0
199	28753.455	28944.21	190.75499999...	665	310.59700000...	0.018	550	0	558	0	0
200	28944.21	29120	175.79000000...	665	310.59700000...	0.02615	1000	0	558	0	0
201	29120	29254.807	134.80700000...	-665	165	0.02615	1000	0	558	0	0
202	29254.807	29419.807	165	0	292.106	0.02615	1000	0	558	0	0
203	29419.807	29711.913	292.106	-570	210	0.02615	1000	0	558	0	0
204	29711.913	29921.913	210	570	411.33299999...	0.02615	1000	0	558	0	0
205	29921.913	30120	198.087	570	411.33299999...	0.0160000000...	620	0	558	0	0
206	30120	30333.246	213.24599999...	-570	210	0.0160000000...	620	0	558	0	0
207	30333.246	30543.246	210	0	197.48	0.0160000000...	620	0	558	0	0
208	30543.246	30640	96.75400000...	0	197.48	0.027	1020	0	558	0	0
209	30640	30740.726	100.72599999...	-645	120	0.027	1020	0	558	0	0
210	30740.726	30860.726	120	645	236.90500000...	0.027	1020	0	558	0	0
211	30860.726	31097.631	236.90500000...	-645	120	0.027	1020	0	558	0	0
212	31097.631	31217.631	120	0	160.11699999...	0.027	1020	0	558	0	0

图 1 路段单元数据库

Fig. 1 Unit database of road section

1.3 分布特征

基于对路段单元数据的统计分析,得出了各连续下坡平纵组合路段的长度占比、发生在该路段上的事故占比,如图 2;对该路段进行分类,得出了高速公路平纵组合路段各组合的路段长度占比,如图 3。由图 2 可知,这 3 处连续下坡的平纵组合路段长

度占比为 78.2%,平纵组合路段占比较大;发生在平纵组合路段上的事故占比为 80.2%,这 3 处连续下坡平纵组合路段的事故占比均大于平纵组合路段长度占比,平纵组合路段是事故相对多发位置。统计结果表明:平纵组合路段是连续下坡路段的重点路段,故笔者基于平纵组合中的平曲线与纵坡组合对

连续下坡平纵组合路段分布情况进行进一步统计。由图 3 可知:在连续下坡路段的指标设计上,半径为 550~710 m、纵坡为 2%~3%的组合路段在平纵组合路段中占比 12.08%;半径分布主要集中在 420~1410 m,纵坡主要集中在 2%~4%;出于安全,较少采用半径 420 m 以下的平曲线半径,但半径 550 m 以下路段占比 26.43%。由此可见:受连续下坡段地形限制,仍存在较多的小半径平纵组合路段,需要对各平纵组合路况进行详细分析。

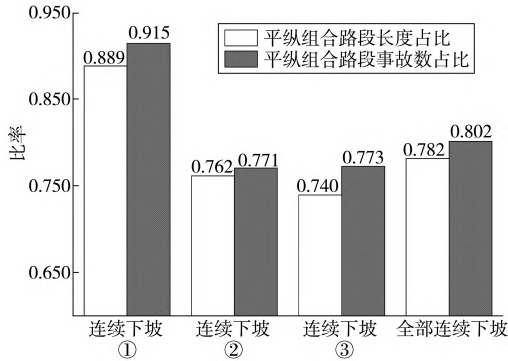


图 2 平纵组合路段占比

Fig. 2 Proportion of longitudinal-transverse combination sections

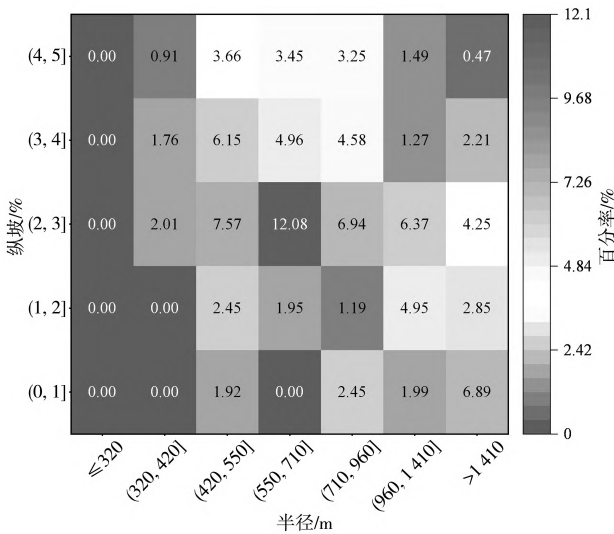


图 3 平纵组合分布

Fig. 3 Distribution of longitudinal-transverse combination sections

2 连续下坡平纵组合路段行车仿真

2.1 连续下坡路段位置分类

根据 JTG D20—2017《公路路线设计规范》^[27]规定:高速公路、一级公路的连续长、陡下坡路段的平均坡度与连续坡长不宜超过表 2 要求。但国内还存在着较多长度大于 20 km 级的连续下坡路段。随着长时间驾驶,位于连续下坡路段的不同位置,驾驶

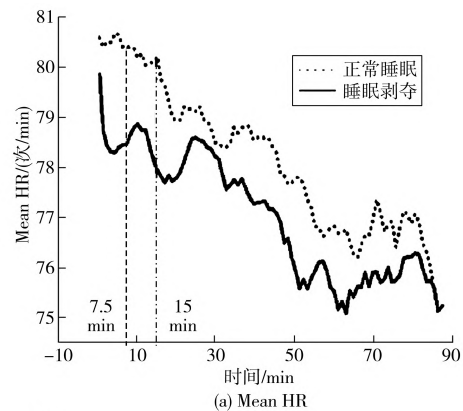
者的驾驶状态必然存在一定差异,驾驶者的疲劳度也会逐步上升。

表 2 连续长、陡下坡的平均坡度与连续坡长

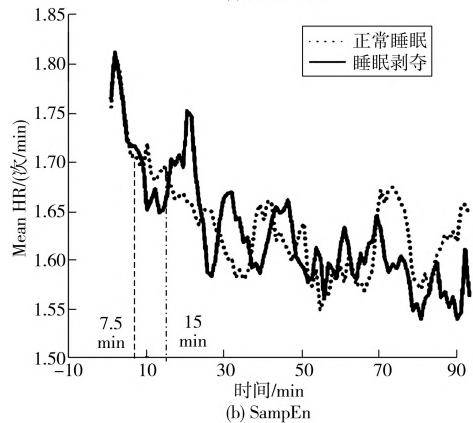
Table 2 The average slope and continuous slope length of continuous long and steep downhill slopes

连续坡度/%	连续坡长/km	相对高差/m	连续坡度/%	连续坡长/km	相对高差/m
<2.5	不限	不限	4.0	6.8	270
2.5	20.0	500	4.5	5.4	240
3.0	14.8	450	5.0	4.4	220
3.5	9.3	330			

向洪义^[28]认为:驾驶者形成疲劳过程并不是呈线性的,在不同时间段驾驶者的状态各不相同,疲劳随驾驶时间基本呈现波动性变化的趋势;通过正常睡眠及睡眠剥夺后的两组环形复合道路环境下的驾驶实验,绘制了 Mean HR(单位时间段内心率平均值)和 SampEn(非线性域参数)随驾驶时间变化的情况(图 4),发现这两组参数均呈下降趋势。祝荣欣等^[29]的研究表明:SampEn 与驾驶者主观疲劳程度呈负相关;这两组的 SampEn 随时间减小,这表明随驾驶时间增加,驾驶者会逐渐产生疲劳感。



(a) Mean HR



(b) SampEn

图 4 随驾驶时间指标变化情况

Fig. 4 Indicator variation conditions changing with driving time

由图 4(a)可见:在正常睡眠下,驾驶者 15 min 的平均心率呈现出一定的下降趋势;由图 4(b)可见:在正常睡眠下,驾驶者在 7.5 min 时 SampEn 骤降到一定水平,在 15 min 时 SampEn 再次呈现出下降趋势。

综上,基于驾驶者疲劳情况、连续下坡设计规范规定和我国连续下坡设计现状,以 80 km/h 的设计速度作为车辆速度。当驾驶者行驶至连续下坡路段时,将距坡顶 10 km 定义为本研究的坡顶位置,距离坡顶 10~20 km 定义为坡中位置,距离坡顶 20 km 以上定义为坡底位置。为分析不同位置的连续下坡路段行车安全水平,对连续下坡路段的 3 处位置进行研究。

2.2 评价指标选取

在驾驶者方面,因行车中的生/心理原因没有及时响应道路线形改变,造成车辆通过该路段时车速过快或转向太慢,带来的行车风险;在车辆方面,当车辆通过该路段无法达到安全行车要求时,会出现车辆横向偏移现象,当偏移量大于某个区间后,车辆会因失控继而引发行车风险;在路方面,当道路线形指标较低,通过该路段的安全速度过低,车辆减速不及时易造成行车风险。由此可见:为研究高速公路连续下坡平纵组合路段上的行车安全问题,在评价指标选取上,要尽可能的考虑到多方面的因素。针对道路线形的行车安全研究,靳辉^[30]认为:可以用平均心率作为纵坡路段驾驶者的心理表现特征,以速度标准差作为纵坡路段车辆的行驶表现特征;张驰等^[31-32]以车辆在行驶过程中产生的横向偏移值作为行驶中的风险表现特征,并以此对高速公路行车风险进行了评价。

综上,应从驾驶行为角度全面考虑驾驶者在通过连续下坡平纵组合路段时的安全性,基于人-车-路的影响机理,笔者采集了人-车的反馈数据信息:驾驶者心率、车辆速度变化、车辆横向偏移,以此作为评价驾驶者在通过连续下坡平纵组合路段时行车安全指标(驾驶舒适性、车辆稳定性),并分析了行车安全指标在不同平曲线和纵坡组合下的变化情况。

2.3 仿真设计

2.3.1 道路设计指标

笔者以设计速度为 80 km/h 和最大超高为 8% 作为设计半径阈值;以 250、320、420、550、710、960、1 410 作为连续下坡平纵组合路段的平曲线半径 R 值,以 1%、2%、3%、4%、5% 作为设计纵坡值;以

70 m 作为回旋线长度值。建立道路模型时,各工况平纵组合路段之间增加 400 m 的直线路段,使得车速在直线段中维持 80 km/h,同时保证模拟时不受前方道路影响。仿真实验方案如表 3。

表 3 仿真实验方案

指标	参数值
平曲线半径 R/m (超高 $i_s/\%$)	250(8), 320(7), 420(6), 550(5), 710(4), 960(3), 1410(2)
纵坡 $i/\%$	1, 2, 3, 4, 5
试验段位置	坡顶, 坡中, 坡底
车道宽度 w/m	右侧: 1.5(中分带)+2×3.75(行车道)+ 3(硬路肩)+0.75(土路肩)=12.75
路面附着力系数	0.8

2.3.2 仿真车辆选择

通过 UC-win/Road 软件建立车辆模型。仿真车辆选用小型车,轴距为 2.5 m、车宽为 1.8 m;使用 UC-win/Road 软件默认的动力学方程。

2.3.3 参加人员

充分考虑到实际行驶情况,笔者选择 10 名平均驾龄在 3 年以上的驾驶者。他们均持有驾驶证,且安全行驶里程都超过 3 万 km,同时要求驾驶者保持睡眠充足,基本情况如表 4。

表 4 驾驶者基本情况

编号	年龄/ 岁	驾龄/ 年	视力 水平	编号	年龄/ 岁	驾龄/ 年	视力 水平
1	29	5	5.0	6	27	2	4.8
2	46	18	4.5	7	31	4	5.0
3	37	10	4.6	8	48	20	4.6
4	41	14	4.6	9	24	1	5.0
5	35	8	4.9	10	54	24	4.4

在数据收集过程中,采用 MP160 多通道生物生理记录仪配合 AcqKnowledge 分析软件进行,记录驾驶者在通过各工况平纵组合路段时的心率数据;采用二自由度驾驶模拟仿真平台收集车速与横向偏移数据。在临近曲线路段时,部分驾驶者会在曲线路段前 50 m 左右位置发生心理波动或驾驶行为变化。为能全面表征各项指标在各工况下的变化情况,笔者在该路段上选取了 6 个关键断面位置,分别为直缓点前 50 m 处、直缓点、缓圆点、平曲线中点、圆缓点、缓直点。

2.4 数据处理

2.4.1 速度指标

平纵组合路段处的速度变化能较好地反映车辆

行驶状态的变化规律。根据式(1)可得到各采集点的速度变化率;通过式(2)可得到各工况下平均速度变化率。

$$V_{1,i} = \frac{|V_{i+1} - V_i|}{V_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{1,i} \quad (2)$$

式中: V_i 为在第*i*个观测点的车速, km/h; $V_{1,i}$ 为第*i*个观测点的速度变化率; X 为该工况下的速度变化率; n 为观测点个数。

2.4.2 偏移指标

本研究规定:车辆行驶轨迹横向偏移值为车辆中心线与道路中心线的偏移距离。为得到行车轨迹横向偏移值的均值,对驾驶仿真平台导出的车辆距左右两侧距离进行转换。根据道路横断面的组成形式与距离进行换算,则车辆行驶轨迹横向偏移如式(3)。

$$D = 2.625 - \left(A + \frac{8.25 - A - B}{2} \right) \quad (3)$$

式中: D 为车辆行车轨迹横向偏移值(即车辆重心与相应行车道中心线的横向距离),m; A 为车辆至左侧边界距离,m; B 为车辆至右侧边界距离,m。

将所有轨迹横向偏移值对每个工况下的数据进行均值计算,如式(4)。

$$Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (4)$$

式中: D_i 为第*i*个观测点的车辆横向偏移值,m; Y 为该工况下车辆横向偏移值,m; n 为观测点个数。

2.4.3 心/生理指标

靳辉等^[30]认为:平均心率能较好地表征驾驶者行车时的心理状况;故笔者以平均心率来判断驾驶者在该工况下的心理特征。驾驶者在各工况下的各采集点平均心率如式(5)。

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{R,i} \quad (5)$$

式中: $H_{R,i}$ 为第*i*个观测点驾驶者心率,次/min; Z 为该工况下驾驶者平均心率,次/min。

2.4.4 综合评价指标

笔者分别基于驾驶者舒适性和车辆稳定性,采集了影响连续下坡平纵组合路段行车安全性的3个方面的评价指标。在评价过程中,速度变化率、行车横向偏移值、心率均值这3个指标存在维度不同的问题,无法对各指标影响程度进行主观评判。ZHANG Chi等^[33]在研究同向曲线路段安全性评价

方法时,通过引入综合评价指标[式(6)],综合量化了3项安全指标对行车安全的影响情况。基于此,笔者发现这3项指标均与行车安全性成反比关系,因此将三维坐标系引入评价体系中,全面地考虑这3个指标的影响程度。为平衡这3个评价指标影响权重,笔者将这3个指标最大值通过式(7)进行归一化处理,归一化值代表了指标变化程度;再通过综合评价指标*H*对这3个指标进行分析。

$$H_i = \frac{1}{\sqrt{X_i'^2 + Y_i'^2 + Z_i'^2}} \quad (6)$$

$$\begin{cases} X_i' = \frac{X_i}{\max_{1 < i < m} (X_i)} \\ Y_i' = \frac{Y_i}{\max_{1 < i < m} (Y_i)} \\ Z_i' = \frac{Z_i}{\max_{1 < i < m} (Z_i)} \end{cases} \quad (7)$$

式中: m 为仿真总次数; X_i 为第*i*次仿真平均速度变化率; X_i' 为其归一值; Y_i 为第*i*次仿真平均横向偏移值; Y_i' 为其归一值; Z_i 为第*i*次仿真平均心率; Z_i' 为其归一值; H_i 为第*i*次仿真综合评价指标。

3 评价方法与设计建议值

3.1 综合评价指标双因素

对连续下坡平纵组合路段的3种位置线形因素进行分析时,采用综合指标进行评价。利用方差分析进行显著性判断,利用极差分析进行影响情况判断。

3.1.1 方差分析

设*m*种因素*r*种水平的正交实验总次数为*n*;第*i*次实验的结果为 $y_i (i=1, 2, \dots, n)$; $K_j^i (i=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, m)$ 表示因素*j*在同一水平*i*下的结果之和; \bar{y} 表示所有结果 $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的均值。其分析步骤如表5。

表5 方差分析步骤

Table 5 ANOVA procedure

计算指标	计算方法
总离差平方和 S_T^2	$S_T^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$
各因素离差平方和 (以 <i>A</i> 为例)	$S_A^2 = \frac{r}{n} \sum_{i=1}^r (K_i^A)^2 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}$
误差离差平方和	$S_E^2 = \sum S_{\text{空列}}^2$

(续表 5)

计算指标	计算方法
交互作用离差平方和	$S^2_{(A \times B)} = S^2_{(A \times B)1} + S^2_{(A \times B)2}$
总自由度	$f_T = n - 1$
某一因素自由度	$f_j = r - 1$
交互作用自由度	$f_{(A \times B)} = f_A \times f_B$
F 值	$F_A = \frac{S_A^2 \times f_E}{S_E^2 \times f_A}$
显著性检验	在显著性水平 α 下, 比较 $F_\alpha(f_A, f_E)$ 与 F_A 大小。若 $F_A > F_\alpha(f_A, f_E)$, 则认为 A 因素对实验结果又显著影响。

3.1.2 极差分析

极差分析简称 R 法, 包括计算和判断两个步骤, 可直接在仿真结果上进行分析, 如图 5。

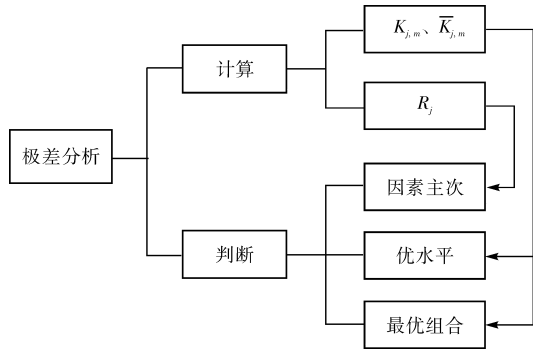


图 5 极差分析示意

Fig. 5 Schematic diagram of extreme variance analysis

图 5 中: $K_{j,m}$ 为第 j 列因素 m 水平所对应的实验指标和; $\bar{K}_{j,m}$ 为 $K_{j,m}$ 的平均值。由 $K_{j,m}$ 可以判断因素 j 的优水平和各因素的水平组合, 即最优组合。 R_j 为第 j 列因素的极差, 即第 j 列因素的各水平下平均指标的最大、最小值之差, 如式(8)。

$$R_j = \text{Max}(\bar{K}_{j,1}, \bar{K}_{j,2}, \dots, \bar{K}_{j,m}) - \text{Min}(\bar{K}_{j,1}, \bar{K}_{j,2}, \dots, \bar{K}_{j,m}) \quad (8)$$

R_j 反映了当第 j 列因素水平变动时, 指标的变动幅度; R_j 越大, 说明该因素对指标的影响越大, 就越重要。根据 R_j 大小就可判断因素的主次。

3.1.3 双因素分析

在对连续下坡平纵组合路段进行仿真后, 进行方差结果和极差结果分析, 如表 6、表 7。

由表 6 可知: 在坡顶、坡中和坡底位置, 纵坡、半径和交互作用均对综合评价指标有着显著影响。由 F 分布上侧分位数表^[34]可知, $F_{0.05}(4, 35) = 2.64$,

$F_{0.05}(6, 35) = 2.37, F_{0.05}(24, 35) = 1.83$, 根据 F 值大小可判断出这 3 种影响因素对综合评价指标影响的强弱依次为半径>纵坡>半径和纵坡交互作用。

由表 7 可知: 平纵组合路段下各影响因素与综合评价指标的关系。对于整体连续下坡平纵组合路段, 半径极差值比纵坡极差值增大了 77.0%; 半径对综合评价指标的影响大于纵坡; 坡底位置半径和纵坡对综合评价指标的影响最大。

表 6 方差分析结果

Table 6 ANOVA results

位置	误差源	离差平方和	自由度	均方	F 值	显著水平
坡顶	纵坡	0.275	4	0.069	344.336	显著
	半径	0.783	6	0.131	652.706	显著
	纵坡 * 半径	0.043	24	0.002	8.868	显著
	误差	0.007	35	0.000	—	—
	总和	53.498	70	—	—	—
坡中	纵坡	0.246	4	0.061	306.911	显著
	半径	0.702	6	0.117	585.270	显著
	纵坡 * 半径	0.039	24	0.002	8.147	显著
	误差	0.007	35	0.000	—	—
	总和	52.282	70	—	—	—
坡底	纵坡	0.359	4	0.090	448.318	显著
	半径	0.831	6	0.138	692.330	显著
	纵坡 * 半径	0.071	24	0.003	14.695	显著
	误差	0.007	35	0.000	—	—
	总和	50.721	70	—	—	—

注: “纵坡 * 半径”表示纵坡与半径为方差的双因素。

表 7 极差分析结果

Table 7 Results of extreme variance analysis

水平均值	坡顶		坡中		坡底	
	纵坡	半径	纵坡	半径	纵坡	半径
K_1	0.947	0.717	0.934	0.708	0.934	0.682
K_2	0.912	0.760	0.903	0.758	0.899	0.737
K_3	0.878	0.820	0.865	0.815	0.842	0.794
K_4	0.826	0.860	0.816	0.843	0.792	0.823
K_5	0.769	0.905	0.767	0.895	0.740	0.876
K_6	—	0.966	—	0.966	—	0.968
K_7	—	1.037	—	1.013	—	1.010
极差	0.178	0.321	0.168	0.305	0.194	0.328

利用各影响因素在不同水平下均值作为依据, 通过回归分析可建立综合评价指标与各影响因素联系, 拟合函数如图 6。拟合函数均采用二次函数, R^2 均大于 0.98, 影响情况均构成二次相关。利用这一

特性可考虑通过二次函数特性对行车安全评价模型

进行回归分析。

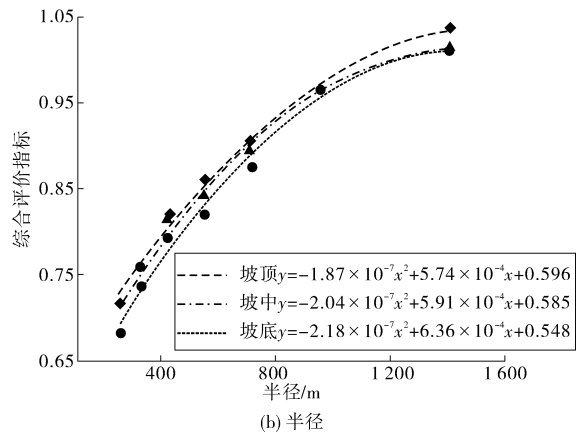
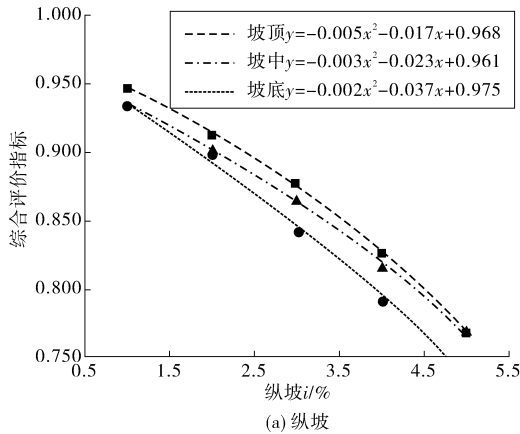


图6 相关性拟合

Fig. 6 Correlation fitting

3.2 行车安全评价模型

根据平纵参数与综合评价指标 H 的三维散点分布形式,对坡顶、坡中和坡底位置分别进行三维曲面非线性回归分析。构建光滑函数曲面,探寻纵坡 i 、半径 R 与综合评价指标 H 的内在规律,其拟合结果如表8。

根据以上评价模型函数,绘制三维数值模拟图,并在两个超高界点 $R = 250$ 、 $1\ 410$ m 处进行纵向剖面处理,绘制剖面特征曲线,如图7。

表8 连续下坡平纵组合路段行车安全评价模型

Table 8 Driving safety evaluation model of continuous downhill longitudinal-transverse combination sections

位置	拟合函数	R^2
坡顶	$H_{\text{坡顶}} = 0.746 - 0.034i + 4.99 \times 10^{-4}R - 0.005i^2 - 1.87 \times 10^{-7}R^2 + 2.49 \times 10^{-5}iR$	0.975
坡中	$H_{\text{坡中}} = 0.752 - 0.044i + 4.95 \times 10^{-4}R - 0.003i^2 - 2.04 \times 10^{-7}R^2 + 3.21 \times 10^{-5}iR$	0.984
坡底	$H_{\text{坡底}} = 0.769 - 0.066i + 5.04 \times 10^{-4}R - 0.002i^2 - 2.18 \times 10^{-7}R^2 + 4.41 \times 10^{-5}iR$	0.973

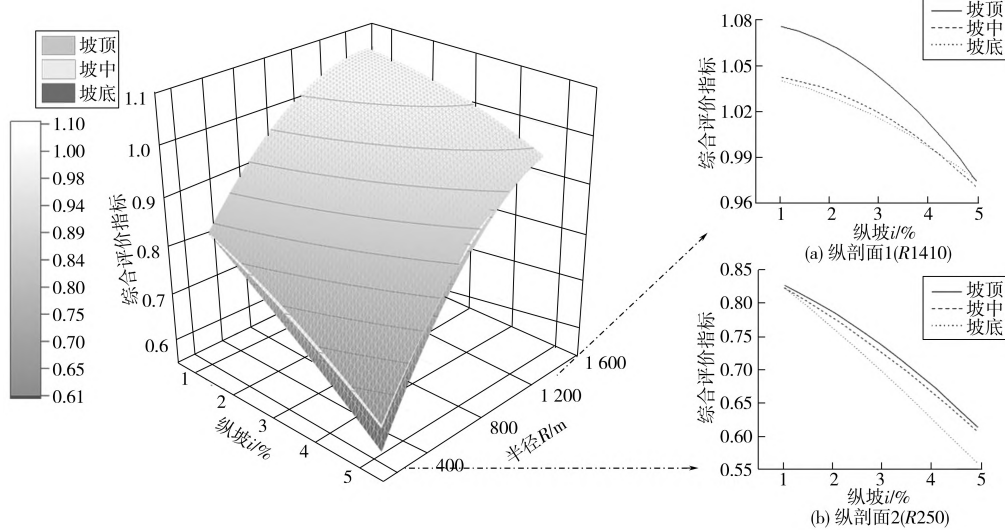


图7 3D 评价模型和剖面

Fig. 7 3D evaluation model and its profile

由图7可知:①在坡底位置,小半径与大纵坡组合的平纵组合路段综合评价指标较坡顶和坡中位置相对更低,说明其行车安全性更低;②根据 $R = 1\ 410$ m 处的纵剖面1,在大半径平纵组合路段,坡中和坡底位置的综合评价指标较坡顶位置相对更低,

随着纵坡增大其差值逐渐减小,说明大半径与小纵坡组合的平纵组合路段在坡顶位置行车安全性更高;③根据 $R = 250$ m 处的纵剖面2,在小半径平纵组合路段,坡底位置的综合评价指标较坡顶和坡中位置相对更低,随着纵坡增大其差值逐渐增大,说明小

半径与大纵坡组合的平纵组合路段在坡底位置行车安全性更低。

3.3 行车安全评价标准

根据各工况的仿真数据,计算得出综合评价指标,并统计其累计频率如图 8。图 8 中:累计频率曲线并无明显分级趋势,结合模型数值分布两端差异性特征,选取综合评价指标的 15%、30%、70%、85%分位数作为划分阈值,将行车安全划分为安全、较安全、一般、较危险和危险等 5 个等级,如表 9。

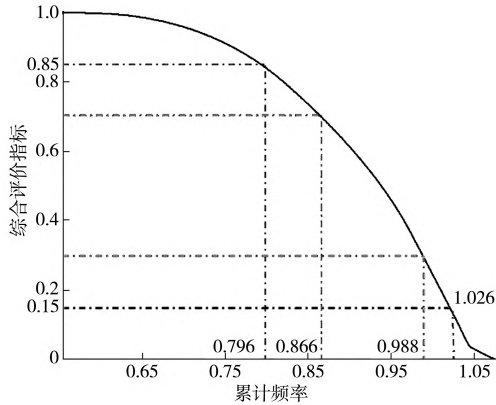


图 8 累计频率分布

Fig. 8 Distribution of cumulative frequency

表 9 连续下坡平纵组合路段行车安全等级划分

Table 9 Driving safety level classification of continuous downhill longitudinal-transverse combination sections

安全等级	取值
危险	$H \leq 0.796$
较危险	$0.796 < H \leq 0.866$
一般	$0.866 < H \leq 0.988$
较安全	$0.988 < H \leq 1.026$
安全	$H > 1.026$

3.4 连续下坡平纵组合路段设计建议值

根据综合评价指标阈值 0.796、0.866、0.988、1.026 对评价模型进行横向剖面处理,如图 9。由图 9 可见:各安全等级下不同连续下坡位置处平纵组合路段的安全水平。

为保障高速公路连续下坡平纵组合路段的行车安全,避免“较危险”路段和“危险”路段,笔者建议高速公路连续下坡平纵组合路段设计半径应大于 350 m。根据连续下坡数据统计,目前连续下坡平纵组合路段设计中在极少特殊情况会采用 400 m 及以下半径。根据图 9 中“较危险”等级划分界限,得出不同半径下最大纵坡建议一般值,如表 10;根据图 9 中“危险”等级的划分界限,得出不同半径下最大纵

坡建议极限值,如表 11。

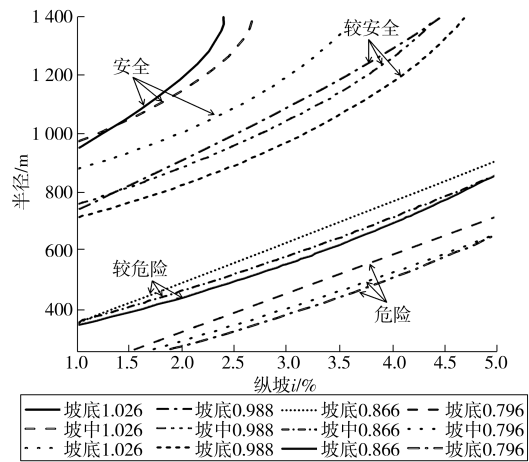


图 9 安全等级划分剖面

Fig. 9 Safety level classification profile

表 10 连续下坡平纵组合路段设计建议一般值

Table 10 Recommended general value for the design of continuous downhill longitudinal-transverse combination sections

半径/m	最大纵坡值/%		
	坡顶	坡中	坡底
400	1.65	1.47	1.38
450	2.13	1.93	1.73
500	2.58	2.36	2.10
550	2.98	2.77	2.45
600	3.36	3.17	2.81
650	3.71	3.55	3.17
700	4.05	3.92	3.53
750	4.36	4.27	3.88
800	4.65	4.61	4.24
850	4.93	4.92	4.58
900	—	—	4.93

表 11 连续下坡平纵组合路段设计建议极限值

Table 11 Recommended limit value for the design of continuous downhill longitudinal-transverse combination sections

半径/m	最大纵坡值/%		
	坡顶	坡中	坡底
300	2.33	2.14	1.89
350	2.78	2.60	2.24
400	3.21	3.03	2.63
450	3.60	3.44	3.00
500	3.97	3.83	3.37
550	4.32	4.23	3.75
600	4.66	4.59	4.12
650	4.97	4.95	4.51
700	—	—	4.87

4 实例验证与应用

4.1 项目概述

笔者以西南山区某高速公路为例,对行车安全进行评价。其中 K1751+995—K1785+680 段采用设计速度为 80 km/h,平均纵坡为 2.77%。由于严苛的地形条件,该下坡路段多为弯道;其中平纵组合路段占连续下坡路段全长的 76.1%,如图 10。笔者筛选了 2018—2021 年在 K1751+995—K1785+680 连续下坡路段所发生的事故数共 116 起。

4.2 连续下坡平纵组合路段行车安全评价

将各平纵组合单元路段的平纵线形参数代入行

车安全评价模型(表 4),根据所处连续下坡路段位置计算各平纵组合单元路段的综合评价指标;根据行车安全性等级划分标准(表 5),完成基于平纵组合的连续下坡路段行车安全评价,并统计其实际事故数,如表 12、表 13。

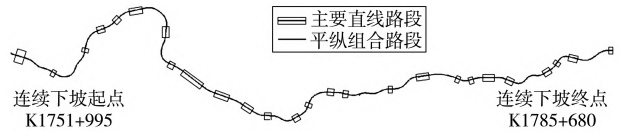


图 10 西部山区某高速连续下坡路段示意

Fig. 10 Schematic diagram of a continuous downhill section of a certain expressway in the western mountainous area

表 12 西部山区某高速连续下坡部分平纵组合路段行车安全评价结果

Table 12 Driving safety evaluation results of a continuous downhill longitudinal-transverse combination section of a certain expressway in the western mountainous area

位置	长度/m	半径/m	纵坡/%	安全等级	事故数/起	位置	长度/m	半径/m	纵坡/%	安全等级	事故数/起
坡顶	96.80	820.00	0.500	较安全	0	坡中	244.67	442.18	2.950	较危险	1
	210.55	645.28	2.945	一般	2		80.00	1 172.21	3.975	一般	1
	272.02	500.00	2.945	较危险	1		271.70	876.93	3.975	一般	2
	341.90	500.00	3.950	危险	1		189.27	876.93	2.956	一般	2
	448.80	749.84	3.950	一般	2		177.00	2 500.00	4.000	安全	0
	310.00	684.93	3.950	较危险	0		251.17	720.00	2.889	一般	1
	210.21	684.93	2.200	一般	1		219.72	720.00	4.028	较危险	2
	478.58	653.40	3.950	较危险	2		212.14	640.00	2.950	一般	1
	95.00	1 255.13	1.511	安全	1		441.34	2 500.00	2.980	安全	1
	340.00	875.21	3.950	一般	0		672.59	1 000.00	4.000	一般	1
坡中	386.96	516.59	1.080	一般	2	坡底	361.28	400.00	4.000	危险	2
	426.77	1 600.00	1.080	安全	0		635.16	400.00	2.980	危险	6
	142.43	1 600.00	0.500	较安全	1		219.69	400.00	4.000	危险	1
	749.26	1 700.00	2.600	较安全	0		469.86	511.97	4.000	危险	6
	1 244.70	2 200.00	2.600	安全	0		270.64	650.00	1.500	一般	2
	390.00	442.18	3.975	危险	2		719.26	720.00	1.500	一般	4

表 13 西部山区某高速连续下坡平纵组合路段安全评价结果统计

Table 13 Statistics of safety evaluation results of a continuous downhill longitudinal-transverse combination section of a certain expressway in the western mountainous area

事故统计	安全等级				
	危险	较危险	一般	较安全	安全
组合路段	1	4	12	5	5
坡顶	1	4	9	2	2
坡中	6	8	10	1	4
坡底	28	30	42	9	7
事故数/起	2.923	5.061	10.847	2.697	4.111
路段长度/km	9.578	5.928	3.872	3.337	1.703
事故率/(起/km)					

由表 13 可知:①随着安全等级上升,平纵组合路段在坡顶的占比呈上升趋势;随着安全等级降低,平纵组合路段在坡底的占比呈上升趋势。在“安全”和“较安全”等级中,坡顶位置占 52.6%;在“危险”和“较危险”等级中,坡底位置占 58.3%。由此可知:该高速公路 K1751+995—K1785+680 平纵组合路段随着里程增加,坡底位置平纵组合路段的行车安全性显著降低。②根据路段长度分布,“危险”等级占 11.4%，“较危险”等级占 19.7%，“一般”等级占 42.3%，“较安全”等级占 10.5%，“安全”等级占 16.0%。由此可知:该高速公路 K1751+995—K1785

+680 平纵组合路段低安全性路段和高安全性路段占比接近,主要为一般安全性路段。③根据安全等级,对比各路段实际事故率情况。随着安全等级降低,事故率显著上升,“较危险”等级和“危险”等级率较“一般”等级分别上升了 53.1% 和 147.4%。结果表明:该模型可靠性及适用性良好,能应用于高速公路连续下坡平纵组合路段的行车安全性评价。

5 结 论

针对高速公路连续下坡路段安全问题,笔者对连续下坡平纵组合路段的不同位置进行了安全评价,得出如下结论:

1)通过对连续下坡路段事故分布特征分析,提出了平纵组合路段在连续下坡路段中的关键位置。研究发现:西南山区某高速公路连续下坡路段中平纵组合路段的长度占比 78.2%,平纵组合中半径 550~710 m 与纵坡 2%~3% 的组合占比最大,发生在平纵组合路段的事故数占比 80.2%;

2)基于连续下坡路段不同位置、不同平纵线形组合参数完成了连续下坡平纵组合路段的仿真。以 80 km/h 设计速度的连续下坡路段为研究对象,基于连续下坡路段不同位置的各平曲线与纵坡组合工况构建驾驶仿真模型,完成了仿真实验与数据采集分析;

3)根据驾驶者的平均心率、车辆速度变化率和横向偏移值计算综合评价指标,提出了基于平纵组合的行车安全评价方法。利用累计频率分布图,划分评价阈值,将连续下坡平纵组合路段行车安全等级划分为危险、较危险、一般、较安全和安全,并给出了平曲线与纵坡组合设计参数的建议值;

4)对行车安全评价方法进行了应用验证。以西南山区某高速公路连续下坡路段为例,结果表明该评价方法适用性良好,能为高速公路连续下坡平纵组合路段的行车安全评价提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 王熙博. 基于模糊软集合的道路线形设计综合评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2015.
WANG Xibo. *Study on Comprehensive Evaluation of Road Alignment Design Based on Fuzzy Soft Set*[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [2] RIENER A, FERSCHA A, ALY M. Heart on the road: HRV analysis for monitoring a driver's affective state [C] // *Proceedings of the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive*

- Vehicular Applications*. September 21-22, 2009, Essen, Germany. ACM, 2009: 99-106.
- [3] KATSIS C D, GOLETIS Y, RIGAS G, et al. A wearable system for the affective monitoring of car racing drivers during simulated conditions [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2011, 19(3): 541-551.
- [4] 郑柯, 彭立. 高速公路连续下坡路段运行速度协调性评价分析 [J]. *公路工程*, 2011, 36(6): 48-50.
ZHENG Ke, PENG Li. Analysis of the consistency of operating speed assessment on continuous long downgrade section of freeway [J]. *Highway Engineering*, 2011, 36(6): 48-50.
- [5] 刘圆圆. 基于驾驶行为的山区高速公路连续长大纵坡路段安全性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
LIU Yuanyuan. *Study on Safety of Long and Continuous Longitudinal Slope Section of Mountain Expressway Based on Driving Behavior* [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [6] 周晓光. 青海省长大下坡交通事故预测模型的建立[D]. 西安:长安大学, 2007.
ZHOU Xiaoguang. *The Establishment Forecast Model of Traffic Accidents on Long and Steep Downgrades in Qinghai Province* [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [7] REZAPOUR M, MOOMEN M, KSAIBATI K. Ordered logistic models of influencing factors on crash injury severity of single and multiple-vehicle downgrade crashes: A case study in Wyoming [J]. *Journal of Safety Research*, 2019, 68: 107-118.
- [8] 陈立辉, 郭忠印. 高速公路连续下坡路段大货车速度特征研究 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(8): 86-91.
GUO Lihui, GUO Zhongyin. Velocity characteristics of large truck on continuous downgrade section of expressway [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2019, 38(8): 86-91.
- [9] 陈斌, 袁伟, 付锐, 等. 连续长大下坡路段交通事故特征分析 [J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(4): 75-78.
CHEN Bin, YUAN Wei, FU Rui, et al. Analysis of traffic accident characteristic on continuous long downgrade section [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9(4): 75-78.
- [10] 张驰, 侯宇迪, 杨坤, 等. 公路长大下坡路段货车制动毂温升模型研究综述 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(3): 96-107.
ZHANG Chi, HOU Yudi, YANG Kun, et al. Review of brake drum temperature rise model for vehicle on long and steep downgrades of highway [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(3): 96-107.
- [11] 张驰, 侯宇迪, 秦际涵, 等. 基于制动毂温升的连续下坡安全设计方法 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(10): 139-150.
ZHANG Chi, HOU Yudi, QIN Jihan, et al. Safety design method of long slope downhill slope based on temperature increase of brake drum [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(10): 139-150.

- [12] 张驰, 胡涛, 侯宇迪, 等. 基于制动毂温升的连续下坡货车事故风险评价模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(11): 19-29.
ZHANG Chi, HU Tao, HOU Yudi, et al. Crash risk evaluation model based on brake heating for trucks under continuous downhill road conditions[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(11): 19-29.
- [13] 雷斌, 许金良, 辛田, 等. 重载交通区连续下坡坡度危险度分级研究[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 53-58.
LEI Bin, XU Jinliang, XIN Tian, et al. Study on heavy traffic area risk levels classification in continuous downhill slope section[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(6): 53-58.
- [14] 毛大德. 从汽车行驶特性分析公路弯坡路段线形设计[J]. 公路与汽运, 2001(2): 28-30.
MAO Dade. Analysis of alignment design of highway curved slope section from automobile driving characteristics[J]. *Middle South Automotive Transportation*, 2001(2): 28-30.
- [15] 钟小明, 荣建, 刘小明, 等. 高速公路弯坡路段小客车自由流运行速度模型研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(12): 84-88.
ZHONG Xiaoming, RONG Jian, LIU Xiaoming, et al. Research on speed prediction models for passenger cars on combined sharp horizontal and vital curves of expressways[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21(12): 84-88.
- [16] 慕慧, 杨少伟. 公路弯坡路段线形设计[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(2): 26-29.
MU Hui, YANG Shaowei. Alignment design of curved section of highway[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2007, 27(2): 26-29.
- [17] 辛强, 童申家, 王培, 等. 风压影响下弯坡路段线形设计[J]. 公路工程, 2012, 37(6): 131-133.
XIN Qiang, TONG Shenjia, WANG Pei, et al. Alignment design of curved section of highway under the influence of wind pressure[J]. *Highway Engineering*, 2012, 37(6): 131-133.
- [18] 田林, 许金良, 张莹. 横风作用下载重汽车在复杂路段运行的安全模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 21-26.
TIAN Lin, XU Jinliang, ZHANG Ying. Operational security model of truck in complex sections under cross wind[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2015, 35(3): 21-26.
- [19] 徐进, 邵毅明, 杨奎, 等. 基于人-车-路协同仿真的山区道路大型车辆行驶适应性分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(2): 14-25.
XU Jin, SHAO Yiming, YANG Kui, et al. Analysis of adaptability of large vehicles on mountainous highways based on driver-vehicle-road collaborative simulation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(2): 14-25.
- [20] 颜强, 吴国雄, 孙家骊, 等. 平面线形组合与衔接的定量分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 30-31.
YAN Qiang, WU Guoxiong, SUN Jiasi, et al. Quantitative analysis of the combination and joint of plane alignment[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(3): 30-31.
- [21] 向红艳, 朱顺应. 山区高速公路曲线超高与汽车行驶安全[J]. 公路, 2007(4): 34-37.
XIANG Hongyan, ZHU Shunying. Curve superelevation of expressway in mountainous region and safety running of vehicles[J]. *Highway*, 2007(4): 34-37.
- [22] 孟祥海, 关志强, 郑来. 基于几何线形指标的山区高速公路安全性评价[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 103-108.
MENG Xianghai, GUAN Zhiqiang, ZHENG Lai. Safety evaluation of mountainous expressway based on geometric alignment indexes[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(2): 103-108.
- [23] 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(增刊1): 89-92.
HU Jiangbi, YANG Yang, ZHANG Meijie. Safety evaluation method of curved slope combination section of mountainous expressway[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(Sup 1): 89-92.
- [24] 王雪松, 王晓梦, 杨筱茵. 平纵组合线形几何特征对车速变化的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 620-625.
WANG Xuesong, WANG Xiaomeng, YANG Xiaohan. Effect of combined horizontal and vertical curve on speed change[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(5): 620-625.
- [25] 黄晓明, 洪正强. 基于CarSim软件的道路安全评价技术的现状与展望[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(10): 1-6.
HUANG Xiaoming, HONG Zhengqiang. Status and progress of highway safety evaluation based on CarSim software[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2022, 41(10): 1-6.
- [26] LAMM R, PSARIANOS B, MAILAENDER T. *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*[M]. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [27] 中华人民共和国交通运输部. 公路路线设计规范: JTG D20—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. *Design Specification for Highway Alignment: JTG D20—2017*[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [28] 向洪义. 驾驶疲劳生理特征及识别方法研究[D]. 重庆: 陆军军医大学, 2022.
XIANG Hongyi. *Study on Physiological Characteristics and Identification Methods of Driving Fatigue*[D]. Chongqing: Army Medical University, 2022.
- [29] 祝荣欣, 王金武, 唐汉, 等. 基于心率变异性的联合收割机驾驶员疲劳分析与评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 77-83.
ZHU Rongxin, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Analysis and evaluation of combine harvester driver fatigue based on heart rate variability[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,

2016, 32(1): 77-83.

- [30] 靳辉. 纵坡弯道线形路段的车速变化规律及驾驶员心电特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.

JIN Hui. *Study on the Psychological Characteristics of Drivers and Vehicle State Based on the Highway Linear*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

- [31] 张驰, 王博, 贺九平, 等. 基于行车动力学的高速公路积水路段行车风险分析[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(5): 9-17.
ZHANG Chi, WANG Bo, HE Jiuping, et al. Traffic risk analysis of ponding sections on freeways based on driving dynamics [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2019, 37(5): 9-17.
- [32] 张驰, 李永春, 吴斌, 等. 高速公路多心卵形曲线路段行车风险分析[J]. 公路, 2022(3): 1-10.

ZHANG Chi, LI Yongchun, WU Bin, et al. Analysis of traffic risk on the expressway sections with multi-centric oval curves [J]. *Highway*, 2022(3): 1-10.

- [33] ZHANG Chi, WANG Bo, LI Yongchun, et al. Freeway traffic safety evaluation using virtual reality: focus on compound curve[J]. *Sustainability*, 2022, 14(22): 15170.
- [34] 高祖新, 言方荣. 概率论与数理统计[M]. 南京: 南京大学出版社, 2020.
GAO Zuxin, YAN Fangrong. *Probability Theory and Mathematical Statistics*[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2020.

(责任编辑: 刘 韬)

(上接第 69 页)

- [16] 徐迪, 陆煜铨, 肖勇, 等. 基于孤立森林算法的配电网线损异常判定[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 12-18.
XU Di, LU Yuxin, XIAO Yong, et al. Identification of abnormal line loss for a distribution power network based on an isolation forest algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(16): 12-18.
- [17] CAMPOS G O, ZIMEK A, SANDER J, et al. On the evaluation of unsupervised outlier detection: Measures, datasets, and an empirical study[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2016, 30(4): 891-927.
- [18] 合肥示范区黄科路口数据介绍[EB/OL]. (2016-10-15) [2023-07-04]. <https://www.openits.cn/openData2/710.jhtml>.
Introduction of Huangke intersection data in Hefei demonstration area [EB/OL]. (2016-10-15) [2023-07-04]. <https://www.openits.cn/openData2/710.jhtml>.
- [19] 王飞, 徐维祥. 基于 LSTM 神经网络改进的路阻函数模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(6): 1065-1071.
WANG Fei, XU Weixiang. Improved model of road impedance function based on LSTM neural network[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(6): 1065-1071.
- [20] 王涛, 谢思红, 黎文皓, 等. 基于 FFOS-ELM 和 PF 的短时交通流自适应预测模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),

2021, 40(6): 21-27.

- WANG Tao, XIE Sihong, LI Wenhao, et al. Short-term traffic flow adaptive prediction model based on FFOS-ELM and PF[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2021, 40(6): 21-27.
- [21] ZEROUAL A, MESSAI N, KECHIDA S, et al. A piecewise switched linear approach for traffic flow modeling[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2017, 14(6): 729-741.
- [22] ABDI H, WILLIAMS L J. Principal component analysis[J]. *WIREs Computational Statistics*, 2010, 2(4): 433-459.
- [23] BREUNIG MM, KRIEGEL H P, NG R T, et al. LOF: identifying density-based local outliers [C] // *Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. Dallas Texas, USA: ACM, 2000: 1-12.
- [24] KRIEGEL H P, SCHUBERT M, ZIMEK A. Angle-based outlier detection in high-dimensional data[C] // *Proceedings of the 14th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Las Vegas, Nevada, USA. ACM, 2008: 444-452.
- [25] SCHÖLKOPF B, PLATT J C, SHAWE-TAYLOR J, et al. Estimating the support of a high-dimensional distribution[J]. *Neural Computation*, 2001, 13(7): 1443-1471.

(责任编辑: 罗素琴)