

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.10.007

# 基于合成坡度的连续下坡路段货车行车 风险评价方法

张驰<sup>\*1</sup>, 向宇杰<sup>2</sup>, 兰富安<sup>3</sup>, 王博<sup>1</sup>, 白皓<sup>4</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 九江市交通运输局, 江西 九江 332000;  
3. 四川乐西高速公路有限责任公司, 四川 成都 610000; 4. 四川高速公路建设开发集团有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 为了分析高速公路连续下坡平纵组合路段的货车行车风险要素及其影响情况, 提出了合成坡度和制动毂温度风险因素, 利用货车事故率量化行车风险, 研究了风险因素交互作用。首先, 基于制动距离表征制动效能的角度, 通过行车动力学仿真试验发现了货车制动衰退与道路的合成坡度在影响货车平纵组合路段行车风险方面存在一定交互作用。然后, 以2013—2020年雅西高速公路3处连续下坡路段原始交通数据处理与分析为基础, 基于实际事故数据, 通过聚类及相关性分析方法揭示了合成坡度-制动毂温度-货车事故率内在的指数增长相关性。最后, 采用非线性回归法拟合了相关性曲面函数, 择优构建了货车事故风险度量方程, 结合风险分级标准提出了高速公路连续下坡路段货车行车风险评价方法并进行了实例验证。结果表明: 二元非线性指数函数能够较好地解释货车在连续下坡平纵组合路段发生的事故风险变化规律, 通过对风险模型剖析, 合成坡度与制动毂温度的交互作用主要体现在合成坡度5%以上和制动毂温度200℃以上的组合路段, 交互作用导致货车行车风险的急剧增大。研究结果可为高速公路连续下坡路段道路线形优化、安全措施布设尤其是避险车道布设提供有效的参考依据。

**关键词:** 道路工程; 风险评价方法; 多元非线性回归法; 连续下坡路段; 合成坡度; 制动毂温度

中图分类号: U412.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2023)10-0051-11

## Risk Assessment Method for Trucks on Continuous Downhill Section Based on Synthetic Slope

ZHANG Chi<sup>\*1</sup>, XIANG Yu-jie<sup>2</sup>, LAN Fu-an<sup>3</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>, BAI Hao<sup>4</sup>

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

2. Jiujiang Transportation Information Net, Jiujiang Jiangxi 332000, China;

3. Sichuan Lexi Expressway Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000, China;

4. Sichuan Expressway Construction and Development Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000, China)

**Abstract:** In order to analyze the factors of truck driving risk and their influence on the continuous downhill section of the expressway, the synthetic slope and brake hub temperature risk factors are put forward, the truck accident rate is used to quantify the truck driving risk, and the interaction of risk factors is studied. First, the angle of braking efficiency is represented based on the braking distance, through the dynamic simulation test, it is found that there is a certain interaction between the degradation of braking and the synthetic slope on the road. Then, based on the original traffic data processing and analysis of three continuous downhill sections of Yaan-Xichang Expressway from 2013 to 2020, based on the actual accident data, through clustering and correlation analysis, the inherent exponential growth correlation of synthetic slope-brake hub temperature-freight car accident rate is revealed. Finally, the correlation surface function is

收稿日期: 2022-11-08

基金项目: 四川省科技计划项目(2022YFG0048); 四川省交通运输厅科技项目(2019-ZL-12, 2021-ZL-15)

作者简介(\* 通讯作者): 张驰(1981-), 男, 四川宜宾人, 博士, 教授。(zhangchi@chd.edu.cn)

fitted by the nonlinear regression method, and the risk assessment equation of truck accident is constructed, combined with the risk classification standard, the evaluation method of freight car running risk in the continuous downhill section of expressway is put forward, and the example verification is carried out. The result shows that the binary nonlinear exponential function can well explain the change rule of accident risk of freight cars on the straight and vertical combination road sections of continuous downhill, the interaction between the synthetic gradient and the temperature of the brake hub is mainly embodied in the road sections with the synthetic gradient above 5% and the temperature of the brake hub above 200 °C. The research result can provide an effective reference for the optimization of expressway alignment, the layout of safety measures, especially the layout of the refuge lane.

**Key words:** road engineering; risk assessment method; multiple nonlinear regression method; continuous downhill road section; synthetic slope; brake hub temperature

## 0 引言

山区高速公路受限于复杂地形地质条件,往往采用较大纵坡和展线方法克服巨大高差,形成了较多连续下坡路段,同时为了顺应复杂地形和避让不良地质,会产生较多曲线路段甚至是小半径曲线路段,导致连续下坡中平纵组合路段占有很大比例,如厦蓉高速公路纳黔段连续下坡 33 km 中曲线路段占比 74.9%,雅西高速公路 3 处连续下坡 111 km 中曲线路段占比 71.8%。平纵组合路段对交通安全的影响要远远大于单个平、竖曲线的影响及两者影响的简单相加<sup>[1]</sup>。同时随着公路货运量的增加和铰接列车朝着载重化发展,六轴铰接列车成为我国公路货物运输的主导车型<sup>[2]</sup>。相关数据表明,在长陡坡和小半径组合路段大型车是事故车辆的主体,占 50%~80%,致死事故中铰接列车的参与比例超过了 40%<sup>[3]</sup>。货车在连续下坡路段的制动性不足或制动不及时是引发弯坡组合路段侧翻、侧滑以及追尾事故的主要原因,此外货车制动效能的衰退或制动失灵是连续下坡交通事故的关键诱因<sup>[4]</sup>。针对这一现象,需要对货车在连续下坡平纵组合路段的行车风险进行深入分析,以提出针对性的行车风险量化评价方法。

针对连续下坡安全与风险评价,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 3 方面开展相关研究。

驾驶安全性方面,张娟等<sup>[5]</sup>建立了驾驶人瞳孔大小变化百分比与坡度、角度变化率之间的关系模型;高圆圆<sup>[6]</sup>以驾驶人瞳孔变化百分比及有效视域空间平均变化速率建立了连续下坡路段安全性评价模型;廖军洪等<sup>[7]</sup>建立了驾驶人心率增长率与车辆驶离连续下坡路段起点的距离、车辆所在坡段的曲

率和车辆运行速度的关系模型。交通风险评估方面,Abdel-Aty, Lord 和 Caliendo 等<sup>[8-10]</sup>通过不同数据模型建立碰撞事故的预测模型,鉴别了影响碰撞事故发生的显著因素;胡立伟, Apronti, Moomen 等<sup>[11-13]</sup>先后通过集成 DEMATEL-HSM 方法、随机参数负二项模型和零膨胀负二项方法,辨识了各类风险致因综合评估重载货车的碰撞风险。货车性能及其温升理论方面,张驰等<sup>[14-16]</sup>通过实地试验并参考 GSRS 方法构建了六轴半挂货车的制动毂温升模型,提出了基于制动毂温升的连续下坡安全设计方法;雷斌等<sup>[17]</sup>分析不同纵坡坡度下车辆主制动器温度达到一定限值时对应的最小行驶距离,以此对连续下坡坡度的危险度进行分级;郑晓<sup>[18]</sup>通过对交通事故的数据统计分析,考虑车辆制动性能,研究了下坡路段的纵坡危险分级方法。

综上所述,针对连续下坡路段,目前已有部分研究从驾驶人心理生理、道路环境和制动衰退的角度判定了其风险致因,提出了相应的安全性评价方法。但是较少研究针对连续下坡中的平纵组合路段,由于连续下坡的特殊性,导致其中平纵组合路段的风险愈发明显。

针对平纵组合路段,国外的专家学者为了提高平纵线形组合的安全性,研究重点关注意于线形设计一致性方面以及线形安全设计方面。国内主要是从汽车动力性能,驾驶员心理生理情况以及交通事故与线形指标关系的角度出发,通过各种试验和数据的收集分析来对平纵线形组合安全性评价进行研究。Fu 等<sup>[19]</sup>学者经数据分析发现公路自身平面采用的线形以及纵断面线形会在很大程度上对交通事故发生与否、严重程度产生明显的作用。陈亦新等<sup>[20]</sup>利用驾驶模拟试验获取小客车车道偏离数据,从车辆偏移行为的角度提出更安全的平纵组合线

形。已有研究主要基于行车动力学研究车辆稳定性对行车安全的影响,但忽略了由于驾驶人刹车需求导致的制动风险。针对这一问题,王雪松等<sup>[21]</sup>通过驾驶模拟试验分析了组合线形几何特征与车速变化关系,研究了弯坡组合路段车辆制动需求的变化情况。

在连续下坡平纵组合路段,货车车辆有行驶速度较快,车辆动能大,且安全通过速度相对客车较低的特点。在此情况下,基于驾驶人身心理与车辆稳定性,往往存在较高的刹车需求,而目前仍缺乏在连续下坡的整体环境下,刹车制动风险在平纵组合路段这一关键风险因素的相关研究。为研究连续下坡平纵组合路段行车风险,本研究以合成坡度综合量化道路线形情况。通过制动毂温升模型提取典型连续下坡路段货车制动毂温度数据,基于货车特性的车路协同行车风险综合分析,将货车制动性能、道路线形与事故相结合,分别选取制动毂温度、合成坡度和事故率作为连续下坡平纵组合路段货车事故致因与风险的量化指标。通过相关性分析提出三者间的内在关系,并通过多元非线性回归方法结合风险分级标准构建风险评价模型,揭示连续下坡平纵组合路段货车事故风险的变化规律,最后通过实例验证模型有效性。

## 1 连续下坡平纵组合路段行车风险因素

### 1.1 合成坡度

道路交通风险分析是高速公路安全治理的重要基础,一直是道路安全研究的重要课题。高速公路运行环境封闭管理,不受行人和非机动车的影响,具有交通事故与道路设计指标相关度高的特点<sup>[22]</sup>。故基于道路环境对各路段交通风险的评估能够帮助设计人员和管理人员高效分配资源改善道路安全水平,其中道路平纵设计指标显得尤为重要。

平纵指标方面,Eck<sup>[23]</sup>分析了小半径曲线和陡坡组合路段货车车辆特性对车辆控制和稳定性的影响,建议增加急弯陡坡路段的下坡方向超高,适当减小上坡方向的超高。向红艳等<sup>[24]</sup>重点研究了山区高速公路车辆的运行情况,通过分析路面超高和车辆轮胎的关系判别公路安全性能。纵向指标方面,杨帆<sup>[25]</sup>从人-车-路-环境的角度分析了高速公路纵面线形指标及其组合对交通安全的影响。由此可见超高和纵坡都会较大程度影响车辆行驶安全,较大的超高和纵坡均会导致行车风险的骤增,其组合路段风险更为明显。在公路设计方面,诸多研究人员

将合成坡度这一概念运用在超高过渡段排水这一内容,基于合成坡度判断路面水流情况,却少有从合成坡度过大角度深入分析行车风险。《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)<sup>[26]</sup>条文说明,将合成坡度限制在某一范围内的目的是尽可能地避免陡坡与急弯的组合对行车产生的不利影响。当陡坡与小半径平曲线相重叠时,宜采用较小的合成坡度,控制最大合成坡度。

当货车在平纵组合路段行驶时,根据行车动力学知超高协同纵坡组成的合成坡度共同影响车辆的受力情况,过大的合成坡度势必影响驾驶稳定性。为综合评价连续下坡平纵组合路段的道路情况,本研究以最大合成坡度综合量化道路超高和纵坡的线形情况,作为道路平纵线形代表指标。

### 1.2 制动毂温度

在货车下坡过程中,由于制动过程中重力势能转化成制动器的摩擦热,将引起制动器温度上升,进而导致制动性能下降,在安全速差较大的路段容易诱发事故。李都厚和赵凯辉<sup>[27-28]</sup>通过制动器试验台进行制动器热衰退性能的试验,试验过程中,保持制动分泵气室一定的压力,得到制动扭矩随温度变化的关系曲线,表明制动毂温度 260 °C 时制动能力约为原来的 80%。基于安全通过速度下的货车刹车需求,制动毂高温情况下制动效能越低,越难在安全范围内抵达安全速度,过弯风险越大。在连续下坡路段,制动毂温度存在累积效果,制动毂温度的高低在一定程度上体现了货车在连续下坡行驶里程的增大和距离行驶起点的相对位置。故本研究将制动毂温度作为货车连续下坡平纵组合路段行车风险因素之一。

### 1.3 交互作用

针对连续下坡平纵组合路段较高的刹车需求,需分析制动毂温度过高对平纵组合路段制动效能的影响。根据以往研究成果本研究拟定 260 °C 下制动衰减系数为 0.8 进行仿真试验,探究制动能力衰减下的制动效能影响情况。基于 Trucksim 仿真平台模拟不同驾驶情况,其中影响载重货车运行安全的道路环境控制因素包括不同平曲线半径下的超高  $i_s$  和纵坡  $i_l$ ,车辆因素包括制动毂温度  $T$ 。本仿真试验车辆是六轴半挂车,基于最不利情况满载驾驶,研究不同温度情况下不同平曲线半径下的超高  $i_s$  和纵坡  $i_l$  对制动能力衰退的影响,半径与超高的对应参数参考《公路路线设计规范》(JTG D20—2017),试验策略如表 1 所示。

表1 试验策略  
Tab.1 Test strategy

指标	参数值
车型	华骏 ZCZ9402HJD 半挂车
满载重量/t	49
车道宽度/m	1.5(中分带)+2×3.75(行车道)+3(硬路肩)+0.75(土路肩)=12.75
超高/%	8(R-250 m), 7(R-320 m), 6(R-420 m), 5(R-550 m), 4(R-710 m)
纵坡/%	-1, -2, -3, -4, -5
制动速度/(km·h <sup>-1</sup> )	80~60
制动主缸压力/MPa	0.7

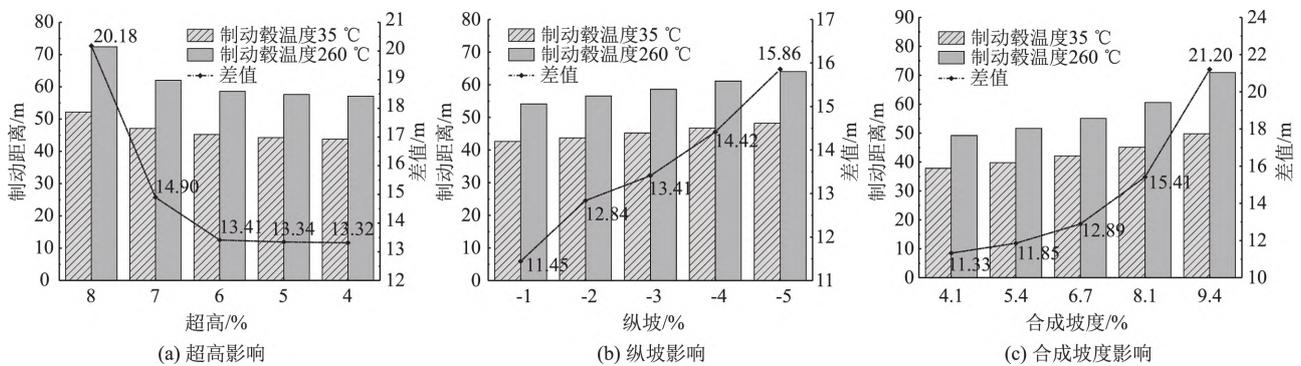


图1 制动衰退情况下对制动效能的影响

Fig.1 Effect of braking degradation on braking performance

## 2 风险因素量化

### 2.1 研究路段

G5京昆高速雅安至西昌段全长240 km,为设计速度80 km/h的双向4车道高速。该段高速公路存在3处连续下坡,长度均超过25 km,最长一处达到50.83 km,是国内最具代表性的连续下坡路段,道路纵坡参数见表2。调研数据显示,这3处连续下坡历年来便是货车事故多发路段,事故形态主要表现为由于制动失效或不及导致的侧翻、追尾、撞击路侧护栏和起火等。选择该3处连续下坡路段作为试验对象,计算货车制动毂温度,并收集风险因素数据进行处理,为后续研究打下基础。

表2 连续下坡道路参数

Tab.2 Parameters of continuous downhill road

路段编号	高差/m	平均纵坡/%	连续坡长/km	最大纵坡/%
连续下坡①	759	-2.35	32.97	-3.90
连续下坡②	670	-2.56	26.00	-4.00
连续下坡③	1 515	-2.96	50.83	-4.95

### 2.2 基础数据处理

本研究团队收集了雅西高速公路的交通事故、

试验结果如图1所示,图1(a)为纵坡3%时不同的超高 $i_s$ 对制动衰退下制动效能的影响,当超高 $i_s$ 越小时,制动距离差值越小,当超高 $i_s$ 小于6%时,制动差值趋于稳定;图1(b)为超高6%时不同的纵坡 $i_l$ 对制动衰退下制动效能的影响,制动距离差值和纵坡基本成正比关系;图1(c)为超高与纵坡同时线性增加时合成坡度 $i$ 对制动衰退下制动效能的影响,制动距离随合成坡度变大加速增大。由此可见超高和纵坡组成的合成坡度不但影响车辆行驶的安全性,还影响货车制动毂高温情况下的制动效能,指标越大导致制动到达安全速度的行驶距离越大,进一步加剧了连续下坡平纵组合路段驾驶的行车风险。

道路数据、交通环境数据,数据由雅西高速公路运营公司提供。交通事故数据包括事故发生的时间(年、月、日)、地点(桩号或者特征位置)、方向、事故原因、车辆类别等;道路数据包含平面、纵断面和横断面等道路线形基础数据;交通环境数据包括车流量和车辆比例等。

本次数据收集为期8 a(2013—2020),交通事故数据共有4 187起。由于本研究内容为合成坡度与制动毂温度影响下的连续下坡平纵组合路段货车事故风险,故剔除主线与匝道分流处货车碰撞事故、匝道货车事故、收费站货车事故等无关事故,最终从总事故台账中筛选出3处长下坡平纵组合路段中的相关事故数据共计290起。为研究合成坡度的影响情况,将道路按照连续下坡行车方向,以超高值和纵坡值的变化点作为单元的起终点,将雅西高速公路连续下坡平纵组合路段划分为213个恒定合成坡度的单元(由于事故致因位置存在前推和后置的可能,本研究将缓和曲线纳入圆曲线段),根据事故桩号为各单元匹配事故数。其中合成坡度4%以下单元占17.4%,合成坡度4%~6%占47.9%,合成坡度6%以上单元占35.7%。

由于本研究仅考虑连续下坡平纵组合路段货车相关事故, 考虑到交通流量、货车比例、路段长度和统计时间对事故分布的影响, 本研究基于主线交通量、进出口流量和交通组成等计算各下坡路段大型货车交通比例, 对事故率计算式进行修正, 修正货车事故率计算方法如式 (1) [16] 所示:

$$CR = \frac{N \times 10^6}{365 \times n \times S \times L \times AADT}, \quad (1)$$

式中,  $CR$  为每公里百万车的货车事故率;  $N$  为路段事故总数;  $n$  为事故统计年数;  $S$  为大型货车比例;  $L$  为路段长度;  $AADT$  为路段年平均日交通量。

## 2.3 制动毂温度

### 2.3.1 温度计算模型

为得出本研究连续下坡的制动毂温度情况, 需采用合适的制动毂温升模型。近年长安大学分析了我国当前货运车辆组成 [29], 将六轴铰接列车作为建模对象, 考虑发动机辅助制动, 以及各轴间制动力分配, 同时选取国内具有代表性的连续下坡路段进行制动鼓温升实车试验, 对比分析了不同温升建模方法和模型的准确性 [16], 构建了六轴半挂货车的制动毂温升模型 [17]。该模型符合我国货运发展趋势以及货车下坡性能现状, 因此认为该模型适用于文中研究。该模型将临界纵坡作为使用主制动器的判别条件, 由此划分为联合制动工况下的升温模型以及仅使用辅助制动下的纯降温模型, 分别见式 (2) ~ (3) [15]。

$$i_l \leq i_0: T = (T_0 - T_\infty) e^{\left(\frac{-h_c A^2 L}{m_d c_d V}\right)} + T_\infty, \quad (2)$$

$$i_l > i_0: T = \left( T_0 - \frac{0.95V(\beta F_s r_d - N_a - N_h) + T_\infty h_c A}{7.2r_l h_c A} \right) \cdot e^{\left(\frac{-h_c A^2 L}{m_d c_d V}\right)} + \frac{0.95V(\beta F_s r_d - N_a - N_h) + T_\infty h_c A}{7.2r_l h_c A}, \quad (3)$$

式中,  $T_0$  为初始温度;  $T_\infty$  为环境温度;  $i_0$  为辅助制动下的临界纵坡;  $L$  为坡长;  $V$  为车速;  $F_s$  为车轮所受地面制动力;  $r_d$  为轮胎动力半径;  $r_l$  为轮胎滚动半径;  $\beta$  为制动力分配系数;  $N_a$  为发动机制动所产生的制动力矩;  $N_h$  为轮胎迟滞力矩;  $F_d$  为车轴所受垂直荷载;  $h_c$  为对流换热系数;  $A$  为制动毂外表面积<sup>2</sup>;  $m_d$  为制动毂质量;  $c_d$  为制动毂比热容。

### 2.3.2 温度计算结果

本研究基于高档 (12 挡) 发动机辅助制动, 不开启缓速器及淋水, 在满载条件下, 通过主制动器及辅助制动将车速控制在一定范围内。由于货车在

停车处完成制动毂降温处理, 故根据服务设施位置划分路段, 各路段间的温升测算互不相关。根据现场数据, 第 2 段连续下坡存在 1 处停车区, 第 3 段连续下坡存在 1 处服务区 and 1 处停车区。

根据上述划分路段, 将道路数据导入温升模型进行计算, 完成连续下坡路段货车制动毂温度计算, 如图 2 所示。3 处连续下坡路段中制动毂温度 200 °C 以下里程占 65.1%, 制动毂温度 200~260 °C 里程占 25.6%, 制动毂温度 260 °C 以上里程占 9.3%。杨宏志等 [30] 研究表明, 为保证绝对制动安全, 制动鼓温度应控制在 200 °C 以内, 220 °C 时制动衰减较弱, 而超过 260 °C 将会出现制动失效情况; 廖军洪等 [31] 研究表明, 制动器温度在 200 °C 以内时, 失效可能性较小, 在 200~260 °C 时存在失效的可能, 超过 260 °C 时失效可能较大。由此可见, 制动毂温度过高较大程度影响了本研究路段的货车制动安全。

## 3 风险评价方法构建

### 3.1 影响因素分析

3 处连续下坡路段划分的 213 个平纵组合单元事故分布情况如图 3 所示。由图 3 (a) 可见, 合成坡度和货车事故率基本呈现正比关系, 事故路段单元合成坡度主要集中在 5%~8% 左右; 由图 3 (b) 可见, 制动毂温度和货车事故率正比关系不显著, 事故路段单元制动毂温度在 260 °C 左右存在聚集现象; 事故严重程度均呈现低事故率单元居多, 高事故率单元较少的特征。

上述分析表明事故率与合成坡度和制动毂温度均存在一定相关性, 但线性回归结果表明单一变量与事故率之间的关系分布存在较大离散性。此外, 由于在以合成坡度划分路段的过程中, 路段被平面直缓点和纵面变坡点划分为长度较短路段单元的情况较多, 导致较多单元货车事故率虚高。因此本研究为进一步研究风险因素对事故率的影响, 分别以 1% 合成坡度和 30 °C 制动毂温度为单元区间对连续下坡平纵组合路段的数据进行聚类, 合并相同区间内的事故和路段长度信息, 分别计算各区间路段的货车事故率, 通过合成坡度-制动毂温度-货车事故率绘制事故热图, 如图 4 所示, 由此反映三者之间的内在相关性。

### 3.2 风险度量方程

基于以上相关性, 采用三维曲面拟合进行多元非线性回归分析, 构建光滑数学曲面, 能够集中反映空间数据在大范围内的变化趋势, 揭示事故风险

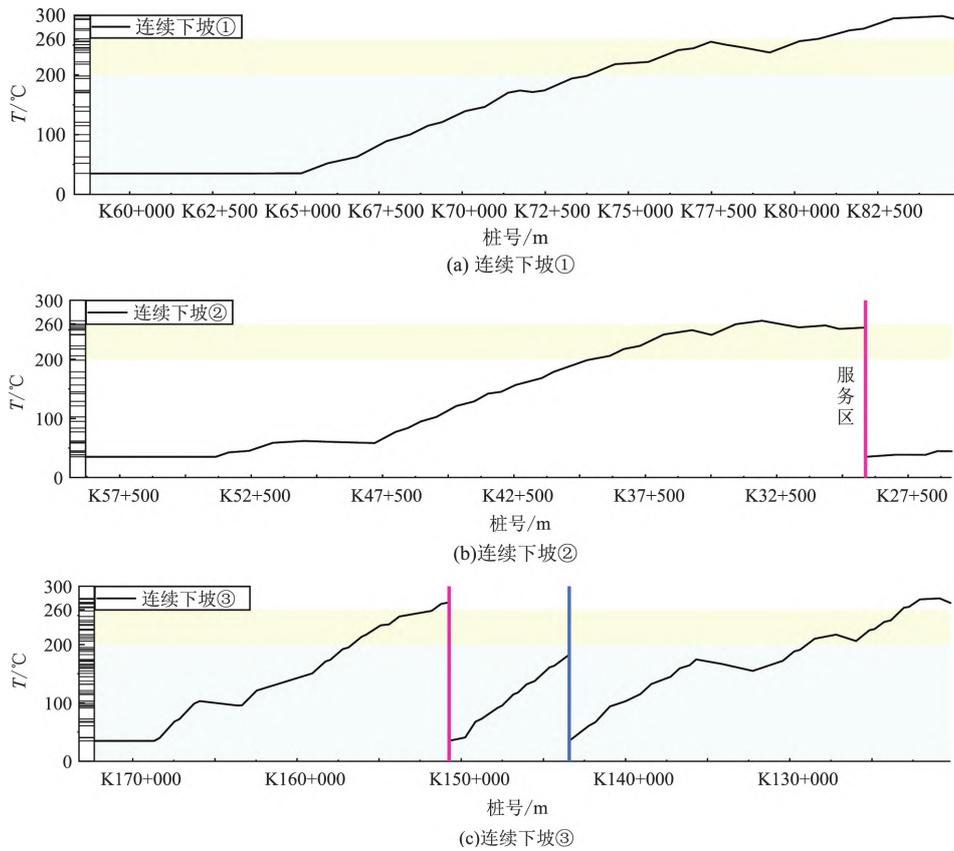


图2 研究路段温升情况

Fig. 2 Temperature rise of studied road sections

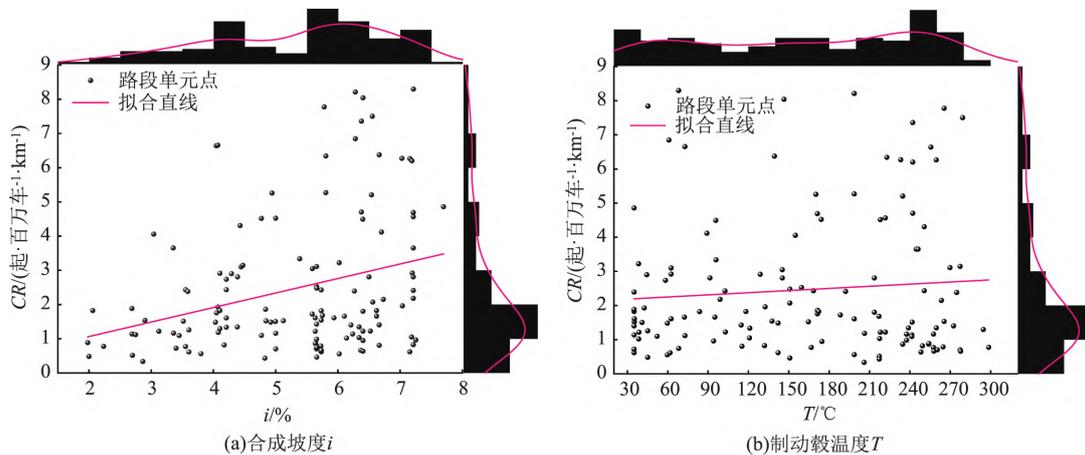


图3 事故分布情况

Fig. 3 Accident distributions

的变化规律。将  $CR$  作为因变量，合成坡度  $i$  和制动毂温度  $T$  作为自变量，结合非线性分析专业软件 TableCurve 3D 匹配适用度较高的曲面函数模型。根据三维散点分布形式，发现指数函数、幂函数和多项式函数曲面较符合上述变化趋势，因此选取该类 4 种曲面函数构建度量方程，对各函数的拟合采用 Levenberg-Marquardt (LM) 迭代算法，最终求解了

各曲面函数的回归系数和判定系数  $R^2$ ，结果见表 3。

为对以上不同类型的回归函数进行最优化选取，且防止过度拟合情况，采用赤池信息量 ( $AIC$ ) 和贝叶斯信息量 ( $BIC$ ) 来判别。本研究以  $AIC$  和  $BIC$  作为综合指标，以样本量 ( $n$ )、参数个数 ( $K$ ) 和残差平方和 ( $RSS$ ) 为分析对象，对拟合方程进行评价，并以  $AIC$  和  $BIC$  数值最小为最优判别标准，该

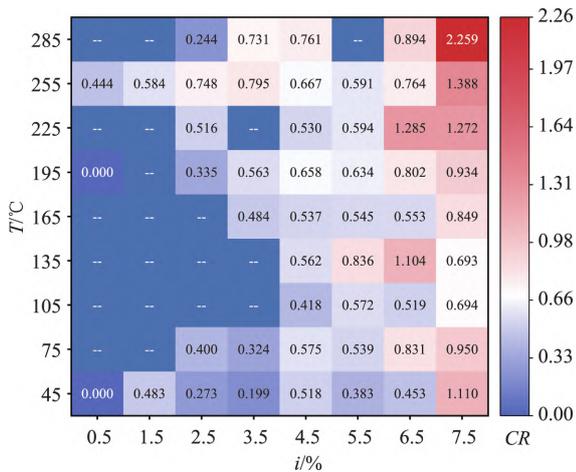


图 4 聚类区间事故分布

Fig. 4 Accident distribution in cluster intervals

表 3 曲面函数回归分析

Tab. 3 Regression analysis on surface functions

函数类型	曲面函数形式	回归系数	R <sup>2</sup>
二元非线性指数函数	$CR = A + Be^{-\frac{i}{c}} + De^{-\frac{T}{E}} + Fe^{-\frac{i}{c}}e^{-\frac{T}{E}}$	$A=0.37; B=0.006$ $C=-1.70; D=3.9 \times 10^{-4}$ $E=-51.93; F=5.2 \times 10^{-5}$	0.725
二元三次多项式函数	$CR = A + Bi + CT + Di^2 + EiT + FT^2 + Gi^3 + Hi^2T + IiT^2 + JT^3$	$A=-0.60; B=0.51$ $C=0.01; D=-0.10$ $E=-0.002; F=-4.1 \times 10^{-5}$ $G=0.008; H=1.08 \times 10^{-4}$ $I=5.15 \times 10^{-6}; J=5.23 \times 10^{-8}$	0.724
二元非线性幂函数	$CR = A + Bi^C + DT^E + Fi^C T^E$	$A=0.40; B=5.2 \times 10^{-5}$ $C=4.53; D=1.2 \times 10^{-13}$ $E=4.93; F=8.3 \times 10^{-17}$	0.716
二元二次多项式函数	$CR = A + Bi + CT + Di^2 + ET^2 + FiT$	$A=0.41; B=-0.04$ $C=-0.003; D=0.01$ $E=1.1 \times 10^{-5}; F=2.8 \times 10^{-4}$	0.656

表 4 不同曲面函数对比值

Tab. 4 Comparison of different surface functions

曲面函数	n	K	RSS	AIC	BIC	R <sup>2</sup>
二元非线性指数函数	52	2	1.87	-156.30	-145.19	0.725
二元三次多项式函数	52	2	1.87	-144.21	-129.35	0.724
二元非线性幂函数	52	2	1.93	-154.77	-143.65	0.716
二元二次多项式函数	52	2	2.33	-144.78	-133.67	0.656

准则目前已广泛应用于公路交通等工程领域的数据拟合和模型选择<sup>[32-33]</sup>。

由表 4 可知, 二元非线性指数函数的 AIC 和 BIC 最小, 将其作为最优回归方程, 判定系数初步表明该回归方程拟合度较好, 拟合结果见式 (4)。进一步对该回归方程进行方差分析见表 5, 其概率 p 值为

表 5 方差分析结果

Tab. 5 Result of ANOVA

方差来源	自由度	平方和	均方	F	p
回归	5	4.93	0.99	24.20	0
残差	46	1.87	0.04	—	—
未修正的整体	52	29.55	—	—	—
修正整体	51	6.80	—	—	—

0, 表明回归效果显著。综上所述, 基于聚类区间构建事故风险度量方程, 通过计算事故率指标反映风险程度的大小。

$$CR = 0.37 + 0.006e^{\frac{i}{1.7}} + 3.9 \times 10^{-4}e^{\frac{T}{51.93}} + 5.2 \times 10^{-5}e^{\frac{i}{1.7}}e^{\frac{T}{51.93}} \quad (4)$$

### 3.3 风险评价模型

为进一步划分风险评价等级, 本研究基于货车事故率对风险评价等级进行划分。由于我国不同地区的公路的运营状况差异较大, 导致确定某一公路等级下的事故率标准较为困难。本研究依据文献[34]提出的公路安全性服务水平评价方法, 该方法借鉴泰国事故率标准, 如表 6 所示。

表 6 泰国事故率划分标准

Tab. 6 Classification standard of accident rate in Thailand

AADT/(veh · d <sup>-1</sup> )	事故率标准/(起 · 百万车 <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> )
≤ 15 000	5.00
15 000~30 000	1.50
30 000~50 000	1.25
50 000~70 000	1.00
>70 000	0.75

经调研, 西南山区高速公路单向交通量(自然数)通常在 20 000 ~ 30 000 veh/d 之间, 这与泰国的事事故状况较为接近, 因此本研究将我国山区高速公路连续下坡路段大型货车的事故率标准确定为 1.5 起 · 百万车<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup>。根据同济大学对事故多发点改善效果显著性的定量分析<sup>[35]</sup>, 当该路段事故率降低 35% 时认为改善效果显著, 故将货车事故率低于 0.975 起 · 百万车<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup> 的路段可定义为事故风险极低路段。

故本研究基于事故率阈值 1.5, 0.975 起 · 百万车<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup> 对连续下坡货车事故风险进行分级。当货车事故率低于 0.975 起 · 百万车<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup> 时, 风险等级为 Stable; 当货车事故率介于 0.975 至 1.5 起 · 百万车<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup> 时, 风险等级为 Potential; 当货车事故率高于 1.5 起 · 百万车<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup> 时, 风险等级为 Dangerous。将事故风险度量方

程与风险评价标准结合,可对连续下坡平纵组合路段货车事故风险进行计算并分级评价,三维数值模拟如图5所示。

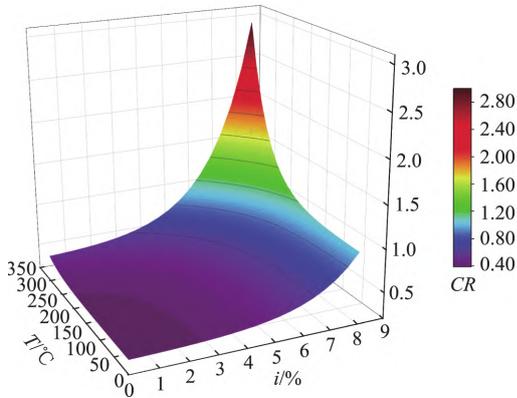


图5 货车连续下坡平纵组合路段事故风险数值模拟  
Fig.5 Accident risk numerical simulation of trucks in continuous downhill horizontal and vertical combined road section

### 3.4 风险评价模型分析

根据风险模型绘制剖面风险曲线图,如图6所示。

由图6(a)所示,合成坡度越大,随着制动毂温度的上升,货车事故率上升越快;当合成坡度为6%时,其不同温度下曲线上升速率呈现指数上升,拐点位于200℃左右,200℃以上时事故风险快速上升。由图6(b)所示,制动毂温度越大,随着合成坡度的增大,货车事故率上升越快;当制动毂温度为260℃时,其不同合成坡度下曲线上升速率呈现指数上升,拐点位于5%左右,合成坡度大于5%时事故风险快速上升。

由此可见,连续下坡平纵组合路段货车事故风险主要由合成坡度决定,合成坡度越大,货车事故率增长速率越快,当合成坡度到达8%左右时,事故风险等级为Potential~Dangerous。当制动毂温度大于200℃时,连续下坡平纵组合路段货车事故风险上升加快。对于制动毂温度处于0~230℃左右的路段,较大的合成坡度不会使风险等级达到Dangerous,对于制动毂温度处于230℃以上的路段,较大的合成坡度使风险等级达到Dangerous,此时货车行驶存在较大的事故风险。综上,根据事故风险模型分析,合成坡度与制动毂温度的交互作用主要体现在合成坡度5%以上及制动毂温度200℃以上的组合路段。

### 4 实例验证与应用

以纳黔高速连续下坡路段为例验证以上货车事故风险评价方法。该路段全长33.69 km,平均纵坡-

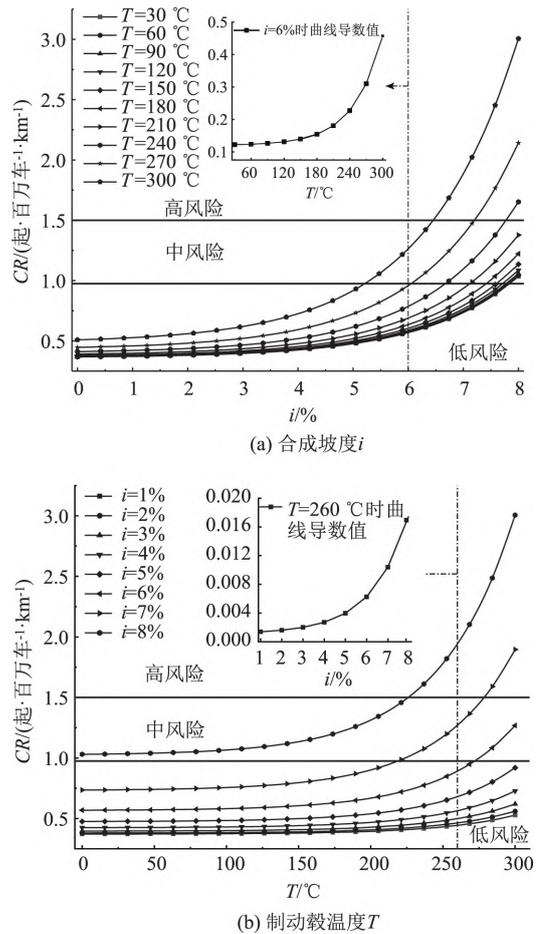


图6 风险模型剖面图

Fig.6 Sectional views of risk model

2.77%;设计速度80 km/h,采用双向4车道。筛选2018—2021年的83起平纵组合路段货车事故,根据制动毂升温模型对货车制动毂温度进行计算,计算聚类区间对应的事故率和货车事故风险评价等级,评价结果如表7所示。

结果表明,评价方法计算结果与实测事故率的平均误差为0.198起·百万车<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>,分级准确率达到91.2%,对大部分特征路段的风险识别效果较好,3处聚类区间评价价值偏低。由于货车事故发生致因众多,除去合成坡度与刹车制动的致因影响外偶发性较高,故本研究认为在实际应用中模型产生的误差在可接受的范围内,验证结果表明方法可靠性良好,可以基于合成坡度与制动毂温度的角度为连续下坡平纵组合路段货车事故风险情况提供参考。

根据此行车风险评价方法,有以下应用:①在连续下坡路段的设计阶段,基于降低连续下坡平纵组合路段货车风险角度,通过计算制动毂温度和合成坡度,为优化平纵线形提供组合上的参考优化依据。②在连续下坡路段进一步考虑安全性改善,采

表 7 事故风险评价结果对比

Tab. 7 Comparison of accident risk evaluation results

合成坡度 / %	制动毂温度 / °C	实际事故率 / (起 · 百万车 <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> )	风险评价等级	合成坡度 / %	制动毂温度 / °C	实际事故率 / (起 · 百万次 <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> )	风险评价等级
2~3	120~150	0.428	Stable	5~6	120~150	0.26	Stable
2~3	180~210	0.414	Stable	5~6	150~180	0.51	Stable
3~4	30~60	0.58	Stable	5~6	180~210	0.339	Stable
3~4	90~120	0.238	Stable	5~6	210~240	0.582	Stable
3~4	120~150	0.263	Stable	5~6	240~270	1.033	Stable
3~4	180~210	0	Stable	5~6	270~300	0.675	Stable
3~4	210~240	0.415	Stable	6~7	30~60	0.505	Stable
4~5	30~60	0.24	Stable	6~7	60~90	0.671	Stable
4~5	90~120	0.493	Stable	6~7	120~150	0.357	Stable
4~5	120~150	0.385	Stable	6~7	150~180	0.854	Stable
4~5	150~180	0	Stable	6~7	180~210	0.672	Stable
4~5	180~210	0.262	Stable	6~7	210~240	1.231	Stable
4~5	210~240	0.784	Stable	6~7	270~300	1.401	Potential
4~5	240~270	0.174	Stable	7~8	90~120	0.534	Stable
4~5	270~300	1.016	Stable	7~8	120~150	0.937	Stable
5~6	60~90	0.867	Stable	7~8	240~270	1.973	Dangerous
5~6	90~120	0.49	Stable	7~8	270~300	2.026	Dangerous

取安全预检与工程技术措施。在坡顶位置设置安全检查站, 检查货车淋水系统以及水箱水量; 对等级为 Potential 和 Dangerous 的路段采用设置减速标线、低限指标警告标志等措施。③由于本方法是根据道路指标安全性和车辆制动效能对连续下坡平纵组合路段货车风险的评估, 对避险车道设计可提供一定的参考价值。在等级 Dangerous 路段可考虑设置避险车道供失控的货车提前驶入, 提高避险车道布置的准确性和针对性。

5 结论

针对货车在连续下坡平纵组合路段的事故风险, 本研究进行了定性分析, 提出合成坡度和制动毂温度风险因素, 利用货车事故率量化行车风险, 研究风险因素交互作用。通过深入分析, 得到如下主要结论:

(1) 基于行车动力学仿真平台试验, 制动毂温度和道路合成坡度存在一定交互作用。在制动能力衰退的情况下, 制动效能随纵坡增大而降低, 当超高大于 6% 时, 制动效能显著下降。根据实际数据显示, 连续下坡平纵组合路段货车事故率和合成坡度、制动毂温度基本呈现正比关系, 事故路段单元合成坡度主要集中在 5%~8%, 事故路段单元制动毂温度在 260 °C 左右存在聚集现象。

(2) 由于单一变量与货车事故率之间的关系分

布存在较大离散性以及短路段单元货车事故率虚高的情况, 本研究以 1% 合成坡度和 30 °C 制动毂温度为单元区间对连续下坡平纵组合路段的数据进行聚类, 发现了三者之间的内在指数增长相关性。

(3) 采用三维曲面拟合进行多元非线性回归, 指数函数、幂函数和多项式函数曲面中, 二元非线性指数函数的 AIC(-156.30) 和 BIC(-145.19) 最小, 拟合优度较好 ( $R^2 = 0.725$ ), 将其作为连续下坡平纵组合路段货车事故风险回归方程。

(4) 根据我国山区高速事故率现状, 参考同类发展中国家安全性分级标准, 将连续下坡货车事故率标准定为 1.5 起 · 百万车<sup>-1</sup> · km<sup>-1</sup>。结合事故多发点的改善效果, 将事故风险评价标准划分为 3 级。根据风险模型剖面分析, 合成坡度与制动毂温度的交互作用主要体现在合成坡度 5% 以上及制动毂温度 200 °C 以上的组合路段。

(5) 根据实例聚类验证, 平均误差 0.198, 分级准确率 91.2%, 对大部分特征路段的风险评估效果较好, 可以基于合成坡度与制动毂温度量化连续下坡平纵组合路段货车行车风险, 对连续下坡平纵组合路段交通安全措施, 特别是避险车道的布置有一定参考价值。

下一步应考虑连续下坡平纵组合路段事故损失的影响, 引入事故严重程度指标修正风险模型, 进一步提高风险评价方法的全面性和准确性。

## 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 Xi-bo. Comprehensive Evaluation of Road Alignment Design Alignment Based on Fuzzy Soft Sets [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [2] 长安大学运输科学研究院. 中国高速公路运输量统计调查分析报告 [R]. 北京: 人民交通出版社, 2013.  
Transportation Science Research Institute, Chang'an University. Report of Statistical Survey and Analysis of China's Highway Traffic Volume [R]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [3] 王玉兰. 青海省长大下坡路段交通安全分析与评价方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007.  
WANG Yu-lan. Research on Traffic Safety Analysis and Evaluation of Long and Steep Downgrade Sections in Qinghai [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [4] 王俊骅. 高速公路特大交通事故预防技术研究及示范: 长大下坡路段事故预防技术 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2011.  
WANG Jun-hua. Research and Demonstration of Highway Traffic Accident Prevention Technology: Accident Prevention Technology for Long Downhill Sections [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011.
- [5] 张娟, 朱文强, 李晓伟, 等. 连续长坡路段组合线形与驾驶人瞳孔大小关系的试验分析 [J]. 安全与环境学报, 2018 (1): 188-193.  
ZHANG Juan, ZHU Wen-qiang, LI Xiao-wei, et al. Analysis of the Relationship of the Vehicle Drivers' Pupil Size Change with the Highway Alignment in the Status-in-situ of Long and Steep Continuous Slope. [J]. Journal of Safety and Environment, 2018 (1): 188-193.
- [6] 高圆圆. 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.  
GAO Yuan-yuan. A Study on the Safety of Continuous Long Downgrade Section of Highways in Mountainous Areas Based on Driving Behavior [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [7] 廖军洪, 邵春福, 邬洪波, 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' Heart Rate and Highway Alignment Relationship on Long Steep Downgrades [J]. Journal of 'Transportation Systems Engineering and Information' Technology, 2012, 12 (4): 184-189.
- [8] ABDEL-ATY M A, RADWAN A E. Modeling Traffic Accident Occurrence and Involvement [J]. Accident Analysis & Prevention, 2000, 32 (5): 633-642.
- [9] LORD D, WASHINGTON S P, IVAN J N. Poisson, Poisson-gamma and Zero-inflated Regression Models of Motor Vehicle Crashes: Balancing Statistical Fit and Theory [J]. Accident Analysis and Prevention, 2005, 37: 35-46.
- [10] CALIENDO C, GUIDA M, PARISI A. A Crash-prediction Model for Multilane Roads [J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39: 657-670.
- [11] 胡立伟, 李林育, 古含焱, 等. 山区长大下坡路段货车行车风险因素识别 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2019, 39 (1): 116-126.  
HU Li-wei, LI Lin-yu, GU Han-yan, et al. Driving Risk Factors Identification in Long Downhill Sections of Mountain Area [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39 (1): 116-126.
- [12] APRONTI DT, SAHA P, MOOMEN M, et al. Truck Safety Evaluation on Wyoming Mountain Passes [J]. Accident Analysis and Prevention. 2019, 122 (1): 342-349.
- [13] MOOMEN M, REZAPOUR M, KSAIBATI K. An Investigation of Influential Factors of Downgrade Truck Crashes: A Logistic Regression Approach [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2019, 6 (2): 185-195.
- [14] 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 Yu-di, 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.
- [15] 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 Yu-di, QIN Ji-han, 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.
- [16] 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 Yu-di, 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.
- [17] 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 Jin-liang, 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.
- [18] 郑晓. 基于货车制动性能的长大下坡行车风险分析及防控措施 [D]. 西安: 长安大学, 2014.  
ZHENG Xiao. Research on Risk Analysis of Driving and Prevention Measures for the Long-steep Downgrade Based on 'Truck Braking Performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [19] FU R, GUO Y S, YUAN W, et al. The Correlation Between Gradients of Descending Roads and Accident Rates [J]. *Safety Science*, 2011, 49 (3): 416-423.
- [20] 陈亦新, 王雪松. 山区高速公路组合线形路段车道偏移行为 [J]. *中国公路学报*, 2018, 31 (4): 98-104.  
CHEN Yi-xin, WANG Xue-song. Effects of Combined Alignments of Mountainous Freeways on Lane Departure [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31 (4): 98-104.
- [21] 王雪松, 王晓梦, 杨筱菡. 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, 666.  
WANG Xue-song, WANG Xiao-meng, YANG Xiao-han. Effect of Combined Horizontal and Vertical Curve on Speed Change [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46 (5): 620-625, 666.
- [22] WANG C, QUDDUS M A, ISON S G. The Effect of Traffic and Road Characteristics on Road Safety: A Review and Future Research Direction [J]. *Safety Science*, 2013, 57: 264-275.
- [23] ECK R. Technique for Identifying Problem Downgrades [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2002, 109 (4): 604-610.
- [24] 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 Hong-yan, ZHU Shun-ying. Curve Superelevation of Expressway in Mountainous Region and Safety Running of Vehicles [J]. *Highway*, 2007 (4): 34-37.
- [25] 杨帆. 高速公路纵面线形指标及其组合与交通安全关系研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.  
YANG Fan. Study on the Relationship between the Vertical Geometric Alignments and Traffic Safety of Highway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [26] JTG D20—2017, 公路路线设计规范 [S].  
JTG D20—2017, Design Specification for Highway Alignment [S].
- [27] 李都厚. 基于公路长下坡车辆制动性能的事故预防研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.  
LI Du-hou. Research on Accident Prevention for the Continuous Long Steep Downgrade Section Based on Vehicle Braking Performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [28] 赵凯辉. 汽车制动器热衰退性能及相关制动安全检测研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.  
ZHAO Kai-hui. Study on the Brake's Heat-fade Performance and Corresponding Braking Safety Detection of Vehicle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [29] 闫晟煜, 肖润谋. 基于收费数据的高速公路运输量指标特征 [J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18 (6): 112-120.  
YAN Sheng-yu, XIAO Run-mou. Index Characteristics of Expressway Transportation Volume Based on Toll Collection Data [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18 (6): 112-120.
- [30] 杨宏志, 胡庆谊, 许金良. 高速公路长大下坡路段安全设计与评价方法 [J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10 (3): 10-16, 40.  
YANG Hong-zhi, HU Qing-yi, XU Jin-liang. Safety Design and Evaluation Method of Long-steep Downgrade Sections for Expressway [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10 (3): 10-16, 40.
- [31] 廖军洪, 邵春福, 邬洪波, 等. 考虑制动器温度的连续长大下坡纵坡设计方法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46 (12): 114-119.  
LIAO Jun-hong, SHAO Chun-fu, WU Hong-bo, et al. Design Methods for Long Steep Downgrades Considering of Brake Temperature of Truck [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46 (12): 114-119.
- [32] WANG X, PU H Q, LI X, et al. A New GNB Model of Crash Frequency for Freeway Sharp Horizontal Curve Based on Interactive Influence of Explanatory Variables [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 2018 (8): 1-9.
- [33] DHAHIR B, HASSAN Y. Probabilistic, Safety-explicit Design of Horizontal Curves on Two-lane Rural Highways Based on Reliability Analysis of Naturalistic Driving Data [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2019, 123 (2): 200-210.
- [34] 阎莹, 张迎, 李庚凭, 等. 基于速度特征指标的高速公路线形一致性综合评价 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17 (3): 835-839.  
YAN Ying, ZHANG Ying, LI Geng-ping, et al. Comprehensive Evaluation of the Highway Alignment Consistency Based on the Driving Speed Index Characteristic Features [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17 (3): 835-839.
- [35] 刘涛. 基于 GIS 的区域道路交通安全管理系统研究 [J]. *公路交通科技*, 2004 (3): 92-96.  
LIU Tao. A Study of GIS-based Regional Road Traffic Safety Management System [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004 (3): 92-96.