

基于制动行为的高速公路平均纵坡坡长研究

张驰¹ 国廷玉¹ 胡瑞来² 高艳阳¹ 周郁茗¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安710064; 2. 云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南昆明650041)

摘要: 货车制动毂温度过高是制动失效的主要原因, 为提高货车在连续下坡路段行驶的安全性, 对平均纵坡设计指标进行细化, 研究驾驶人制动行为与货车制动毂温升特性之间的相关性, 并基于驾驶人制动行为提出纵坡坡长可靠度设计方法。首先, 选取西部山区某高速公路连续下坡路段进行实车试验, 采集道路纵坡参数、驾驶人制动行为数据; 其次, 根据实测数据提出评价指标、位移强度系数和制动毂温度梯度, 并基于回归分析探究了位移强度系数和道路平、纵线形的关系以及位移强度系数和制动毂温度梯度的关系; 最后, 根据驾驶人制动行为和临界温度构建可靠度模型, 基于蒙特卡罗仿真法, 给出了连续下坡路段不同平均纵坡所对应的临界坡长, 并与规范进行对比分析。结果表明: 圆曲线半径与位移强度系数相关性不大, 纵坡坡度与位移强度系数呈显著正相关, 拟合优度 r^2 达0.95; 当纵坡坡度大于2%时, 驾驶人采取的制动行为多为持续性刹车, 与纵坡坡度小于2%时驾驶人多采取点刹的制动行为区别较大, 位移强度系数与制动毂温度梯度呈显著正相关, 拟合优度 r^2 为0.845; 当驾驶人制动比例为85%时, 驾驶人制动行为与规范界定坡长的条件基本一致; 取可靠度为0.95时, 平均纵坡为2.1%~3.0%, 连续坡长临界值为14.95~30.12 km。所给出相关参考值考虑了真实行车环境中的随机性, 可为平均坡度小于2.5%的坡长设计提供依据。

关键词: 道路工程; 制动行为; 位移强度系数; 可靠度; 临界坡长

中图分类号: U491.2⁺55

文章编号: 1000-565X(2025)02-0012-15

随着“一带一路”建设的推进和我国现代综合交通运输体系发展规划及交通强国战略的实施, 以山区为主的西部地区高速网正在紧锣密鼓的建设中, 高速公路作为藏区等地势特殊地区发展的重要交通纽带, 其设计、建设与运行状态决定了道路网络的安全性。西部山区由于地形复杂多变、地势险要, 道路沿线受制于特殊的地理环境, 路线走廊带布设受限, 往往需要跨越山川河流, 采用超长展线及较大纵坡以克服较大的高差, 不可避免的会产生

纵坡大、坡长长的连续下坡路段。某地交通事故数据显示^[1], 有900余起交通事故发生在连续下坡路段, 其中近86%的事故是由下坡过程中制动失效造成, 而制动毂温度过高所引发的交通事故占下坡路段交通事故的57.85%。造成上述路段事故频发的主要原因是连续下坡坡长较长, 驾驶人长时间采取制动行为, 造成车辆失控, 可见频繁的制动行为和较长的下坡路段是该路段交通事故发生的关键因素。由于《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[2]

收稿日期: 2023-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1512005); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-391); 山西省重点研发计划项目(202102020101014)

Foundation items: Supported by the National Key R & D Program of China (2020YFC1512005), the Natural Science Basic Research Project of Shaanxi Province (2023-JC-YB-391) and the Key R & D Projects of Shanxi Province (202102020101014)

作者简介: 张驰(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事交通安全与道路数字化研究。E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

只规定了平均坡度大于2.5%时的最小坡长，而对于平均坡度小于2.5%的连续下坡未做规定，造成设计人员对坡长设计不合理，因此针对连续下坡路段驾驶人的制动行为、制动毂温升特性以及连续下坡设计指标研究变得尤为重要。

对于制动行为的研究一直备受重视。早期的研究是通过利用自动控制理论建立自动控制器并采用方向盘转角和踏板行程来研究驾驶人操纵行为特性^[3]。Delaigue等^[4]在考虑人、车、环境等因素之后建立了制动模型；王雪松等^[5]通过主成分分析，对驾驶人制动行为参数实施了降维处理；吴斌等^[6]利用自然驾驶数据构建了一种驾驶人模型，用于研究紧急工况下的制动避撞行为，该研究探讨了驾驶人在紧急制动过程中反应时间和紧急制动输入特性的规律特征；李霖等^[7]基于真实交通工况下驾驶人的紧急制动行为特征，建立了一种新的危险估计算法，用于汽车避撞系统的控制策略开发；刘瑞等^[8]对驾驶人制动行为的收敛性进行了探讨，并采用核密度估计方法来描述驾驶人的纵向加速行为；张弛等^[9]考虑了降雨、超速和道路线形等因素，分析了小客车在曲线路段上减速过程中的行驶风险；徐进等^[10]基于实测数据探讨了踏板作用力与心率增长率之间的相关性，并建立了回归模型。

针对制动毂温升特性，国内外学者开展了大量研究。Blook^[11]研究了制动器摩擦热与制动性能间的关系；苏波等^[12]研究了制动毂温度与坡度、坡长、车重、车速的关系；Olesiak等^[13]提出了一种函数关系模型，用于描述制动毂温度与道路和车辆参数之间的关系；Moomen等^[14]基于5轴货车开展实车试验，对纵坡严重程度分级系统(GSRS)模型进行修正，修正后的模型被证明能够反映当前车辆的总体特征；杜博英等^[15]考虑车辆在一定坡度下仅空挡或采用发动机制动即可匀速行驶，由此给出对应的临界坡度，针对不同的坡度采用不同的模型进行温度预测；贾伟^[16]选取中型客车、2轴重载货车于山区二级公路开展实车试验，采集车速、制动器温度、踏板力等数据，对建立的制动毂温升模型进行验证；张弛等^[17]对国内外制动毂温升模型进行了系统性分析，特别考虑了发动机辅助制动工况，针对6轴货车驱动轴建立制动毂温升模型，并对其进行修正；潘兵宏等^[18]选取6轴货车制动毂温升模型进行修正，修正后的模型相较于原有模型具有更高的精度。

同时国内通常将大货车制动毂温度作为连续下

坡路段纵断面设计合理性的检验性指标。Ben-Akiva等^[19]首次提出使用概率的设计方法来研究道路线形设计；杨晨等^[20]通过与他国规范对比发现目前规范对于不设缓和曲线最小半径取值偏于保守，因而基于可靠度建立极限状态函数，并求解出不同速度、圆曲线半径下的可靠度，并给出建议值；秦玉秀^[21]分别对隧道内平曲线、竖曲线对行车视距的影响进行了研究，得到了不同变量对行车视距失效概率的影响规律，给出了基于可靠度的道路设计流程；张航等^[22]针对现有规范对爬坡车道设计参数规定不明确的问题，基于可靠度理论，建立了爬坡车道长度于纵坡的可靠度模型，并采用蒙特卡洛法，计算出不同组合下爬坡车道的设计参数；王路等^[23]针对目前设计人员对规范坡长应用不当的问题，根据事故数据和现场实车速度数据，提出基于可靠度概率的方法来计算临界坡长，并与规范进行对比分析；刘斌等^[24]针对目前地下高速互通的设计参数缺乏相关规范规定，基于可靠度来研究地下互通匝道纵坡的设计参数，利用蒙特卡罗仿真法，计算了不同设计速度下、不同坡度下的坡长临界值。

综上所述，关于制动行为的研究主要是针对小型车的驾驶人，而货车驾驶人的制动行为研究较少，也缺少连续下坡路段场景下的制动行为研究。国内外关于制动毂温升特性的研究大多以汽车理论出发，然后基于动力学、热力学等建立制动毂温升模型，并通过实车试验修正模型，同时可靠度理论也逐步应用于道路工程设计中，从而解决实际问题中的随机性。交通事故的发生是人、车、路、环境相互作用形成的，鉴于目前研究主要考虑的是车、路、环境的影响因素，未考虑驾驶人制动行为特征对制动毂温度的影响。因此本研究重点考虑人因，从货车驾驶人在连续纵坡路段的制动行为特征入手，提出以位移强度系数作为制动行为的评价指标，通过分析制动毂温度与制动行为的关系，并结合道路设计指标对制动行为的影响，探究驾驶人制动行为与货车制动毂温升特性的相关性，并应用可靠度理论对不同坡度下坡长进行研究。为运营单位安全管理提供新的思路，提高连续下坡路段货车驾驶人的行驶安全性，降低因制动失效引发交通事故的风险。

1 试验方案

1.1 试验目的与思路

为探究驾驶人制动行为与货车制动毂温升特

性的关系, 应选取具有代表性的山区高速公路, 开展实车驾驶试验, 采集真实驾驶习惯条件下的制动踏板位移、加速踏板位移、道路纵坡参数和制动毂温升数据, 分析驾驶人制动行为特性、制动毂温升变化趋势以及制动行为与货车制动毂温升的相互关系, 进而揭示山区高速公路纵坡路段的驾驶人制动行为特性, 为山区高速公路驾驶道路参数设计控制等提供了数据支撑和分析方法。试验流程如图 1 所示。

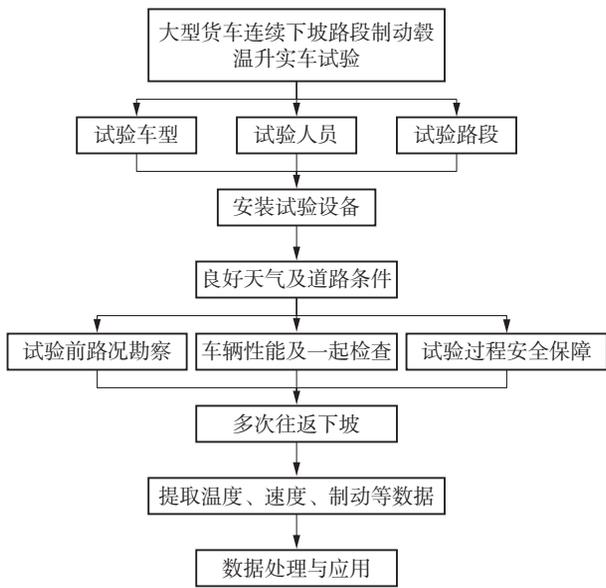


图 1 试验流程

Fig. 1 Testing procedures

1.2 调研路段

选取西部山区某高速公路作为试验路段, 该高速具有海拔高、高差大的特点, 能够反映我国西南山区高速公路的道路特点、环境特征。试验路段设计速度 80 km/h, 具有 3 段连续纵坡路段, 其中具体构造物分布及平面线形如图 2 所示, 连续纵坡指标如表 1 所示。

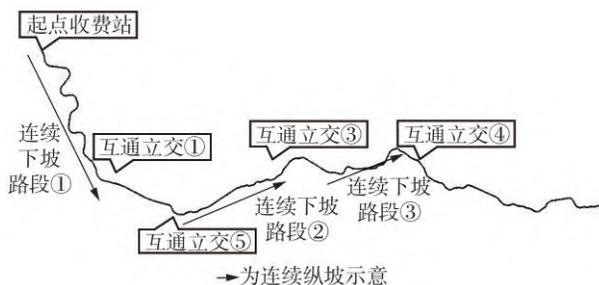


图 2 连续下坡路段平面线形及构造物分布

Fig. 2 Plane alignment and distribution of structures on continuous longitudinal slope sections

表 1 连续纵坡指标

Table 1 Continuous longitudinal slope index

序号	试验路段桩号范围 ¹⁾	平均坡度/%	累计坡长/km	相对高差/m	连续纵坡路段间距/m
1	ZK131+790-ZK99+242	-2.44	32.030	780.873	ZK99+242-ZK89+172=10070
2	ZK89+172-ZK62+946	-2.14	27.672	592.330	ZK62+946-ZK51+764=11182
3	ZK51+764-ZK33+134	-2.06	18.630	384.010	

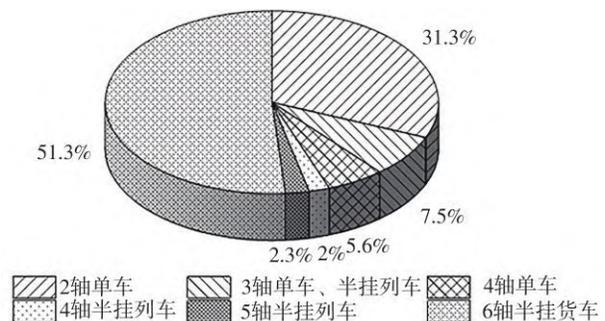
1) ZK 代表道路左线的桩号。

1.3 试验流程

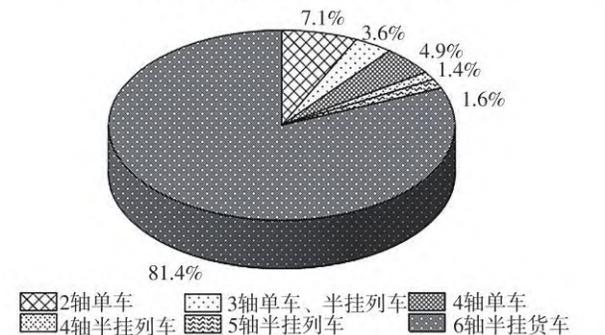
1.3.1 试验车型

近 10 年以来, 半挂车铰接列车已经从 10 年前的小众车型, 发展成为当前我国高速公路货运绝对主导的代表车型, 铰接列车的数量已从占比不到 10% 快速增长至 51% 以上, 而 2019 年由铰接列车完成的货运周转量占高速公路货运总量的 80% 以上, 货车大型化趋势显著。而我国公路相关规范、标准研究修订过程中, 货运代表车型也从 2 轴、3 轴变为 6 轴, 车货总质量从 20 t 增加到 49 t。全国高速公路货运组成如图 3 所示。

因此, 选择高速公路典型 6 轴半挂车作为试验车型, 车辆型号为中国重汽 HOWO T7, 装载货物后车货总质量极限为 49 t。



(a) 高速公路货运车辆类型占比



(b) 高速公路货运周转车辆类型占比

图 3 全国高速公路货运组成

Fig. 3 Composition of national highway freight

1.3.2 试验条件

(1)天气条件：天气晴朗，无雨、无雾，道路能见度高，相对湿度小于95%，气温0~40℃，风速不大于3m/s。

(2)驾驶人条件：驾驶人驾驶大型货车超过10a，且具有丰富的山区高速公路驾驶经验，身体状况良好，试验前睡眠充足，试验过程中无疲劳驾驶。

(3)道路条件：要求路面为平整、干燥的沥青铺装路面，行驶过程中无前方车辆干扰，试验路段无施工、车道封闭，车辆处于自由流状态，隧道内通风、照明设备良好。

(4)车辆条件：车辆装备情况符合该车装配调整技术条件及《机动车运行安全技术条件》(GB 7258—2017)有关规定，轮胎冷充气压力符合相关技术条件的规定，试验汽车使用的燃料、润滑油和制动液的牌号和规格，符合该车技术条件或现行国家标准的规定。装配货物为沙石，均布于货箱内。装配后车货总重为49t。

1.3.3 试验方案

考虑到车辆实际驾驶时采用较高挡位进行行驶，且开启排气制动有助于缓解制动力，因此车辆下坡时采用10~12挡行驶，同时关闭排气阀及缓速器，通过主制动器及发动机辅助制动将车速控制在60km/h左右。试验车辆前、后各安排一辆后勤保障车，且前车与试验车辆保持车距大于300m，开启警示灯，排除其他车辆干扰。选取驾驶经验丰富、对该路段况熟悉的驾驶人进行两次试验，每次试验均为康定至雅安方向。在车辆处于安全行驶状态前提下不停车下坡，仅当制动毂处于危险状态时对其淋水或紧急停车降温。

1.4 数据采集

试验全程使用VBOX数据采集系统采集数据，采集频率为100Hz，即每间隔0.01s采集一次数据，通过协调世界时时间进行数据记录。采集系统包括①踏板信号采集模块，用于记录车辆行驶过程中驾驶人制动及加速数据；②GPS模块，用于记录车辆试验过程中行驶轨迹、经纬度、海拔高度等数据，以便于后期对设计图纸中相关道路线形进行校核；③温度信号无线采集和接收器，可对试验车辆的第2轴、第3轴、第4轴和第6轴制动毂的内表面温度进行采集，并通过温度信号无线接收仪器进行监测；④VGPS速度仪，用于获取车辆行驶速度等动态数据。本次试验数据采集系统设计及仪器安装位置如图4和图5所示。

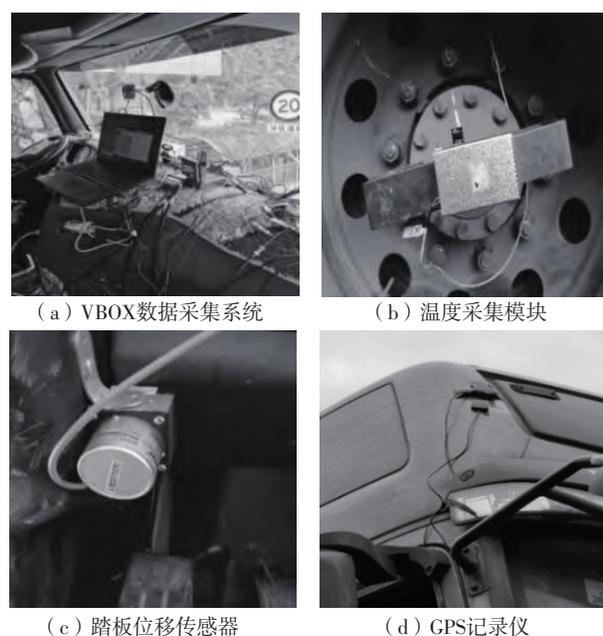


图4 试验数据采集装置

Fig. 4 Test data acquisition device



图5 试验仪器安装位置

Fig. 5 Installation location of test instrument

2 基于制动行为的制动毂温升特性分析

2.1 评价指标的选取

为研究连续下坡路段上的驾驶人制动行为特性，在选取评价指标时应尽可能考虑到多方面因素。目前主要考虑人、车、路、环境4方面的影响，而驾驶人会受到车、路、环境这3方面因素的直接影 响，并在收到这3方面的信息之后做出相应的制动行为。因此根据实车试验采集的数据结果，结合驾驶人制动行为影响因素分析及相关文献，基

于驾驶人制动行为指标的量化分析,进一步对驾驶人制动行为进行分析,能够从更深层次反映驾驶人制动行为的内在致因和特性。

2.1.1 位移强度系数

考虑到实车试验数据可能在一定范围内不存在规律的周期性,而是持续性的制动行为,为了科学合理的从制动行为的角度进行分析,本研究基于制动踏板位移的大小提出位移强度系数来表征制动行为,位移强度系数越大,说明驾驶人采取的制动措施越大,制动力也越大。同时位移强度系数在数值上均处于 $[0,1]$ 范围内,方便后续探究制动行为与制动毂温升特性的相关性计算,并且从实际获取的制动踏板位移数据对最大位移和最小位移进行了处理和变形,很容易计算出位移强度系数,且位移强度系数能很好反映驾驶人在车辆运行中采取的制动措施及强度。本研究基于制动踏板位移提出位移强度系数来表征制动行为,位移强度系数计算式为

$$D_{ci} = \frac{S_i}{S_{\max}} \quad (1)$$

$$D_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{ci} \quad (2)$$

式中: D_{ci} 为某一时段的位移强度系数,无量纲; D_c 为研究路段范围内位移强度系数均值,无量纲; S_{\max} 为连续下坡路段中制动踏板最大位移,cm; S_i 为第*i*时刻制动踏板位移,cm。

2.1.2 温度梯度

驾驶人在不同路段的微观制动行为存在一定差异,同时驾驶人的制动强度在不断连续变化,因此选取微观温度梯度即货车单位时间内温度的变化数值来表征制动毂温升特性,温度梯度越大,则单位时间内制动毂温度上升越快,计算式为

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (3)$$

$$G_T = \frac{\Delta\theta}{t} \quad (4)$$

式中: $\Delta\theta$ 为*i*时刻与*i-1*时刻的制动毂温差, $^{\circ}\text{C}$; θ_i 为*i*时刻制动毂温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_{i-1} 为*i-1*时刻制动毂温度, $^{\circ}\text{C}$; G_T 为温度梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{s}$; t 为时间,s。

2.2 制动行为特性分析

2.2.1 平面圆曲线半径

由前文分析,驾驶人在较小圆曲线半径路段行驶时心生理特性容易发生变化,进而可能对驾驶行为造成影响。从踏板位移的角度分析试验过程中驾驶人的驾驶行为,通过对位移整体变化趋势进行分

析,试验时各路段制动踏板位移值均集中在6~13mm之间,这是由于圆曲线半径较小时,驾驶人普遍会采取制动措施降低车速,所以制动力较大,导致踏板位移出现变化。

对试验路段的位移强度系数点进行计算,各圆曲线路段踏板位移强度系数结果如图6(a)所示。采用*K*均值聚类算法对位移强度系数、圆曲线半径二维数据进行迭代聚类分析,圆曲线半径按照400~700m、700~1000m、1000~1300m、1300~9999m(9999m表示直线路段)进行分组,聚类数作为初始的聚类中心,把每个二维数据分配给距离它最近的聚类中心,得到4个聚类,每分配完10个样本数据,会根据聚类中现有的数据重新计算聚类中心,这个过程将不断重复直到聚类中心几乎不再发生变化,最终将二维数据划分为4类。该过程利用SPSS软件实现,结果如图6(b)所示。

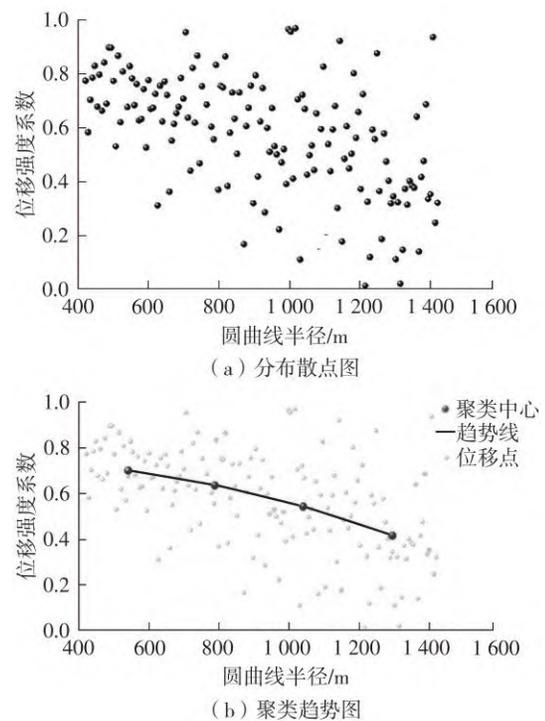


图6 不同半径时踏板位移强度系数分布

Fig. 6 Distribution of brake coefficients at different radius

由图6(a)可知,圆曲线半径约小于700m左右时,位移强度系数分布较为集中,集中在0.7左右,表明驾驶人踏板位移大多处于高位状态,制动行为较强,随着行驶半径的增大,位移强度系数变化趋势由集中向分散转变,踏板位移形式变化较大,存在“踩下”持续制动、“踩下-松脚”制动减弱、“踩下-抬脚”点刹或“轻微点刹”等多种形式;结合图6(b)可知,位移强度系数有随着圆曲线半径增大

而减小的趋势，符合圆曲线半径越大，驾驶人采取制动措施较弱的趋势，即驾驶人认为路段圆曲线半径越小，控制车辆达到期望速度的制动行为越强。

用统计分析软件 Origin 对位移强度系数和圆曲线半径进行相关性分析，采用线性回归分析位移强度系数和圆曲线半径的相关性，而后通过残差分析对回归模型的可信度进行检验。回归分析及残差分析结果如图 7 所示，参数估计及显著性检验结果如表 2 所示。

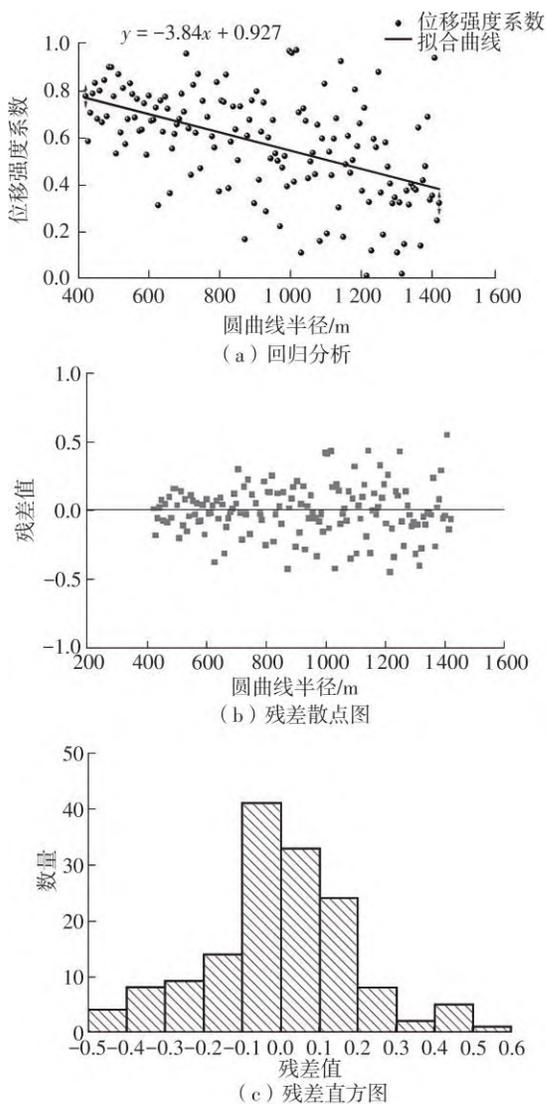


图 7 位移强度系数-圆曲线半径回归及残差分析结果
Fig. 7 Result of the brake coefficient-circular curve radius regression and residual analysis

表 2 位移强度系数和圆曲线半径相关性检验结果

Table 2 Results of correlation test between displacement strength coefficient and circular curve radius

回归类型	回归函数形式	标准误差	$P> t $	r^2
线性回归	$y=ax+b$	0.050 7	0.000	0.262 5

根据上述分析可得出如下结论：从回归参数检验结果来看，方程 P 值均为 0.000，表明回归效果显著，自变量参数 $P>|t|$ ，且均小于 0.0507，能够满足 95% 置信区间下的显著性水平；从拟合效果来看，线性模型回归的 r^2 值为 0.2625，线性模型的回归效果较差，位移强度系数和圆曲线半径之间存在一定的非线性相关性；通过残差分析检验回归方程的可信度，线性回归的残差值随着圆曲线半径的增加而逐渐增大，表明数据存在随着自变量的增大，残差的离散性逐渐变大的趋势。

2.2.2 纵坡坡度

由前文分析，纵坡坡度的大小对驾驶人的制动行为会造成一定影响。对试验路段的位移强度系数点进行计算，各坡度路段踏板位移强度系数点分布如图 8(a) 所示。采用 K 均值聚类算法对位移强度系数纵坡坡度二维数据进行迭代聚类分析，纵坡坡度按 0~1%、1%~2%、2%~3%、3%~4% 进行分组，利用 SPSS 软件将二维数据划分为 4 类，结果如图 8(b) 所示。

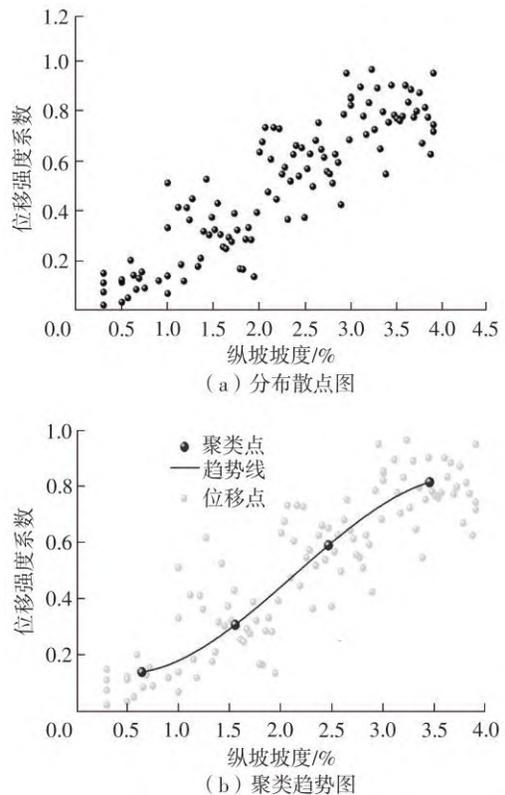


图 8 位移强度系数随纵坡坡度变化趋势
Fig. 8 Trend plot of the brake coefficient on different slopes gradient

由图 8(a)、8(b) 可知，位移强度系数整体分布随着坡度变化较为集中，并且随着坡度的增大，位移强度系数增大，表明驾驶人踏板位移在大坡度路

段处于高位状态, 驾驶人制动行为较强, 同时踏板位移也随着坡度增大表现为“轻微点刹”、“踩下-抬脚”点刹、“踩下-松脚”制动稍弱、“踩下”持续制动的转变, 同时也符合坡度越大, 驾驶人采取制动措施越强的趋势, 即驾驶人认为坡度越大, 控制车辆达到期望速度的制动行为越强。

用统计分析软件 Origin 对位移强度系数和纵坡坡度进行相关性分析。采用线性回归分析位移强度系数和纵坡坡度的相关性, 而后通过残差分析对回归模型的可信度进行检验。回归分析及残差分析结果如图 9 所示, 参数估计及显著性检验结果如表 3 所示。

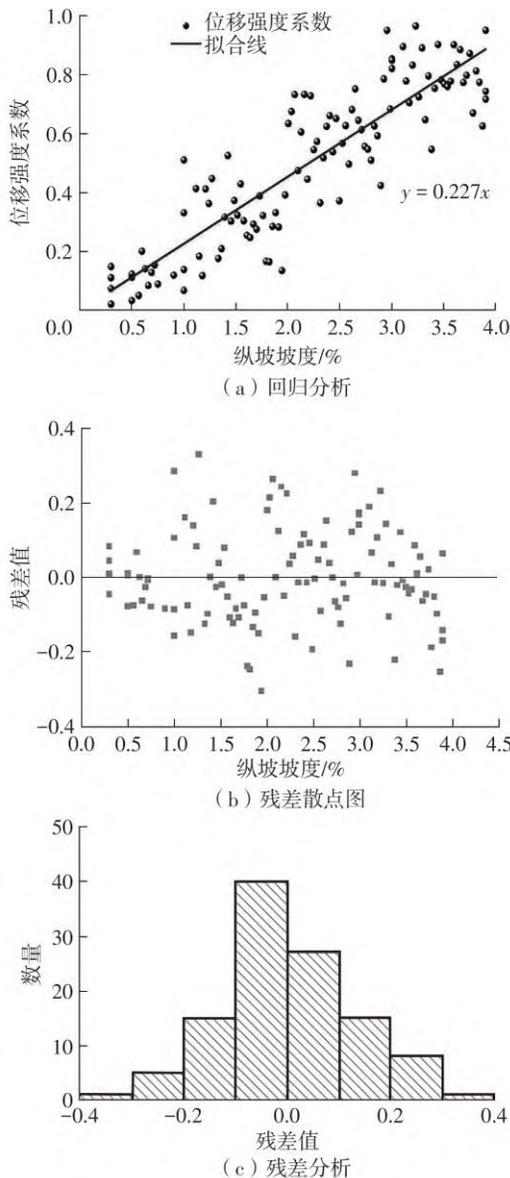


图 9 位移强度系数-纵坡坡度回归及残差分析结果

Fig. 9 Result of the braking coefficient-longitudinal slope regression and residual analysis

表 3 位移强度系数和纵坡坡度相关性检验结果

Table 3 Results of correlation test between displacement strength coefficient and longitudinal slope

回归类型	回归函数形式	标准误差	$P> t $	r^2
线性回归	$y=ax$	0.0049	0.000	0.9504

根据上述分析可得出如下结论: 由回归参数检验结果来看, 方程 P 值为 0, 远小于显著性水平 0.05, 回归方程通过了 F 检验, 表明回归效果显著, 能够满足 95% 置信区间下的显著性水平; 从拟合效果来看, 线性模型回归的 r^2 值为 0.9504, 线性模型的回归效果较好, 位移强度系数和纵坡坡度之间具有较好的相关性; 通过残差分析检验回归方程的可信度, 线性回归的残差值均满足正态分布, 并且拟合函数的残差值均匀的分布在 0 的两侧, 因此, 可以看出拟合函数的可信度较高。从拟合结果来看, 随着坡度的升高, 位移强度系数也逐渐增大; 位移强度系数和纵坡坡度存在正相关性。

为探究纵坡对驾驶人制动行为的影响程度, 根据上述位移强度系数和纵坡坡度的相关性分析, 计算出位移强度系数的累计频率, 并绘制踏板位移强度系数累计频率图如图 10 所示。

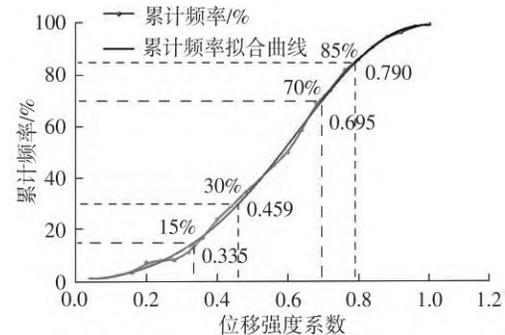


图 10 位移强度系数累计频率分布图

Fig. 10 Cumulative frequency distribution of displacement strength coefficient

根据统计学原理, 选位移强度系数 D_c 累计频率的 15%、30%、70% 及 85% 作为划分阈值, 将驾驶人制动行为的等级强弱划分为强、较强、中等、较弱和弱 5 个等级, 结果如表 4 所示。

根据表 4 和位移强度系数和纵坡坡度的回归分析结果, 可计算出各等级下的临界坡度为 1.47%、

表 4 位移强度系数分级表

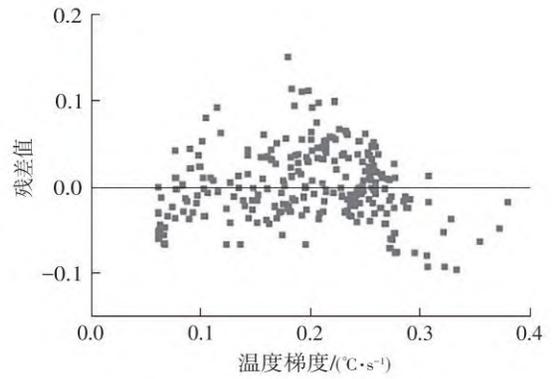
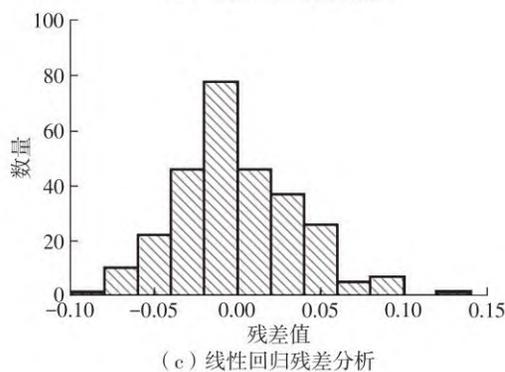
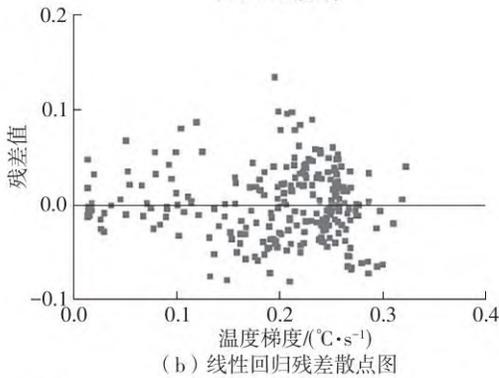
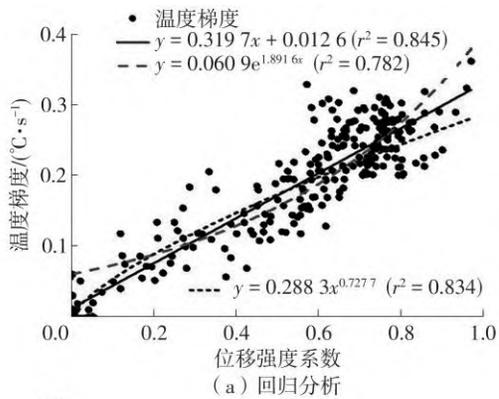
Table 4 Displacement strength coefficient grading table

弱	较弱	中等	较强	强
$D_c \leq 0.335$	$0.335 < D_c \leq 0.459$	$0.459 < D_c \leq 0.695$	$0.695 < D_c \leq 0.790$	$D_c > 0.790$

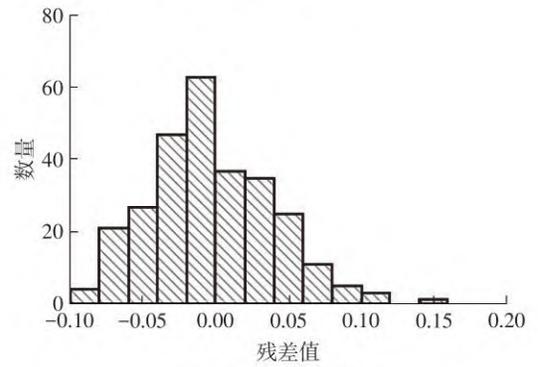
2.00%、3.06% 和 3.48%。同时根据驾驶人在纵坡制动踏板位移的特征可得，驾驶人在坡度小于 2% 的路段采取的制动行为大多为单次点刹，而在坡度大于 2% 路段采取的制动行为多为持续性的刹车，并且大多数情况下波谷处的踏板位移值仍处于高位状态，因此可认为在坡度达到 2% 时，驾驶人的制动行为表现出明显差异。

2.3 基于驾驶人制动行为的温升特性分析

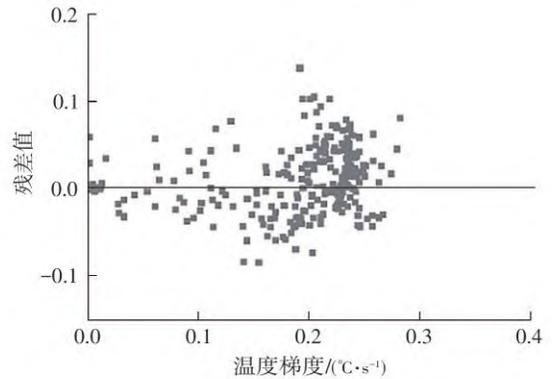
采用统计分析软件 Origin 和 SPSS，对位移强度系数和制动毂温度梯度进行相关性分析。分别采用常用的线性回归、幂函数回归和指数回归模型，拟合位移强度系数与制动毂温度的相关性，以探究驾驶人制动强度对制动毂温度梯度的影响规律，而后利用残差分析对模型的可信度进行检验。回归分析及残差分析结果如图 11 所示，参数估计及显著性检验结果如表 5 所示。



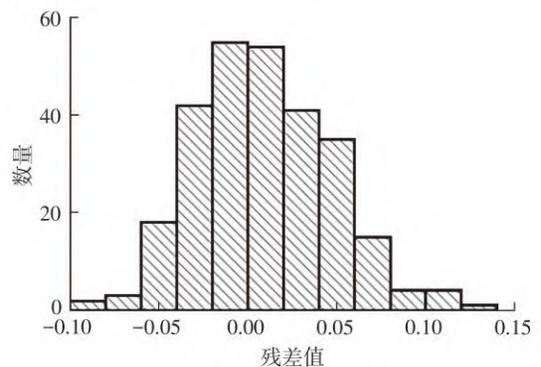
(d) 指数回归残差散点图



(e) 指数回归残差分析



(f) 幂函数回归残差散点图



(g) 幂函数回归残差分析

图 11 位移强度系数-温度梯度回归及残差分析结果
Fig. 11 Result of the displacement-strength coefficient-temperature gradient regression and residual analysis

表5 位移强度系数与制动毂温度梯度相关性检验结果

Table 5 Results of correlation test between displacement strength coefficient and brake hub temperature gradient

回归类型	函数形式	标准误差	$P> t $	r^2
线性回归	$y=ax+b$	0.0082/0.0050	0.000/0.012	0.845
指数回归	$y=ae^{bx}$	0.0037/0.0848	0.000/0.000	0.782
幂函数回归	$y=ax^b$	0.0562/0.0316	0.000/0.000	0.834

根据上述分析可得到:从方差分析结果来看,回归模型 P 值均为0,表明回归效果显著;回归参数检验结果各自变量参数 $P>|t|$,均小于0.05,能够满足95%置信区间下的显著性水平;从拟合效果来看,线性回归、指数回归和幂函数回归的 r^2 值分别为0.845、0.782和0.834,3种回归模型的拟合效果均较好,其中,线性模型的回归效果最好,幂函数模型次之,指数模型的回归效果相对较差,因此,线性回归能够更好地拟合位移强度系数和制动毂温度梯度之间的相关性。根据残差分析结果可以看出,线性回归和幂函数回归的残差值能够正态分布。其中线性回归和幂函数回归的残差值正值、负值均匀分布于0的两侧,指数回归的残差值大致满足正态分布,残差值正值、负值相较于线性幂函数回归在0的两侧分布不均匀,并且基本都在 ± 0.1 范围内,说明预测值和实际值的差值较小。整体上3种回归拟合函数的可信度均较高,根据回归结果可以看出,位移强度系数越大,制动毂温度梯度越高,位移强度系数与制动毂温度梯度存在较强的相关性。

3 基于制动行为的制动毂温升可靠度分析

3.1 可靠度模型构建

根据可靠度理论,本研究从制动毂温升的角度将制动行为可靠度定义为:重载货车以某一速度在连续下坡路段行驶时,驾驶人根据道路环境条件采取制动行为时,制动器因持续工作导致制动毂温度升高,其制动毂温度的最高值不超过临界温度的概率即为制动行为可靠度。由此,基于驾驶人制动行为的温升可靠度极限状态函数可表示为

$$P = 1 - P_f = 1 - P_f \quad (5)$$

$$\theta_z = \theta - \theta_c, \quad Z \geq 0 \quad (6)$$

式中: P 为驾驶人制动安全的可靠度; P_f 为驾驶人的制动失效概率; θ 为制动毂温升的极限状态方程; θ 为制动毂温度实际预测值,根据驾驶行为与制动毂温升特性进行计算; θ_c 为临界安全温度。

本研究基于文献[2]综合考虑国内外各研究学者的成果,结合试验车型和试验时的平均车速(60 km/h左右),将制动毂温度200℃作为制动失效临界安全温度,当制动毂温度超过200℃时,可认为制动失效。

3.2 可靠度模型变量分布

3.2.1 制动时长分布

根据前文分析,在坡度较大的路段,驾驶人会采取较强的制动措施控制车速,而坡度较小的路段,驾驶人会采取较弱的制动措施或不采取制动措施,以便车辆恢复速度,但驾驶人并不是全程都采取制动行为,为分析驾驶人制动时长的分布,计算各连续下坡路段的驾驶人的有效制动(使制动毂温升的制动)行为占比。通过对该路段驾驶人的制动时长调查,发现在连续下坡路段驾驶人不会采取全制动行为,驾驶人采取有效制动的的时间占比在72%~85%之间,最大为84%,平均值为77%;而驾驶人采取不制动行为的时间占比在15%~28%之间,最大为27%,平均值为22%。因此,当考虑到道路的实际运行情况,由于交通流的干扰,驾驶人可能采取更长的刹车时间从而使制动毂达到失效温度200℃。因此对驾驶人的制动时长比率按照77%(平均值)、80%、85%、90%、95%、100%的工况进行可靠度仿真分析。

3.2.2 位移强度系数分布

根据前文研究,位移强度系数与纵坡坡度呈正相关,坡度越大,位移强度系数越大。在坡度大于2%时,位移强度系数均在中等以上,同时文献[2]中只规定了平均坡度大于2.5%时的最小坡长,对于平均坡度小于2.5%时的连续下坡坡长未作规定。为分析不同纵坡类型下的位移强度系数的分布规律,根据试验数据计算2%~3%坡度区间每个坡度下的位移强度系数分布,如图12所示。

由图12可知:坡度越大,位移强度系数的均值越大,并且位移强度系数在均值附近分布比较集中,两端分布比较分散,根据每个坡度下的分布曲线可知位移强度系数在各个坡度下满足一定的分布规律。以坡度2.8%为例,对位移强度系数使用目前常用的正态分布、对数分布、威布尔分布、伽马分布进行分布检验,结果如表6所示。

根据表6检验结果可知,正态分布、对数分布、威布尔分布、伽马分布的渐近显著性 P 均不满足各分布的要求。所以可以排除位移强度系数满足正态分布、对数分布、威布尔分布或伽马分布。

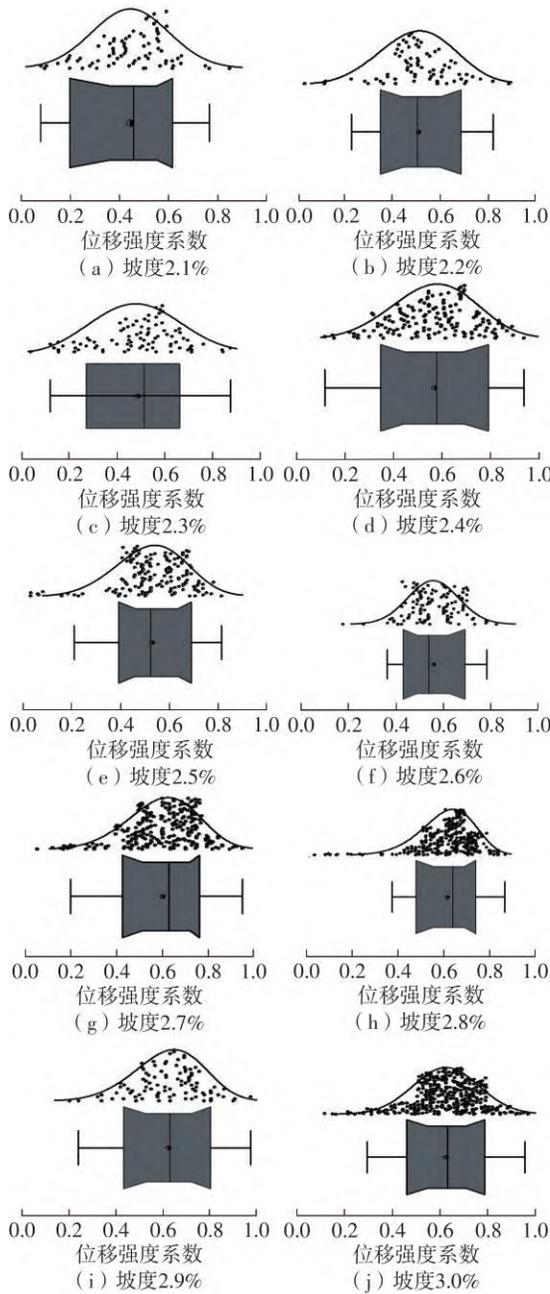


图 12 不同坡度下位移强度系数分布

Fig. 12 Distribution of displacement intensity coefficients at different slopes

根据图 12，位移强度系数分布满足一定分布规律，利用 Origin 软件统计分布拟合功能对其进行拟合，经对比分析发现 GaussAmp 分布拟合的优度较高，GaussAmp 分布函数式为

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2w^2}} \quad (7)$$

式中： y 为位移强度系数值的计数； y_0 为位移强度系数计数的基线值； A 为峰值振幅； x 为位移强度系数； x_c 为高斯曲线的峰值位置的位移强度系数； w 为宽度参数， w 越小，GaussAmp 曲线越尖锐。

表 6 各种分布检验结果

Table 6 Results of various distribution tests

分布类型	拟合优度检验	统计	P 值	在置信水平 5% 下的结论
正态	K-S 修正检验	0.12945	≤0.010	排除正态分布
对数	K-S 修正检验	0.28431	≤0.010	排除对数分布
威布尔分布	K-S 修正检验	0.13306	≤0.010	排除威布尔分布
伽马分布	K-S 修正检验	0.23606	≤0.005	排除伽马分布

GaussAmp 分布拟合的拟合优度 $r^2=0.995$ ，位移强度系数分布拟合结果如图 13 所示。根据试验可知，由于驾驶环境条件较好，受交通流影响较小。对该路段驾驶人的制动时长调查发现该路段驾驶人平均制动时长比率在 77% 左右，考虑到真实行车环境，驾驶人制动时长比率会较大，因此在货车速度为 60 km/h 时，对驾驶人制动时长比率在 80%、85%、90%、95% 和 100% 工况下的位移强度系数 GaussAmp 分布进行拟合，拟合结果及相关参数如表 7 所示。

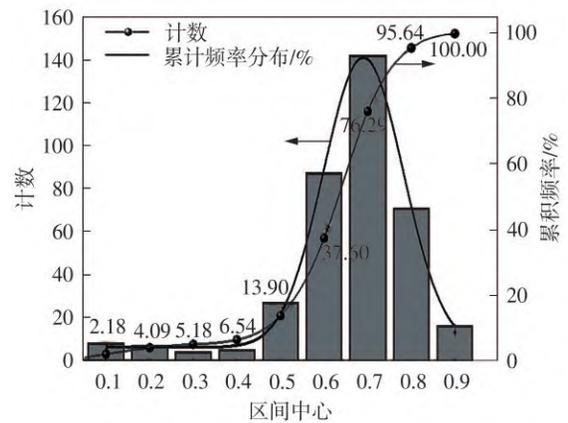


图 13 位移强度系数 GaussAmp 分布拟合结果

Fig. 13 Fitting results of GaussAmp distribution of displacement strength coefficient

表 7 不同制动时长比率拟合结果

Table 7 Fitting results of different braking duration ratios

制动时长比率/%	函数分布形式	参数值
80	$y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2w^2}}$	$A=141.78, w=0.092, y_0=6.78, x_c=0.64$
85		$A=150.96, w=0.092, y_0=7.22, x_c=0.64$
90		$A=159.78, w=0.092, y_0=7.64, x_c=0.64$
95		$A=168.59, w=0.092, y_0=8.06, x_c=0.64$
100		$A=177.41, w=0.092, y_0=8.48, x_c=0.64$

3.3 仿真流程

本研究均是在车辆合法装载前提下进行,因此不考虑超载车行驶的情况。研究对象为设计速度80 km/h的高速公路连续下坡路段,重载货车速度控制为60 km/h,计算车辆行驶时间。基于上述分析,考虑到货车驾驶人在连续下坡路段不同坡度下,存在不同的位移强度系数分布,利用蒙特卡罗仿真法,在极限状态方程的基础上,基于Matlab软件编程,对一定概率分布下的位移强度系数进行随机生成,模拟下坡行驶车辆的实际情况,抽样模拟计算不同制动比率下制动毂温度失效的概率,其基本步骤如下:

步骤1 定义抽样次数 $N=5000$,制动毂初始温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$;

步骤2 根据不同平均坡度输入连续下坡路段长度、驾驶人的制动比率、位移强度系数的概率分布函数占比;

步骤3 根据不同坡度下位移强度系数的概率分布函数,随机生成服从其分布的位移强度系数;

步骤4 根据位移强度系数和制动毂温度梯度的温升关系计算车辆在不同坡度、不同坡长下的制动毂温度;

步骤5 将每次仿真计算温度与临界安全温度相比较,低于临界温度时定义为制动安全,超过临界温度则为制动失效,同时记录两者次数和制动失效时不同平均坡度下的连续坡长;

步骤6 重复步骤1-5,直至完成 N 次,计算不同坡长下制动安全次数与总次数的比值,即为该段制动行为可靠度。

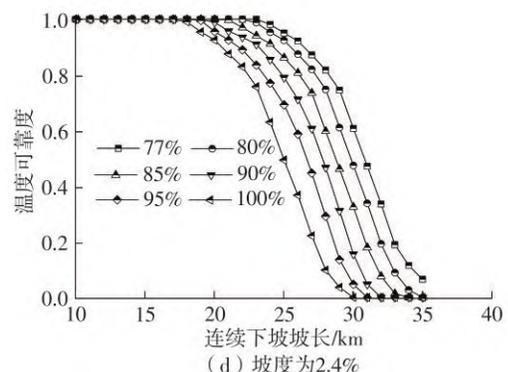
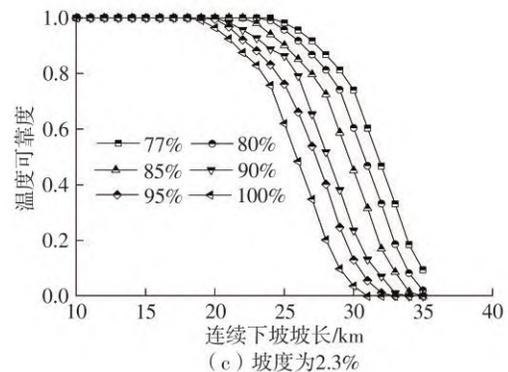
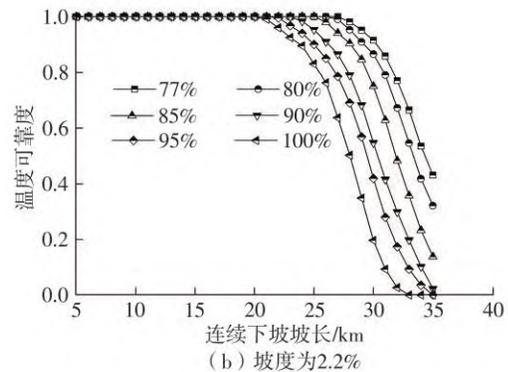
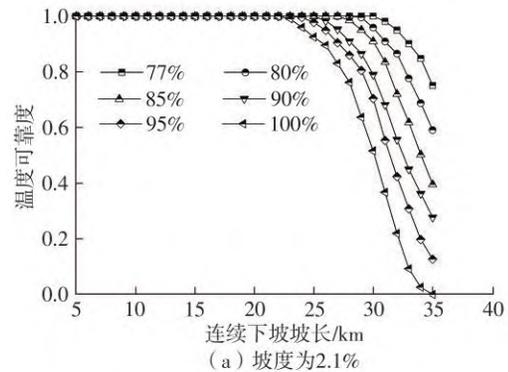
3.4 仿真结果分析

将重载货车驾驶人在连续下坡路段的制动比率分布比例范围设定为80%~100%,并以5个百分点的增量依次递增,同时将增加试验驾驶人制动时长比率77%作为对比分析,分别计算不同制动时长比率、不同坡度下连续坡长的制动毂温度可靠度,结果如图14所示。

本研究对象为高速公路连续下坡路段,参考《工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)^[25]中对高速公路目标可靠度的规定,目标可靠度取0.95。对驾驶人制动时长比率在77%、80%、85%、90%、95%和100%的工况计算临界坡长,如表8所示。

由表8可知当制动时长比率为85%时,各坡度下对应的坡长与文献[2]中规定坡长最为接近。需

要特别指出的是,文献[2]中关于坡长的界定是在驾驶员采用合法规范的驾驶操作行为、车辆无质量问题、合法装载且无非法改装的前提下提出的。而本试验也是在相同的前提下进行的,即可认为当驾驶人制动时长比率为85%时,驾驶人制动行为与规范界定坡长时驾驶人制动行为一致。



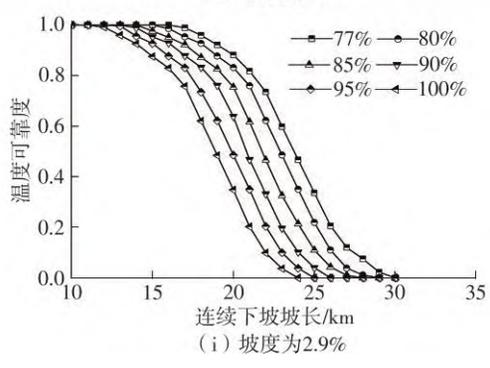
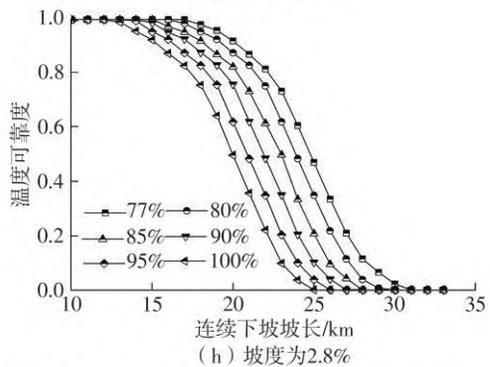
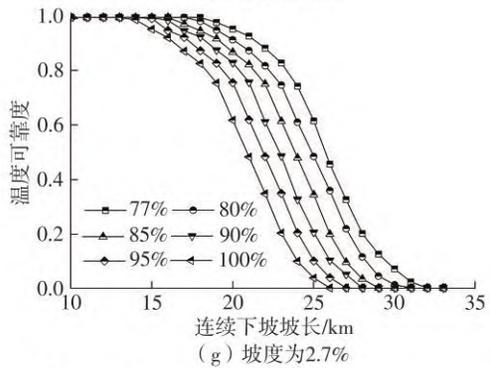
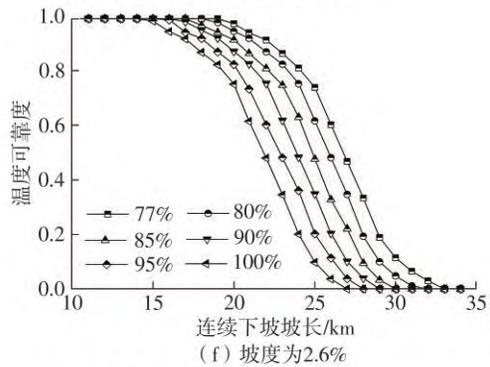
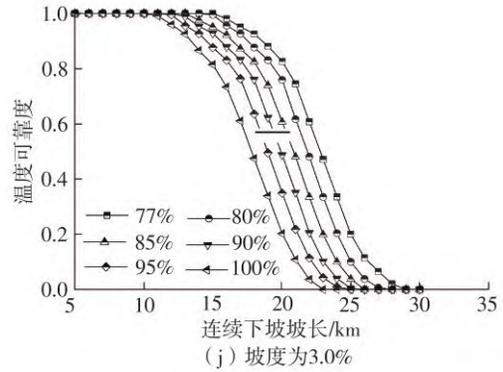
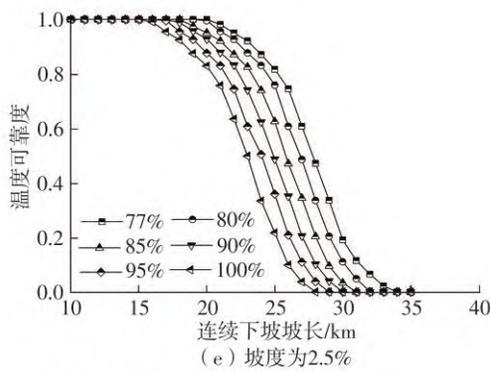


图 14 不同坡度、制动比率下制动毂温度可靠度

Fig. 14 Brake hub temperature reliability at different gradients and braking ratios

表 8 可靠度 0.95 下各坡度的仿真临界坡长

Table 8 Simulated critical slope lengths for each slope at reliability 0.95

平均 坡度/%	临界坡长/km					
	77% ¹⁾	80% ¹⁾	85% ¹⁾	90% ¹⁾	95% ¹⁾	100% ¹⁾
2.1	33.06	31.76	30.12	28.88	25.97	24.56
2.2	30.98	29.02	27.67	24.86	23.67	22.48
2.3	28.32	26.87	25.12	23.34	21.79	20.46
2.4	25.39	23.81	22.75	20.45	19.76	18.83
2.5	22.03	21.74	20.18	18.83	17.75	16.97
2.6	20.49	19.73	18.92	17.76	16.93	15.87
2.7	19.92	18.98	18.04	17.13	15.97	14.91
2.8	19.00	17.89	17.25	15.97	14.72	13.76
2.9	17.99	16.88	15.97	14.93	13.94	12.68
3.0	16.85	15.77	14.95	13.79	12.90	11.74

1) 为制动时长比率。

为便于西部地区相关连续下坡路段工程采取相应的设计参数作为参考，明确连续下坡路段各坡度下的临界坡长，取可靠度 0.95 对上述仿真各工况计算临界坡长，并与各坡度下文献[2]对应的坡长进行对比，得出了当平均坡度小于规范规定的平均坡度下的坡长参考值，如表 9 所示。

由表 9 可知如下结果。①通过研究可靠度取 0.95 时不同平均纵坡的临界坡长，发现当制动时长比率为 85% 时，各平均坡度对应的临界坡长与文献[2]中规定的坡长最为接近。因此以制动时长比率为 85% 工况下计算得到的各平均纵坡连续坡长临界值作为参考，补充了文献[2]中平均纵坡在 2.1%~2.4% 的连续坡长临界值。考虑到平均坡度大于 2.5% 时连续坡长会受到文献[2]的约束，设计人员通常将平均坡度设计在 2.1%~2.4% 之间，造成平均坡度在 2.1%~2.4% 之间时连续坡长设计不当。在考虑驾驶人制动特性的情况下，该表给

表9 规范坡长与仿真试验临界坡长对比¹⁾

Table 9 Comparison of normative slope length and simulation test slope length reference values

平均坡度/%	文献[2]中的 规范坡长/km	临界坡长/km
2.1		30.12
2.2		27.67
2.3		25.12
2.4		22.75
2.5	20.00	20.18
2.6	18.96	18.92
2.7	17.92	18.04
2.8	16.88	17.25
2.9	15.84	15.97
3.0	14.80	14.95

1)制动时长比率为85%。

设计人员在指标选取时提供了更多可参考的结论。②表9只是一个推荐性、检验性的指标,并非强制限制值。在今后的设计过程中,由于不同高速公路受到地形、地质等条件限制,实际情况各不相同,可结合工程实际情况参考表9进行设计,当设计坡长超过表9的参考值时,运营阶段可进行合理的速度控制、增设强制停车区等安全性分析评价,给出相应的通行管控措施,在一定程度上保证行车安全。

4 结语

在连续下坡路段,驾驶人由于频繁的制动行为导致制动毂温度过高,从而导致连续下坡货车事故频发。本研究结合实车试验数据提出了基于驾驶人制动行为的制动毂温升特性的研究方法,从驾驶人的制动行为和制动毂温升机理出发,以位移强度系数、温度梯度作为量化指标,明确了制动行为对制动毂温升速率的影响关系;同时基于可靠度构建基于驾驶人制动行为的温升可靠度模型,以研究不同坡度下制动时长、位移强度系数分布占比下的连续下坡坡长的可靠度。得到了以下主要结论。

(1)鉴于目前研究缺乏针对连续下坡路段驾驶人制动行为的研究,本研究基于实车试验,提出以位移强度系数作为制动行为的评价指标,分析驾驶人制动行为在不同圆曲线半径和纵坡下的分布特征。发现位移强度系数与圆曲线半径相关性不显著;位移强度系数与纵坡坡度呈显著正相关,相关拟合优度可达0.95;当纵坡坡度大于2%时,

驾驶人采取的制动行为多为持续性刹车,与纵坡坡度小于2%时驾驶人多采取点刹的制动行为区别较大。

(2)提出基于驾驶人制动行为的制动毂温升特性的研究方法,以位移强度系数、温度梯度作为量化指标,明确了制动行为对制动毂温升速率的影响关系。发现位移强度系数与制动鼓温度梯度呈显著正相关,相关拟合优度0.845;驾驶人制动行为越强,制动毂温升速率越快。

(3)鉴于我国规范文献[2]中缺少对平均坡度在2.1%~2.4%下的连续坡长临界值的规定,本研究取可靠度0.95,对不同制动时长比率和坡度下的驾驶人制动行为进行仿真试验,计算临界坡长。在目标可靠度0.95下,当驾驶人制动比率为85%时,各平均坡度对应的临界坡长与文献[2]中规定的坡长最为接近。因此以制动时长比率为85%时计算得到的各平均纵坡连续坡长临界值作为参考,补充了文献[2]中平均纵坡在2.1%~2.4%的连续坡长临界值,为设计人员的设计提供了参考依据。

(4)本研究成果可为高速公路连续下坡路段重载货车驾驶人制动行为研究提供基础,以期提高连续下坡路段的安全运营水平,为后续研究提供多角度多维度的科学依据。

未来可以增加不同年龄段的驾驶人进行实验以丰富研究样本,提高试验数据的准确性和全面性;考虑复杂天气条件等因素,分析其对制动毂温升特性的影响;本研究未考虑同一坡度下小半径圆曲线对位移强度系数的影响,还可以对不同纵坡下研究小半径圆曲线的位移强度系数进一步分析。

参考文献:

- [1] 史培龙,刘瑞,余强,等. 重型货车坡道运行安全监控系统[J]. 科技导报, 2015, 33(4): 104-110.
SHI Peilong, LIU Rui, YU Qiang, et al. Safety monitoring system for heavy duty vehicles running on rampway [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(4): 104-110.
- [2] 公路路线设计规范: JTG D20—2017 [S].
- [3] MACADAM C. Understanding and modeling the human driver [J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(1): 101-158.
- [4] DELAIGUE P, ESKANDARIAN A. A comprehensive vehicle braking model for predictions of stopping distances [J]. Journal of Automobile Engineering, 2004, 218(12): 1409-1417.

- [5] 王雪松, 朱美新, 陈铭. 驾驶员前向避撞行为特征的降维及多元方差分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 1858-1866.
WANG Xuesong, ZHU Meixin, CHEN Ming. Dimension reduction and multivariate analysis of variance for drivers' forward collision avoidance behavior characteristics [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(12): 1858-1866.
- [6] 吴斌, 朱西产, 沈剑平. 基于自然驾驶数据的驾驶员紧急制动行为特征 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 1514-1519, 1535.
WU Bin, ZHU Xichan, SHEN Jianping. Driver emergency braking behavior based on naturalistic driving data [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(11): 1514-1519, 1535.
- [7] 李霖, 贺锦鹏, 刘卫国, 等. 基于驾驶员紧急制动行为特征的危险估计算法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 109-114.
LI Lin, HE Jinpeng, LIU Weiguo, et al. Threat assessment algorithm based on characteristics of driver emergency braking behavior [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(1): 109-114.
- [8] 刘瑞, 贺经纬, 朱西产, 等. 基于自然驾驶数据的跟车场景潜在危险估计模型 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 788-795.
LIU Rui, HE Jingwei, ZHU Xichan, et al. Potential risk assessment model in car following based on naturalistic driving data [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 788-795.
- [9] 张驰, 孟良, 汪双杰, 等. 高速公路曲线路段小客车制动行为侧滑风险仿真分析 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 134-142.
ZHANG Chi, MENG Liang, WANG Shuangjie, et al. Sideslip risk simulation analysis of passenger car braking behavior on expressway curved sections [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 134-142.
- [10] 徐进, 汪旭, 王灿, 等. 山区公路纵坡段驾驶人脚操纵特征及驾驶负荷 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(1): 91-100.
XU Jin, WANG Xu, WANG Can, et al. Foot manoeuvres and workload of driver on mountainous roads with longitudinal slopes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 91-100.
- [11] BLOOK H. The flash temperature concept [J]. Wear, 1963, 6(6): 483-494.
- [12] 苏波, 方守恩, 王俊骅. 基于大货车制动性能的山区高速公路坡度坡长限制研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 287-289, 297.
SU Bo, FANG Shouen, WANG Junhua. Research on longitudinal slope and slope length limit of mountain-expressway based on heavy vehicles' braking ability [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2009, 28(2): 287-289, 297.
- [13] OLESIAK Z, PYRYEV Y, YEVTUSHENKO A. Determination of temperature and wear during braking [J]. Wear, 1997, 210(1/2): 120-126.
- [14] MOOMEN M, KSAIBATI K. Updating the grade severity rating system (GSRS) for wyoming mountain passes: a description of tests and results [J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2020, 13(1): 71-85.
- [15] 杜博英, 方守恩, 迟爽, 等. 货车制动在公路长大下坡安全研究中的应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4): 656-659.
DU Bo-ying, FANG Shou-en, CHI Shuang, et al. Using of truck braking in security research of long and steep downgrade on highway [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(4): 656-659.
- [16] 贾伟. 制动器温升与山区道路参数及车辆工况关系研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [17] 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 [J]. Journal of south China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(10): 139-150.
- [18] 潘兵宏, 牛肖, 白浩晨, 等. 高速公路连续下坡路段货车制动毂温升模型修正研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38(9): 85-91.
PAN Binhong, NIU Xiao, BAI Haochen, et al. Study on temperature rise model of truck brake hubs on continuous downhill section of expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(9): 85-91.
- [19] BEN-AKIVA M, HIRSH M, PRASHKER J. Probabilistic and economic factors in highway geometric design [J]. Transportation Science, 1985, 19(1): 38-57.
- [20] 杨晨, 程建川. 基于可靠度的道路不设缓和曲线最小半径的计算 [J]. 公路交通科技, 2013, 30(7): 7-11.
YANG Chen, CHENG Jianchuan. Calculation of minimum circular radius of road without transition curve based on reliability [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(7): 7-11.
- [21] 秦玉秀. 基于可靠性的道路行车视距分析和线形设计研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [22] 张航, 涂智佳, 田晟, 等. 山区高速公路爬坡车道长度可靠性设计 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(3): 495-500.
ZHANG Hang, TU Zhijia, TIAN Sheng, et al. Reliability design of climbing lane length of expressway in mountainous area [J]. Journal of Wuhan University

- of Technology (Transportation Science & Engineering), 2022, 46(3): 495-500.
- [23] 王路, 程建川. 基于可靠度的高速公路准临界坡长[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 181-187.
- WANG Lu, CHENG Jianchuan. Pre-critical grade length of expressway based on reliability [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(1): 181-187.
- [24] 刘斌, 李刚, 黄春富, 等. 基于可靠度的地下互通立交匝道坡度指标研究 [J]. 公路, 2022, 67(10): 9-17.
- LIU Bin, LI Gang, HUANG Chunfu, et al. Research on the slope index of underground interchange ramp based on reliability [J]. Highway, 2022, 67(10): 9-17.
- [25] 工程结构可靠性设计统一标准: JT G2120—2020 [S].

Research on Average Longitudinal Slope Length of Expressway Based on Braking Behavior

ZHANG Chi¹ GUO Tingyu¹ HU Ruilai² GAO Yanyang¹ ZHOU Yuming¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shanxi, China; 2. Broadvision Engineering Consultants Co., Ltd., Kunming 650041, Yunnan, China)

Abstract: Excessive temperature of the truck brake hub is a primary factor leading to brake failure. To enhance the safety of trucks traveling on continuous downhill sections, this study refined the average longitudinal slope design parameters and investigated the correlation between driver braking behavior and the temperature rise characteristics of truck brake hubs. Based on driver braking behavior, it proposed a reliability design method for longitudinal slope length. Firstly, a continuous downhill section of an expressway in the western mountainous area was selected for real vehicle test, and the road longitudinal slope parameters and driver braking behavior data were collected. Secondly, according to the measured data, the evaluation indexes were proposed: displacement intensity coefficient and brake hub temperature gradient. This study investigated the relationship between displacement intensity coefficient and road profile, both longitudinal and transverse, as well as the relationship between displacement intensity coefficient and brake hub temperature gradient through regression analysis. Finally, a reliability model was constructed based on the driver's braking behavior and critical temperature. Using the Monte Carlo simulation, critical slope lengths corresponding to different average longitudinal slopes on continuous downhill sections were determined and compared with the specification. The results indicated that there is a weak correlation between the radius of the circular curve and the displacement intensity coefficient, while there is a significant positively correlation between the longitudinal slope gradient and the displacement intensity coefficient, and the goodness of fit r^2 is 0.95. When the longitudinal slope gradient is greater than 2%, the braking measures taken by drivers are mostly sustained braking, which is more different from the braking behavior of drivers mostly taking point braking when the longitudinal slope gradient is less than 2%. The displacement intensity coefficient and the temperature gradient of the braking hub are significantly positively correlated with the goodness-of-fit r^2 is 0.845. When the proportion of the driver braking for 85%, the braking behavior of the driver at this time with the specification of defining the conditions of the slope length is basically the same. When the reliability is 0.95, the average longitudinal slope is 2.1%~3.0%, and the critical value of the continuous slope length is 14.95~30.12 km. The given reference values take into account the randomness in the real driving environment, and provide a basis for the design of the slope length with an average slope of less than 2.5%.

Key words: road engineering; braking behavior; displacement strength coefficient; reliability; critical slope length