

低等级公路连续下坡路段货车制动行为与制动毂温升模型研究

张驰¹ 金宇铮¹ 聂渝涵² 国廷玉¹ 韦涤斌¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安710064; 2. 长安大学运输工程学院, 陕西西安710064)

摘要: 我国低等级公路里程基数大, 且载重货车制动失效事故频发。为更加深入地研究低等级公路连续下坡路段货车驾驶员的制动行为, 该文基于低等级公路六轴铰接式列车的长下坡实测数据, 探明复杂平纵组合下坡路段的驾驶员制动时机, 分析并量化了低等级公路连续下坡路段货车驾驶员的制动行为特征, 并在TruckSim仿真软件中建立了Matlab/Simulink驾驶员行为联合仿真模型, 对比验证了模型的可靠性。结果表明: 在平曲线路段, 驾驶员受曲线影响, 会在直线段末端与曲线开端路段产生相对高强度的制动行为; 坡度2%~9%的直坡段上, 驾驶员的制动幅度与坡度呈正相关; 将曲线根据半径大小划分为急弯、中弯、缓弯, 急弯入弯前的制动踏板平均行程达220mm, 而中弯和缓弯下的制动踏板平均行程无明显差异, 制动踏板平均行程分别达176mm和174mm。相较于以往研究中未考虑平面线形因素的制动毂温升预测模型, 该文建立的仿真模型具有更高的制动毂温度预测精度, 能够为低等级公路的交通安全保障提供理论基础。

关键词: 道路工程; 低等级公路; 制动行为; 制动毂温度; 温升模型; TruckSim; 联合仿真

中图分类号: U491.2*55

文章编号: 1000-565X(2026)04-0119-13

低等级公路为三、四级公路以及未达到技术标准的“等外公路”, 设计速度一般为20~40 km/h。尽管20世纪80年代以来我国高速公路的建设突飞猛进, 里程数有了巨大的增长, 但低等级公路仍拥有庞大的绝对里程数, 并且其里程数仍占等级公路总里程的相当一部分比重。

由于低等级公路较低的设计标准, 加之山区复杂的地形地质条件, 其道路线形往往曲折蜿蜒, 小

半径平曲线与回头曲线的占比很大^[1-2]。另一方面, 由于山区地势险峻, 受工程造价与社会经济条件的制约, 低等级公路常采用较大纵坡展线等手段来克服大高差, 形成了较多的连续下坡路段^[3]。在这样的线形特征下, 货车在低等级公路上行驶时往往面临着更为严峻的制动安全问题。实际案例显示, 因制动失效而导致的货车侧翻、追尾以及冲出车道的事故屡有发生, 给沿线居民和过往车辆造成了严重

收稿日期: 2025-04-15

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); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(自然科学类)(300102215206)

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2020YFC1512005), the Natural Science Basic Research Project of Shaanxi Province (2023-JC-YB-391) and Shanxi Provincial Key Research and Development Plan (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

的人身和财产损失。制动失灵主要是驾驶员制动行为引起的制动性能热衰退导致^[4-5],因此,深入研究低等级公路复杂平纵组合连续下坡路段的驾驶员制动行为,从制动毂温度预测层面揭示货运安全隐患,对于降低交通事故率、保障道路运输安全显得尤为重要。

表1列出了我国低等级公路货车制动失效事故的一些示例,其来源为各地交通部门的通报信息。低等级公路的主要线形特征为密集平曲线与连续下坡,目前已有不少针对这两种场景的驾驶员行为研究,相关研究成果如表2所示。文献[7]以运行速度为驾驶行为表征指标,建立了长下坡路段大货车运行速度与纵坡的关系模型,但其适用场景仅为设计速度60km/h的山区高速公路。文献[8]在山区低等级公路上开展了小车实车实验,采集踏板力数据并分析了踏板力与纵坡坡度的相关性,但分析过程中仅考虑了每个纵坡单元的踏板力最大值。文献[9]针对低等级公路急弯路段上车辆的纵向加速度特性展开研究,通过分析实车行驶数据发现急弯段车辆纵向减速度最大值出现在缓和曲线上,但该研究仅针对小客车,未涉及其他车型。文献[10]对小车驶入小半径平曲线路段时的速度特征进行了分析,发现入弯前驾驶员会进行减速行为,且入弯前速度越快减速行为的幅度就越大,但该研究仅进行了定性分析,未涉及减速行为的发生位置和量化表征。文献[11]在下坡路段开展实车实验,以制动减速度和坡度为变量建立了驾驶员负荷模型,发现下坡坡度越大驾驶员产生不适感的可能性越大。

表1 低等级公路货车制动失效事故示例

Table 1 Examples of truck brake failure accidents on low-class highways

序号	事故地点	事故致因
1	黔东南州天柱县	途经长下坡弯道时制动失灵
2	漳平县三重岭路段	长时间下坡导致制动疲软
3	阳新县绵羊寨山路	长时间制动导致制动失灵
4	黔西南州普安县	货车速度过快制动失灵
5	武平县S221线下坡	车辆突然制动失灵
6	平桥镇乌岩村	频繁使用制动致使制动失灵
7	十堰市郧西县	制动系统故障紧急制动无效
8	林州市石板岩镇	制动失灵发生侧翻

对于制动毂温升特性,国内外已有一定研究基础。苏波等^[14]基于GSRs预测模型对制动毂温度进行修正,推导出了制动毂温度与坡度、坡长、车重、车速的关系。Blok^[15]研究了制动器摩擦热与制动性能的关系。张弛等^[16-17]基于理论分析法构建了六轴铰接式列车的制动毂温升模型,并通过实车实验对模型进行了修正。潘兵宏等^[18]基于行车动力学和热力学分析,在三轴重载货车制动毂温升模型基础上将车型修正为六轴铰接列车,提高了预测精度。杨宏志等^[19]通过现场测温与回归分析,以坡长、坡度、速度与质量为变量建立了货车制动毂温度预测模型。

目前,对弯道与下坡路段驾驶员行为的研究维度往往较为单一,缺少将平纵工况进行耦合的研究,且现有研究的车型大多为小客车或小型货车,而重载货车的质量、体积及制动系统等与小型车辆存在较大差别,小型乘用车的驾驶员行为无法真实

表2 驾驶员行为的相关研究成果

Table 2 Research findings related to driver behaviors

来源	主要相关研究内容	研究指标	数据来源	针对道路	针对线形指标	针对车型
文献[6]	通过方向盘数据分析驾驶员行为特征	方向盘数据	仿真实验	山区、低等级公路	平面指标	小型乘用车
文献[7]	建立运行速度与纵坡的关系模型	速度	实车实验	山区、高速公路、连续下坡路段	纵坡指标	普通货车
文献[8]	分析踏板力与纵坡坡度的相关性	踏板力	实车实验	山区、低等级公路	纵坡指标	小型乘用车
文献[9]	研究急弯路段车辆的纵向加速度特性	加速度	实车实验	低等级公路、急弯路段	平面指标	小型乘用车
文献[10]	分析小车驶入小半径平曲线路段时的速度特征	速度	实车实验	小半径平曲线路段	平面指标	小型乘用车
文献[11]	以制动减速度和坡度为变量建立驾驶员负荷模型	减速度	实车实验	山区公路、连续下坡路段	纵坡指标	小型乘用车
文献[12]	研究螺旋隧道不同平纵组合下的驾驶员行为特征	速度	驾驶模拟	螺旋隧道路段	平、纵指标	小型乘用车
文献[13]	分析道路几何特征与驾驶员速度选择的关系	速度	实车实验	山区公路、急弯路段	平面指标	小型乘用车
本研究	分析制动时机,量化制动幅度与平、纵指标的关系,建立驾驶员行为模型	踏板行为	实车实验、仿真实验	山区、低等级公路、连续下坡路段	平、纵指标	半挂牵引车

反映重载货车的驾驶员行为。此外，表征驾驶员行为的指标大多以速度类指标为主，以踏板行为作为指标的研究往往缺少深入的作用机理分析及量化表征。同时，低等级公路上平曲线与长下坡共同存在，对驾驶员行为具有耦合影响，单独研究其中一个因素可能存在片面性，而以往的制动毂温升模型对平面因素的考量不足，对于低等级山区公路的适用性欠佳。鉴于此，文中以六轴铰接式列车为研究车型，基于在低等级公路上进行的货车连续下坡实车实验，获取表征驾驶员行为与车辆运行状态的一系列数据，对驾驶员制动行为的时机与幅度进行分析与量化，探究山区低等级公路复杂平纵组合下货车驾驶员的自然制动行为特征，并在 TruckSim 仿真软件中构建驾驶员行为模型，通过对对比验证模型预测制动毂温度时的可靠性，从制动毂温度预测的角度分析低等级公路连续下坡的安全性，以期降低货车制动失灵事故的发生概率，为路线设计及运营单位安全管控提供参考。

1 实车实验方案设计

1.1 实验地点

实车实验选取的路段为国道210线西安至石泉方向的洋峪口到大岭垭口路段。国道210线宁陕段是西安—安康公路的关键路段，在20世纪70年代按山区三级公路标准建设，在平面线形上呈密集的小半径平曲线与连续长、大纵坡的组合，具有十分典型的低等级公路特征，具体如图1所示。

本次实车实验以国道210线的大岭垭口为起点，洋峪口为终点。大岭垭口处于63.9 km里程桩处，高程为2030 m；洋峪口处于31.0 km里程桩处，高程为500 m，二者高差为1530 m。研究中选取数据进行分析的路段平面长度为24 km，其中包含了94段半径范围为35~429 m、纵坡范围为2.2%~8.3%的平曲线路段，如表3所示。

在驾驶员的选择上，选取了具有驾驶经验并且熟悉当地复杂路况的货车司机作为实车实验的驾驶员。

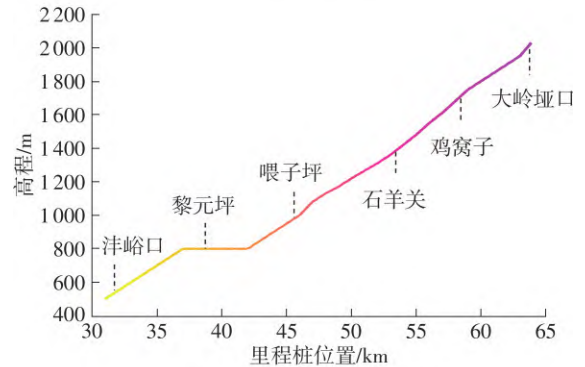
1.2 实验设备

实验车辆为汕德卡品牌的六轴ZZ4256V324HE1B型重型半挂牵引车，该车型为目前货运市场的主流车型，具有较好的代表性，主要性能参数如表4所示。

如图2，在实验车辆上装载了5个模块的设备。



(a) 国道210线卫星图



(b) 国道210线纵断面线形

图1 实验公路的平纵线形

Fig. 1 Horizontal and vertical alignment of experimental highway

表3 平曲线数据统计

Table 3 Statistics of horizontal curves

序号	下坡坡度范围/%	半径/m		路段数
		最小	最大	
1	2~3	37.10	304.1	13
2	3~4	34.80	300.1	14
3	4~5	55.30	117.5	24
4	5~6	35.00	175.3	12
5	6~7	29.20	247.6	15
6	7~8	36.96	123.4	13
7	8~9	41.80	124.2	3

表4 车辆基本参数

Table 4 Basic vehicle parameters

整车参数	型号
车型	ZZ4256V324HE1B
发动机型号	MC13.48-50
整车整备质量/kg	8800
最大允许牵引质量/kg	40000
最大功率/kW	353
最大扭矩/(N·m)	2300
主减速比	3.36

(1) 制动踏板行程收集模块

该模块主要采集驾驶员的制动数据，记录制动踏板动作及开度，其传感器安装在大货车脚踏板位置，有线数据传输线路与数据采集通道连接，输出制动响应信号。

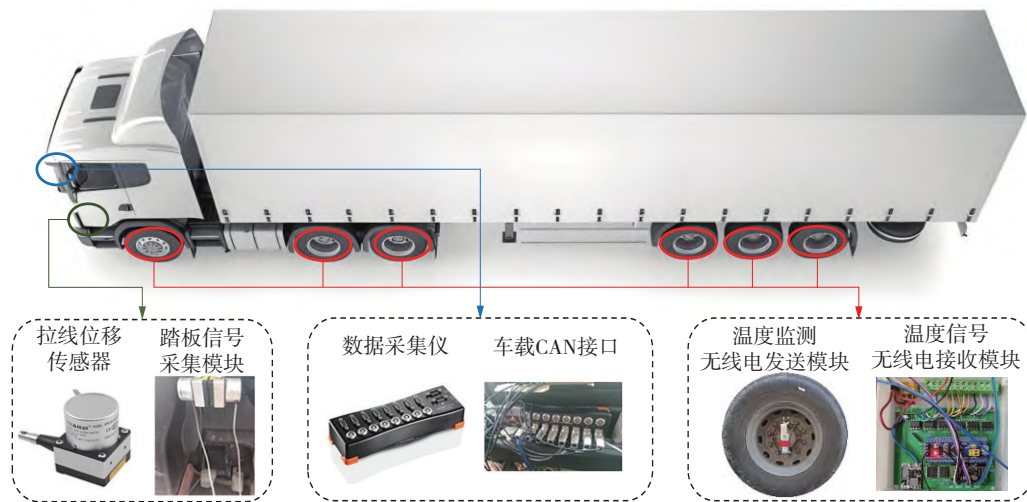


图2 车辆设备安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vehicle equipment installation

(2) 加速踏板行程采集模块

该模块用于记录加速踏板行程开度。

(3) 制动毂温度采集模块

该模块主要采集货车制动毂温度数据,由测温探头(热电偶)和数据记录仪组成,通过热电偶对实验车第1、2、3、4、5、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数据传输。

(4) 车辆CAN采集模块

该模块通过车载自动诊断系统(OBD)读取车辆CAN数据,包括车速、发动机转速等。

(5) DEWESOFT 数据采集仪

该模块用于记录来自踏板行程传感器、制动毂温度传感器的数据以及车辆的CAN数据。

1.3 实验流程

实车实验的具体流程如下。

(1) 实验路段勘察

对实验路段进行勘察,熟悉路况,包括核查隧道、服务区、收费站、避险车道等构造物的相对位置。

(2) 仪器设备安装与检查

实验开始前,对仪器设备进行安装,检查各设备电源、通信情况是否正常,用电脑记录相关数据。

(3) 下坡行驶

车辆由大岭垭口向泮峪口方向下坡行驶,下坡过程中仅使用主制动器和发动机辅助制动(各轴无淋水,不使用液力缓速器)控制车速。车辆达到速度下限时松开制动踏板或者关闭辅助制动系统,车辆达到速度上限时优先采用发动机辅助制动,辅助

制动无法控制行车速度时,使用行车制动器。

实验时,控制速度范围在15~25km/h之间,保持相对匀速行驶。车辆到达该段实验终点泮峪口后,对相关资料进行备份,之后掉头往大岭垭口方向行驶。车辆返回该段实验起点大岭垭口后,检查车辆性能状况及实验设备的运行情况,开展后续实验。车辆行驶过程中,全程记录行驶速度、行驶距离、制动器作用时间及次数、挡位变化、制动毂温度等动态数据。

1.4 实验数据采集

为进一步探明驾驶员在连续长大下坡路段的制动行为特点,以及平纵组合对驾驶员制动行为的耦合影响,采集以下指标数据进行分析。

(1) 方向盘转角($^{\circ}$)

在TruckSim中还原实车实验道路的平纵线形后,进行全路段仿真实验并输出方向盘转角数据,然后将桩号与实车实验数据进行匹配。在仿真软件中,控制信号输入在方向盘上,方向盘转向带动转向轴进行车轮的转向,其转向系统的各个组成要素如图3所示。

在直线路段,方向盘转角稳定于 0° 左右,随着车辆逐渐驶入平曲线,其数值不断增加至一峰值;当车辆开始驶出平曲线后,其数值减小至 0° 。

(2) 制动踏板行程(mm)

制动踏板行程表征制动踏板的动作及开度,通过安装在货车脚踏板位置的制动踏板行程传感器收集模块采集得到。当驾驶员未踩下踏板时,制动踏板行程保持在一个初始值,随着驾驶员施加踏板力的增大,行程数值不断增大。

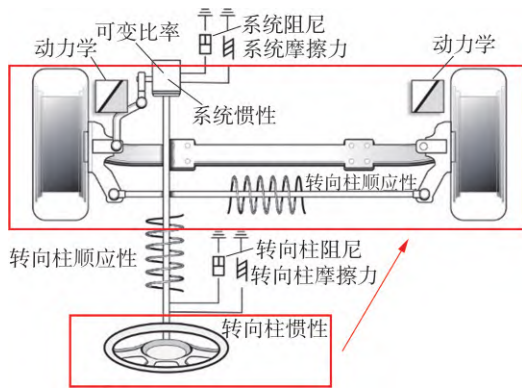


图3 转向系统的组成

Fig. 3 Steering system principles

(3) 制动毂温度(°C)

制动毂温度由温度监测无线电发送模块和温度监测无线电接收模块进行采集。

2 驾驶员制动行为分析

2.1 数据处理与制动时机分析

为防止因仪器采集问题得到的异常数据值影响分析结果，利用基于四分位距的异常值检测(IQR)方法检测并去除异常值，然后利用 Savitzky-Golay 滤波方法，设滑动窗口大小为 11、多项式数为 2 以去除数据噪声，同时去除数据中车辆处于停车状态时的数据。

为进一步研究制动行为的强度变化规律，以及不同强度制动行为的分布规律，引入制动踏板行程强度系数作为表征制动强度的指标，并定义制动踏板行程位置分布系数作为表征制动位置的指标。制动踏板行程强度系数能够反映持续性制动行为的变化特征^[20]。各数据记录点的行程强度系数可由式(1)得到：

$$D_{ei} = \frac{D_i}{D_{max}} \quad (1)$$

式中： D_{ei} 为某一时刻的制动踏板行程强度系数，无量纲； D_i 为某一时刻的制动踏板位置，mm； D_{max} 为连续下坡路段中制动踏板最大行程，mm。

处理后的制动踏板行程及其强度系数如图4所示。

实车实验过程中，车辆在直线、曲线上不断交替行驶。根据现有研究，弯道对于驾驶员的制动影响可能在进入弯道前的直线路段上提前体现，具体表现为在进入弯道前提前进行减速^[21]。从图4数据可以发现，实际行驶过程中，司机的踏板操作变化幅度很大，踩下、松开踏板的操作很频繁，且受制

于设备的采样频率，制动强度的波动很大，存在骤降骤升的情况，很难发掘出其内在规律。

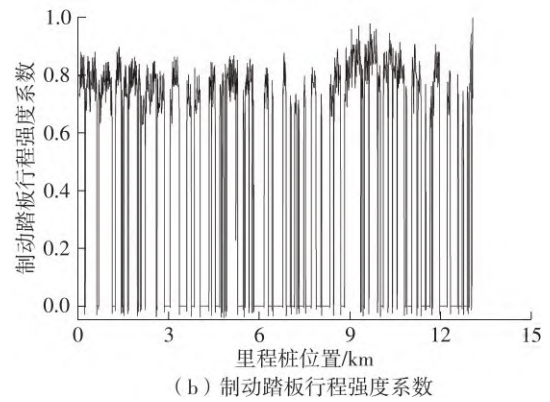
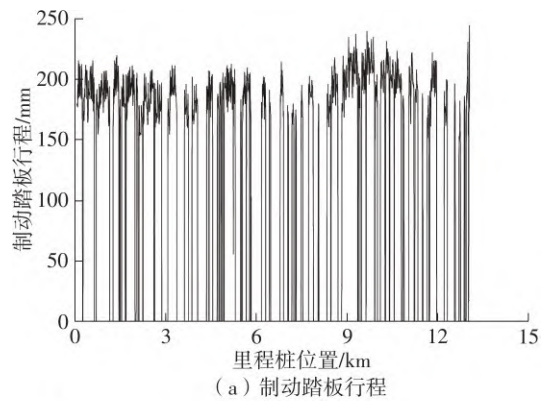


图4 滤波后的制动踏板行程数据

Fig. 4 Filtered displacement data of brake pedal

为进一步分析不同强度制动行为的出现位置，本研究提出位置分布系数，将直曲相接路段划分为若干节点与段落(如图5所示)，而后利用高斯混合模型分别对直线段与曲线段的制动踏板行程强度系数进行聚类。

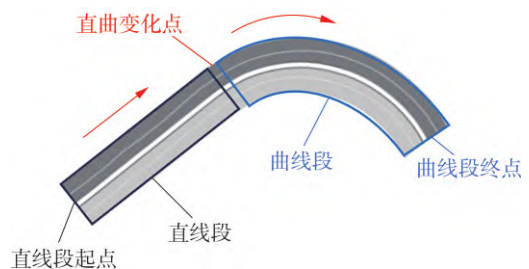


图5 直曲路段划分

Fig. 5 Classification of straight and curved road segments

直线段和曲线段的位置分布系数计算式分别如式(2)和式(3)所示。

$$L_{si} = \frac{L_i}{L_s} \quad (2)$$

式中： L_{si} 为直线段上*i*点的位置分布系数，无量纲； L_i 为直线段上*i*点距直曲变化点的距离，m； L_s 为直

线段起点距直曲变化点的距离, m_0 。

$$C_{si} = \frac{C_i}{C_s} \quad (3)$$

式中: C_{si} 为曲线段上 i 点的位置分布系数, 无量纲; C_i 为曲线段上 i 点距直曲变化点的距离, m ; C_s 为曲线段起点距直曲变化点的距离, m 。

利用高斯混合模型分别对直线段和曲线段的制动踏板行程强度系数进行聚类, 得到4类聚类对象, 强度等级从强到弱依次为4、3、2、1。统计不同制动强度的聚类对象, 发现4、3两类最强的制动强度等级占比达75%以上, 考虑到出现这一现象的原因可能是实验路段的纵坡较大或是受平曲线影响导致制动行为加剧, 因此通过核密度图进一步分析4、3两类制动强度等级的位置分布情况, 如图6所示。

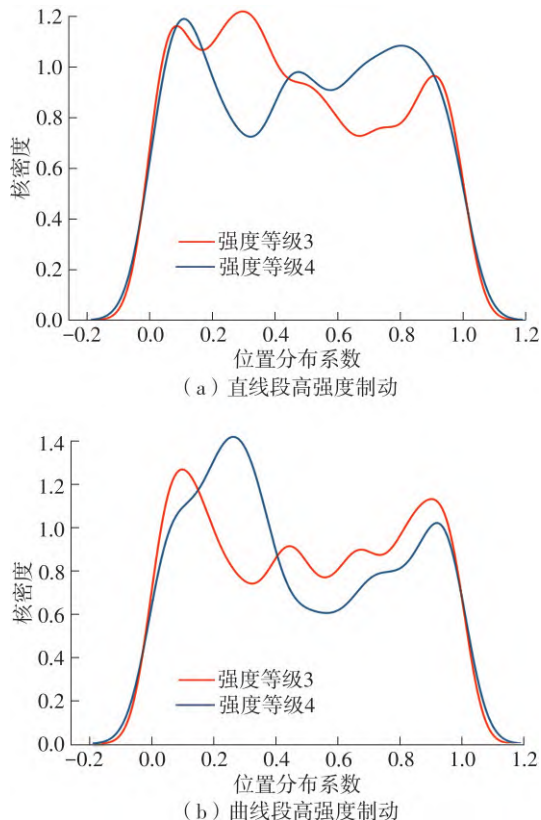


图6 高强度制动的核密度分布

Fig. 6 Kernel density distribution of high-intensity braking events

对直线段的制动强度聚类分布进行分析, 可以发现, 其核密度分布曲线在两端出现了明显的峰值, 这意味着在接近弯道以及驶出弯道时, 高强度制动行为有着较为密集的分布, 表明驾驶员在入弯前与出弯后进行了相对大幅度的减速操作。对曲线段的制动强度聚类结果进行分析, 发现其核密度分布的两端, 尤其是靠近0的一端出现了明

显的峰值, 说明接近弯道以及驶出弯道时的高强度制动行为较多, 在弯道中则保持相对较弱的制动行为。

通过聚类以及位置分布系数分析, 确定了驾驶员在直线段与曲线段上的制动行为分布特征。根据结果可以发现, 高强度的制动行为总是出现在直线段与曲线段的衔接处附近, 即需要大幅度操作方向盘的路段。经统计, 入弯前驾驶员会于直线段最后32%路段、曲线段开头34%的路段进行相对高强度的制动行为。

除去直线段制动区间内包含的转动区间, 得到直线段纯制动区间。对纯制动区间的长度进行中位数置信区间统计检验, 得中位数95%置信区间为 $[9.89, 12.72]$ m ; 对纯制动区间的长度进行中位数置信区间统计检验, 得驾驶员提前制动的距离大约为9~13 m 。

2.2 制动幅度分析

确定了高强度制动的时机后, 进一步分析高强度制动幅度与一般强度制动幅度。在低等级公路中, 由于平纵组合情况复杂, 驾驶员需频繁地进行制动, 结合前述分析, 其制动行为可以分为两类: ①连续下坡过程中, 由于重力分力导致车辆速度过快而进行的控速制动; ②因平曲线导致的入弯制动及出弯制动。对制动幅度的分析将分以上两种情况进行。

2.2.1 控速制动分析

首先对直坡路段的控速制动幅度进行分析。由于实车实验公路的平曲线十分密集, 直接对直线段的制动幅度进行分析, 会受到其前后相邻的平曲线影响而造成偏差。因此, 为了进一步消除平曲线的影响, 提取相对较长的直线路段单元共17个, 各单元长度为105 m 至284 m 不等, 并去除这些路段首尾的高强度制动行为区间, 以更好地观察驾驶员在直坡路段上的速度控制行为特征。

将制动踏板行程减去初始值, 得到制动踏板行程绝对值。由于下坡过程中的制动模式以持续制动为主, 因此将制动踏板平均行程作为表征指标, 计算各坡度下直坡段的制动踏板平均行程, 并以坡度为自变量、制动踏板平均行程为因变量进行拟合, 得到图7所示拟合曲线。

最后, 得到制动踏板平均行程(y)与坡度(x)间拟合良好的函数如下:

$$y = 24.581 + 71.702x - 11.728x^2 + 0.717x^3, R^2 = 0.914.$$

仿真建模过程中, 踏板行程无法直接作为制动

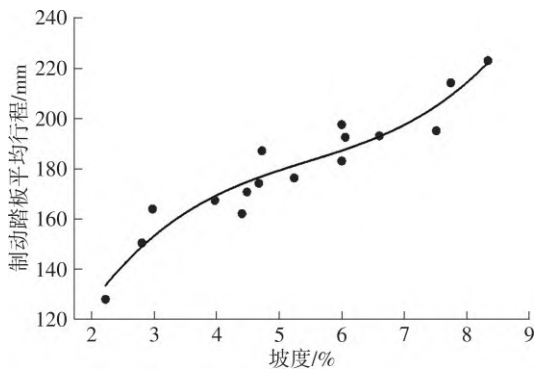


图7 坡度-制动踏板平均行程拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of slope gradient versus brake pedal mean displacement

力的输入量，因此需要进行踏板行程与踏板力间的转换。

在制动系统中，驾驶员踩踏制动踏板后，踏板力通过杠杆比被放大，转化为对主缸活塞的作用力^[22]，如式(4)所示：

$$F_{piston} = F \times I \tag{4}$$

式中： F_{piston} 为作用在主缸活塞上的力，N； F 为踏板力，N； I 为杠杆比。假设当踏板被踩下时，初始阶段需要克服系统的间隙和弹性变形，之后压力随着踩踏深度的增加而线性增大^[23]。忽略系统的非线性或弹性变形，将这一过程进行简化。此时，主缸压力为其承受的作用力与主缸活塞的有效面积之比，如式(5)所示；主缸活塞的行程距离与踏板行程和杠杆比相关，如式(6)所示。

$$p = F_{piston} / A_{mc} \tag{5}$$

$$x = dI \tag{6}$$

式中： p 为主缸压力，N； A_{mc} 为主缸活塞有效面积， m^2 ； x 为活塞行程，mm； d 为制动踏板行程，mm。

最后，如式(7)和式(8)所示，考虑主缸活塞的体积变化与系统的柔量影响，

$$\Delta V = A_{mc} \cdot x \tag{7}$$

$$p = \Delta V / c \tag{8}$$

式中： ΔV 为主缸活塞的体积变化， m^3 ； c 为制动系统的等效柔量， m^3/Pa 。

将式(4)–(8)进行联立，建立简化后的踏板力与踏板行程之间的计算关系，得

$$F = \frac{A_{mc}^2}{I^2 \cdot c} \cdot d \tag{9}$$

将式(9)与坡度-踏板平均行程拟合函数 $D(x)$ 进行联立，得到坡度-踏板力关系如下：

$$F = \frac{A_{mc}^2 \cdot D(x)}{I^2 \cdot c} \tag{10}$$

2.2.2 弯道制动分析

对入弯及出弯制动行为进行分析，根据2.1节中对由平曲线引起的高强度制动位置区间的计算，提取直线段位置分布系数为0.00~0.32、0.77~1.00区间内的数据，以及曲线段位置分布系数为0.00~0.34、0.82~1.00区间内的数据，并将直-圆相接的数据合并为入弯区段，将圆-直相接的数据合并为出弯区段。

为分析不同半径平曲线路段上制动表现的差异，将提取出的曲线段数据分为急弯、中弯、缓弯，其对应的半径(R)范围分别为 $R < 60 m$ 、 $60 m \leq R < 120 m$ 、 $120 m \leq R \leq 430 m$ 。将各个路段在所述入弯区间中的制动踏板行程数据进行平均值计算，并分3组进行Kruskal-Wallis检验，得到拒绝原假设的结果后进行Dunn事后检验，结果如表5所示。

表5 Kruskal-Wallis 及Dunn事后检验结果

Table 5 Results of Kruskal-Wallis test and Dunn test

Kruskal-Wallis 检验			Dunn 事后检验		
H	P	原假设	组别	P	显著性
17.512	0.008	拒绝	急弯-中弯	0.001047	显著
			急弯-缓弯	0.000682	显著
			中弯-缓弯	0.976000	不显著

根据Kruskal-Wallis检验及Dunn事后检验结果，急弯、中弯、缓弯度中，至少有2组的制动强度分布不同，经检验发现，急弯与中弯、缓弯的制动强度分布存在显著差异，中弯与缓弯的制动强度分布无明显差异。将3组数据进行对比，发现急弯的平均制动强度明显高于中弯与缓弯，而中弯与缓弯的平均制动强度相近，如图8所示。

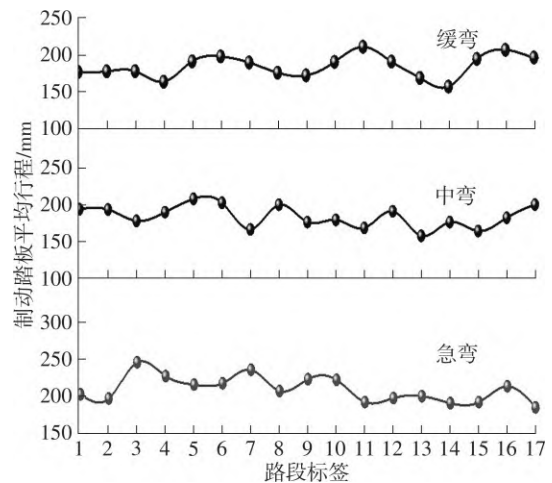


图8 平均入弯制动强度对比

Fig. 8 Comparison of average braking intensity during corner entry

综上,通过分析驾驶员制动强度可以发现:

1)在直线路段上,随着坡度不断增加,制动幅度的增长斜率表现出先下降后上升的趋势,当坡度从2%逐渐增加到8%时,制动踏板平均行程由123 mm增长至214 mm;

2)在忽略系统非线性或弹性变形的假设下,对踏板系统内部受力进行分析,将坡度-踏板行程函数转换为坡度-踏板力函数,可为进一步在仿真软件中进行驾驶员行为建模创造条件;

3)在平曲线路段上,当 $R < 60$ m时,制动踏板

平均行程显著高于 $60 \text{ m} \leq R < 120 \text{ m}$ 和 $R \geq 120 \text{ m}$ 时的行程,而 $60 \text{ m} \leq R < 120 \text{ m}$ 和 $120 \text{ m} \leq R \leq 430 \text{ m}$ 时的制动踏板平均行程无明显差异;

4)当 $R < 60$ m时,入弯前的制动踏板平均行程达220 mm, $60 \text{ m} \leq R < 120 \text{ m}$ 时达176 mm, $120 \text{ m} \leq R \leq 430 \text{ m}$ 时则达174 mm。

2.3 制动毂温升特性分析

根据坡度划分实车实验路段,并通过坡长、起终点制动毂温度计算不同坡度下的制动毂温升梯度,以揭示坡度对制动毂温升特性的影响,结果表6。

表6 不同坡度下的制动毂温度梯度

Table 6 Temperature gradient of brake drums under different slope gradients

路段序号	坡度/%	坡长/m	起点温度/°C	终点温度/°C	温度梯度/(°C·km ⁻¹)	直线比例/%
1	2.22	356.5	101.3	103.9	4.51	22.0
2	2.57	66.8	110.4	109.9	2.40	71.6
3	2.72	93.2	103.0	102.8	3.92	75.3
4	2.80	814.9	103.7	103.4	6.96	32.7
5	2.97	427.9	111.8	110.4	7.21	57.0
6	3.97	539.2	110.7	112.0	9.88	43.6
7	4.09	446.3	102.8	101.7	15.57	12.8
8	4.29	489.2	97.9	100.4	17.55	10.9
9	4.40	1079.8	107.6	110.7	13.56	39.6
10	4.48	429.7	106.5	107.6	10.81	52.9
11	4.67	529.6	99.1	100.7	12.39	67.8
12	4.72	416.6	101.1	100.0	14.13	68.4
13	4.91	459.4	104.3	106.5	20.17	37.3
14	5.24	411.5	102.1	103.2	21.88	61.9
15	5.28	310.9	104.1	103.8	24.78	37.4
16	5.60	235.6	103.2	103.6	22.96	22.2
17	5.63	177.7	103.4	103.3	27.33	6.6
18	6.00	400.0	93.2	95.6	20.86	67.8
19	6.05	590.2	100.5	99.4	25.35	35.0
20	6.60	424.3	95.6	97.9	24.18	55.0
21	7.03	518.8	99.7	99.1	27.87	48.5
22	7.13	362.8	101.7	100.5	37.84	17.9
23	7.51	405.1	93.8	93.2	30.73	46.0
24	7.74	429.7	100.7	104.3	26.87	58.1
25	7.74	419.4	100.7	104.3	35.30	22.0
26	8.33	296.8	99.8	99.7	46.74	50.5

由表6数据可以发现:制动毂的温度梯度在低坡度时较低,在小于4%的坡道上,温度梯度低于10 °C/km;陡坡路段温度梯度较高,在坡度为8.33%时达到峰值46.74 °C/km。总体上,温度梯度随着坡度的增大而升高,如图9所示。值得注意的是,在两段坡度相近的路段,制动毂的温度梯度受到直线比例的影响较为显著。如[3,4]、[9,10]、[14,15]、[18,19]、[24,25]等路段组合,两个路

段间的坡度相差不大,但是直线比例更小者的温度梯度更高,这进一步说明在连续下坡路段中,平曲线的存在会影响驾驶员的制动行为,平曲线的占比增加时,驾驶员的制动强度相较于在直线上行驶时更高,并且坡度越大平曲线对制动强度的影响越明显,相近坡度路段的制动毂温度梯度相差更大。

综上所述,制动毂温度梯度与坡度呈显著的正相关关系,且通过对比坡度相近路段的制动毂温度

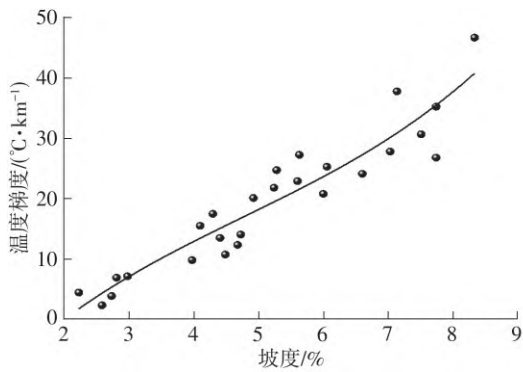


图 9 不同坡度下的制动毂温度梯度分布

Fig. 9 Distribution of brake drum temperature gradients under different slope gradients

梯度可知，直线比例也是影响制动毂温度梯度的重要因素，且两者呈负相关。

3 仿真模型的建立与验证

3.1 驾驶员行为模型的构建

根据驾驶员制动行为分析结果，在 TruckSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真平台中构建驾驶员行为联合仿真模型。

根据纵断面坡度变化，将由式(10)得到的踏板力作为输入。同时，根据车辆的方向盘转角与变化率，在转向时基于平曲线半径计算一个额外的入弯制动力，并将该入弯制动力与控速制动力进行比较，输入两者中的最大值作为控制制动力。为消除方向盘转角细微波动造成的额外制动力输入扰动，在 Simulink 中加入数字滤波器对其进行低通滤波处理，总体模型仿真界面如图 10 所示。

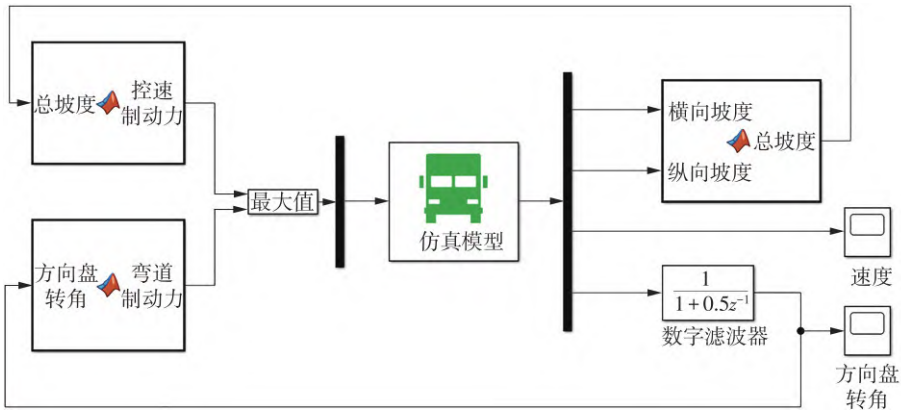


图 10 Matlab/Simulink 联合仿真界面

Fig. 10 Matlab/Simulink co-simulation interface

使用上述 Matlab/Simulink 联合仿真模型进行仿真实验，根据仿真输出数据，车辆速度基本可以维持在 15~25 km/h 的范围内，与实车实验采集所得速度波动情况相符。

3.2 模型标定

基于实车实验所用的实际车型，对仿真的车型参数，包括铰接形式、发动机功率、车重与载重、制动系统形式、挡位及减速比等，在 TruckSim 中建立六轴铰接式货车整车模型。将实车实验公路轨迹点导出并修正后，还原公路线形并在 TruckSim 中建立全段道路模型，如图 11 所示。

根据 2.3 节中对实车实验制动毂温升特性的分析，基于各坡度下的制动毂温度梯度对制动毂温升仿真模型进行标定，标定前后的参数见表 7。

将标定前后及实车实验所测得的制动毂温度进行比对，发现标定后的制动毂温度相较于标定前明显更接近实测数据，如图 12 所示。



(a) 车辆模型



(b) 道路模型

图 11 仿真建模示意图

Fig. 11 Schematic diagrams of simulation modeling

根据式(11)计算标定前后温度与实测温度的均方根误差 E_{RMS} ：

表7 标定前后参数对比

Table 7 Comparison of parameters before and after the calibration

参数名称	初始参数值	标定后参数值
制动毂质量/kg	50	80
制动毂比热容/(kJ·kg·K ⁻¹)	0.47	0.485
杠杆比	—	6.2
主缸活塞面积/m ²	—	9.5×10 ⁻⁴
系统等效柔量/(m ³ ·Pa ⁻¹)	—	1×10 ⁻¹¹
冷却系数	0.0015	0.0024

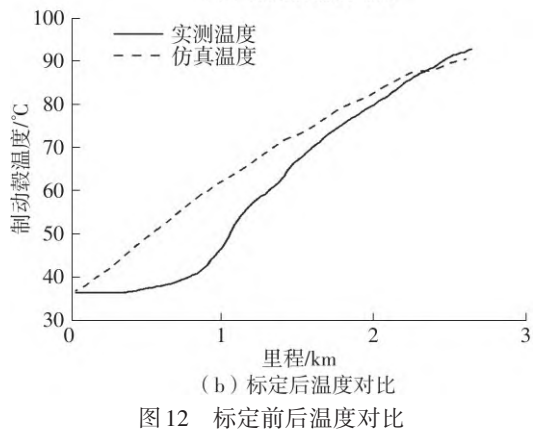
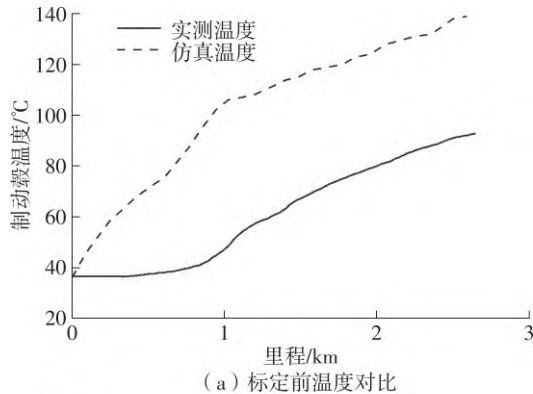


图12 标定前后温度对比

Fig. 12 Temperature comparison before and after the calibration

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (11)$$

式中, y_i 为实测数据, \hat{y}_i 为仿真数据。

计算得标定前温度的均方根误差为 43.36 °C, 标定后温度的均方根误差为 9.17 °C, 标定后的温度误差大大减小, 且处于较小的水平, 证明模型标定的效果良好。

3.3 模型对比

货车制动毂的温度变化与驾驶员的制动行为密切相关, 文中建立的仿真模型在速度方面已经能较好地还原实车实验中的表现。为进一步验证文中建立的低等级公路六轴铰接式货车下坡路段驾驶员行为模型的可靠性, 将以往研究中具代表性的制动毂温升模型与文中模型进行制动毂温度预测精度的对比。

选用了文献[16]提出的基于理论分析法构建的模型作为对比, 该模型如式(12)所示。以六轴铰接列车为主导车型, 并利用实车实验对该模型的准确性进行了验证。

$$T = \left(T_0 - \frac{0.95v(\beta F_s r_d - N_a - N_h) + T_\infty h_c A}{7.2r_t h_c A} \right) e^{\left(\frac{-h_c A^2 L}{m_d c_d v} \right)} + \frac{0.95v(\beta F_s r_d - N_a - N_h) + T_\infty h_c A}{7.2r_t h_c A} \quad (12)$$

式中: T_0 为初始温度, °C; T_∞ 为环境温度, °C; i_0 为发动机制动下的临界纵坡坡度, %; L 为坡长, m; v 为车速, m/s; F_s 为车轮所受地面制动力, N; r_d 为轮胎动力半径, m; r_t 为轮胎滚动半径, m; β 为制动力分配系数; N_a 为发动机制动所产生的制动扭矩, N·m; N_h 为轮胎迟滞力矩, N·m; F_d 为车轴所受垂直荷载, kN; h_c 为对流换热系数, 无量纲; A 为制动毂外表面面积, m²; m_d 为制动毂质量, kg; c_d 为制动毂比热容, J/(kg·K)。

输入模型对比所采用的道路线形数据后得到制动毂温度预测数据。制动毂温升模型、TruckSim 仿真模型以及实车实验的温度对比如图 13 所示。

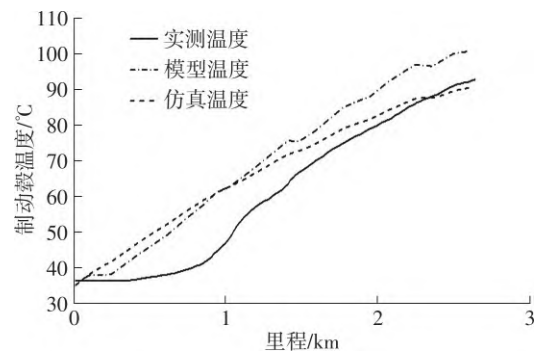


图13 温度预测结果对比

Fig. 13 Comparison of temperature prediction results

将由制动毂温升模型得到的温度预测结果与文中 TruckSim/Simulink 联合仿真模型输出的温度数据分别导入 SPSS 软件中, 与实测温度数据进行对比, 结果表明: 模型预测温度与实测温度、仿真预测温度与实测温度间的 Pearson 相关系数分别为 0.868、0.983, 均高于 0.8; 显著性分别为 0.00、0.00, 均小于 0.01; 平均偏差分别为 10.59 °C、7.12 °C, 最大偏差分别为 19.6 °C、15.8 °C。

上述结果表明, 相较于制动毂温升理论计算模型, 文中建立的仿真模型与实测数据具有更高的线性相关性, 且偏差更小, 说明仿真模型具有更高的预测精度。究其原因, 可能是因为以往研究中的制动毂温升模型针对的多是高速场景, 如 60~80 km/h

的行车场景，且未将平面因素作为变量耦合进模型中，而平曲线因素对于驾驶员的制动行为特征有着显著的影响。文中建立的仿真模型从直坡段和弯坡段分别对驾驶员的制动行为进行仿真模拟，并且对参数进行了较为准确的标定，因此对于低等级公路连续下坡场景制动毂温度预测的准确性进一步提升。

4 结语

低等级公路上，由于频繁的制动行为，重载货车制动失效而导致的交通事故频发。文中基于低等级公路长大下坡实车实验数据，对六轴铰接式列车下坡过程中的制动强度进行聚类，提出行程强度系数与位置分布系数，识别出高强度制动行为的分布区间，探明了平曲线路段驾驶员的制动时机。将驾驶员制动行为分为直坡路段的控速制动与弯坡路段的出、入弯制动，分析并量化了低等级公路连续下坡路段货车驾驶员的制动行为特征，并在TruckSim仿真软件中建立了Matlab/Simulink驾驶员行为联合仿真模型，验证了模型的可靠性，得到以下主要结论。

(1)在纵坡坡度均大于2%的连续下坡路段，驾驶员采取持续制动的行为；在平曲线路段，驾驶员受曲线影响会产生相对高强度的制动行为，具体的制动时机为直线段末端32%路段、曲线段开始34%的路段。

(2)文中从直线段的控速制动与曲线段的弯道制动两个层面进行制动幅度的分析，得到了坡度-踏板平均行程函数，量化表征了坡度为2%~9%的直坡段上驾驶员制动幅度与坡度的关系，发现坡度越大，驾驶员的制动幅度越大。

(3)制动毂温度梯度与坡度呈显著的正相关关系，且坡度相近时平曲线占比更大的路段的制动毂温度上升速度更快。

(4)急弯段的制动踏板平均行程显著高于中弯段和缓弯段，入弯前的制动踏板平均行程达220mm；而中弯和缓弯下的制动踏板平均行程无明显差异，入弯前的制动踏板平均行程分别达176和174mm。

本研究得到的结论可以为低等级公路交通安全保障措施的实施提供一定的参考，与以往的制动毂温升模型在预测低等级公路制动毂温度时的精度相比，文中建立的仿真模型具有更高的预测精度，可以作为低等级公路六轴铰接式列车的下坡制动性能预测与速度控制工具，从而为低等级公路的线形设计提供优化建议，完善对低等级公路的安全性评价

手段，提高低等级公路的货运安全管理水平。

未来研究中，可以通过一定的仿真模拟、实测手段将文中成果进一步拓展至更多载重货车车型及行驶速度上，并进一步掌握交通流、交通安全设施、构造物、天气等因素对制动行为的影响，提高模型的预测精度。

参考文献：

- [1] 张韡, 吴晓多, 白骞, 等. 基于多项Logit模型的山区高速公路事故致因分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2111-2117.
ZHANG Wei, WU Xiaoduo, BAI Qian, et al. Cause analysis of highway accidents in mountainous areas based on multinomial logit model [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 2111-2117.
- [2] 徐进, 罗晓, 张凯, 等. 基于自然驾驶试验的山区公路汽车行驶轨迹特性研究 [J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 38-51.
XU Jin, LUO Xiao, ZHANG Kai, et al. Research on vehicle trajectory characteristics of mountainous highway based on natural driving test [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 38-51.
- [3] 刘通, 胡红, 单珏, 等. 考虑人因-环境因素的山区公路警觉水平量化模型 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(7): 44-51, 69.
LIU Tong, HU Hong, SHAN Jue, et al. A quantitative model of alertness level of mountain highway considering human-environmental factors [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2024, 43(7): 44-51, 69.
- [4] 袁飞云, 张黎明, 王韩, 等. 基于制动鼓温升的连续下坡超长隧道纵坡可靠度研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39(12): 179-187.
YUAN Feiyun, ZHANG Liming, WANG Han, et al. Study on longitudinal slope reliability of continuous downhill super-long tunnel section based on brake drum temperature rise [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(12): 179-187.
- [5] 张弛, 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 research on temperature rise model of truck brake hub in long and steep downhill sections of highway [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(3): 96-107.
- [6] 徐进, 邵毅明, 彭其渊, 等. 公路线形的操纵负荷分析及设计控制 [J]. 东南大学学报(自然科学版),

- 2009, 39(4): 867-872.
- XU Jin, SHAO Yiming, PENG Qiyuan, et al. Handling load analysis and design control of highway alignment [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2009, 39(4): 867-872.
- [7] 胡江碧, 李晓宇, 罗绍建, 等. 基于驾驶行为需求的长大纵坡界定 [J]. *北京理工大学学报*, 2017, 37(6): 590-594.
- HU Jiangbi, LI Xiaoyu, LUO Shaojian, et al. The definition of long longitudinal slope based on driving behavior needs [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37(6): 590-594.
- [8] 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. Driver's foot handling characteristics and driving load in longitudinal slope section of mountainous highway [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(1): 91-100.
- [9] 覃胜, 于国岳, 王芳菲, 等. 山区低等级公路急弯路段车辆纵向加速度特性 [J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2025, 44(2): 60-69.
- QIN Sheng, YU Guoyue, WANG Fangfei, et al. Longitudinal acceleration characteristics of vehicles on sharp curves of low-grade highways in mountainous areas [J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2025, 44(2): 60-69.
- [10] 徐进, 潘存书, 符经厚, 等. 典型道路场景以及场景切换时的速度行为特性 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(4): 1331-1341.
- XU Jin, PAN Cunshu, FU Jinghou, et al. Typical road scenes and speed behavior characteristics during scene switching [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(4): 1331-1341.
- [11] 胡立伟, 殷秀芬, 张苏航, 等. 基于驾驶负荷的山区二级公路纵坡路段驾驶舒适度评价研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(6): 240-246, 258.
- HU Liwei, YIN Xiufen, ZHANG Suhang, et al. Research on driving comfort evaluation of longitudinal slope section of secondary highway in mountainous area based on driving load [J]. *Transportation System Engineering and Information*, 2020, 20(6): 240-246, 258.
- [12] XING G, MA Y, CHEN S, et al. The effects of radius and longitudinal slope of extra-long freeway spiral tunnels on driving behavior: a practical engineering design case [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 152(c): 105967/1-20.
- [13] SHAO Y, XU J, LI B, et al. Modeling the speed choice behaviors of drivers on mountainous roads with complicated shapes [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(2): 862610/1-13.
- [14] 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 the slope length limit of mountainous expressway based on the braking performance of large trucks [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2009, 28(2): 287-289, 297.
- [15] BLOK H. The flash temperature concept [J]. *Wear*, 1963, 6(6): 483-494.
- [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 Yudi, et al. Risk assessment model of continuous downhill truck accident based on brake hub temperature rise [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(11): 19-29.
- [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 continuous downhill based on brake hub temperature rise [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 Binghong, NIU Xiao, BAI Haochen, et al. Research on temperature rise model correction of truck brake hub in continuous downhill section of expressway [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(9): 85-91.
- [19] 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 Hongzhi, HU Qingyi, XU Jinliang. Safety design and evaluation method for long and steep downgrade section of expressway [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(3): 10-16, 40.
- [20] 张驰, 国廷玉, 胡瑞来, 等. 基于制动行为的高速公路平均纵坡坡长研究 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(2): 12-26.
- ZHANG Chi, GUO Tingyu, HU Ruilai, et al. Research on average longitudinal slope length of expressway based on braking behavior [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*

- tion), 2025, 53(2): 12-26.
- [21] 李德林, 陈俊先, 王永岗, 等. 基于潜在类别模型的急陡弯路段驾驶行为辨析 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(12): 3526-3533.
- LI Delin, CHEN Junxian, WANG Yonggang, et al. Analysis of driving behavior in steep curves based on latent class model [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(12): 3526-3533.
- [22] 戴丽萍, 金智林. 整体式EHB系统建模及安全机制研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(9): 119-127.
- DAI Liping, JIN Zhilin. Integrated EHB system modeling and security mechanism research [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(9): 119-127.
- [23] 余卓平, 史彪飞, 卓桂荣, 等. 集成式电子液压制动系统行程压力特性理论研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 294-303.
- YU Zhuoping, SHI Biaofei, ZHUO Guirong, et al. Theoretical study on displacement and pressure characteristics of integrated electro-hydraulic braking system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 294-303.

Research on Braking Behavior and Brake Drum Temperature Rise Model of Truck on Continuous Downhill Section of Low-Grade Highway

ZHANG Chi¹ JIN Yuzheng¹ NIE Yuhan² GUO Tingyu¹ WEI Dibin¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: China has a large mileage base of low-grade highways, and accidents caused by brake failure of heavy-duty trucks occur frequently. To conduct an in-depth study on the braking behavior of truck drivers on continuous downhill sections of low-grade highways, this research, based on the field-measured data of six-axle articulated trains on low-grade highways during long downhill driving, identified the driver's braking timing on downhill sections with complex horizontal and vertical alignments, analyzed and quantified the characteristics of truck drivers' braking behaviors on continuous downhill sections of low-grade highways, established a joint simulation model of driver behavior in TruckSim simulation software by integrating Matlab/Simulink, and, finally, verified the reliability of the model through comparison. The results show that, on horizontal curve sections, truck drivers are influenced by the curves and will exhibit relatively high-intensity braking behaviors at the end of straight sections and the beginning of the curved sections. On straight downhill sections with a gradient of 2%~9%, the drivers' braking magnitude is positively correlated with the gradient; According to the radius, the curves are classified into sharp curves, medium curves and gentle curves, and the average brake pedal stroke before entering sharp curves reaches 220 mm, while there is no significant difference in the average brake pedal stroke between medium curves (176 mm) and gentle curves (174 mm). As compared with the brake drum temperature rise prediction models in previous studies that did not consider horizontal alignment factors, the simulation model established in this research is of higher prediction accuracy for brake drum temperature, thus providing a theoretical basis for the traffic safety guarantee on low-grade highways.

Key words: road engineering; low-grade highway; braking behavior; brake drum temperature; temperature rise model; TruckSim; joint simulation