

张 驰, 金字铮, 张立祥, 等. 基于重型货车制动毂温升特性的低等级公路纵坡可靠度[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2026, 46(3): 13-31.
ZHANG Chi, JIN Yu-zheng, ZHANG Li-xiang, et al. Reliability of low-speed highway longitudinal slope based on temperature rise characteristics of heavy-duty truck brake drums[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2026, 46(3): 13-31.
DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2026.03.002

基于重型货车制动毂温升特性的 低等级公路纵坡可靠度

张 驰¹, 金字铮¹, 张立祥², 焦昱棋³, 韦涤斌¹, 高艳阳¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;
3. 辽宁省高速公路运营管理有限责任公司, 辽宁 沈阳 110002)

摘 要:为降低低等级公路货车制动失效事故的安全隐患,以重型货车为研究对象,基于实车试验数据,探讨制动行为与制动毂温升特性之间的耦合关系,并在此基础上构建低等级公路纵坡设计的可靠度模型,提出科学合理的连续下坡坡长建议值。采用中国西部山区一条典型四级低等级公路为试验路段,选取六轴半挂货车为测试车型,采集制动毂温度与踏板位移数据。通过构建制动强度指数指标,量化驾驶人制动行为强度,采用回归分析方法,分别建立圆曲线半径与纵坡坡度对制动强度的影响模型,进而分析平面与纵向线形组合对制动行为的复合作用。在此基础上,引入宏观与微观温度梯度评价指标,分别刻画坡段尺度及瞬时尺度下制动毂温升速率,并建立制动强度指数与微观温度梯度的耦合回归方程。随后,将制动行为影响下的温升特性纳入极限状态函数,构建纵坡设计可靠度模型,采用蒙特卡洛仿真方法,模拟不同坡度、坡长及小半径路段占比条件下的制动毂温升过程,获得对应的坡长可靠性指标,并提出满足可靠度要求(0.8)下各坡度对应的坡长临界值。研究表明:在小半径路段中,制动强度指数与圆曲线半径显著负相关,而在大半径路段相关性减弱,制动行为受纵坡影响主导;纵坡坡度与制动强度指数间的线性关系显著;宏观温度梯度与纵坡成正相关,坡度大于 3% 时温升速率明显增大;微观温度梯度与制动强度指数也呈显著正相关;在小半径曲线占比从 5% 增至 20% 条件下,坡长越长,平均坡度越陡,可靠度下降越快。

关键词: 交通工程; 低等级公路; 连续下坡路段; 制动行为; 制动毂温升; 可靠度

中图分类号: U491.255 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8879(2026)03-0013-19

Reliability of low-speed highway longitudinal slope based on temperature rise characteristics of heavy-duty truck brake drums

ZHANG Chi¹, JIN Yu-zheng¹, ZHANG Li-xiang², JIAO Yu-qi³, WEI Di-bin¹, GAO Yan-yang¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. POWERCHINA Chengdu Engineering Co., Ltd., Chengdu 610072, Sichuan, China; 3. Liaoning Provincial Expressway Operation Management Co., Ltd., Shenyang 110002, Liaoning, China)

Abstract: To reduce the safety hazards associated with brake failure of heavy trucks on low-grade

收稿日期: 2025-12-01

基金项目: 四川省交通运输科技项目(2023-A-04); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102215206);

西安市社会科学规划基金项目(25GL123); 陕西省社会科学基金项目(2025R018)

作者简介: 张 驰(1981-), 男, 四川宜宾人, 教授, 工学博士, 从事交通安全与道路数字化研究, E-mail: zhangchi@chd.edu.cn.

highways, this study took a heavy truck as the research object to investigate the coupling relationship between braking behavior and brake drum temperature rise characteristics based on real-vehicle test data. On this basis, a reliability model for longitudinal grade design of low-grade highways was developed, and scientifically justified recommended lengths for continuous downhill sections were proposed. A typical class IV low-grade highway in a mountainous region of western China was selected as the test section, and a six-axle semi-trailer truck was used as the test vehicle to collect brake drum temperature and pedal displacement data. A braking intensity index was constructed to quantify the driver's braking behavior, and regression analysis was employed to establish the models of the influence of horizontal curve radius and longitudinal grade on braking intensity, thereby analyzing the combined effect of horizontal and vertical alignments on braking behavior. Subsequently, macroscopic and microscopic temperature gradient evaluation indices were introduced to characterize the brake drum temperature rise rate at the slope-segment scale and instantaneous scale, respectively. A coupled regression equation between the braking intensity index and the microscopic temperature gradient was established. The temperature rise characteristics influenced by braking behavior were then incorporated into the limit state function to construct a reliability model for longitudinal grade design. Using the Monte Carlo simulation method, the brake drum temperature rise process under different combinations of grade, slope length, and proportion of sharp horizontal curves was simulated, yielding corresponding reliability indices for slope length. Critical slope lengths for each grade that meet a reliability requirement of 0.8 were proposed. The results show that: on sharp horizontal curves, the braking intensity index is significantly negatively correlated with the curve radius, whereas this correlation weakens on gentle curves, where braking behavior is predominantly influenced by the longitudinal grade; a significant linear relationship exists between longitudinal grade and braking intensity index; the macroscopic temperature gradient is positively correlated with the grade, with a marked increase in temperature rise rate when the grade exceeds 3%; the microscopic temperature gradient also exhibits a significant positive correlation with the braking intensity index; under the condition where the proportion of sharp curves increases from 5% to 20%, the reliability decreases more rapidly with longer slope lengths and steeper average grades. 6 tabs, 15 figs, 31 refs.

Key words: traffic engineering; low-grade highway; continuous downhill sections; braking behavior; brake drum temperature rise; reliability

Author resume: ZHANG Chi (1981-), male, professor, PhD, zhangchi@chd.edu.cn.

Foundation items: Transportation Science and Technology Project of Sichuan Province (2023-A-04); Fundamental Research Fund for the Central Universities (300102215206); Social Science Planning Fund Project of Xi'an (25GL123); Social Science Fund Project of Shaanxi Province (2025R018)

0 引言

根据《2023 年交通运输行业发展统计公报》^[1],低等级公路作为中国道路网络的重要组成部分,其里程占中国公路总里程的比重高达 86%。这类公路多为二级及以下技术等级,主要承担区域内资源运输、山区通行及大型工程配套交通等

功能,服务对象以重载货车为主,运行速度低、运营环境复杂。在山区地区,随着高速公路、高速铁路、水电站等重大基础设施项目推进与建设需求牵引,大量低等级公路作为配套交通设施被规划与修建,其分布呈现相对密集化的发展趋势。低等级公路常穿越地势起伏剧烈、地形复杂的区域,纵坡长、坡度大、平曲线半径小等不利线形组合普

遍存在,重载货车制动毂温度过高而导致的制动失效事故频发^[2],给重载货车的安全运行带来巨大挑战。而制动失效的主要原因是制动行为异常,因此亟需对制动行为进行深入分析,并以此进行低等级公路下坡安全性的研究与提升。

制动毂的温升特性是驾驶人制动行为作用于车辆系统的表征,两者密不可分,国内外学者基于制动行为和制动毂温升模型已经开展了大量研究。早期国内外对驾驶制动行为的研究多依赖于问卷调查^[3-4]、固定测点监控^[5]、驾驶人心理生理指标^[6-8]等手段,随着技术手段不断进步,实车试验^[9-10]、驾驶模拟仿真^[11]、大数据分析^[12-13]等方式逐渐成为主流。Tokuda等^[14]发现驾驶人在不同交通环境下对车辆的操控反应存在差异,当交通状况趋于复杂时,其方向调整幅度加大、紧急制动增加。Hernández等^[15]通过模拟器采集驾驶人脑电信号,实现了制动意图的提前识别。徐进等^[16]根据实测数据,建立了心率指标与踏板力的回归模型。张驰等^[17]通过仿真模型探讨了复杂气象和线形条件影响下,小客车驾驶人在不同路段的制动行为特征。制动毂温升模型大致可分理论分析法、实测回归法及软件仿真法^[18]。理论分析法主要以能量守恒和热力学为基础,从车辆性能出发构建温升模型。郭鑫等^[19-21]选取六轴半挂车作为研究车辆,构建了相应的制动毂温升模型。张驰等^[22]梳理了现有温升模型并结合实测数据验证其适用性,并基于实车试验数据对考虑发动机制动工况的温升模型进行了修正^[23]。潘兵宏等^[24]以六轴半挂货车为研究对象,构建了适用于驱动轮的制动毂温升模型。实测回归法基于特定道路条件下采集的实车温度,选取关键影响因素构建回归温升模型。杨宏志等^[25]结合车速、纵断面指标及载重等因素进行制动毂温升模型的建立。软件仿真法将复杂结构离散为有限单元,模拟实际制动工况以计算温度场数值,具有效率高、建模灵活的优势。Gao等^[26-27]通过有限元仿真软件,建立了制动系统热力学分析模型,通过计算机模拟获得了制动器温度场分布及变化规律。袁燕等^[28]分析了制动毂在紧急、重复及持续制动3类连续下坡工况下的温度变化特征。

虽然在制动行为与制动毂温升模型方面已有不少研究,但是鲜有研究将两者结合进行分析研究。制动行为的研究多聚焦于特定交通场景或指定工况下的刹车行为分析,研究对象多为小客车;

制动毂温升模型的研究大多聚焦于车辆本身参数和环境条件,较少考虑驾驶人在连续制动过程中的操作行为及其对温升变化的具体影响。考虑到低等级公路中驾驶人制动行为及道路交通特征相较于高等级公路存在显著差异,现有制动毂温升特性研究在低等级公路中的适用性仍需完善。因此,本文针对目前对低等级公路场景制动行为研究的不足,通过实车试验采集的制动踏板位移数据,研究低等级公路中驾驶人的制动行为特性。利用制动强度指数量化制动行为强度,通过相关性分析及回归分析方法,构建不同路段组合下的制动强度指数最优回归方程,明确平纵组合线形对驾驶人制动行为的影响规律,并进一步采用宏观与微观的温度梯度揭示不同道路条件下制动毂温升速率的变化特征。

另外,目前关于连续下坡路段纵坡设计的研究多从车辆载重、制动性能以及运行速度等典型因素出发,但是考虑到低等级公路连续下坡路段驾驶人的制动行为差异较大,即便道路条件一致,不同驾驶人的制动表现也可能明显不同,存在较大随机性。鉴于可靠度理论可以较好地解决不确定性的干扰,并且已在道路安全领域的研究中得到了可行性的验证^[29-31],本文在分析了驾驶人制动行为特征的基础上,进一步引入可靠度方法并建立制动强度指数与微观温度梯度的回归模型,最终建立基于制动行为与温升速率的低等级公路纵坡坡长可靠度模型,更有效地体现真实道路环境中各因素耦合下的安全程度,并为低等级公路连续下坡路段纵坡坡长设计提出建议值,为纵坡设计与安全优化提供理论依据。

1 实车试验及数据采集

1.1 试验路段

选取中国西部山区一条低等级公路,该低等级公路(试验路段)为山区双向两车道四级公路,试验路段起点为K1335+020,终点为K1304+090,路段内包含2段连续下坡路段,路段1全长21.4 km,路基宽度为8.5 m,最大纵坡坡度为9%,平均纵坡坡度为5.98%,海拔高差为1254 m;路段2全长4.1 km,路基宽度为8.5 m,最大纵坡坡度为8.7%,平均纵坡坡度为4.83%,海拔高差为198 m。试验路段平纵线形如图1所示。

试验路段涵盖146处不同半径的平面弯道,



图 1 试验路段平纵线形及设施示意

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal and vertical alignments and facilities for test road section

其中包括 12 条回头曲线以及多组连续 S 形弯道与回头弯道组合,纵坡坡度为 $(0\sim 9\%)$,如表 1 所示。该道路充分反映了山区低等级公路为适应地形、克服大高差而采用长大纵坡、密集平曲线的典型工程特征,能够较好地代表中国山区低等级公路的普遍特征。同时该路段路侧场景多样,潜在风险较高,但道路基础设施完善且标志标线清晰,沿线植被遮挡较少,有利于试验观测。

1.2 试验车型

经货运市场调研,当前货运市场中 6 轴半挂列车占比达到 51.3%,并且该车型承担了 81.4% 的货运周转量。因此,试验选用具有代表性的公路典型六轴半挂列车作为试验车型,车辆型号为中国重汽 ZZ4256V324HE1B(图 2)。

1.3 试验设备及仪器

试验全程采用 DEWESOFT 数据采集系统,采集频率为 100 Hz,记每次试验开始时时间为 0。采

表 1 平曲线统计

Table 1 Horizontal curve statistics

序号	纵坡坡度/%	半径/m		个数
		最小	最大	
1	(0,1]	46.40	263.8	12
2	(1,2]	74.20	182.4	16
3	(2,3]	37.10	304.1	19
4	(3,4]	34.80	300.1	17
5	(4,5]	55.30	117.5	26
6	(5,6]	16.00	175.3	12
7	(6,7]	29.20	247.6	15
8	(7,8]	33.96	123.4	18
9	(8,9]	41.80	124.2	11

集设备主要包括:①制动毂温度采集模块,测温探头嵌入制动毂内壁的预设位置,并通过无线模块将温度信号传输至采集终端,实现全过程的温度记录与数据存储;②踏板位置信息采集模块,使用设备中的拉线式位移传感器,采集驾驶人制动与



(a) 试验车辆正面



(b) 试验车辆侧面

图2 试验车辆

Fig. 2 Test vehicle

加速数据,记录制动、加速踏板动作及开度,传感器固定于重型货车的制动与加速踏板位置,通过有线传输线路与数据采集系统相连,用于输出制动响应;③CAN模块,通过连接车辆OBD接口,可

高效采集车速、挡位、发动机转速等行车电脑参数,具备响应快、精度高、抗干扰能力强等特点,能真实反映车辆运行状态,为驾驶行为分析提供数据支持;④触发器,由试验人员手动操作,主要用于标记试验起止时间,并记录沿线构造物及里程碑号位置等关键位置。试验数据采集仪器与安装位置如图3所示。

1.4 试验方案

试验路段连续下坡分为2段:第1段全长21.4 km,第2段全长4.1 km,采取非紧急情况不停车的原则完成下坡,选取4名具有10年以上驾龄的货运车辆驾驶人共进行4次重复试验。对驾驶人进行访问调查后,根据驾驶人在连续下坡路段的实际操控习惯,试验选择3、4挡进行下坡操作,车辆为满载49 t。

考虑到当前低等级公路重载货车在配置与使用层面仍存在差异,本文构建从未配置或未充分使用辅助制动装置的极端工况,关闭排气阀、缓速器及刹车淋水系统,仅依靠主制动器与发动机制动共同控制车速,使其维持在20~30 km/h,实现相对稳定的匀速行驶。试验具体流程如下:

(1)试验开始前,完成仪器设备的安装与调试,并测量制动毂初始温度。

(2)车辆从路段1起点沿下坡方向行驶,关闭排气阀、缓速器与淋水系统,仅依靠主制动器与发动机制动控制车速。

(3)试验过程中实时采集车辆运行状态、驾驶行为数据及通过构造物(如停车区、超限检测站)与沿线桩号时的时间位置信息。

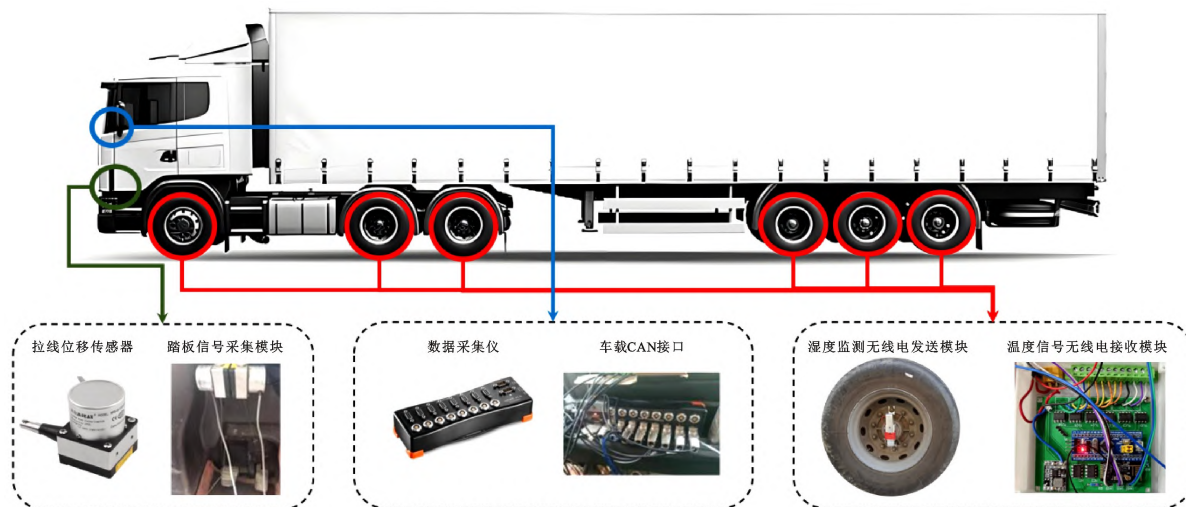


图3 试验仪器及安装位置示意

Fig. 3 Schematic diagram of test instruments and their installation positions

(4)到达路段 2 终点后,对采集数据进行备份,并将车辆驶往上坡方向返程,在返程途中完成数据初步核查,确保数据完整性与准确性。

(5)车辆完成单次试验并返回起点后,应对车

辆性能及试验设备进行检查,重新记录试验起始的环境信息。确认满足试验条件后,重复上述步骤开展下一轮试验(图 4)。



(a) 照片1



(b) 照片2

图 4 试验过程照片

Fig. 4 Test process photos

2 基于制动行为的货车制动毂温升特性研究

根据实车试验采集的驾驶数据,为探明低等级公路的线形特征与驾驶人制动行为、制动毂温升特性之间的耦合关系,本文利用制动强度指数量化制动行为强度,通过相关性分析及回归分析法,明确平纵组合线形对驾驶人制动行为的影响规律。以温度梯度表征制动毂温度特性,通过建立不同路段组合下的制动强度指数-温度梯度回归方程,构建制动行为与制动毂温升特性间的关系。

2.1 制动行为评价指标确定

车辆行驶过程中,驾驶人作为行为主体,其决策过程直接受到车辆状态、道路条件和环境因素的综合影响,并据此做出相应制动反应。为系统分析连续纵坡路段驾驶人的制动行为特性,本文选取评价指标需体现驾驶人的连续操作特性,并能够以直观方式对制动特性进行量化表示,揭示其行为形成的内在机制与变化规律,故本文基于实测踏板位移数据提出制动强度指数,用以量化连续制动行为强度,其可表示为

$$B_s = \frac{D_s}{D_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$B_0 = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n B_s \quad (2)$$

式中: B_s 为 s 时刻的制动强度指数; B_0 为制动强度指数均值; D_{ref} 为实车试验中制动踏板最大行程; D_s 为 s 时刻踏板位移量。

B_s 越高,表明驾驶人实施的制动操作越强烈,从而有效体现制动行为的剧烈程度。

2.2 基于道路特征的制动行为特性分析

根据《公路路线设计规范》(JTJ D20—2017)中对不同设计速度下圆曲线半径与纵坡坡度的规定,将平面线形分为直线、大半径圆曲线及小半径圆曲线路段,半径分别为 $r > 400$ m、 $65 \text{ m} < r \leq 400$ m、 $r \leq 65$ m。将纵断面线形分为陡坡、中坡与缓坡,坡度分别为 $(0, 3\%]$ 、 $(3\%, 6\%]$ 、 $[6\%, 9\%)$ 。

2.2.1 制动强度指数特征分析

(1) 平面线形与制动强度耦合机制分析

本文基于制动踏板位移数据,依据式(1)、(2)计算制动强度指数 B ,分析制动强度指数与圆曲线半径间的相关性,从而探讨不同曲线半径条件下驾驶人制动强度的变化规律。回归分析结果及检验如图 5、表 2 所示。

图 5(b)呈现了 $(15 \text{ m} < r \leq 65 \text{ m}) B$ 的回归分析结果。线性模型 $p < 0.001$,表明回归模型在 95% 置信水平下具有统计显著性,且 $R^2 = 0.631$,

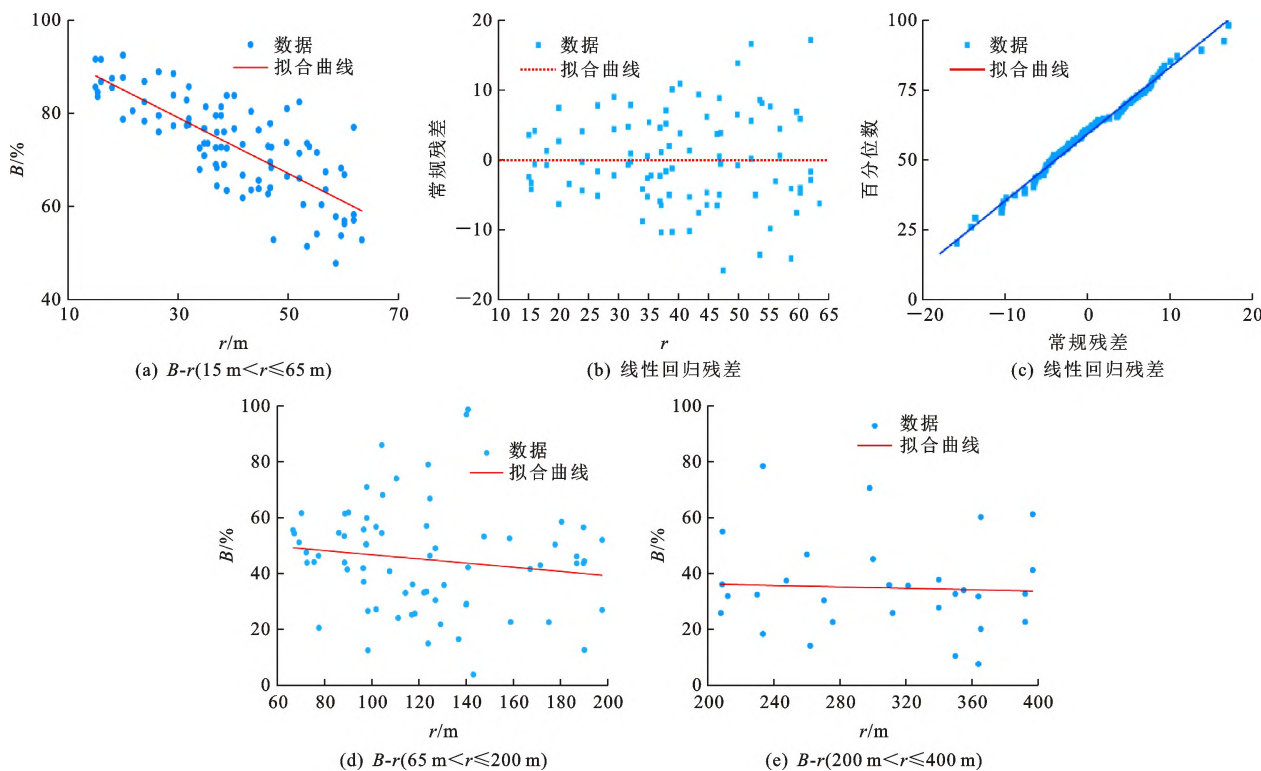


图5 圆曲线半径-制动强度指数回归分析

Fig. 5 Regression analysis of circular curve radius and braking intensity index

表2 $B-r$ 参数估计及显著性检验 ($15\text{ m} < r \leq 65\text{ m}$)

Table 2 Parameter estimation and significance test for

 $B-r$ ($15\text{ m} < r \leq 65\text{ m}$)

函数类型	函数形式	回归系数	F	p	R^2
线性回归	$B=ar+b$	$a=-0.598$ $b=96.91$	132.17	<0.001	0.631

揭示两者存在线性相关性,即随 r 减小, B 呈增强趋势。残差分析表明,残差随 r 增大而递增,反映出 r 增大时 B 的离散程度上升。进一步分析显示,当 $r < 30\text{ m}$ 时,曲线范围内 B 持续高位,即便处于波谷时仍超 75% ,这归因于此类曲线多为回头曲线,驾驶人需通过高强度持续制动维持低速过弯;当 $(30\text{ m} < r \leq 65\text{ m})$ 时, B 均值呈离散且减小趋势,但多数仍超 60% ,表明该区间小半径曲线对 B 仍具显著影响。图 5(c)、(d) 显示, $(65\text{ m} < r \leq 400\text{ m})$ 回归模型拟合效果欠佳,揭示 B 与 r 间存在非线性关联。随 r 增大,制动行为离散性增强,驾驶人制动方式呈现多样化。线性拟合斜率表明 B 整体呈下降趋势,与 r 增大制动需求减弱的实际特征一致。

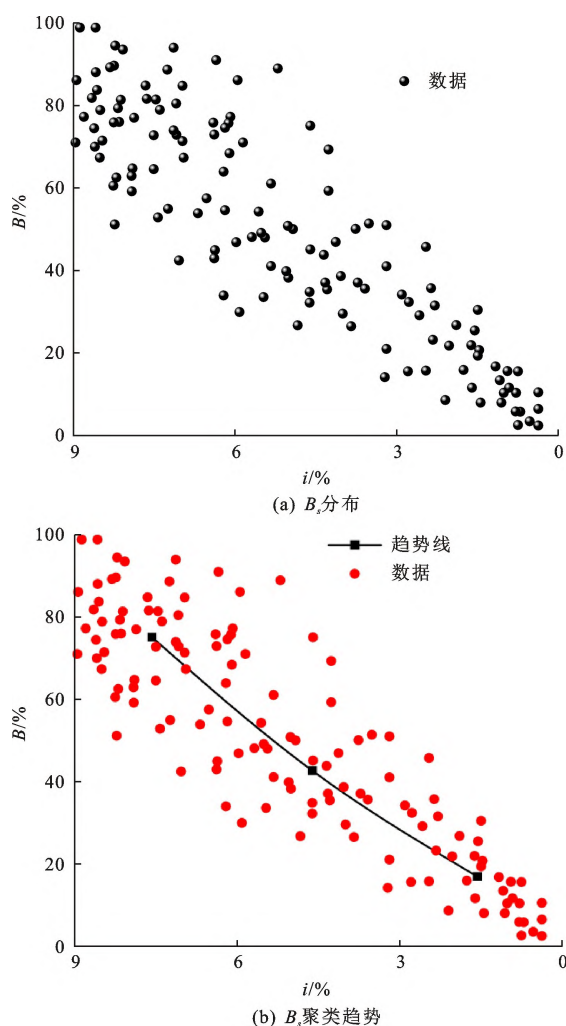
综上所述,平面线形与制动强度的耦合机制表现为:当 $r \leq 65\text{ m}$ 时, B 与 r 呈现出较强的线性相关性, B 聚集性较强,该现象反映出驾驶人对小半径弯道的车速控制需求显著增强,为保持稳定

过弯姿态,常采取强制制动策略,导致踏板位移频繁、制动力持续性增强。根据车辆动力学模型,小半径曲线内的横向离心力增大,若不通过主动减速将风险指数压低,车辆极易出现侧滑或失稳风险。此外,小半径回头弯道常与视距受限、空间紧迫等因素叠加,加剧驾驶人制动预警行为,从而引发制动强度集中分布;当 $r > 65\text{ m}$ 时, B 分布更为随机,离散性逐渐增大,说明随着平面线形条件的变好, r 不再是 B 的决定性因素,由于驾驶人的制动行为还受到纵坡坡度的影响,需要进一步探讨纵坡坡度与制动强度的耦合机制。

(2) 纵断面线形与制动强度耦合机制分析

对试验路段的制动强度指数点进行计算,各坡度路段驾驶人制动强度指数点结果如图 6(a) 所示。由于 $0 < i \leq 9\%$,可以较为直观地在散点图中查看趋势,为探究制动强度指数与纵坡坡度之间的关联,本文采用 K 均值聚类算法,将纵坡坡度分为 $(0, 3\%]$ 、 $(3\%, 6\%]$ 、 $(6\%, 9\%]$,借助 SPSS 软件对数据进行聚类分析,结果如图 6(b) 所示。

据图 6 可知, B 在各坡度区段内的分布较为集中,且整体数值随坡度增加而上升,且驾驶人采取的制动操作模式也随着坡度变化从小坡度的“轻微点刹”过渡到“踩下-抬脚”制动稍强,最终变为持

图6 B 在不同纵坡坡度下的分布Fig. 6 Distribution of B under different longitudinal slopes

续“踩下”的较强制动行为,为评估 B 与 i 之间的相关性,本文采用线性回归方法,同时结合残差检验对回归模型的拟合精度进行验证。回归结果及参数检验如表 3 所示。

表 3 i - B 参数估计及显著性检验Table 3 Parameter estimation and significance test for i - B

函数类型	函数形式	回归系数	F	p	R^2
线性回归	$B=ai$	$a=-9.687$	2 545.34	<0.001	0.940 7

回归参数检验结果显示 p 显著低于 0.001,并通过了 F 检验, R^2 为 0.940 7,表明 i 与 B 具有较强的线性相关性。残差呈近似正态分布,并且在 0 两侧分布较为对称,进一步验证了模型拟合的稳定性与可信度。因此可以分析得到, i 与 B 的耦合机制表现为,随着 i 增大, B 表现出持续上升趋势,二者之间存在显著正相关。

2.2.2 平纵组合对制动强度指数的影响分析

由第 2.2.1 节分析可知, B 和 r 以 65 m 为分界

点表现出由较强相关性变为弱相关或无相关,和 $0 < i \leq 9\%$ 表现为较强正相关,因此,将圆曲线半径 65 m 作为划分依据,将试验路段划分为小半径-纵坡组合路段及大半径-纵坡组合路段。以 $r=10$ m 和 $i=1\%$,以及 $r=50$ m 和 $i=1\%$ 为步长,分别对不同平纵组合路段中驾驶人制动强度指数数据进行聚类处理,并绘制分布热力图,从而进一步揭示制动强度指数与平纵组合的耦合关联特征,如图 7 所示。

由图 7(a)可知:在小半径圆曲线($r \leq 65$ m)路段中, B 处于中高位,最小为 52.3%。总体来看,当 r 逐渐减小时, B 呈显著上升趋势,而当 i 不断增大时, B 并无显著变化。进一步分析,在 $15 \text{ m} < r \leq 25$ m 的圆曲线与纵坡叠合路段中,不论 i 大小 B 均在 80% 以上,这表明在小半径弯道中,驾驶人对车速的控制需求较高,即使 i 较小,仍需较强的制动行为;在 $35 \text{ m} < r \leq 65$ m 的圆曲线与纵坡叠合路段中,随着 i 增大 B 体现出略微上升的趋势,说明虽然驾驶人的制动需求更多地取决于 r ,但与 i 仍存在一定联系。

由图 7(b)可知,当 $i \leq 3\%$ 时, B 随 i 减小而降低,但总体处于低位,当 r 减小时, B 呈轻微上升趋势。当 $i > 3\%$ 时, B 持续呈上升趋势,而 r 的变化对该指标的影响相对较弱。 $8\% \leq i \leq 9\%$ 时, B 均值大于 90%,说明在陡坡范围内不论是否经过圆曲线驾驶人都会采用大强度的持续制动来维持期望车速。在大半径圆曲线与纵坡叠合路段内, r 与 i 间的交互作用较弱, B 主要由纵坡坡度主导。

综上分析,平纵组合对于 B 的影响如下:

(1)总体来看, B 随 i 增大而升高,随 r 增大而降低,但是平纵因素对于 B 的影响在不同情况下呈现出不同的优先级,主导因素随线形特征变化发生转移;

(2)在 r 较小的平纵组合路段中,圆曲线对于 B 的影响相较于 i 更加显著,具体表现为小半径路段的 B 始终保持高水平且与 r 呈高度负相关,与 i 呈较弱的正相关。当 $15 \text{ m} < r \leq 25$ m 时, B 均在 80% 以上,这反映出小半径自身带来的感知风险优先特征,即驾驶人对弯道限速要求的心理警觉性高于对坡度的物理反应;

(3)在圆曲线半径较大的平纵组合路段中, i 对于制动强度的影响占主导地位, B 随 i 增加呈明显升高趋势,但受 r 的影响较弱。当 $8\% \leq i \leq 9\%$, $B > 90\%$ 。这表明在大半径段中,车辆稳定性由

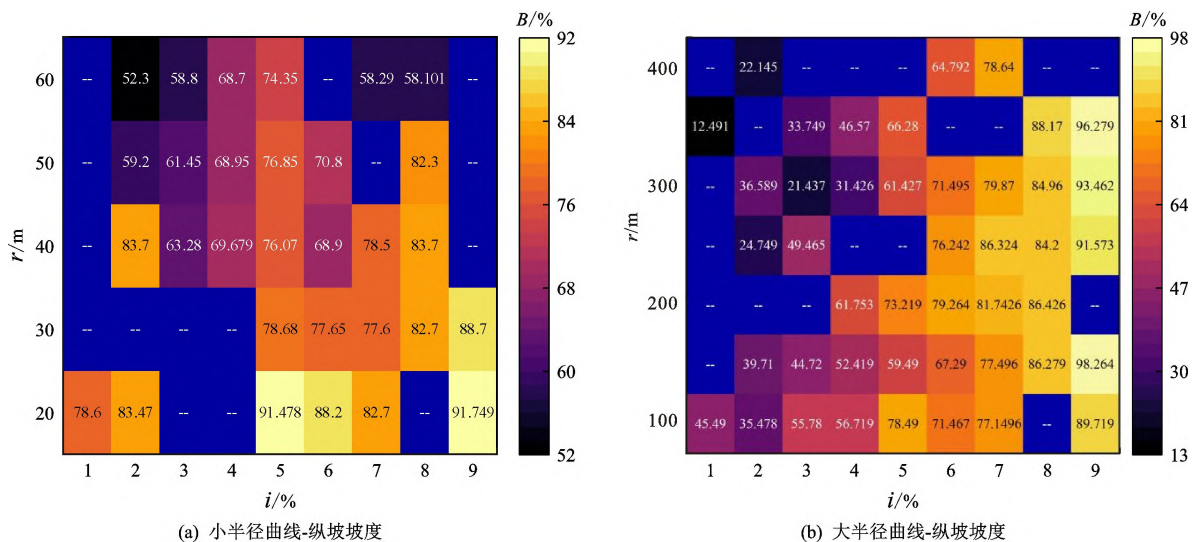


图7 聚类空间制动强度指数分布 heatmap

Fig. 7 Heatmaps of spatial distribution of braking intensity index by clustering

纵向重力作用主导,需通过持续制动维持速度下限。

2.3 制动毂温升评价指标确定

结合第2.2节分析结果可知,在低等级公路的连续下坡路段中,驾驶人需频繁制动控速,而高频次的制动会使制动毂温度升高,温度不断累积导致制动性能下降甚至失效,显著增加货车运行风险。故基于制动行为提出制动毂温升累积温度与温度梯度指标,从宏观和微观2个角度分析道路线形-制动行为-温升特性三者的关系。其中,累积温度表示车辆在下坡路段某位置所测得的实际温度。温度梯度用于描述该路段内温度随时间或距离的变化速率,反映不同道路条件下的温升特性。基于上述定义,本文将车辆在单一坡段行驶时制动毂温度的变化速率称为宏观温度梯度,用以评价重型货车在该路段上的温升响应。其可表示为

$$G_L = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3)$$

式中: G_L 为宏观温度梯度; T_2 为货车行驶坡段终点的制动毂温度; T_1 为行驶坡段起点的制动毂温度; L 为路段长度。

由于试验数据采集系统采集频率较高,可以基于单位时间内的制动强度指数表征驾驶人在微观层面的差异,故引入微观温度梯度作为评价指标,即单位时间内制动毂温度的变化量,即

$$G_T = \frac{T_s - T_{s-1}}{t} \quad (4)$$

式中: T_s 为 s 时刻制动毂温度; G_T 为微观温度梯

度; t 为时间。

2.4 驾驶人制动行为影响下的制动毂温升特性分析

道路线形特征与交通环境是影响温升变化的关键因素。同时相关研究表明^[18],制动毂温度对纵坡坡度与坡长较为敏感,二者在温升过程中起到显著作用。故综合前述对制动行为的分析结果,从2个层面开展研究:①分析纵坡坡度对宏观温度梯度的影响;②从平纵组合角度分析其对微观温度梯度的影响。

2.4.1 宏观温度梯度分析

为深入分析纵坡坡度对温升的影响,以 $i = 1.0\%$ 作为分类区间,构建了各坡度区间下的宏观温度梯度与制动强度指数分布,计算各直方的平均值标记在直方图中,并将 B 与 G_L 进行二次函数拟合并回归分析,如图8所示。

由宏观温度梯度分布直方图可知,不同纵坡坡度下,宏观温度梯度表现为3种典型形式:① $i < 1\%$ 时,发动机制动与滚动阻力基本可抵消部分重力分量,制动毂呈冷却特性,最低冷却速率为 $-5.41\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$;② $1\% \leq i \leq 3\%$ 时, $G_L = 0.433 \sim 4.129\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$,正负温升速率皆有分布,但整体以微弱升温为主,表明此坡段内制动毂大致维持在恒温状态;③ $i > 3\%$ 时, G_L 与 i 正相关,最高升温速率达 $31.39\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$,说明该坡段内制动行为加剧,制动系统作为主要动能吸收机制,其能量转化为热能并迅速集中于制动毂区域,温升过程显著加快。

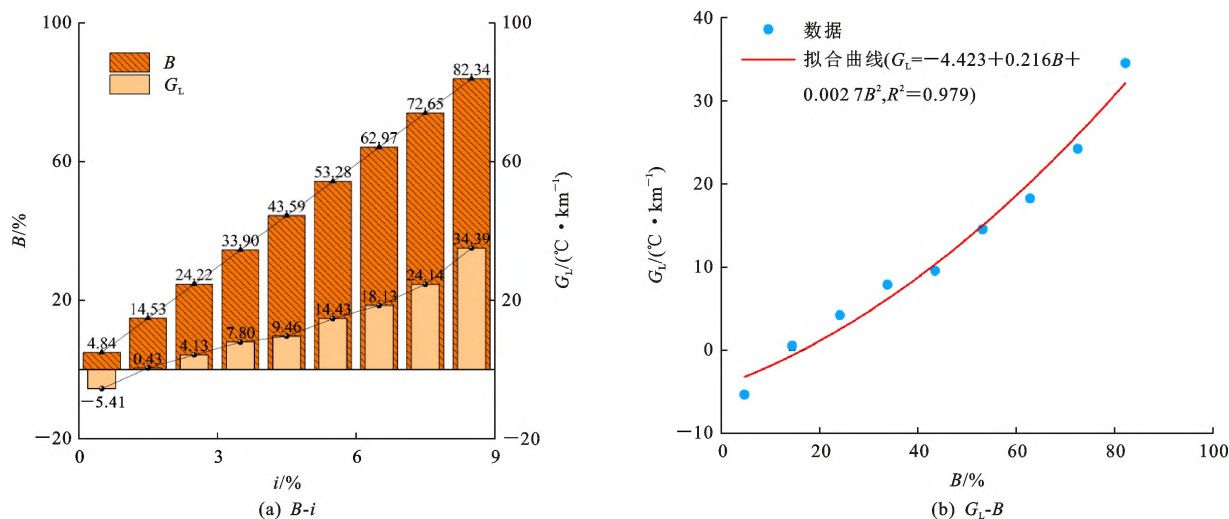


图8 制动强度指数与温度梯度变化

Fig. 8 Variations of braking intensity index and temperature gradient

总体来看, i 与 B 、 G_L 呈显著正相关, 尤其在陡坡路段, 二者数值达到最大。从整体变化规律来看, B 与 G_L 的增长趋势一致, 其回归分析的拟合优度 R^2 达到 0.979, 说明拟合模型具有良好的解释力。

2.4.2 微观温度梯度分析

从微观视角进一步分析, 制动毂温升过程很大程度上取决于驾驶人是否执行制动操作, 且驾驶人在不同道路条件下的操作方式存在差异, 在

小半径圆曲线路段尤为明显。由于此类曲线长度显著短于单一纵坡坡长, 采用 G_L 难以准确描述其温升特性, 因此后续研究针对该问题采用 G_T 表征单位时间内的温升情况, 具体计算方式见式(4)。

为探讨驾驶人制动强度对 G_T 的影响规律, 本文对大半径-纵坡耦合路段、小半径-纵坡耦合路段分别进行了分析, 利用 SPSS 软件中的线性回归、二次回归及三次回归模型, 对两者间的关系进行拟合, B 与 G_T 拟合方程示意图 9。

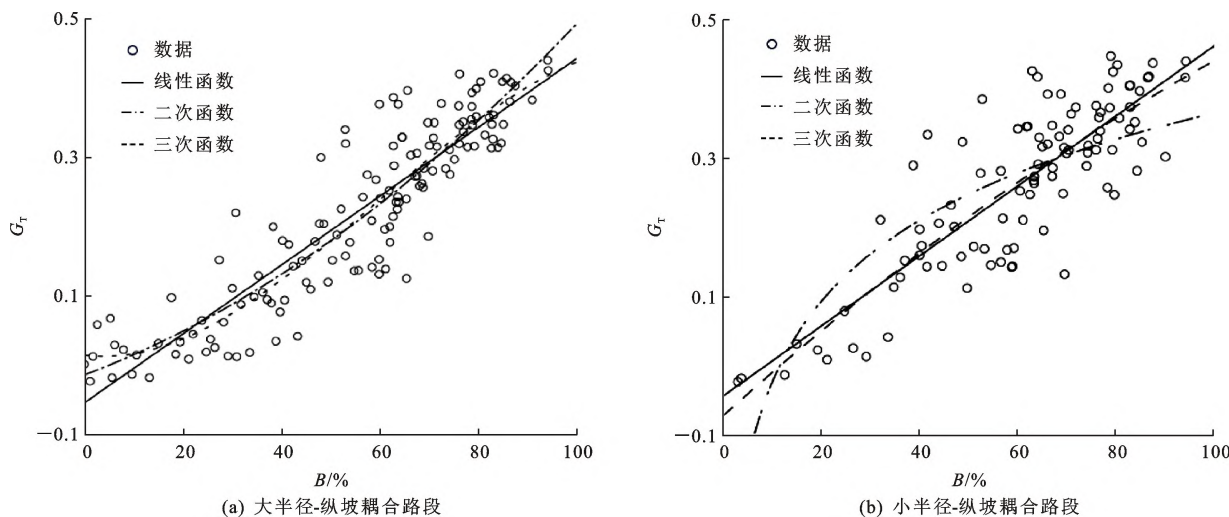


图9 微观温度梯度拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of microscopic temperature gradient

分别对大半径-纵坡耦合路段、小半径-纵坡耦合路段的拟合方程进行对比, 发现两者拟合效果最好的方程形式均分别为二次方程、线性方程, R^2 分别达到 0.826、0.711。进一步采用 AIC 和 BIC 对回归子集进行检验, 并对其进行方差分析, 结果

如表 4 所示。

由检验结果可知, 以二次函数形式对大半径-纵坡耦合路段制动强度指数和微观温度梯度进行拟合, AIC 和 BIC 值分别为 -809.58 和 -800.76, 且 $F=325.804$, 其显著性概率 $p<0.001$, 故回归

表4 拟合函数检验
Table 4 Tests of fitting functions

类型	拟合方程	回归系数	R^2	参数检验			
				AIC 值	BIC 值	F	p
大半径-纵坡耦合路段	$G_T = \alpha + \beta B + \gamma B^2$	$\alpha = -1.355 \times 10^{-2}$ $\beta = 2.537 \times 10^{-3}$ $\gamma = 2.2 \times 10^{-5}$	0.826	-809.58	-800.76	325.804	<0.001
小半径-纵坡耦合路段	$G_T = \alpha + \beta B$	$\alpha = -4.348 \times 10^{-2}$ $\beta = 4.812 \times 10^{-3}$	0.711	-548.50	-543.27	243.914	<0.001

模型通过了显著性检验。因此,大半径-纵坡耦合路段的 B 和 G_T 拟合结果如式(5)所示

$$G_T = -1.355 \times 10^{-2} + 2.537 \times 10^{-3} B + 2.2 \times 10^{-5} B^2 \quad (5)$$

以线性函数形式对小半径-纵坡耦合路段制动强度指数和微观温度梯度进行拟合的 AIC 和 BIC 值分别为 -548.5 和 -543.27,且 $F=243.914$,其 $p<0.001$,故回归模型通过了显著性检验。因此,小半径-纵坡耦合路段的 B 和 G_T 拟合结果如式(6)所示

$$G_T = -4.348 \times 10^{-2} + 4.812 \times 10^{-3} B \quad (6)$$

通过对图 9、表 4 的分析可知:

(1) B 与 G_T 之间呈显著正相关关系,表明两者在不同路段条件下具有较强的相关性。

(2) 从回归模型的拟合优度指标来看, R^2 均超过 0.7,说明在不同平纵组合路段中,制动强度与微观温度梯度具有较好的规律性和统计显著性。

(3) 对比各回归方程的斜率参数可发现,在相同制动强度水平下,小半径曲线路段与大半径路段的温升速率存在细微差异,小半径曲线路段在 $20\% \leq B \leq 90\%$ 时均大于大半径路段的温升速率,但总体差值均在 7% 以下,可认为二者在相同 B 下温升速率接近。

在第 2.2.2 节的分析结果中,在不同的圆曲线半径条件下驾驶人采取的制动行为并不相同,而通过微观温度梯度分析发现,以 B 为自变量,不同路段内 G_T 相近,说明在不同线形条件下,同一制动强度对应的温升梯度波动幅度较小,表明微观温升过程主要由制动行为决定,而非线形参数本身。这一结论进一步证明了以 B 为核心输入变量来构建温升预测模型的合理性,也为后续可靠度模型的变量选取提供了理论支撑。

3 低等级公路连续下坡坡长可靠度研究

《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)(简称

《规范》)中要求:二级公路、三级公路、四级公路的越岭路线连续上坡或下坡路段,相对高差为 200~500 m 时,平均纵坡坡度应不大于 5.5%;相对高差大于 500 m 时,平均纵坡坡度应不大于 5%;任意连续 3 km 路段的平均纵坡坡度不大于 5.5%。对于低等级公路的纵坡及坡长设计仅提到了一个大致范围,但忽略了低等级公路中重型货车的制动安全,若山区低等级公路中高差大于 500 m 时,保证平均纵坡坡度小于 5% 常常会导致几十千米的连续长下坡,易导致重型货车制动安全事故。同时,在低等级公路中纵坡坡度与坡长一定的情况下,小半径路段占比越大,驾驶人总体制动行为越多,导致制动失效风险增加。

因此,在低等级公路连续下坡安全的研究当中,需要考虑路线中平曲线对制动行为的影响,探究平纵组合条件下的道路安全设计指标。《规范》中通过实车试验与理论推导相结合的方式,根据重载货车制动毂温度阈值控制长大下坡的坡度与坡长,而根据本文前述研究, G_T 能够反映低等级公路平纵组合对制动行为的耦合影响量化关系,从微观层面体现制动毂温度的变化情况,因此在本节中将 G_T 作为可靠度模型中计算制动毂预测温度的依据,并据此提出低等级公路连续下坡的临界坡长。

3.1 可靠度模型构建

本文从制动安全角度将连续下坡纵坡设计可靠度定义为:重型货车在低等级公路连续下坡行驶过程中,驾驶人因线形变化进行制动操作控制速度,导致制动毂温度持续升高,在行驶至不同坡长位置处时,制动毂温度未超过临界安全温度的概率。据此,式(7)、(8)为基于制动行为与制动温升的纵坡设计可靠度极限状态函数

$$P = 1 - P_f = 1 - P_f(Z \geq 0) \quad (7)$$

$$Z = T - T_c \quad (8)$$

式中: Z 为温升极限状态函数; T 为根据制动强度指数与微观温度梯度计算得到的制动毂预测温

度; T_c 为设定的制动毂临界安全温度; 当 $Z \geq 0$ 时即为制动失效; P 为驾驶人制动安全的可靠度; P_f 为失效概率, 量纲为一。

3.1.1 临界温度确定

制动毂性能衰退的温度对重型货车在连续下坡路段中的行驶安全影响较大, 确定其阈值对于本文得出的纵坡设计可靠度结论至关重要。国内外已有大量学者围绕该温度阈值展开系统研究。其中法国 SETRA 将制动毂温度超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为风险判定条件, 认定其对行驶安全影响较大。美国 FHWA 发现导致制动毂发生热变形的温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 制动毂完全失效的温度为 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。杨宏志等^[25]指出, 为确保绝对制动安全, 制动毂温度应控制在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 会出现效能轻微衰减, 而超过 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时将面临制动失效的风险。此外,《规范》中也将 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为车辆制动性能未显著下降的温度界限。因此, 综合国内外研究成果及规范标准, 本文将 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 设定为临界温度阈值, 当极限状态函数中制动毂温度超过此阈值时, 视为发生制动失效。

3.1.2 可靠度模型变量选取及分布

由于小半径-纵坡耦合路段是低等级公路的特征路段, 选取驾驶人制动行为和小半径-纵坡耦合路段占比作为工况分组依据进行分析。其中制动行为为变量分别为制动时长和制动强度指数, 路段变量为小半径路段占比。

(1) 制动时长分布

在陡坡路段驾驶人通常采取较强制动以控制车速。同时在小半径圆曲线路段驾驶人受半径影响较大, 此时驾驶人同样会使用较强的制动措施控制车速。而在缓坡路段驾驶人可能选择点刹或加速行驶, 以便车辆恢复速度。由此可见在实际行驶过程中, 驾驶人并不会始终处于制动状态。为分析不同路段上的制动分布特征, 本文计算了 4 个平行试验中驾驶人的有效制动占比, 用以表示制动毂升温与降温区段, 如图 10 所示。

从试验路段上驾驶人制动行为与路段长度的占比关系来看, 驾驶人在大半径路段存在部分不采取制动行为的情况, 而在路段长度占比较小的小半径路段基本采取全制动。驾驶人在大半径路段上采取有效制动的路段长度占比为 $55.7\% \sim 62.1\%$, 平均制动率为 58.6% ; 在小半径路段上采取有效制动的路段长度占比为 $13.8\% \sim 13.9\%$, 平均制动率为 13.875% 。而驾驶人在大半径路段

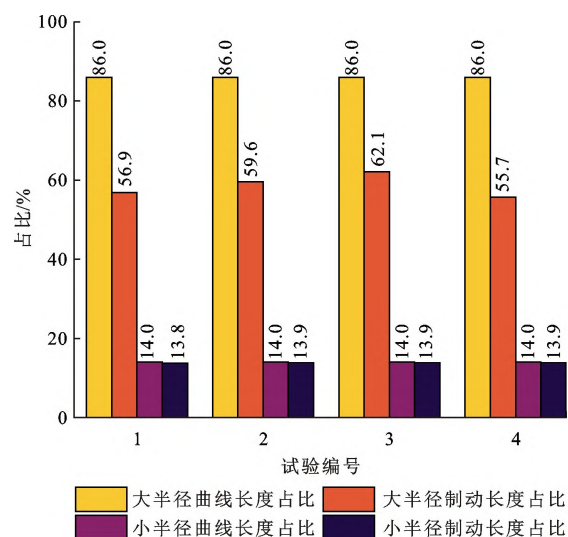


图 10 驾驶人制动占比分布

Fig. 10 Distribution of drivers' braking proportion

上不采取制动的路段占比为 $23.9\% \sim 30.3\%$, 平均值为 27.43% ; 在小半径路段上驾驶人采取制动行为的情况极小, 可近似认为驾驶人在小半径路段上采取全制动。

结合第 2.4 节中制动行为对温升的影响可知, 驾驶人在行驶过程中所采取的制动行为强度越高, 制动毂温度上升速度越快, 制动系统失效风险加剧, 故确定制动行为分布是计算纵坡设计可靠度的基础。对驾驶人在不同路段(大半径、小半径)的制动路段比率按照 $58.6\%、14\%$ 展开可靠度计算。

同时根据速度均值, 将重型货车通过小、大半径曲线路段的运行速度设为 $20、25\text{ km/h}$, 以不同车速分段计算低等级公路连续下坡路段全程的行驶时间, 从而计算制动时长。

(2) 路段占比

试验连续下坡路段小半径平曲线路段占比为 14% , 在 21.4 km 的连续下坡中存在总计 3 km 的小半径曲线路段, 即每千米包含 140 m 左右的小半径平曲线路段(图 11)。由第 2.4.2 节分析可知, 驾驶人在通过小半径曲线路段时受到平曲线影响会采取较强的制动行为, 而较强的制动行为势必会导致制动毂温升加速, 同时山区低等级公路连续下坡路段多位于地形条件复杂的重丘、山岭地带, 为了克服高差沿山体展线, 低等级公路的平曲线线形条件普遍较差, 小半径平曲线路段在低等级公路连续下坡路段普遍存在。

为了使研究具有普适性, 使设计人员在不同平曲线占比下灵活选用, 同时考虑小半径路段在

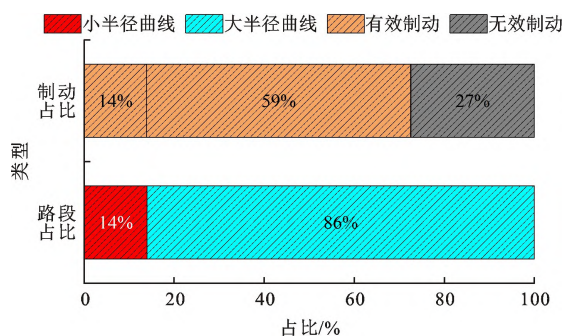


图 11 路段占比与制动占比示例

Fig. 11 Example of road section proportion and braking proportion
实际工程中的占比,选定小半径占比为5%、10%、14%(实车试验条件下)、15%、20%下的纵坡坡长进行可靠度仿真研究,同时制动时长由各个路段

的平均控制车速计算得到。

(3) 制动强度指数分布

根据第2.4.2节分析可知在低等级公路连续下坡中,在大半径-纵坡耦合路段中,驾驶人制动行为与温升特性会在 $i=3.0\%$ 时体现出差别,因此选取 $3.0\% \leq i \leq 6.0\%$,以 $i=0.5\%$ 为步长进行分析;同时小半径-纵坡耦合路段主要受到平曲线半径的影响,导致 B 分布较集中于高位,故将路段分类后,绘制各个纵坡坡度区间及小半径曲线段的 B_s 分布箱线图与正态曲线图,其中各个区间的分布包括左侧箱线图与右侧正态曲线图,正态曲线图由各个区间的 B_s 分布点及其分布趋势正态曲线组成,如图12所示。

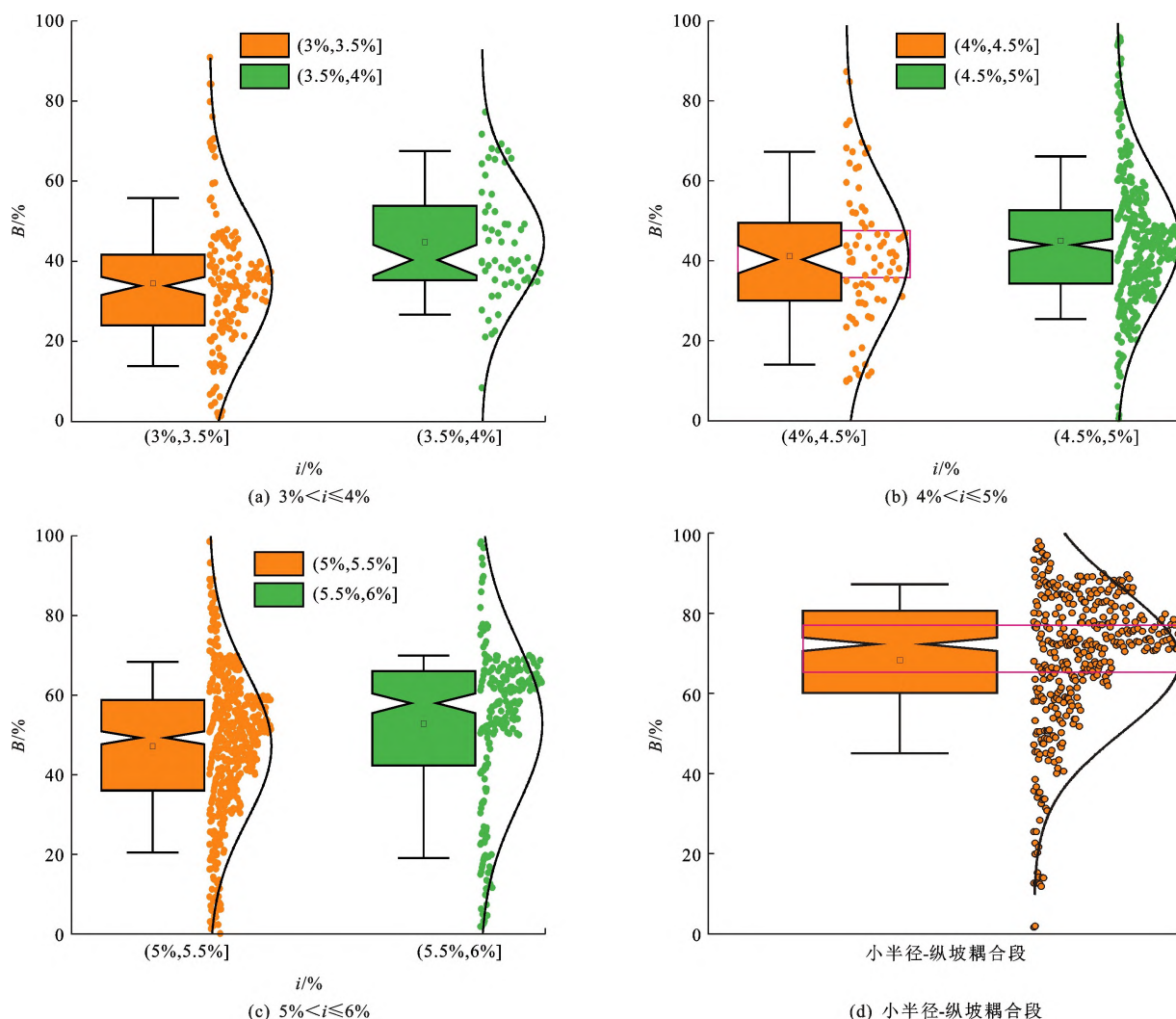


图 12 不同坡度及半径的制动强度指数分布

Fig. 12 Distributions of braking intensity index for different slope intervals and radii

由图12(a)、(b)、(c)可知:随着 i 的逐步增大,驾驶人的 B 呈上升趋势。同时,其数据分布呈现出中心集中、边缘分散的分布特征。由图12(d)

可知:小半径-纵坡耦合路段的 B 处于高位(72%左右),分布与其余路段情况类似。

为进一步探讨不同 i 条件下及小半径路段内

B 的分布特征,对多个坡度区间进行统计分析。以 $5\% < i \leq 5.5\%$ 为例,利用 Origin 软件对该区间内驾驶人 B 进行概率分布拟合,分别尝试正态分布、Gamma 分布、Weibull 分布与对数正态分布 4 进行拟合优度检验,但各分布均未能准确描述 B 的分布特性,这表明 B 可能具有更加复杂的分布特性,单一的经典分布难以准确刻画其规律。因此,使用单峰拟合模块对样本数据进行分析。得到 $5\% < i \leq 5.5\%$ 下的制动强度指数的 GaussAmp 分布拟合形式可表示为

$$J = 15.86 + 116.87e^{\frac{(B-50.79)^2}{277.54}} \quad (9)$$

基于上述分析方法,可推导出连续下坡路段不同坡度区间内驾驶人制动强度指数的统计分布特征,用来模拟可靠度模型中的变量分布情况。接下来对小半径-纵坡耦合路段的制动强度指数进行分布拟合,结果如图 13 所示。

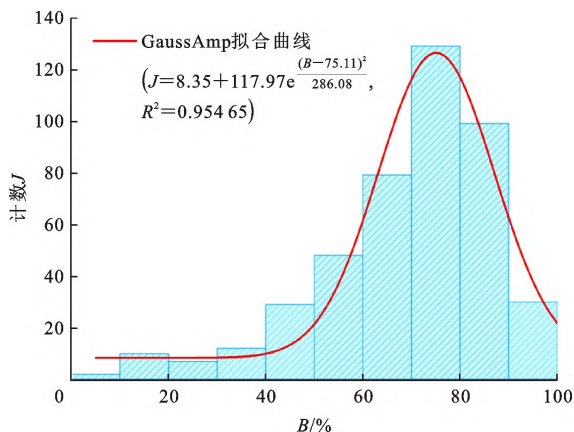


图 13 小半径-纵坡耦合路段制动强度指数分布

Fig. 13 Distribution of braking intensity index on small-radius and longitudinal slope coupling road section

3.2 基于蒙特卡洛仿真的可靠度模型求解

3.2.1 仿真流程构建

蒙特卡洛仿真是一种利用随机数和概率统计方法来模拟和分析复杂系统或不确定性问题的计算方法。它的核心思想是通过大量随机试验,估计系统行为、计算期望值或评估风险。本文中,利用蒙特卡洛仿真进行各个工况下制动安全风险的评估。考虑到不同半径对车辆运行速度具有显著影响,将其分为小半径与大半径路段,分别计算其对应的行驶时长,仿真计算的具体步骤如下:

(1) 设定仿真总次数为 5 000 次,初始制动毂温度统一设定为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 针对不同的平均纵坡坡度,输入相应的坡长长度、不同路段类型占比及 B 的概率分布模型。

(3) 在每次仿真中,依据各类坡度与不同路段类型,从其概率分布模型中随机抽取 B 。

(4) 将随机生成的 B 输入微观温度梯度模型中,计算制动毂在不同坡长下的温度。

(5) 判断计算温度是否超过临界安全温度 ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$):若未超过则视为安全状态,若超过则视为失效状态,同时记录此时的坡度与对应坡长。

(6) 重复上述过程直至完成全部仿真次数,并统计各坡长条件下安全状态所占比例,作为该平均纵坡下的制动行为可靠度。

3.2.2 可靠度仿真结果分析

将货车驾驶人在不同路段的制动行为占比按照图 11 中所示进行设定,此时选取小半径-纵坡耦合段占比分别为 5% 、 10% 、 14% (实车试验条件下)、 15% 、 20% ,相应的大半径-纵坡耦合段占比分别为 95% 、 90% 、 86% (实车试验条件下)、 85% 、 80% ,针对不同制动强度指数的分布特性及各坡度条件下的连续坡长,计算相应工况下的制动毂温度可靠度指标,如图 14 所示。由图 14 可知:

(1) 在不同平均纵坡条件下,随着连续下坡路段长度的增加及小半径曲线段所占比例的上升,重型货车的制动毂温度可靠度普遍呈下降趋势,表明其制动失效风险增大。

(2) 在相同平均纵坡条件下,小半径路段占比对制动毂温度可靠度的影响程度较大,当小半径路段占比由 5% 增加至 20% 时,可靠度随坡长增长呈非线性下降,且临界点随小半径路段占比的升高而提前。以平均坡度坡度为 5% 为例,当小半径路段占比从 5% 升至 20% 时,可靠度为 0 时各小半径占比下的坡长分别为 8.1 、 7.9 、 7.6 、 7.5 、 7.2 km ,小半径占比最小路段与占比最大路段坡长相差 11% ,反映出小半径路段在可靠度模型中的高敏感性。

(3) 在相同小半径路段占比条件下,随着平均坡度逐渐增大,导致制动毂温度可靠度开始下降,连续坡长距离也相应缩短。以小半径路段占比 20% 为例,当平均坡度由 3.5% 上升至 6% 时,可靠度为 0 时各平均坡度下的坡长分别为 13.6 、 10.5 、 8.8 、 7.7 、 6.5 、 5.6 km ,最大缩减比例达到 59% ,表明在坡度较大区域,坡长设计对安全冗余控制尤为关键。该模型可为山区低等级公路布设强制停车带、避险车道提供长度判定依据,并支持坡长-可靠度映射图谱的工程化生成。

(4) 图 14 中所得各可靠度与连续坡长均以实

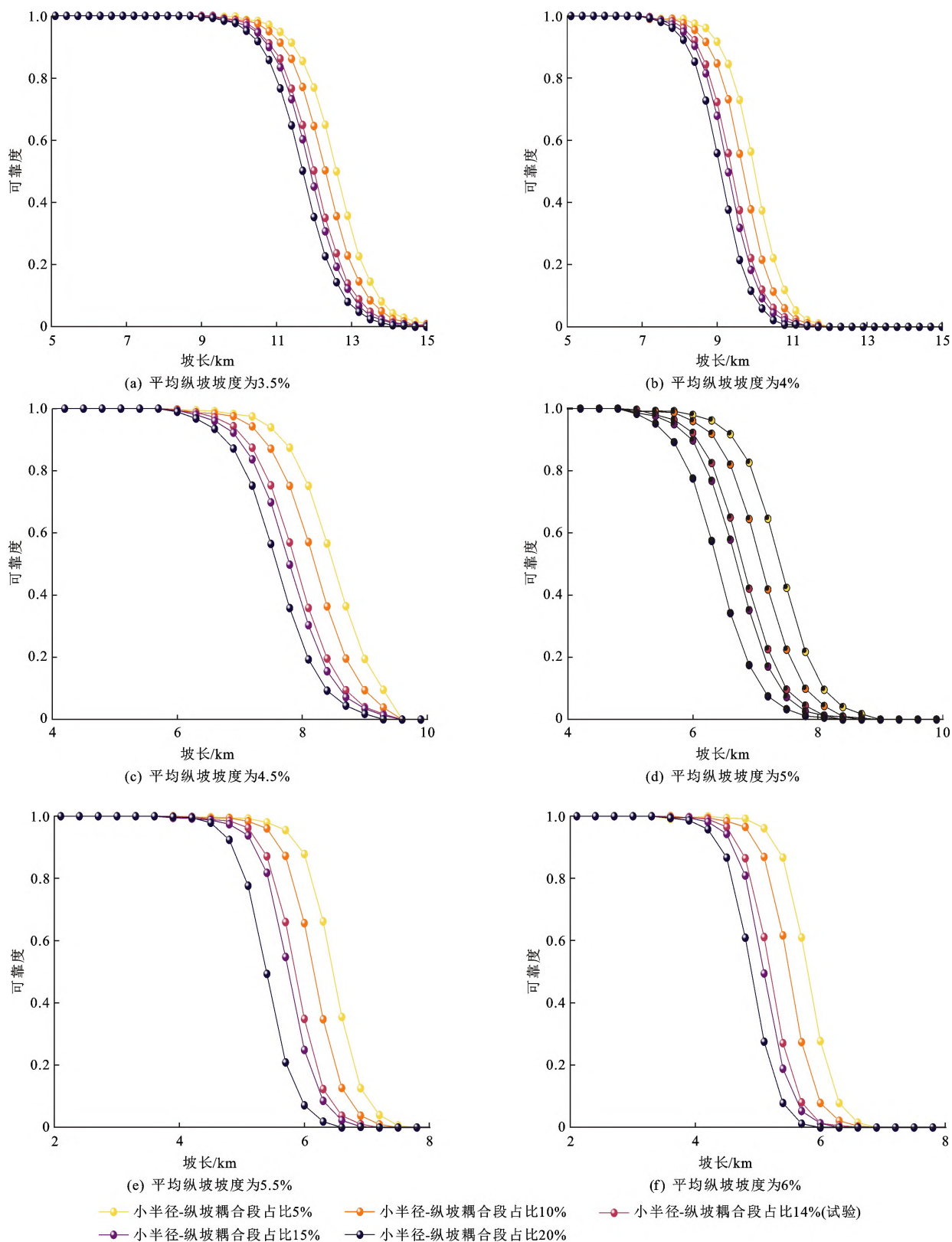


图14 不同坡度下的制动毂温度可靠度

Fig. 14 Reliabilities of brake drum temperature under different slopes

车试验相关数据为基础通过仿真计算得到,由于试验路段具有低等级公路连续下坡的典型特征,故得到的可靠度与纵坡坡度、坡长的关系具有一

定普适性。

3.2.3 临界坡长可靠性分析

为明确重型货车在不同纵坡路段的制动毂温

度可靠度指标选取依据,本文参考了《规范》中对结构可靠度等级的相关规定,将四级公路连续下坡路段所对应的目标可靠度设为 0.7,但由于货车发生制动失效后会造成严重损失,应该提高可靠度取值以提出较为保守的指标,因此根据低等级公路定义,本文选取可靠度指标为 0.8,针对上述仿真工况计算对应的临界坡长,并将结果与各平均纵坡条件下《规范》所规定的坡长进行对比分析。具体如图 15、表 6 所示。

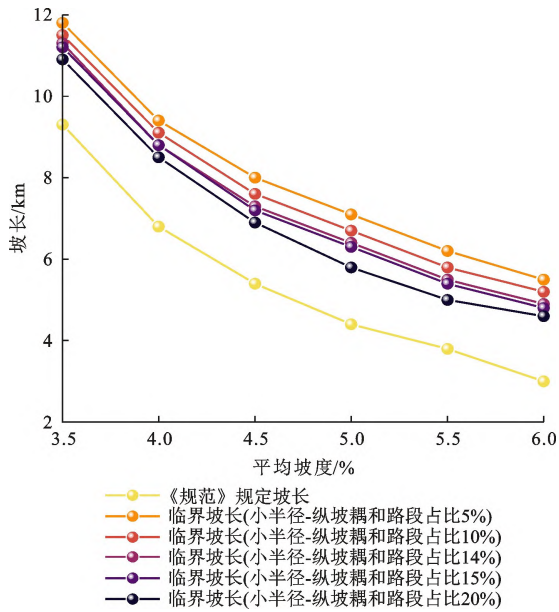


图 15 可靠度计算临界坡长与规范坡长对比

Fig. 15 Comparison of critical slope lengths from reliability calculation and specification slope length

表 6 可靠度为 0.8 下各坡度的仿真试验坡长

Table 6 Simulation test slope lengths for various slopes under a reliability of 0.8

平均坡度/%		3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
《规范》坡长/km		9.3	6.8	5.4	4.4	3.8	3.0
不同小半径-纵坡 耦和路段占比(%) 下的坡长/km	5	11.8	9.4	8.0	7.1	6.2	5.5
	10	11.5	9.1	7.6	6.7	5.8	5.2
	14	11.3	8.8	7.3	6.4	5.5	4.9
	15	11.2	8.8	7.2	6.3	5.4	4.8
	20	10.9	8.5	6.9	5.8	5.0	4.6

通过对比可以发现,《规范》中对连续下坡设计指标的规定相对保守,其主要有以下方面:

(1)《规范》第 8.3.5 条是针对高速公路和一级公路的平均纵坡坡度提出相应指标,其平纵线形较低等级公路更好,连续下坡驾驶过程中基本不考虑平曲线对驾驶行为的影响,但同时其运行速度较低等级公路更高,且行驶挡位较高,故其取值均小于本文基于可靠度计算出的临界坡长;

(2)《规范》第 8.3.4 条中以相对高差 500 m 为分界值计算极限工况,平均纵坡坡度为 5.5%时坡长为 9.1 km,而本文基于可靠度计算出的临界坡长为 5.9~6.2 km,普遍小于《规范》第 8.3.5 条所规定的高等级公路指标。这一差异主要源于《规范》设定未考虑小半径对制动行为的调控效应,也未引入驾驶人操作随机性所带来的温升放大机制。尤其在 $r \leq 65$ m 路段频现的山区公路中,《规范》仅以车辆动力学稳态为依据设定坡长,可能低估制动热负荷累积速率。本文提出的可靠度坡长可作为《规范》取值的下限校核标准,可为设计人员在具备冗余前提下进行基于风险的坡度优化提供量化参考。

由于本文所构建的下坡制动工况为关闭排气阀、缓速器及刹车淋水系统的极端工况,因此表 7 所列参考值仅具备推荐与检验意义,在满足《规范》第 8.3.4 条设计要求的基础上,应结合车辆自身缓速器配置情况以及具体工程条件,如布设服务区、加水站等配套设施,或加强限速、预警提示和强制检查等交通管控措施,进行综合考虑设计。

4 结 语

(1)驾驶人制动行为对路段线形具有显著响应差异。在 $r < 65$ m 时, B 与 r 呈明显负相关,反映出驾驶人在小半径弯道中需采用更强制的制动以控制横向稳定;而在大半径路段中, i 成为主要影响因素。这一趋势揭示了不同平纵组合条件下驾驶操作影响主导因素发生变化;

(2)制动行为与制动毂温升呈现多尺度耦合特征。宏观层面上, $i > 3\%$ 时,温升过程显著加剧,最大温度梯度达 $31.39\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;微观尺度下, B 与 G_T 保持稳定的二次函数关系。2 种尺度下均呈正相关性,说明制动操作在温升形成中起到主导驱动作用。这一机制验证了以 B 为核心进行制动毂温升建模的可行性;

(3)建立的可靠度模型可用于连续坡长的安全性检验与设计建议。基于驾驶行为-温升响应关系构建的蒙特卡洛仿真模型,可量化评估不同坡度及小半径占比组合下的坡长安全阈值。以 $i = 5.0\%$ 为例,小半径路段占比由 5% 增加至 20% 时,可靠度降为 0 的坡长由 8.1 km 缩短至 7.2 km,差异达 11%;在目标可靠度为 0.8 条件下所推导出的坡长参考值,较《规范》第 8.3.5 条中高等级公路指标更为保守,可更贴近山区低等级道路的实

际风险水平。

(4)本文根据在典型路段开展的实车试验,提出的连续下坡临界坡长相较于《规范》更加适用于地形复杂、线形条件差的山区低等级公路,以及高速铁路、水电站等大型基础工程的配套交通设施。本文构建的可靠度模型具有可参数化、易仿真等特点,可为低速道路的安全评估、交通设施布设、热失效预警系统等提供理论支撑。但由于试验客观条件受限,研究结果仅针对六轴铰接式列车这一车型,并且对于环境考虑尚存在欠缺。因此,在后续的研究中应扩大试验数据的采集范围,纳入更多车型,如轻型货车或不同类型的制动系统,并进行对比分析,了解不同车辆在低等级公路纵坡下的表现,以及其制动系统如何响应类似的路况。本文研究主要集中在道路纵坡、曲率与制动行为之间的关系,未来可以将其他道路设计因素纳入考量,如可见度、路面状况等,使安全性分析更加全面,进一步深入揭示制动毂温升的复合作用机理,提升研究结论的普适性和科学性。同时,基于考虑到驾驶人行行为在研究中的重要性,在工程实际中可以探索引入实时反馈系统的可能性。例如,设置一种系统,当驾驶人超出安全制动阈值或车辆制动温度接近临界值时,及时向驾驶人发出警报,这在山区连续下坡的情况下尤为有用,有助于提高道路安全性。

参考文献:

References:

- [1] 综合规划司. 2023 年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2024.
Department of Comprehensive Planning. Statistical bulletin of transportation industry development in 2023 [R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2024.
- [2] 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 Pei-long, LIU Rui, YU Qiang, et al. Heavy truck ramp operation safety monitoring system [J]. Technology Bulletin, 2015, 33(4): 104-110.
- [3] DE PELSMACKER P, JANSSENS W. The effect of norms, attitudes and habits on speeding behavior: Scale development and model building and estimation[J]. Accident Analysis & Prevention, 2007, 39: 6-15.
- [4] JOVANOVIĆ D, ŠRAML M, MATOVIĆ B, et al. An examination of the construct and predictive validity of the self-reported speeding behavior model [J]. Accident Analysis & Prevention, 2017, 99: 66-76.
- [5] REIMER B, DONMEZ B, LAVALLIÈRE M, et al. Impact of age and cognitive demand on lane choice and changing under actual highway conditions [J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 52: 125-132.
- [6] BANGSB O, JEN S. Effect of muscle acidity on muscle metabolism and fatigue during intense exercise in man[J]. The Journal of Physiology, 1996, 495(2): 587-596.
- [7] DAVIDSON P R, JONES R D, PEIRIS M T. EEG-based lapse detection with high temporal resolution[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2007, 54(5): 832-839.
- [8] 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 Li-wei, YIN Xiu-fen, ZHANG Su-hang, 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.
- [9] 徐 婷, 张 香, 张亚坤, 等. 基于 AdaBoost 算法的货车驾驶人安全倾向性分类[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1273-1281.
XU Ting, ZHANG Xiang, ZHANG Ya-kun, et al. Classification of truck drivers' safety propensity based on AdaBoost algorithm [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(4): 1273-1281.
- [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 Cun-shu, FU Jing-hou, 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] 熊 坚, 施锦浩, 万华森. 人车路综合风险场模型构建及驾驶风格评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(6): 105-114.
XIONG Jian, SHI Jin-hao, WAN Hua-sen. People-vehicle-road integrated risk field model construction and driving style evaluation [J]. Transportation System Engineering and Information, 2021, 21(6): 105-114.

- [12] 付元. 基于轨迹数据的异常驾驶行为与道路交通安全风险辨识方法[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
- FU Yuan. Abnormal driving behavior and road traffic safety risk identification method based on trajectory data[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023.
- [13] 邵宝平, 常世新, 赵建东. 数据驱动下交通异常行为的双层识别模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6257-6263.
- SHAO Bao-ping, CHANG Shi-xin, ZHAO Jian-dong. Data-driven double-layer identification model of traffic abnormal behavior[J]. Science and Technology and Engineering, 2023, 23(14): 6257-6263.
- [14] TOKUDA S, OBINATA G, PALMER E, et al. Estimation of mental workload using saccadic eye movements in a free viewing task [C]//IEEE. Proceedings of 2011 Annual International Conference of the IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society. New York: IEEE, 2011: 4523-4529.
- [15] HERNÁNDEZ L G, MOZOS O M, FERRÁNDEZ J M, et al. EEG-based detection of braking intention under different car driving conditions [J]. Frontiers in Neuroinformatics, 2018, 12: 29.
- [16] 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 handling characteristics and driving load of drivers on longitudinal slopes of mountain highways[J]. China Journal of Highways, 2018, 31(1): 91-100.
- [17] 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 Shuang-jie, et al. Simulation analysis of sideslip risk of bus braking behavior on curved sections of expressway[J]. China Journal of Highway, 2015, 28(12): 134-142.
- [18] 侯宇迪. 基于制动毂温升的高速公路连续下坡设计优化方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- HOU Yu-di. Research on optimization method of continuous downhill design of expressway based on brake hub temperature rise [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [19] 郭鑫. 山区高速公路避险车道选址研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- GUO Xin. Study on the site selection of highway escape lanes in mountainous areas [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [20] YAN M H, XU J L. Prediction model for brake-drum temperature of large trucks on consecutive mountain downgrade routes based on energy conservation law[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 33(1): 147-152.
- [21] 王志新. 基于汽车行驶安全特性的山区公路连续长大下坡路段辅助减速车道研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- WANG Zhi-xin. Research on auxiliary deceleration lanes in continuous long downhill sections of mountainous highways based on vehicle driving safety characteristics[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [22] 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. Summarization 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.
- [23] 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. Continuous downhill safety design method based on brake hub temperature rise[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(10): 139-150.
- [24] 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 Bing-hong, NIU Xiao, BAI Hao-chen, et al. Modification research on temperature rise model of truck brake hub in continuous downhill section of expressway[J]. Highway Transportation Technology, 2021, 38(9): 85-91.
- [25] 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 for long and steep downgrade section of expressway[J]. Transportation Engineering Journal, 2010, 10(3): 10-16, 40.

- [26] GAO C H, LIN X Z. Transient temperature field analysis of a brake in a non-axisymmetric three-dimensional model[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1/2/3): 513-517.
- [27] LEE K. Numerical prediction of brake fluid temperature rise during braking and heat soaking [J]. SAE Transactions, 1999, 108(6): 897.
- [28] 袁 燕,胡昌斌,沈金荣.山区公路长下坡路段货车鼓式制动器温升规律数值分析[J].福州大学学报(自然科学版),2009,37(6):895-904,928.
YUAN Yan, HU Chang-bin, SHEN Jin-rong. Numerical analysis of temperature rise law of drum brake in long downhill section of mountainous highway[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2009, 37(6): 895-904, 928.
- [29] AFOLAYAN A, ABIOLA S O, EASA S, et al. Reliability-based analysis of highway geometric elements: A systematic review[J]. Cogent Engineering, 2022, 9(1): 2004672.
- [30] 庄稼丰,许 多,王 锐.基于可靠度理论的高海拔连续下坡线形指标研究[J].公路交通科技,2023,40(4):209-215,227.
ZHUANG Jia-feng, XU Duo, WANG Rui. Research on linear index of continuous downhill at high altitude based on reliability theory[J]. Road Traffic Science and Technology, 2023,40(4): 209-215, 227.
- [31] 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 Ting-yu, HU Rui-lai, 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), 2025, 53(2): 12-26.