

公路长大下坡路段货车制动毂温升模型研究综述

张 驰^{1,2}, 侯宇迪¹, 杨 坤³, 秦际涵¹, 张 宏¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通基础设施建设与管理数字化工程研究中心;
陕西 西安 710064; 3. 深圳市综合交通设计研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要:为明确重载大货车制动毂温升模型的适用性及应用现状,对国内外货车制动毂温升模型研究进行了梳理。概述大货车制动毂温升机理,依据建模方法将现有制动毂温升模型分为理论分析模型、软件仿真模型和实测回归模型,重点论述 3 种模型的研究进展,分别从建模方法、建模主导车型和辅助制动措施等 3 个方面对模型研究现状进行分析评述。选取京昆(北京—昆明)高速公路雅安至西昌段 3 处长大纵坡作为试验路段,进行载重货车下坡试验,获取货车相关实测数据,绘制典型模型温升曲线和实测温升曲线,采用 SPSS 软件对其相关性及其误差进行对比,分析各模型适用性。研究表明:理论分析模型能更好反映实际行车条件下货车制动毂的温升态势,同时目前温升模型仍具有较大的研究与改善空间;今后应以半挂铰接货车为主导车型,进一步考虑平曲线、平纵组合、驾驶人制动行为特性及气候环境对制动毂温升的影响,并结合多种辅助制动方式深入研究其下坡制动特性和温升机理,进而构建人-车-路-环境耦合作用下的温升模型。未来可将温升模型深入应用于长大纵坡组合设计控制与优化、下坡通行管理和下坡安全风险评级等方面,以缓解中国高速公路长大下坡车路协同矛盾,全面提升长大下坡路段的交通安全水平。

关键词:交通工程;货车制动毂;综述;温升模型;长大下坡

中图分类号:U491.21

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.03.011

Review of brake drum temperature rise model for vehicle on long and steep downgrades of highway

ZHANG Chi^{1,2}, HOU Yu-di¹, YANG Kun³, QIN Ji-han¹, ZHANG Hong¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Transportation Infrastructure Construction and Management Digital Engineering Research Center, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3. Shenzhen Transportation Design and Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: To clarify the applicability and application status of a brake drum temperature rise model for heavy vehicles and to provide the basis for the safety of vehicle on long and steep downgrades of highway, related literatures had been summarized. The temperature rise mechanism of the brake drum of large vehicles were reviewed. According to the modeling method, the brake drum temperature rise models were divided into the theoretical analysis models, software simulation models, and measured regression models, and the research status of the model was analyzed. The characteristics of each modeling method, the dominant modeling

收稿日期:2019-02-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0803906);中国博士后科学基金项目(2016M590915);

陕西省自然科学基金研究计划项目(S2017-ZRJJ-MS-0603);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821172002)

作者简介:张 驰(1981-),男,四川宜宾人,副教授,工学博士,E-mail:zhangchi@chd.edu.cn。

model and the auxiliary braking measures were commented respectively. Three long longitudinal slopes of mountainous highway in Ya'an to Xichang section of Jingkun Highway (Beijing to Kunming) were selected as test sections, and the measured data were obtained of a downhill truck test. The temperature rise curves of typical mode and measured data were plotted, and the correlation and error were compared by SPSS, thus the applicability of each model was analyzed. The results show that the theoretical analysis model can better reflect the temperature rise in heavy vehicle under actual driving conditions, and the brake drum temperature rise model still can be further studied and developed. In the future, we should take the semi-hanging truck as the leading vehicle, with consider the influence of road curve, horizontal and longitudinal alignment combination, characteristics of driver braking behavior and climate environment on the temperature rise of brake drum. The braking characteristics of driver on downhill and temperature rise mechanism in combination with various auxiliary braking methods should also be studied, and then building the brake drum temperature rise model under the coupling effect of human-vehicle-road-environment. Finally, the brake drum temperature rise model can be deeply applied to the control and optimization of longitudinal slope design, the traffic management and the safety risk rating on downhill. These can alleviate the coordination contradiction between the road and vehicle in China, and improve the traffic safety levels. 4 tabs, 3 figs, 56 refs.

Key words: traffic engineering; brake drum of truck; review; temperature rise model; long and steep downgrade

0 引 言

近年来,随着一带一路战略的推进,中国西南、西北地区高速公路建设日益增多,但受其地形地质条件限制,公路需在较短路线内克服较大高差,导致公路设计中不可避免地采取一些极限指标,产生较多急弯陡坡路段,从而形成了连续长大纵坡。根据相关调查^[1-2],山区高速公路长大下坡路段交通事故频发,因货车制动失效而导致事故概率较高,造成的伤亡人数较多,其中泉州—南宁高速公路、漳州—龙岩高速公路等长陡下坡路段近5年来因制动失灵驶入避险车道的车辆多达上百辆,货车在连续长陡下坡的行车风险不容忽视。下坡过程中制动器温度过高引起的热衰退现象,是导致载重货车制动失效的直接原因^[3],也是近年来长大下坡路段重大交通事故频发的主要原因。基于以上现状开展相关研究与试验,研究制动毂温升机理和温度预测模型,已受到越来越多道路和车辆工程领域专家学者的关注。

国外研究起步较早,在制动毂温升机理、模型构建等方面开展了大量工作。Blook 等对制动器摩擦热及制动性能问题进行了研究^[4-5]。Gao 等通过有限元仿真程序,模拟计算了制动器的温度变化值^[6-7]。Bowman 等建立了制动毂温度变化与车辆

参数之间的函数关系模型^[8-9]。Eady 等根据行车动力学及热平衡建立了制动毂温升理论模型^[10]。中国在该领域的研究工作开展较迟,研究初期大多围绕汽车理论,关注制动毂热衰退机理及摩擦热计算,对模型构建有所涉及,但缺乏从交通工程角度,对道路线形、交通环境等温度影响因素进行分析。随后,部分学者从软件仿真和实车试验等多个角度对温度影响因素、温升规律及建模方法进行研究,建立了较多的温升模型,并应用于道路安保工程^[11-13]。

综上,国内外许多学者在该领域进行了深入探索,积累了较多成果,但研究方法繁多,基于不同方法建立的模型缺少对比与评价,道路设计及安全审计人员在选用时存在一定困难,长大下坡路段货车行车安全难以得到保障。为此,本文在系统梳理该领域研究成果基础上,概述货车温升机理,总结并评述制动毂温升建模方法,并基于实车试验相关数据,选取典型模型进行对比分析,最后综述温升模型在道路工程中的应用,给出该领域目前的研究状况以及发展趋势。

1 制动毂温升机理概述

中国大型货车常用主制动器为制动毂,制动毂的温升包括升温、降温2个过程,表面看是在货车主制动器作用下,由摩擦衬片与制动毂的摩擦导致,但

其本质是驾驶人在外界道路及环境条件刺激下,采取对应措施而产生的结果。因此,货车制动毂的温

升是人-车-路-环境多因素耦合作用下的结果,如图 1 所示。

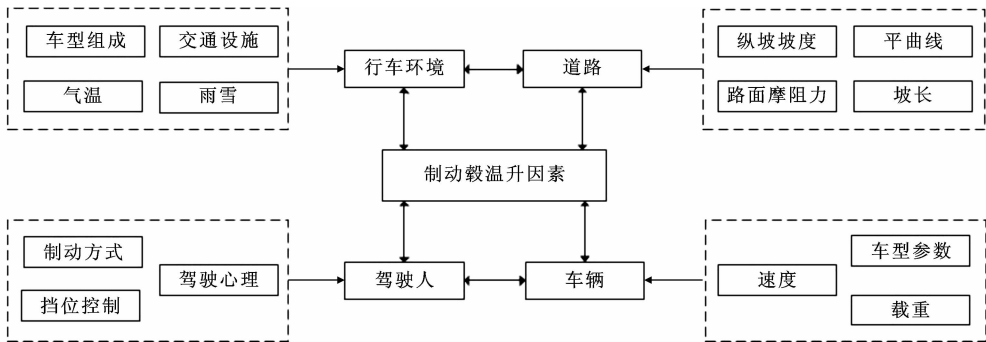


图 1 制动毂温升影响因素

Fig. 1 Factors affecting temperature rise of brake drum

车辆及驾驶人为行为是影响制动毂温度的直接因素,道路和行车环境可视为间接因素。目前对道路及车辆因素的研究较多,各研究均将纵坡作为主要参数,鲜有考虑平面线形或平纵组合,而平曲线因素对货车制动有重要影响;以半挂铰接货车为主导车型的研究忽视了牵引车转向运动及其与挂车间相互作用因素对制动毂温度的影响。此外,货车的车型参数、制动方式、载重等均与制动毂温度存在显著定量关系^[8-9,14-15];然而,在驾驶人及行车环境方面,尚未有学者进行深入研究,如辅助制动方式的选取、驾驶挡位的控制、交通设施的布置位置及间距等都会直接或间接的影响驾驶行为,目前,鲜有对以上几种因素的影响进行定性或定量的研究报道。

在上述因素的耦合作用下货车制动毂温度持续

上升,并随下坡距离的增加不断累积,制动毂摩擦衬片的摩擦因数先增大后减小,导致其摩擦性能下降,货车制动效能明显降低,发生热衰退现象。热衰退也是引起长大下坡路段货车制动失灵的主要因素,存在导致制动大概率失效的温度阈值^[16-17],当制动毂温度超过阈值时,其制动性能会发生大幅下降。因此,保障货车下坡行车安全的关键是制动毂温度不超过其阈值,构建制动毂温度预测模型意义重大。

2 制动毂温升模型研究评述

国内外开展货车制动毂温度预测研究已有十余年,所用方法较多。本文在总结大量文献及研究成果的基础上,按照建模方法将制动毂温升模型分为 3 类,即理论分析法、软件仿真法和实测回归法,各方法构建模型的流程如图 2 所示。

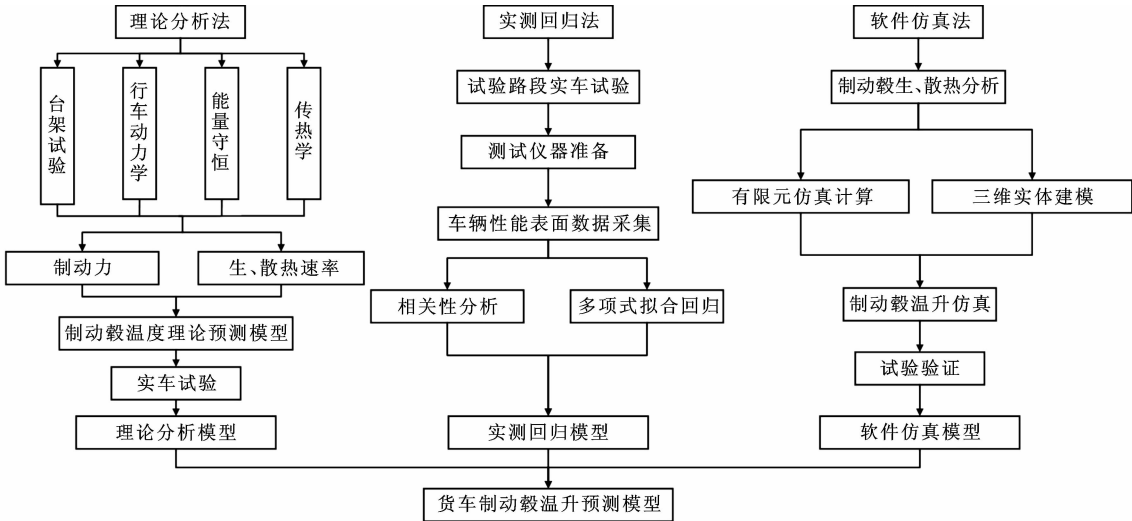


图 2 制动毂温升模型构建流程

Fig. 2 Modeling process of brake drum temperature rise models

2.1 理论分析模型

早期,国外学者主要根据热力学和摩擦学等理论进行制动毂温度建模分析,即以货车及其制动毂为对象,考虑多种制动工况条件,以牛顿第三定律、热力学第一、第二定律(包括能量守恒定律)为理论基础,或通过下坡货车整体势能转化进行计算,结合制动力的分配求得各轮毂温度;或通过单个轮毂进行受力分析,计算轮毂的生、散热量以求得温度变化量,中间过程的关键参数可通过试验确定。最后结合实车试验对模型进行标定,建立最终模型。

20世纪90年代,Limpert 等对数百起商用车事故进行调查和重建,提出了事故的速度测定、衰减预测等方法,并首次根据传热学理论探讨了制动毂的温度预测方法^[18]。FHWA(美国联邦公路管理局)在 Limpert 研究的基础上开发了 GSRS(下坡严重度分级系统),通过分析卡车制动系统和美国道路的坡度特性,初步建立了货车下坡力学平衡模型,随后采用热力学理论,结合5轴半挂货车试验获得的相关参数,建立了制动器温度预测模型,并结合制动器温度阈值来计算车辆在特定质量下的最大安全速度,作为坡度严重等级制定的依据^[19]。然而 GSRS 从未得到执行,FHWA 在2000年开发的交互式公路安全设计模型(IHSDM)中进一步发展了 GSRS 方法,并将其加入到 VDANL 模块中,实现参数化计算。此外,密西根大学交通研究所(UMTRI)对 Limpert 模型中的参数进行了标定及细化,进一步完善了该模型^[20]。

袁伟等考虑制动毂结构及原理,建立了制动毂生热模型,并分别通过台架试验和相似理论得到对流换热系数^[21-22];但其模型均未考虑辅助制动作用,且文献[21]未进行实测验证,文献[22]预测误差较大。苏波利用行车动力学和发动机台架试验,计算出制动器制动力和生热速率,结合传热学确定制动毂散热速率,建立了辅助制动条件下的温升模型,并通过实车试验对模型进行了修正,该模型考虑了中国货车常用制动方式及挡位使用情况^[23]。杜博英等在苏波研究的基础上引入运行速度,建立了变速制动器温度模型^[24]。贾伟分析了长下坡路段汽车的动力特性,通过对整车建立能量守恒公式得到了车辆的制动能量模型,结合传热学理论构建了温升模型,但其对模型的验证缺乏严谨性^[25]。

近年来,少数研究机构及学者根据货车发展趋势,选用六轴货车进行制动毂温升建模^[26-29];但文献[26]~文献[28]是依据能量守恒法计算整车温

度,并结合轮毂数得到平均轮毂温度,忽视了不同车轴制动力分配的差异;文献[29]分别建立了发动机制动、排气制动和电涡流缓速器等多种制动方式下的温升模型,但货车持续使用主制动器时,未考虑货车进行制动的临界条件,模型预测结果均与实际相差较大。同时上述研究均未考虑鞍座作用力等多体货车特有的动力学性能。

2.2 软件仿真模型

随着对制动毂摩擦生、散热等理论的研究深入,部分学者以制动毂为对象,采用软件仿真模拟方法建立了温升模型。该方法以传热学为理论基础,利用有限元分析软件划分有限个节点处连接单元,对制动毂温升进行多工况条件下的仿真热分析,采用数值模拟建立制动毂温升模型,并通过台架试验和道路试验进行验证。

毛智东等运用 ANSYS 软件对持续制动工况下制动毂进行分析,建立了制动毂三维温度场及三维应力场,但其利用有限元建模时手动划分模块存在较大误差^[30]。陈兴旺在采用 ANSYS 软件建立三维参数化制动毂模型的基础上,通过有限元模型在紧急制动、重复制动、持续制动3种工况下的仿真分析,得到长大下坡路段汽车制动毂温度场的变化规律,但未通过实车试验验证模型的有效性^[31]。杨东宇基于传热学理论,分析货车制动毂的生、散热机理,求解出对流换热系数,采用 Catia 软件构建东风 EQ1208 货车后桥制动毂三维实体模型,利用 ANSYS 对制动毂进行热分析,建立了制动毂有限元模型,并与路段实测温度进行对比,验证了该制动器有限元模型的准确性^[32]。

2.3 实测回归模型

为使模型更符合特定路段行车状况,研究人员以实测数据为主导构建了模型。该方法通常是通过选取试验路段及主导车辆,装载温度传感器、车载 GPS 等仪器,在良好的路面状况、天气和交通条件下进行试验。采用数理统计方法建立实测温度与道路线形指标、速度等变量之间的函数关系,并以此构建模型。

多数学者通过将各参数进行拟合回归建立模型。陈飞等根据实测结果,分析了无辅助制动下制动毂温度与载重、车速、坡长、坡度间的相关性,采用 Stepwise 法建立了线性回归温升模型^[33]。杨宏志等根据实测数据对制动毂温度与载重、车速、坡度、坡长等因素进行了回归分析,建立了不同的温升模型^[34-35]。但文献[34]是基于现场拦车试验,采集的

是多种车型温度数据,文献[35]是基于六轴半挂货车发动机辅助制动工况试验。

近年来,部分学者在实车试验基础上,结合相关理论进行拟合修正。顾永田等考虑下坡车辆能量转换,采集下坡试验或平地试验数据,采用回归分析法拟合得到温度与货车重力势能之间的函数关系,并建立制动毂温升模型^[36-37]。但文献[36]未考虑辅助制动,文献[37]的发动机制动力计算是基于平路试验。苏波等利用山区高速实车试验,对美国 GSRS 中的温度模型进行修正,通过修正后模型的预测温度与坡长、高差等因素进行拟合分析,推导出无辅助制动条件下温度与高差、坡长、坡度的关系模型^[38]。

2.4 综合分析及评述

2.4.1 建模方法评述

综上可知,国内外绝大多数研究均采用理论分析法建模,国外研究主要集中于美国,以 Limpert 模型和 GSRS 模型为代表, IHSDM-VDANL 和 UMTRI 模型均是对该模型的深化;澳大利亚也结合美国相关研究探索了铰接列车制动毂的温升特性,并进行了实车试验,而欧洲等国家均将上述典型模型应用于实际项目中。此外,中国学者还从有限元仿真以及实测回归分析层面进行了建模,各建模方法评述如下。

(1)理论分析法以行车动力学和热力学理论为基础,物理背景明确,具有一定普适性,但忽视了驾驶人因素及交通环境对制动毂温度的影响,因此需要结合台架试验或实车试验对模型进行标定与修正,以提高模型精度。修正后的模型既满足理论需求,也与实际行车状况较为相符。

(2)软件仿真法是在简化制动毂实体模型基础上,采用 ANSYS 等软件对制动过程中制动器的受力、传热分析及温度数值模拟。实际上制动毂属于三维复杂构件,利用有限元建模时的手动划分模块误差较大,同时仿真中对模型的简化和相关假设条件大大降低了模型的精度,且仿真难以结合实际路况数据,缺乏实用性。同时,ANSYS 软件对辅助制动工况下的有限元仿真难度极大,可操作性较低,即该方法难以进一步考虑排气制动等主流辅助制动方式,存在一定滞后性。

(3)实测回归法在近些年的研究中比较常见,该方法建立的模型更能反映特定路段制动毂温度的实际变化情况,通过对实测数据的拟合回归可减少路段交通环境等因素对模型的影响。但该方法对实车

试验的数据精度要求较高,且试验具有一定危险性。此外对直接拟合求得的温升模型缺乏足够的理论依据,在推广于其他工程区域,尤其是道路环境及交通量相差较大的路段时,可能产生较大误差,存在一定局限性。

以上 3 种建模方法各有侧重,在工程应用中,可根据实际需求及各模型特点选取建模方法。不同方法建立的典型模型的评价见表 1。

2.4.2 建模主导车型分析

除了建模方法选择,主导车型的确定也是模型是否准确适用的一大因素。郭腾峰等指出,大型半挂列车已经成为中国公路货运的最主要车型,货运车型大型化趋势显著,以往研究中采用的比功率在 8 kW/t 以上的车型已不能适应目前中国货运主导车型向 6 轴铰接列车发展的趋势^[39-40]。六轴铰接列车功率比在 5.12 kW/t 左右,其下坡制动性能明显小于以往公路纵坡设计采用的主导车型,加之中国大型载重货车的持续制动能力低、辅助制动装备落后等,新车与旧路适应性的矛盾显著,因此今后研究制动毂温升模型时需首先考虑主导车型的影响,在确定符合发展趋势主导车型的基础上进行建模。文献[18]~文献[38]研究受年代所限,其研究车型多为两轴、三轴单体货车,仅文献[26]~文献[28]、文献[35]的研究对象为六轴货车,但其建模方法仍存在较大局限性,多体车的铰接特性也未在其模型构建中有所体现。

2.4.3 辅助制动措施分析

货车辅助制动系统需根据实际情况进行选择。文献[40]指出,对于辅助制动系统,目前中国大型货车中使用发动机制动及排气制动系统较多,而国际上同类车型则装备了更先进、更稳定的电磁或液力缓速器系统等。相关研究也表明,受经济性等影响,液力缓速器、电涡流缓速器等缓速器系统在中国载重货车上仍未普遍使用^[41]。随着汽车技术的发展,货车辅助制动装置也在不断发展。文献[42]对电涡流制动等联合制动下的货车制动特性及制动毂温度进行建模,为今后基于液力缓速器等未来主流联合制动下的温升模型研究提供了参考。

大型货车下坡时常使用淋水器以降低轮毂温度,淋水降温是目前山岭区公路货车的必备辅助下坡措施。中国西南等地山区存在部分公路位于雪线以上,冬季常年积雪冰冻,在冰雪路段上采用淋水会加剧路面湿滑结冰,车辆制动距离增大,易造成严重交通事故。因此,考虑到制动毂温升模型的应用范

表 1 典型制动毂温升模型评述

Tab. 1 Evaluation of typical brake drum temperature rise models

方法	模型	公式模型	评述
理论分析法	GSRS 模型 ^[19]	$T=T_0+(T_a-T_0+\frac{1}{h_R A_{g2}}P_B)\left[1-\exp\left(\frac{KL}{v}\right)\right]$ <p>采用主制动器</p> $T=T_0+(T_a-T_0)\left[1-\exp\left(\frac{KL}{v}\right)\right]$ <p>不采用主制动器</p>	参考流体力学理论对制动毂进行了热力学建模,并首次提出了划分升降温的制动坡度阈值。模型中发动机制动功率等关键参数均是通过实地试验测得,考虑到国内外的车辆性能、交通环境、驾驶人习惯等存在较大差异,该模型在中国应用时需对参数重新标定
	方守恩模型 ^[23-24]	$T=(T_0-T_a)\exp\left(\frac{-h_RA_{g2}}{m_gc_g}t\right)+T_a\qquad i\leqslant i_0$ $T=\left(T_0-\frac{P_{bh0}+h_RA_{g2}T_a}{h_RA_{g2}}\right)\exp\left(\frac{-h_RA_{g2}}{m_gc_g}t\right)+\frac{P_{bh0}+h_RA_{g2}T_a}{h_RA_{g2}}\qquad i>i_0$	考虑了辅助制动,通过理论分析提出了不同工况下的临界纵坡度 i_0 ,由此建立的温升模型包括升温及降温两部分,与实际行车状况较为符合
	贾伟模型 ^[25]	$T=\frac{Q_{in}-Q_{out}}{m_gc_g}$	根据能量守恒法建立了不同工况下温升模型,关键参数皆通过实车试验求得,但试验采用的是中型客车,不具有代表性
软件仿真法	陈兴旺模型 ^[31]	有限元模型	分析了后轮紧急制动、重复制动、持续制动温升规律,同时验证了超载条件下的温升态势,但仿真中相关参数均是由经验公式求得
	杨东宇模型 ^[32]	有限元模型	未考虑制动器温升与整车制动效能之间的关系;同时对流系数的选择对有限元结果影响很大,该模型对流换热系数是通过经验公式求得
实测回归法	杨宏志模型 ^[34]	$T=-310.06+54.87\ln L+46.99\ln i+26.647\ln v+85.587\ln M$	采用断面观测法建立了多车温度下的回归模型,消除了环境及单车因素引起的误差,但仅能反映试验路段货车制动毂温度变化的平均态势,无法预测最不利工况温度
	郭忠印模型 ^[35]	$T=0.005H+\sum(0.992v-5.244i)L_j+T_0$	对单车发动机辅助制动工况下的制动毂温度进行了回归建模,但模型是基于货车 49 t 满载条件下建立的,也未进一步考虑制动挡位影响
	潘兵宏模型 ^[37]	$T_k=\alpha Q_z^2+\beta Q_z$ $T_f=\alpha(Q_z+Q_f)^2+\beta(Q_z+Q_f)$ <p>其中: $Q_f=F_B L\sqrt{1+i^2}$; $Q_z=Mgvti/\sqrt{1+i^2}$</p>	基于单车试验测得重力势能与温度的关系构建模型,考虑了不同挡位发动机制动的影响,但忽略了滚动阻力和空气阻力对能量转化的影响

注:为方便对比,将不同数学模型中相同意义的参数做了统一化处理,其中, T 为制动毂温度($^{\circ}\text{C}$); L 为坡长(km); i 为坡度(%); v 为运行速度(km/h); t 为下坡时间(s); M 为货车总质量(t); T_0 为制动毂初始温度($^{\circ}\text{C}$); T_a 为环境温度($^{\circ}\text{C}$); Q_f 为发动机制动力做功(J); F_B 为发动机制动力(N); Q_z 为下坡过程中重力的损失(J); K 为与 v 有关的系数; P_B 为制动力功率(kW); h_R 为制动毂对流换热系数; A_{g2} 为制动毂外表面面积(m^2); m_g 为制动毂质量(kg); c_g 为制动毂比热容; H 为纵坡间相对高差(m); L_j 为连续下坡第 j 个纵坡坡长(m); g 为重力加速度; α 、 β 为模型拟合参数; P_{bh0} 为后轮制动毂吸热速率(w); Q_{in} 为制动毂产生的热量(J); Q_{out} 为制动毂散失的热量(J); T_k 为空挡下坡时制动毂温度($^{\circ}\text{C}$); T_f 为发动机制动下坡时的制动毂温度($^{\circ}\text{C}$)。

围及适用性,虽有学者对淋水降温的效果进行了对比研究^[43-44],但少有对其进行建模分析。

3 制动毂温升模型适用性对比

3.1 试验条件

以东风天龙半挂铰接货车(DFL4251A15)为试验车型,选取京昆(北京—昆明)高速公路雅安至西昌段长大纵坡路段进行实车试验,获取货车运行速度、下坡时间和驱动轮制动毂内表面的温度变化值。该试验基于货车主制动器与发动机辅助制动的联合制动方式(全程关闭液力缓速器或电涡流缓速器),

在满载 49 t 条件下,通过联合制动(12 挡发动机制动)将车速控制在稳速状态。试验路段道路参数如表 2 所示。

表 2 连续长大下坡道路参数

Tab. 2 Road parameters of continuous long downhill

试验路段	桩号	高差/m	平均纵坡坡度/%
1 号连续下坡	K2118+340~K2093+800	625.65	2.91
2 号连续下坡	K2004+810~K1974+570	737.15	2.30
3 号连续下坡	K2019+740~K2030+900	321.68	2.22

3.2 模型选取与参数释义

相关文献表明,简单状态下的制动器有限元温度场模拟结果与实测结果相差较大,软件仿真建立的模型难以反映实际情况^[45];同时其建模及计算流程较为复杂,实用性较低。因此本文通过对比近年来应用率较高的理论分析和实测回归模型,选取了

同济大学郭忠印^[35]、方守恩^[23-24],长安大学杨宏志^[34]、潘兵宏^[37]和美国 FHWA^[19]建立的温升模型,分别命名为模型 1、模型 2、模型 3、模型 4 和模型 5。各模型参数取值状况见表 3。为使模型最大程度与试验条件相匹配,GSRs 模型、方守恩模型和潘兵宏模型仅考虑其最高挡发动机辅助制动工况。

表 3 模型参数取值
Tab. 3 Model parameter values

模型	模型原理	相同参数	差异参数
GSRs 模型 (模型 1)	① $M \frac{dv}{dt} = M \sin(i) - F_B - F_{NB}$ (等式右侧为车辆下坡所受各阻力之和) ② $m_g c_g T = Q_{in} - Q_{out}$	$T_0 = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1 号、2 号连续下坡)或 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3 号连续下坡); $T_a = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$M = 36.3\text{ t}$ $h_R A_{g2} = 0.100 + 0.002\text{ }08v$ $K = 1.23 + 0.025\text{ }6v$ $P_B = F_B v = (Mi - F_{NB})v$ $F_{NB} = 450 + 17.25v + 150/v$
方守恩模型 (模型 2)	① $M \frac{dv}{dt} = M \sin(i) - F_B - F_{NB}$ ② $\sum M_q = 0$ ③ $m_g c_g T = Q_{in} - Q_{out}$		$M = 40\text{ t}$ $h_R A_{g2} = 0.006\text{ }4 + 0.000\text{ }7v$ $m_g = 62\text{ kg}$ $c_g = 460\text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$
杨宏志模型 (模型 3)	$T = -310.06 + 54.87\ln L + 46.99\ln i + 26.647\ln v + 85.587\ln M$ 拟合回归		仅含整车质量、车速和纵坡线形参数,无差异参数
郭忠印模型 (模型 4)	$T = 0.005H + \sum (0.992v - 5.244i)L_j + T_0$		$M = 49\text{ t}$
潘兵宏模型 (模型 5)	① $T = \alpha(Q_z + Q_f)^2 + \beta(Q_z + Q_f)$ ② 多元回归分析		$M = 20.9\text{ t}$ $\alpha = 1.66 \times 10^{-13}$ $\beta = 3.33 \times 10^{-6}$ $F_B = 1.086(k_1 v^2 + k_2 v + k_3)$

注:差异参数一栏仅给出各模型中关键参数。其中: F_{NB} 为非制动阻力,包括空气阻力、滚动阻力和辅助制动系统的阻力等; k_1 、 k_2 、 k_3 为模型拟合参数; M_q 为驱动力矩。

由表 3 可知:GSRs 模型和方守恩模型均是基于行车动力学和热力学理论提出的,但 GSRs 模型是针对货车整体建模,通过发动机辅助制动力和行驶阻力(均通过试验得到)求解车辆匀速状态下所受制动力,进而求得制动系统输入功率及传热率,再根据热平衡方程推导模型;方守恩模型是针对单个轮毂建模,通过合力矩平衡及热对流理论求得制动毂的生、散热量,再根据热平衡方程推导模型,其中所需的行驶阻力是通过理

论计算求得。潘兵宏模型以能量守恒为基础,利用回归分析法求解制动力等中间参数,模型变量仅为道路线形及行驶速度。杨宏志模型和郭忠印模型是直接将温度与道路线形、速度进行回归建模。

3.3 模型适用性分析

将上述道路及车辆参数带入温升模型,绘制温升预测曲线和实测曲线,以验证典型制动毂温升模型的适用性,如图 3 所示。

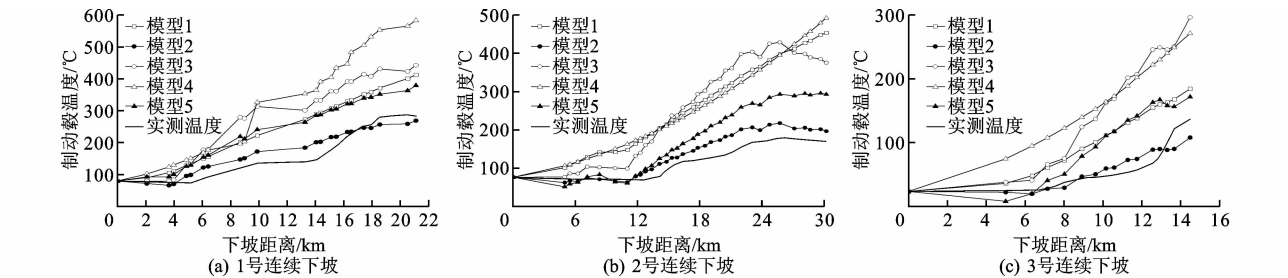


图 3 试验路段制动毂温升曲线

Fig. 3 Temperature rise curves of brake drum in test sections

将各坡段制动毂温度数据导入 SPSS 软件,用 Pearson 相关系数及其显著性表征各模型预测温度与实测温度之间相关性;用各预测温度与实测温度间温差绝对值的均值和极值表征各模型的误差水平。Pearson 相关系数、温差均值和温差极值共同显示了模型温度与实测温度之间的关联程度,如表 4 所示。

表 4 各模型关联程度判断
Tab. 4 Correlations between model temperatures and measured temperatures

分类	名称	Pearson 相关系数	显著性	误差水平	
				温差均值	温差极值
实测回归模型	模型 1	0.860	0.001	112.88	282.74
	模型 3	0.893	0.002	129.97	251.10
	模型 4	0.928	0.002	147.70	321.14
理论模型	模型 5	0.942	0.001	66.30	138.15
	模型 2	0.954	0.000	21.89	52.10

由表 4 可知:各模型的 Pearson 相关系数均高于 0.8,显著性均小于 0.01,各模型预测温度与实测温度相关性高度显著,表明各模型均能较好预测实测温度的温升趋势,通过理论分析法建立得到的模型预测温度更符合实测温升趋势;理论分析模型的温差均值及温差极值相对较低,表明其误差水平较低。理论模型预测温度与实测温度的关联程度更高,能较好预测实际行车状况下制动毂温度的变化情况。各模型精度的差异性可归结为以下几点。

(1)理论模型考虑了动力学及热力学条件,其模型包括车体结构、发动机性能、制动器和道路线形等多层变量,可根据实际道路及车辆条件进行修改;而实测回归模型仅以速度和道路线形作为变量,其车体结构等均视为影响因素赋予模型回归系数,因而当道路交通环境与试验环境差异较大时,其预测精度将大大降低。同时,理论模型考虑了车辆制动的临界条件,可对制动毂升、降温坡段进行较好判别,这体现在理论模型相对实测回归模型更能反映实际坡段的制动毂升、降温趋势。

(2)与 GSRS 模型相比,方守恩模型精度更高,这是由于 GSRS 模型是针对整车建模,计算的是各轴轮毂的平均温度,未考虑各轴制动力分配的不平衡性;方守恩模型是针对驱动轮建模,计算了单毂温度,而实测得到的也是驱动轮温度,因而精度较高。

综上,实测回归模型应用于不同车型及行车环境等条件的路段时,会产生较大误差,模型不具有普适性;基于理论分析方法建立的理论模型能较好反映实际货车温度变化情况,适用性较高。建议在实

际应用时优先考虑理论分析模型,并结合实际情况对模型进行修正与标定,进一步提高模型精度。此外,考虑到目前的制动毂温升模型均未考虑平面线形、驾驶人制动行为和交通环境等因素,而上述因素均是导致各模型预测温度与实测温度存在一定偏差的重要原因,因此应完善模型建模方法,将这些因素也纳入变量范围。

4 制动毂温升模型在道路工程中的应用

中国现行道路标准和规范中的设计指标主要从汽车动力特性的角度考虑,少有考虑制动温度的设计指标。《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)中虽根据六轴铰接货车的制动毂临界温度给出了长大下坡路段安全临界坡长,但该指标为宏观性界定指标,未能充分发挥温升模型在道路设计中的作用。由于制动毂温度主要与坡度、坡长等道路条件有关,因此在道路设计以及道路安全性评价领域中,制动毂温升模型得到广泛应用,主要表现在以下几个方面。

(1)避险车道选址。当载重车辆制动毂温度达到临界失效值时,应设置避险车道分流失控车辆,避免车辆发生追尾、冲出路基等事故。Abdelwahab 等分析了制动毂温度预测结果,对达到制动毂温度临界值的路段进行避险车道设置可行性研究,结合运行速度等方法提出了避险车道的设置原则^[37,46-47]。同时,道路安全审计人员可利用温升模型对已建成的避险车道进行安全性评价^[48-49]。

(2)长大下坡纵坡安全设计。潘兵宏等利用制动毂温升模型中温度与坡度、坡长的函数关系,代入极限参数反算出极限条件下的坡度、坡长和平均纵坡坡度值,作为道路设计中的极限安全指标^[50]。杜博英等通过构建温升模型对长大下坡纵坡组合设计方法进行了研究^[51-53],该研究对连续下坡纵坡的设计及优化具有较大意义。

(3)货车下坡速度控制。根据温度与行车速度之间的函数关系,对下坡车速控制进行定量研究。梁国华等以制动毂温度作为约束条件,通过加权平均方法得到了货车最优限速值^[54]。由于实际行车环境的复杂性,基于温升模型的长大下坡限速值有待进一步研究,可进一步应用于客货分线等交通管理措施中。

(4)下坡安全风险评价。廖军洪在建立货车制动器温度模型的基础上,提出了长大下坡安全区段

划分、安全风险分级指标和评价方法^[55]。潘兵宏等根据临界温度建立了连续下坡路段安全保障体系,并划分了安全等级,对不同等级路段应布设不同的交通标志、减速带等安全保障设施^[37]。雷斌等根据运行速度限制值及制动毂温度,对连续下坡的危险度进行了分级^[56]。

5 结 语

(1)综述了货车制动毂温升机理,得出目前对温升因素的研究主要集中在车辆和道路条件,对驾驶人行行为和交通环境少有涉及。随着中国道路信息化水平的提高和行车环境趋于复杂化,交通环境和驾驶人行行为将成为模型考虑的重要因素。

(2)从理论分析、软件仿真和实测回归 3 个方面对制动毂温升建模方法进行了评述,对比分析了各模型的优缺点,并提出目前制动毂温升模型存在的问题:未考虑平面线形,研究车型不合理,建模方法不完善,对辅助制动方式的考量较落后等。

(3)在山区高速公路实车试验的基础上,对比了典型模型预测温度与实测温度,指出理论模型相比其他 2 种模型能更好反映货车制动毂实际温度变化情况。同时,平面线形、驾驶人制动行为、交通环境等均是导致各模型预测温度与实测温度存在一定偏差的重要因素,后续应完善模型建模方法,将这些因素纳入变量范围。此外,大多数模型只适用于已建道路,且需通过实车试验进行修正,以消除由于地区性差异等因素造成的误差,既增加了经济成本,也难以体现制动毂温升模型在道路设计及安全保障中的前瞻作用。

(4)本文提及的现有模型缺陷为今后基于人-车-路-环境耦合作用下的温升模型理论研究指明了方向。在道路方面,应进一步考虑平曲线及平纵组合对制动毂温升的影响;在车辆方面,需以六轴铰接货车为主导车型,考虑其鞍座作用力、转向运动等多体车动力学特性,结合多种辅助制动方式对其下坡制动特性、温升机理做进一步分析;在驾驶人因素与环境方面,可从定量角度深入研究基于驾驶人行行为特性及行车环境的制动毂温升规律,主要考虑驾驶人制动方式的规律性。以完善目前模型假定车辆以恒速通过发动机持续制动下坡的缺陷,考虑雨雾、冰雪等影响,以完善目前模型多单一环境假设的缺陷。在此基础上针对不同区域的气候特点、车型比例等,引入相关区域修正系数,完善现有模型。

(5)制动毂温升模型在道路工程中具有重要作

用,对于新建公路,可在设计阶段优先采用理论分析模型优化道路线形,对事故易发路段进行预测和识别;当区域内相似环境路段已通过实地试验进行了回归建模时,可考虑应用实测回归模型。对于运营公路,宜通过路段实测以标定理论分析模型,为避险车道的增设、货车通行速度管理提供重要参考。此外,还可通过模型对公路连续下坡全寿命阶段的风险评价与管理提供依据。制动毂温升模型的研究,对缓解中国高速公路长大下坡路段车路协同矛盾、提升长大下坡交通安全保障水平具有重要意义。

参考文献:

References:

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 2017[M]. 北京:中国统计出版社,2017.
National Statistical Bureau of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2017[M]. Beijing: China Statistics Publishing House,2017.
- [2] 陈 斌,袁 伟,付 锐,等. 连续长大下坡路段交通事故特征分析[J]. 交通运输工程学报,2009,9(4): 75-78,84.
CHEN Bin, YUAN Wei, FU Rui, et al. Analysis of traffic accident characteristic on continuous long downgrade section[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2009,9(4):75-78,84.
- [3] YEVTUSHENKO A A, KUCIEJ M, YEVTUSHENKO O. Modelling of the frictional heating in brake system with thermal resistance on a contact surface and convective cooling on a free surface of a pad[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015,81:915-923.
- [4] BLOK H. The flash temperature concept[J]. Wear, 1963,6(6):483-494.
- [5] MAJCHERCZAK D, DUFRENOY P, BERTHIER Y. Tribological, thermal and mechanical coupling aspects of the dry sliding contact[J]. Tribology International,2007, 40(5):834-843.
- [6] 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.
- [7] LEE K. Numerical prediction of brake fluid temperature rise during braking and heat soaking[J]. SAE Transactions,1999,108(6):897-902.
- [8] BOWMAN B L. Grade severity rating system (GSRS)—Users manual[R]. Washington DC:Federal Highway Administration (FHWA),1989.

- [9] OLESIAK Z, PYRYEV Y, YEVTUSHENKO A. Determination of temperature and wear during braking[J]. *Wear*, 1997, 210(1/2): 120-126.
- [10] EADY P, CHONG L. Advanced systems for managing heavy vehicle speed on steep descents[R]. Sydney: Austroads, 2015.
- [11] 周荣贵, 徐建伟, 吴万阳, 等. 公路连续下坡路段的纵断面控制指标研究[J]. *公路*, 2004(6): 46-51.
ZHOU Rong-gui, XU Jian-wei, WU Wan-yang, et al. Study on vertical section control index of highway continuous downhill road[J]. *Highway*, 2004(6): 46-51.
- [12] 王 静. 鼓式制动器温升特性台架试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
WANG Jing. Experimental study on temperature rise performance of drum brake[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [13] 吴谋亮. 鼓式制动器在不同制动工况下的热力耦合分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
WU Mou-liang. The thermal-structure coupling analysis of drum brake on different braking conditions[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [14] 吴振宇. 从车辆制动系热性能分析公路长下坡设计合理性[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
WU Zhen-yu. Analyzing the design rationality of long and steep downhill road from thermal of vehicle brake system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [15] 柳 毅. 基于车路耦合安全评价模型的山区公路纵向设计理论研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
LIU Yi. Research of mountain area road longitudinal design theory based on vehicle-road coupling safety evaluation model[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [16] 薛 刚, 胡立伟, 孙亚南, 等. 模拟长下坡连续制动的中型货车鼓式刹车系统温度阈值分析[J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2015, 39(5): 1069-1072, 1078.
XUE Gang, HU Li-wei, SUN Ya-nan, et al. Analysis of the temperature thresholds of medium-sized truck's drum brake system based on simulative continuous brake in the continuous long down hill[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering*, 2015, 39(5): 1069-1072, 1078.
- [17] 王 佐, 忠 宁, 江 洪, 等. 欧洲高速公路长大纵坡设计技术[J]. *公路*, 2008(9): 58-61.
WANG Zuo, ZHONG Ning, JIANG Hong, et al. Design technology of long and longitudinal slope in European expressway[J]. *Highway*, 2008(9): 58-61.
- [18] LIMPET R, ANDREWS D F. Analysis of truck braking accidents[J]. SAE Paper 00427153.
- [19] BOWMAN B L, COLEMAN J A. Grade severity rating system[J]. *ITE Journal*, 1990, 60(7): 19-24.
- [20] FANCHER P, WINKLER C, CAMPBELL M. The influence of braking strategy on brake temperatures in mountain descents [R]. Washington DC: Federal Highway Administration (FHWA), 1992.
- [21] 袁 伟. 鼓式制动器温升计算模型及其应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2000.
YUAN Wei. Study on calculation model of drum brake temperature rise and its application[D]. Xi'an: Chang'an University, 2000.
- [22] 郭应时, 袁 伟, 付 锐, 等. 鼓式制动器温升计算研究[J]. *汽车技术*, 2006, 6(6): 8-10.
GUO Ying-shi, YUAN Wei, FU Rui, et al. The temperature rise calculation and research of drum brake[J]. *Automotive Technology*, 2006, 6(6): 8-10.
- [23] 苏 波. 大货车持续制动性能与山区高速公路纵坡优化设计研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
SU Bo. Study on the continuous braking performance of large freight cars and the optimization design of freeway in mountainous area [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [24] 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.
- [25] 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.
JIA Wei. Research of relationships between brake temperature rise and mountainous road parameters or vehicle condition[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [26] COLEMAN M. Use of auxiliary brakes in heavy vehicles[R]. Sydney: Austroads, 2014.
- [27] 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. Research on the selection method of truck escape ramps on mountainous expressway [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [28] YAN M, XU J. 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.
- [29] 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. Study on the auxiliary deceleration lane in long and steep downhill sections on mountain road based on the vehicle driving safety features[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [30] 毛智东, 王学林, 胡于进, 等. 鼓式制动器接触分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2002, 7(30): 71-73.
- MAO Zhi-dong, WANG Xue-lin, HU Yu-jin, et al. Contact analysis of drum brake[J]. Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2002, 7(30): 71-73.
- [31] 陈兴旺. 鼓式制动器制动温度场的研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
- CHEN Xing-wang. Study on the braking temperature field of drum brake[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [32] 杨东宇. 鼓式制动器热分析及冷却装置研究[D]. 威海: 哈尔滨工业大学(威海), 2011.
- YANG Dong-yu. Thermal analysis and cooling device research on drum brake[D]. Weihai: Harbin Institute of Technology, Weihai, 2011.
- [33] 陈飞, 戈若愚, 左仁广, 等. 长大下坡路段重型车辆刹车毂温度预测模型研究[C]//中国科学技术协会. 第十一届中国科协年会论文集(3). 北京: 中国科学技术协会, 2009: 211-217.
- CHEN Fei, GE Ruoyu, ZUO Renguang, et al. Research on prediction model of brake drum temperature at long and steep downgrades[C]//Chinese Association of Science and Technology. Proceedings of the 11th Annual Conference of China Association of Science and Technology (3). Beijing: Chinese Association of Science and Technology, 2009: 211-217.
- [34] 杨宏志, 胡庆谊, 许金良, 等. 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, et al. Safety design and evaluation method of long-steep downgrade sections for expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 10-16, 40.
- [35] 陈立辉, 郭忠印. 基于辅助制动长大下坡路段鼓式制动器温升预测模型[J]. 交通科技, 2017(2): 4-6.
- CHEN Li-hui, GUO Zhong-yin. Prediction model of drum brake temperature rise based on auxiliary braking[J]. Transportation Science & Technology, 2017(2): 4-6.
- [36] 顾永田. 车辆长大下坡持续制动制动鼓温升试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- GU Yong-tian. The experimental research on the temperature rise of drum brake continuance brake in long downhill mountains[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [37] 潘兵宏. 山区高速公路平均纵坡研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- PAN Bing-hong. Study on average longitudinal slope of highway in mountainous area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [38] 苏波, 方守恩, 王俊骅, 等. 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 Shou-en, WANG Jun-hua, et al. 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, 2009, 28(2): 287-289, 297.
- [39] 郭腾峰, 张志伟, 刘冰, 等. 适应 6 轴铰接列车动力性的高速公路最大纵坡坡度和坡长[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(3): 34-43.
- GUO Teng-feng, ZHANG Zhi-wei, LIU Bing, et al. Maximum grade and length of longitudinal slope adapted to dynamic performance of six-axis articulated vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(3): 34-43.
- [40] 郭腾峰. 长大纵坡安全与车路协同矛盾探究[J]. 中国公路, 2018(2): 62-65.
- GUO Teng-feng. Study on the conflict between the long longitudinal slope safety and vehicle road synergy[J]. China Highway, 2018(2): 62-65.
- [41] 付凤吉, 陈小五. 浅析重卡缓速器的发展趋势[J]. 汽车实用技术, 2017(24): 1-2.
- FU Feng-ji, CHEN Xiao-wu. Analysis of the development trend of heavy truck retarder[J]. Automobile Technology, 2017(24): 1-2.
- [42] 史培龙, 余强, 余曼, 等. 重型商用汽车长下坡制动器升温模型研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(1): 147-152.
- SHI Pei-long, YU Qiang, YU Man, et al. Research on brake heating model for heavy-duty truck on long downhill[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(1): 147-152.
- [43] 王恒凯. 商用车持续制动装置对我国山区高速公路适应性研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- WANG Heng-kai. Adaptive research on endurance

- braking systems of commercial vehicle in mountainous express way[D]. Xi'an:Chang'an University,2012.
- [44] 王剑波.雅西高速公路51 km长下坡典型货车运行安全测试研究[D].西安:长安大学,2013.
- WANG Jian-bo. Study on safety test of typical freight car in 51 km long downhill of Ya'xi Expressway[D]. Xi'an:Chang'an University,2013.
- [45] 胡昌斌,金 荣,陈友杰,等.长下坡路段货车鼓式制动器摩擦衬片温升规律[J].交通运输工程学报,2009,9(4):49-55.
- HU Chang-bin,JIN Rong,CHEN You-jie,et al. Temperature-rising laws of drum brake pad for truck on long downgrades[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2009,9(4):49-55.
- [46] ABDELWAHAB W, MORRAL J F. Determining need for and location of truck escape ramps[J]. Journal of Transportation Engineering,1997,123(5):350-356.
- [47] WHITEFORD D K. NCHRP Synthesis 178: Truck escape ramps[R]. Washington DC: Transportation Research Board,1992.
- [48] 谢宗运,胡 浩,窦健珍,等.百罗高速公路避险车道安全性评价与建议[J].公路,2012(10):34-37.
- XIE Zong-yun,HU Hao,DOU Jian-zhen,et al. Safety evaluation and suggestion on the safe lane of the Bai-luo Freeway[J]. Highway,2012(10):34-37.
- [49] 杨 林.雅泸高速公路雅安至九襄段公路安全性评价[J].西南公路,2007(2):20-22.
- YANG lin. Safety evaluation of Ya'an to Jiuxiang section of Yalu Expressway[J]. Southwest Highway,2007(2):20-22.
- [50] 潘兵宏,杨少伟,赵一飞.山区高速公路长大下坡路段界定标准研究[J].中外公路,2009,29(6):6-10.
- PAN Bing-hong, YANG Shao-wei, ZHAO Yi-fei. Study on defining standard of long and downhill sections of expressway in mountainous area[J]. Journal of China and Foreign Highway,2009,29(6):6-10.
- [51] 杜博英,何 斌.采用制动器热衰减评价公路长大纵坡安全设计的可行性研究[J].公路,2015(1):124-128.
- DU Bo-ying, HE Bin. Feasibility study on evaluating safety design of highway long longitudinal slope by using brake thermal attenuation[J]. Highway,2015(1):124-128.
- [52] 廖军洪,邵春福,邬洪波.考虑制动器温度的连续长大下坡纵坡设计方法[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(12):114-119.
- LIAO Jun-hong, SHAO Chun-fu, WU Hong-bo. Design methods for long steep downgrades considering of brake temperature of truck[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2014,46(12):114-119.
- [53] 王 莎,夏润东,刘 学,等.长大纵坡路段重型车辆动荷载研究[J].筑路机械与施工机械化,2013,30(8):53-57.
- WANG Sha,XIA Run-dong,LIU Xue,et al. Study on dynamic load of heavy vehicle in long and steep longitudinal slope section[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2013,30(8):53-57.
- [54] 梁国华,钱国敏,李 瑞.基于安全与效率的交通事件下高速公路长大下坡限速值[J].中国公路学报,2015,28(5):117-124.
- LIANG Guo-hua,QIAN Guo-min,LI Rui. Speed limit value based on safety and efficiency for long and steep downhill of expressway under traffic incident[J]. China Journal of Highway and Transport,2015,28(5):117-124.
- [55] 廖军洪.高速公路连续长大下坡路段线形优化理论与方法研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- LIAO Jun-hong. Research on highway alignment optimization methods of long steep downgrades on expressway[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2016.
- [56] 雷 斌,许金良,辛 田.重载交通区连续下坡坡度危险度分级研究[J].中国公路学报,2013,26(6):53-58.
- LEI Bin,XU Jin-liang,XIN Tian. Study on heavy traffic area risk levels classification in continuous downhill slope section[J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(6):53-58.