第 44 卷　第 1 期
2024 年 1 月

长安大学学报(自然科学版)
Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)

Vol. 44　No. 1
Jan. 2024

张　驰,王　韩,富志鹏,等. 山区高速公路长大下坡路段缓坡设计指标[J]. 长安大学学报(自然科学版),2024,44(1):1-12.
ZHANG Chi,WANG Han,FU Zhi-peng,et al. Gentle slope design indexes of long downhill in mountainous expressway[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2024,44(1):1-12.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.01.001

山区高速公路长大下坡路段缓坡设计指标

张　驰[1],王　韩[1],富志鹏[2],侯宇迪[3],白浩晨[2]

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075;
3. 广州市市政工程设计研究总院有限公司,广东 广州 510095)

摘　要:为了明确中国山区高速公路长下坡缓坡设计指标,在汽车动力学理论的基础上,以六轴铰接列车为主要研究对象,剖析其以发动机辅助刹车方式长下坡时的货车加速特征与制动毂散热特征。首先,建立力学平衡方程,构建挡位-速度-临界坡度模型,求解不同速度和挡位条件下的缓坡临界坡度值。然后,进一步考虑中国高速公路设计控制条件与货车行驶特性,以 12 挡和 11 挡时对应的临界坡度作为高速公路缓坡设计控制指标,提出连续下坡缓坡设计指标与方法;最后,以进入缓坡速度 70 km/h 为例,对比基于降速及降温特性得到的缓坡坡长指标,并结合西南某山区高速公路进行方案设计优化及优化效果分析。研究结果表明:连续长下坡路段之间设置缓和坡段有助于制动毂降温,恢复货车制动性能;基于速度特性得出了速度折减值 10 和20 km/h不同缓坡坡度下的缓坡坡长值;基于降温特性求解的缓坡坡长以制动毂失效温度260 ℃为最不利条件,并得出了不同运行速度及温度折减值;基于降速特性得到的缓坡坡长值对纵坡设计具有指导意义,而基于降温特性得到的缓坡坡长值相对较大,不宜作为设计参考但可作评价研究,并整理得到连续长下坡缓坡设计-评价流程,以西南山区某高速公路为实例分析发现,对缓和纵坡的坡度与坡长合理取值能有效改善制动毂温度,提升连续长下坡路段车辆的行驶安全性。

关键词:道路工程;缓坡设计;试验研究;货车下坡特性;连续长下坡路段;制动毂温度

中图分类号:U412.33　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-8879(2024)01-0001-12

Gentle slope design indexes of long downhill in mountainous expressway

ZHANG Chi[1], WANG Han[1], FU Zhi-peng[2], HOU Yu-di[3], BAI Hao-chen[2]

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510095, Guangdong, China)

Abstract: In order to clarify the design criteria for extended downhill grades on mountainous highways in China, with a primary focus on articulated six-axle trucks, an analysis was conducted based on the principles of vehicle dynamics. The acceleration characteristics of trucks descending long slopes was examined, using engine-assisted braking and the heat dissipation characteristics

收稿日期:2023-08-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600103,2021YFB2301602);四川省科技计划项目(2022YFG0048);四川省交通运输科技项目(2019-ZL-12,2022-ZL-04);陕西省自然科学基础研究计划项目(2023-JC-YB-391)

作者简介:张　驰(1981-),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhangchi@chd.edu.cn。

of brake hubs. Initially, mechanical equilibrium equations were formulated, and a gear-speed-critical gradient model was developed to determine the critical gradient for gentle slopes under various speed and gear conditions. Subsequently, considering the design constraints of highways in China and the operational characteristics of trucks, the critical gradients corresponding to the 12th and 11th gears were adopted as the control indicators for highway gentle slope design. The design criteria and methods for continuous downhill and gentle slope sections were proposed. Finally, utilizing an entry speed of 70 km/h as an example, a comparison was made between the gentle slope length criteria obtained based on speed reduction and temperature reduction characteristics. Additionally, an analysis was performed, combining the results with an optimized design of a highway in the Southwestern Mountainous Region. The results show that introducing gentle slope sections between continuous long downhill segments contributes to brake hub temperature reduction and restoration of truck braking performance. Based on speed characteristics, different gentle slope lengths are determined for speed reductions of 10 and 20 km/h under varying gentle slope gradients. The gentle slope length based on temperature characteristics is calculated under the least favorable condition of brake hub failure temperature at 260 ℃, considering different operating speeds and temperature reduction values. The gentle slope length obtained based on speed reduction characteristics provides valuable guidance for longitudinal slope design, while the length obtained based on temperature reduction characteristics, although relatively large, is not suitable for design but can be used for evaluation. The continuous downhill and gentle slope design-evaluation process is summarized. Using a highway in the Southwestern Mountainous Region as an example, the analysis reveal that reasonable values for the gradient and length of gentle longitudinal slopes effectively improve brake hub temperatures and enhance the safety of vehicles traveling on continuous long downhill segments. 6 tabs, 7 figs, 34 refs.

Key words: road engineering; design of transition slope; experimental research; downhill characteristics of truck; continuous long downhill slope; brake hub temperature

0 引 言

中国高速公路近年来逐步向西南、西北等山区延伸,而山区地形地质较复杂,在进行山区高速公路设计时,为克服地形高差,产生了较多连续长下坡路段。根据相关调查[1],中国长下坡路段事故频发,重特大事故屡见不鲜,其中,3 年内有超过 300 多辆车驶入了漳龙(漳州—龙岩)高速公路和罗富(罗村—富宁)高速公路的多条避难车道,造成了不可估量的生命财产损失。针对连续长下坡,中国目前大多采用“陡缓结合”的纵坡设计方法,即在连续陡坡之间插入缓坡以期使得载重货车减速降温。然而,相关规范及标准并未对下坡路段缓坡的设计指标及方法做出明确规定,《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)[2] 和《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)[3](下文称《规范》)仅在连续上坡处基于汽车的爬坡性能研究缓和坡段坡度和坡长的取值,对于长下坡缓和坡段的合理性缺乏相关研究。因而现行规范尚难以指导长下坡缓和坡段的设计。

国外大多通过速度管控提高长下坡安全性,如美国联邦公路局(FHWA)根据理论分析以及实车试验研发了下坡严重度分级系统(GSRS),以此建立制动毂温升模型[4]。Coleman 基于制动毂温升模型推导出温度与纵坡指标的对应关系[5]。国外少有采用陡缓陡的设计方法,尚无相关文献或规范提出下坡路段缓坡设计方法。中国学者对纵坡设计方法进行了大量研究。廖军洪等基于驾驶人心理、生理特性研究了纵坡设计指标[6-8]。周荣贵等基于汽车动力学特性研究了纵坡设计指标[9-10]。付焱鑫基于仿真技术研究了长下坡设计指标与行车安全的关系[11]。丁志勇等通过实测运行速度建立速度模型并验证其在长下坡设计指标中的适用性[12-14]。潘兵宏等分析并修正同济大学的制动毂温升模型,从动力学和热力学的角度得到了更精准的模型[15]。

这些研究主要是针对长下坡，考虑对象均为纵坡值较大的陡坡，并未进一步分析缓和坡段。中国关于缓坡设计指标的研究较少。李清波等基于汽车动力学理论求解出不限坡长的最大纵坡，将小于该坡度的纵坡定义为缓坡[16]。综上，国内外关于长下坡缓坡设计指标的研究较少，尚未形成统一结论。同时近十年来中国高速公路车型比例发生了较大变化，导致以六轴铰接列车为主导车型的交通流无法适应长下坡路段的道路设计。针对当前车路不协调的常态化矛盾，不仅要在符合市场规律的条件下，逐步提高生产制造水平和车辆性能，同时还要合理改进长下坡和纵坡的设计方法。

基于上述背景，从主导车型出发，根据发动机制动条件下货车减速特性以及制动毂降温特性，建立挡位-速度-临界坡度模型，利用该模型求解缓坡控制指标[17]；根据货车下坡的减速和冷却特性，提出缓坡长度的控制和评价指标，并对应用缓坡指标设计与评价的方法进行论述。研究成果可为长下坡路段缓坡设计和评价提供理论依据。

1　连续下坡缓坡坡度分析

1.1　主导车型受力分析

相关调查结果显示[1]，近十年来，铰接式半挂车已发展为中国高速公路上的主要货运车辆。半挂铰接式列车的质量功率较低，辅助制动装置落后，导致其下坡性能与以往设计模型采用单辆车控制的纵坡设计指标不适用，更容易产生制动故障并引发交通事故[18-19]。因此，需要提高大型车在连续长下坡上的驾驶安全性。针对以上研究背景，本文以牵引车和半挂车组成的满载六轴铰接列车为研究模型，牵引车型号为东风 DFL4251A15，整车长度约为 18 m。

在国际上，所有六轴货车都配备了先进稳定的电磁或液压缓速器系统、Jake Brake 发动机辅助制动系统等，而中国车辆更多使用的是发动机辅助制动和排气制动系统[20-23]。文献[24]中发动机辅助制动模式下六轴货车的受力分析如图 1 所示，当整车在直线坡上行驶时，汽车进行发动机制动，燃油供给系统不向发动机供给燃油，变速器挂入某挡，假设铰接处只受力而不受力矩，将牵引车和半挂车看作一个刚体。

图 1 中：$mg\sin(\alpha)$为货车重量在下坡方向的分力；α 为斜坡与水平面夹角；F_j 为加速阻力；F_w 为空气阻力；F_b 为持续制动力；F_f 为滚动阻力；F_N 为垂直于坡面的压力；m 为货车质量；G 为货车重量。根据整车的受力平衡分析，参考文献[24]得到 F_b、F_w、F_f、F_j 之间的平衡方程以及各力的计算方法。

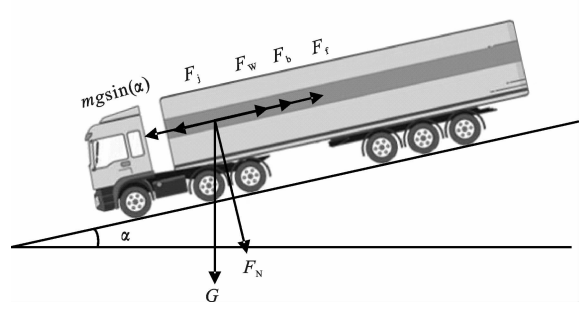

图 1　牵引车头的受力分析

Fig. 1　Force analysis of tractor

以上述汽车动力学分析为基础，可进一步推导车辆性能、速度、挡位与纵坡线形的关系，进而求解出相应缓坡坡度与坡长指标。

1.2　临界坡度

根据车辆动力学理论，当坡度等于某定值时，只有在发动机制动时，车辆才能保持匀速行驶。该坡度阈值称为缓坡临界坡度。临界坡度定义为连续下坡和缓坡的控制值。如果坡度小于此值，则为缓坡。当车辆在不大于该临界坡度的缓坡上行驶时，将会减速行驶或保持匀速行驶，此时车辆的主制动器处于非工作状态，车辆挂低速挡增加发动机制动力，有助于刹车制动毂散热冷却。

根据斜坡上牵引车头受力分析，可以推导出下式

$$mg\sin(\alpha)-F_b-F_w-F_f=\delta_j m\frac{dv}{dt} \tag{1}$$

式中：δ_j 为汽车旋转质量系数；v 为速度；t 为时间。

分析 F_b、F_w、F_f 可知，F_b 和道路行驶阻力 F_w+F_f 均为速度 v 的函数，故汽车下坡时所受总制动力 F_{bt}可表示为速度函数一般通式[24]

$$F_{bt}=F_b+F_w+F_f=B_2v^2+B_1v+B_0 \tag{2}$$

式中：B_0、B_1、B_2 均为总制动力拟合系数。

最终推出纵坡坡度 i 为关于车速的二次函数，即

$$i=\frac{B_2}{mg}v^2+\frac{B_1}{mg}v+\frac{B_0}{mg} \tag{3}$$

对于车辆来说每个挡位具有一个固定的速度范围，将其稳定的速度代入式(2)，进一步可以得到不同挡位和速度下的临界坡度值，如表 1 所示。

根据高速公路不同设计速度确定不同运行速度下的缓坡坡度，按照实际状况驾驶人会通过换挡减速再驶入连续长下坡，当驾驶人下坡行驶速度在 80 km/h 时至多可挂11挡，当下坡速度为100 km/h

表 1 临界坡度

Tab. 1 Critical slope values

挡位	不同下坡稳定车速(km·h^{-1})下的临界坡度/%														
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
12				1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3
11		1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4				
10	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6							
9	2.5	2.6	2.8	2.8	2.9										

至多可以换到 12 挡。考虑到最不利条件,将相应速度下可以挂入的最高挡位作为控制指标,即 11、12 挡发动机制动下的临界坡度作为缓坡的控制指标,如表 2 所示。

表 2 连续下坡缓坡坡度控制指标

Tab. 2 Transition slope gradient indexs in continuous downhill slope

设计速度/(km·h^{-1})	不同运行速度(km·h^{-1})下的缓坡坡度/%										
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
120、100		1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	2.0	2.2	2.3
80	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4		

1.3 Ⅰ、Ⅱ类缓坡

根据上述提出的临界纵坡的指标可以看出,在同一挡位下临界纵坡随着速度的增大而增大。在极限工况条件下控制纵坡指标能够有效提高路段的安全性。对此提出Ⅰ、Ⅱ类缓坡概念,将 1.8%作为缓坡坡度临界值,当 $i<1.8\%$ 时称其为Ⅰ类缓坡,这类缓坡的特点在于当车辆在上面行驶时驾驶人基本不采用或极少采用制动,制动毂持续降温处于自然冷却状态。

在定义Ⅱ类缓坡前需要引入每千米温度变化量[25]概念,每千米温度变化量实质为某路段的温升速率,通过温升速率这一指标可以反映车辆在不同纵坡上的温度变化特性,它是单个纵坡值所拥有的温升属性,通过每千米温度变化量可以确定降温坡段对应的坡度,从而确定Ⅱ类缓坡临界值。其计算方式如下

$$G_{\mathrm{T}}=\frac{T_k-T_{k-1}}{L} \tag{4}$$

式中:G_{T} 为每千米温度变化量;T_k 为货车行驶坡段终点 k 处的制动毂温度;T_{k-1} 为行驶坡段起点 $k-1$ 处的制动毂温度;L 为货车行驶坡段长度。

图 2 为制动毂温度对应的各坡段每千米温度变化量,由图 2 可以看出随着制动毂温度的升高,G_{T} 在不同坡度下均呈下降趋势,根据实车试验数据[25]表明当 $G_{\mathrm{T}}\leqslant 3$ ℃时,可以认为货车在此坡段上制动毂呈降温趋势。当车辆驶入 i 为 1.8%~2.3%的缓坡时,驾驶人会采取制动行为,但此时制动毂的升温速率小于降温速率,制动毂总体处于降温趋势。当 $G_{\mathrm{T}}=3$ ℃时,其 $i=2.3\%$,故将 2.3%作为Ⅱ类缓坡

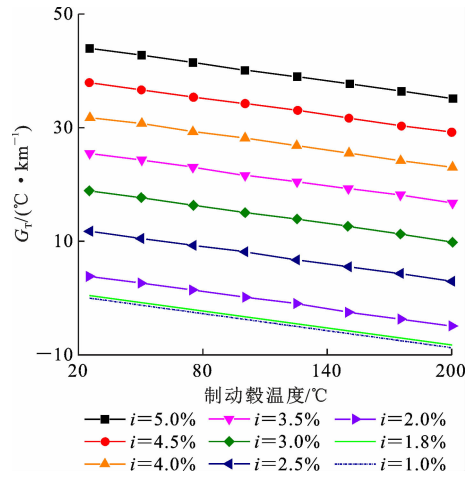

图 2 制动毂温度对应的各坡段每千米温度变化量

Fig. 2 Temperature gradients of each slope section corresponding to brake temperature

最大控制值。综上,将 i 为 1.8%定义为Ⅰ类缓坡,将 i 为1.8%~2.3%之间定义为Ⅱ类缓坡。以下从速度和降温特性角度,研究 $i<2.3\%$ 的缓坡的安全坡长。

2 连续下坡缓坡坡长分析

2.1 基于速度特性的缓坡坡长

在发动机辅助制动下,研究车辆以一定的加速度 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}t$ 下坡行驶,可以得到行驶坡度长度与车速之间的关系。研究表明[26]当 $i<1.8\%$ 时,大型车辆行驶速度为 40~80 km/h,本文中货车的最低允许速度为 40 km/h。

联立式(1)和式(2)并进行单位换算以及对两端同时积分可得

$$L_v = \int_{v_1}^{v_2} v\left[12\ 960\left(gi\left(\delta_j\sqrt{1+i^2}\right)^{-1} - \frac{B_2 v^2 + B_1 v + B_0}{\delta_j m}\right)\right]^{-1} \mathrm{d}v \tag{5}$$

式中：L_v 为行驶坡度长度，v_1 为起始速度，v_2 为结束速度。

以减速量为安全边界条件，根据式(5)可得出不同折减情况下的缓坡长度。当减速分别为10、20 km/h时，不同入坡速度对应的缓坡长度见表 3。

由表 3 可将主导车型以不同入坡速度在各坡度缓坡上行驶时所对应的坡长绘制成发动机制动减速曲线，如图 3 所示。

从图 3 可以看出：当货车运行速度、减速度相同时，坡度越大，相应的坡长越长；当坡度恒定时，曲线的倾斜程度在速度下降过程中就显得越大，表明了在车速下降时，当驾驶人切换至低挡，发动机制动力增强，车辆的减速提高，在降低相同车速时所需要的坡度长度也更短。在相同坡度缓坡的情况下，坡长越长对车辆的折减速度也越大，设计人员应根据目标合理选用缓坡坡长。

表 3　不同入坡速度进入缓坡的缓坡坡长

Tab. 3　Transition slope length at different entry speeds

坡度/%	减速度为 10 km·h^{-2}					减速度为 20 km·h^{-2}				
	不同入坡速度(km·h^{-1})的缓坡坡长/m					不同入坡速度(km·h^{-1})的缓坡坡长/m				
	50	60	70	80	90	50	60	70	80	90
0.5	180	230	290	350	365	330	435	560	675	715
1.0	240	310	400	485	515	445	595	785	960	1 025
1.2	270	360	475	580	615	515	700	935	1 160	1 240
1.4	320	430	575	715	760	610	845	1 160	1 460	1 570
1.6	310	475	635	825	1 065	785	1 110	1 465	1 890	2 060
1.7	335	530	725	955	1 240	865	1 250	1 680	2 195	2 400
1.8	370	595	835	1 130	1 485	965	1 435	1 965	2 615	2 870
1.9	410	685	995	1 385	1 850	1 095	1 680	2 380	3 235	3 575
2.0	465	805	1 220	1 790	2 455	1 270	2 025	3 010	4 245	4 735
2.1	540	980	1 590	2 525	3 640	1 520	2 570	4 115	6 170	7 010
2.2	665	1 280	2 280	4 310	7 060	1 945	3 560	6 595	11 375	13 505

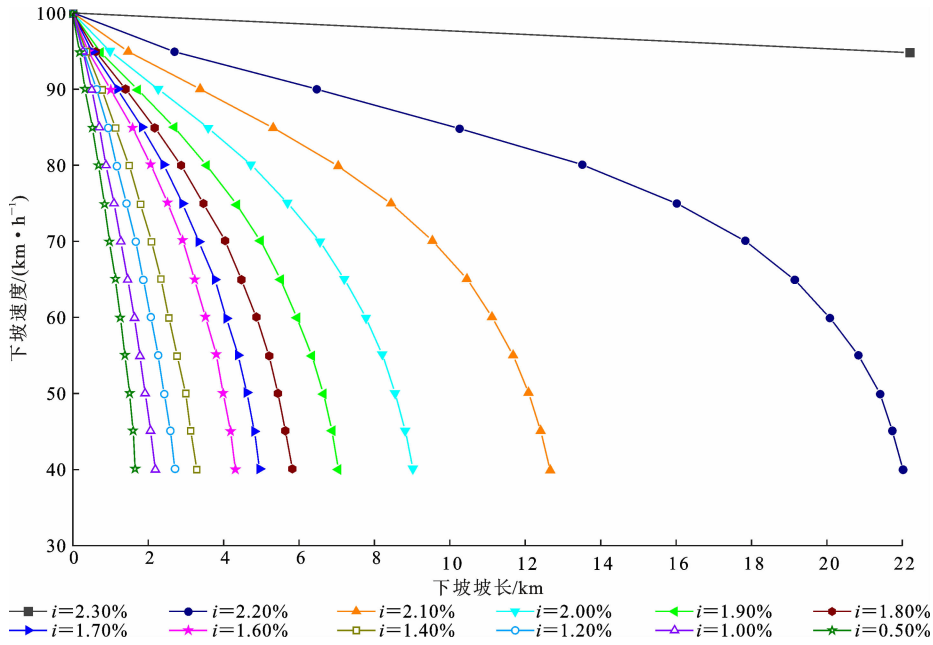

图 3　发动机制动减速曲线

Fig. 3　Engine brake deceleration curves

根据表 3 及图 3 进行缓坡设计时,给出入坡速度跟缓坡坡度,便可分别查询出速度折减 10、20 km/h 时的缓坡坡长。当目标速度折减量为其他数值时,也可以通过连续查询、线性内插的方法得到对应的缓坡坡长。

2.2 基于降温特性的缓坡坡长

货车在长下坡路段制动失效的过程主要是由于主制动器失效引起,频繁使用主制动器会使制动毂温度上升进一步引起制动毂热衰退[27],最终导致刹车失效造成交通事故,因此制动毂的散热方式十分重要。根据传热理论,热量传递主要分为热传导、热对流和热辐射。基于制动毂的物理简化模型[28]对主要热量传递方式进行分析,制动毂通过热辐射散失的热量至多占总散失热量的 5%~10%,因而可以忽略不计;此外制动毂与其他周围物体接触较少且热阻大,因此热量散失较小,也可忽略。综上,制动毂主要由热对流实现散热,热对流的热量传递过程主要通过流体中质点发生相对位移引起。

参考上述简化物理模型,制动毂的散热方式只考虑热对流。热对流主要是制动毂与外部空气进行对流热交换,其程度取决于轮毂的物理特性和内外温差,与道路纵坡坡度无关。由牛顿冷却公式可知,制动毂与空气对流散热交换的热量 P_d 为

$$P_d = h_R A_{g2}(T - T_a) \tag{6}$$

式中:h_R 为制动毂与空气间的对流换热系数,表示对流换热的强弱;A_{g2} 为制动毂的外表面面积;T 为制动毂温度;T_a 为制动毂周围空气的平均温度,制动毂几乎被轮辋和侧面的保护板包裹,其中的空气温度明显高于外界温度。

根据文献[24]对式(6)进一步推导以及单位换算可得

$$L_T = \frac{m_g c_g (T_2 - T_1)}{(5.224 + 1.552\,5 v e^{-0.002\,7v}) A_{g2}(T_2 - T_a)} \tag{7}$$

式中:L_T 为基于温度特性的行驶坡度长度;T_1 为初温度;T_2 为末温度;m_g 为制动毂的质量;c_g 为制动毂比热容。

文献[29]中制动毂的临界失效温度为 260 ℃,将制动毂降温数值作为安全边界条件,利用式(7)计算制动毂在临界失效温度条件下降低特定温度行驶的坡长,结果如表 4 所示。

由表 4 可知:当运行速度或制动毂温度任一数值恒定时,降温所需坡长均随另一变量呈线性增长;当不同初速度条件下的速度折减量相同时,其降温所需坡长基本相同。当制动毂温度从临界失效温度(260 ℃)降低 20 ℃以内时,缓坡坡长可控制在2 km 以内,但 20 ℃显然无法达到驾驶人的预期降温值,行车安全无法保证。当制动毂温度降低至 200 ℃以下时,对应的坡长均超过 5 km,无法在可控的路线长度内有效克服高差。

表 4 初始温度为 260 ℃时对应缓坡(i=1.8%)坡长

Tab. 4 Corresponding to transition slope length when initial temperature is 260 ℃

制动毂降温后的温度/℃	不同运行速度(km·h^{-1})的缓坡坡长/m				
	40	50	60	70	80
250	860	885	910	935	960
240	1 715	1 765	1 815	1 865	1 920
230	2 575	2 650	2 725	2 800	2 880
220	3 435	3 530	3 630	3 735	3 840
210	4 295	4 415	4 540	4 670	4 800
200	5 150	5 300	5 450	5 600	5 760
190	6 010	6 180	6 355	6 535	6 720
180	6 870	7 065	7 265	7 470	7 680
170	7 730	7 950	8 170	8 405	8 640
160	8 585	8 830	9 080	9 335	9 600
150	9 445	9 715	9 990	10 270	10 560
140	10 305	10 595	10 895	11 205	11 520
130	11 165	11 480	11 805	12 140	12 480
120	12 020	12 360	12 710	13 070	13 440
110	12 880	13 245	13 620	14 005	14 400
100	13 740	14 130	14 530	14 940	15 360

3 连续下坡缓坡设计指标与方法

缓坡设置的目的是在可接受坡长范围内使得货车降速减挡,在低速低挡条件下可将制动毂温度保持在较安全范围内,提高行车安全性。根据高速公路设计速度、运行速度及挡位条件可以确定缓坡坡度,即挡位-速度-临界坡度模型。对 i 为 1.8%~2.3%的缓坡进行研究,并计算不同坡度、入坡速度及速度折减值下对应的缓坡坡长。

通过速度特性求解的缓坡坡长大多小于2 km,如在 i=2%、入坡速度为 70 km/h、速度折减为 10 km/h 时,对应的缓坡坡长为 1 220 m,在该长度缓坡内,货车速度可降至 60 km/h,挡位可挂至 9 挡,达到了缓坡设计的一般性目的。相对基于速度特性得到的坡长而言,以降温特性控制时,缓坡坡长大多大于 3 km,表明以制动毂温度折减方法计算的坡长相对较大,不宜作为缓坡坡长的设计控制指标,仅可用作评价阶段时参考。

因此,在进行高速公路连续长下坡设计时,可

根据基于速度特性的缓坡坡长和发动机制动减速曲线对缓坡坡长进行控制，并结合基于降温特性的缓坡坡长评价缓坡路段的制动毂降温效果。将以上内容整理得连续长下坡缓坡设计-评价流程如图 4 所示。

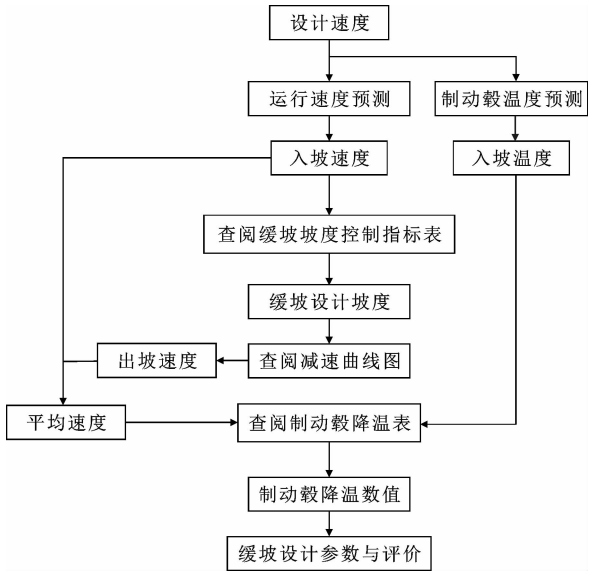

图 4　缓坡路段设计-评价流程

Fig. 4　Transition slope section design-evaluation flow chart

由图 4 可知：在高速公路连续长下坡路段设计时，首先确定高速公路设计速度，对大货车驶入缓坡时的运行速度和制动毂温度进行预测，得到入坡速度和制动毂入坡温度；查阅缓坡坡度控制指标表（表 2），得到缓坡设计坡度；输入缓坡坡度、入坡速度、速度折减值等参数，查阅发动机制动减速曲线（图3），可得到缓坡设计坡长[30]，此时出坡速度已知，可计算得到平均速度，以入坡温度和该货车驶过缓坡路段的平均速度为参数，查阅初始温度为 260 ℃时对应缓坡坡长表（表 4）得到制动毂降温数值，该降温数值可用于评价设计缓坡的温控效果。

4　实例应用

4.1　项目概况

现以西南某山区高桥隧比高速公路为例（后文称 M 高速）说明连续下坡时，缓坡设计方法以及缓坡应用效果。M 高速的线形设计平纵指标均满足《规范》，尽管其纵坡坡度能够满足《规范》中小于 2.5%不限坡长的规定，但是其连续坡长 39.12 km 远大于《规范》中的 20 km，因此在理论上该路段存在大货车制动失效的相关风险隐患。

图 5 为 M 高速中连续下坡路段设计推荐方案，该路段共设置 4 座特长隧道和 1 座长隧道，该路段的起终点实际上是 A 隧道的出洞口处以及 G 隧道的入洞口处。由于考虑受洞口偏压和落石槽落石限制因素，A～G 隧道平纵线位难以调整。因此该项目推荐方案的隧道路段的平纵线位均不宜调整。

本文以六轴半挂货车作为建模对象，实车试验选取东风天龙重卡 DFL4251A15（6×4）作为试验车型，其比功率为 6.59 kW/t，试验车型相关参数如表 5 所示。

4.2　方案设计优化

受限于西南山区复杂地形，由于 A～G 隧道平纵线位难以调整，在本案例中方案优化的目标在于

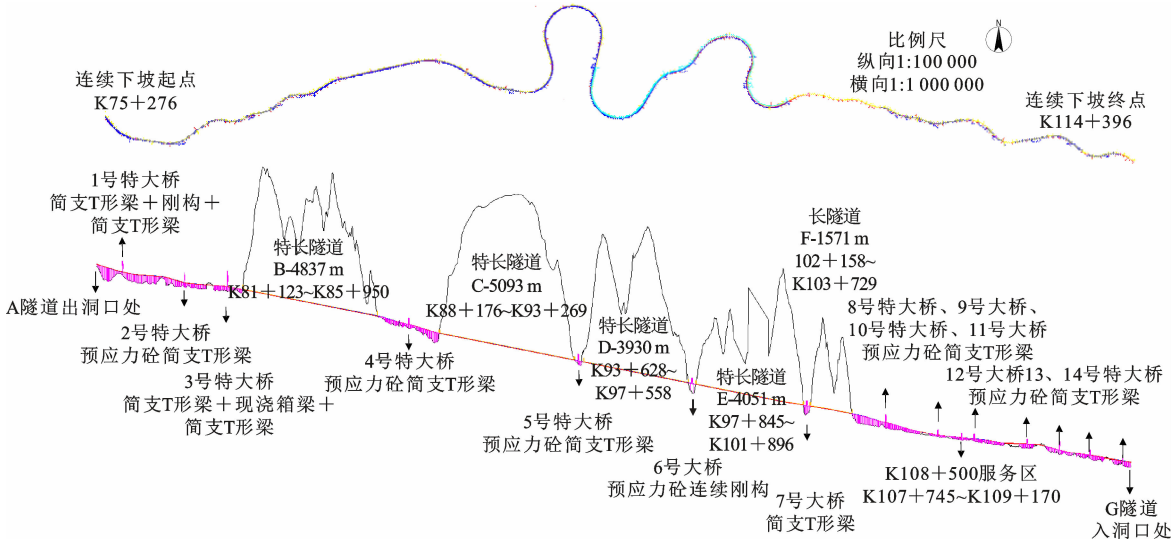

图 5　推荐方案连续下坡段平纵示意

Fig. 5　Horizontal and vertical sketch of continuous downhill section of recommended scheme

表 5 试验车型参数

Tab. 5 Test vehicle parameters

车型	DFL4251A15	额定(最大净功率)/kW	331/323
发动机型号	ISZ45041	最高车速/(km·h^{-1})	90
整备质量/kg	8 800	发动机转速范围/(r·min)	900～1 800
最大允许牵引质量/kg	40 000	总质量(地磅)/kg	48.78

考虑在起终点、高差已经确定的条件下,以安全考量对连续下坡路段调整合适的缓坡对纵断面进行优化。

根据以上分析可知,该方案平均纵坡无法再调整,对优化前推荐方案与平均纵坡方案货车制动毂温度进行测算,对比结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,实际方案制动毂温度 T_r 均高于平均纵坡方案制动毂温度 T_c。分析实际方案的 G_T,方案中 $T_r>100$ ℃且 G_T 超过 10 ℃的路段采用不同颜色的折线区分,这些路段长 3.953 km,占总路段 10.1%(其中 G_T 超过20 ℃的占比达到 6.4%)。分析坡底温度 $\Delta T=T_r-T_c=10$ ℃>5 ℃,且全段 $T_r>T_c$,T_r 波动较大。从图 6 可以看出,实际方案有优化空间,可以通过调整缓坡的坡度与坡长降低制动毂温度。

对于上述方案可从以下指标进行优化可增大最小纵坡坡度、降低最大纵坡坡度,合理选用Ⅰ、Ⅱ类缓坡改善坡度;通过减小相邻坡段坡度差优化纵断面指标;对于Ⅰ类、Ⅱ类缓坡坡度,尽量采用Ⅰ类缓坡 $i=1.8\%$,条件受限时使用 $i=2.3\%$(局部平均纵坡较大路段);应降低 $T\geqslant200$ ℃路段的最大纵坡;区段设计中 $T>200$ ℃的局部受限路段按Ⅱ类缓坡控制,满足最大坡度差。

根据上述优化目标,对连续下坡路段实际方案(推荐方案)进行纵断面优化,方案优化调整情况如表 6 所示。调整情况主要将路段以 200 ℃为界[31],将路段分为 2 个区段,分别按照上述的优化目标进行调整。优化后小于 200 ℃路段达到Ⅰ类缓坡临界值,基本满足安全要求;大于 200 ℃路段的设计指标得到较大提升,对坡长和坡度进行缓坡设计方法调整后,坡长组合基本为长缓短陡[32-34]。

4.3 优化效果分析

对上述优化方案进行制动毂温度及每千米温度变化量测算,与推荐方案对比结果如图 7 所示。考虑到隧道封闭结构特点,造成了隧道内部的流体分布与外部环境存在较大的差异。车辆在行进过程中产生的废热无法及时排出累积在隧道内,会影响制动毂在隧道环境下的散热过程,针对这一现象在预测制动毂温度时采用制动毂温升修正模型。根据制动毂降温路段实测数据确定隧道内对流换热系数。计算出隧道的对流换热系数来修正原有的制动毂温升模型,采用通过修正制动毂温升模型对比推荐方案和优化方案更具客观性。

对比发现,优化后的方案制动毂温度在全路段低于推荐方案制动毂温度,最高温度为 212 ℃,与推荐方案最高温度接近 240 ℃相比降低 28 ℃,得到较大改善,温度超过200 ℃的路段长度为5.31 km,

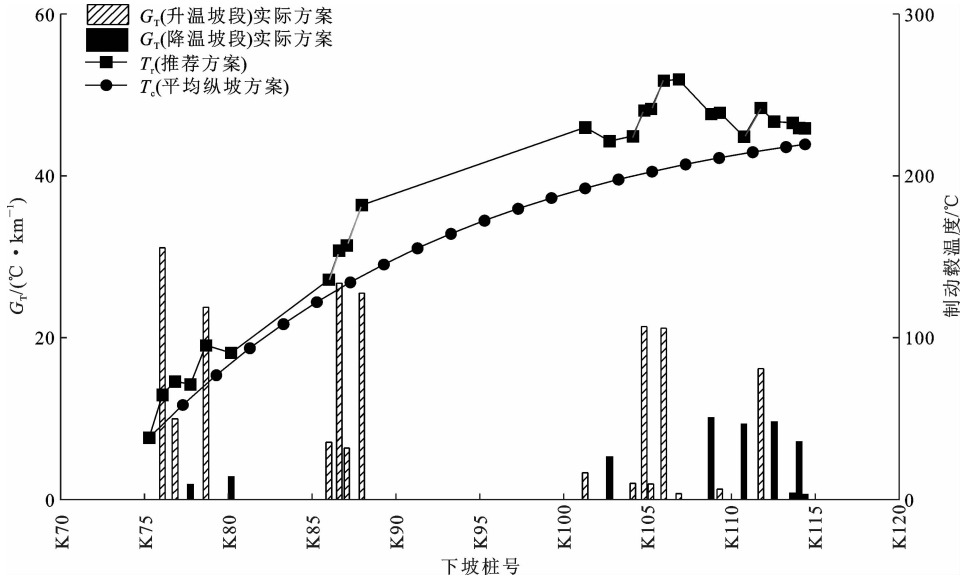

图 6 货车制动毂温度测算分析

Fig. 6 Measurement and analysis of temperatures of truck brake

表 6　方案优化调整情况

Tab. 6　Scheme optimization and adjustment

区段	优化指标	推荐方案	优化方案	调整情况
制动毂温度小于 200 ℃路段	最小/最大缓坡	0.70%/2.53%	1.60%/2.69%	经优化，i_{min}=1.6%，小于临界值 i=1.8% 局部平均纵坡受限无法满足Ⅰ类缓坡
	最大纵坡坡度	4%	4%	不变，受控制因素限制无法进一步优化
	相邻坡段坡度差	2.84%	1.47%	经优化，满足 Δi<1.7%
	坡长组合	存在 2 处长陡短缓组合	存在 1 处长陡短缓组合	经优化，基本满足良好坡长组合
制动毂温度大于 200 ℃路段	最小/最大缓坡坡度	0.5%/2.5%	1.7%/2.6%	经优化，i_{min}=1.7%，小于临界值 i=1.8%局部平均纵坡受限无法满足Ⅰ类缓坡时，可通过小于临界值 i=2.5%控制
	最大纵坡坡度	4.00%	2.85%	经优化，T≥200℃路段 i≤3%
	相邻坡段坡度差	3.00%	1.24%	经优化满足 Δi<1.7%
	坡长组合	存在 2 处长陡短缓组合 L=2.45 km(i>3%)	不存在长陡短缓组合 L=0 km(i>3%)	经优化，坡长组合良好，消除了大于 3%的陡坡段

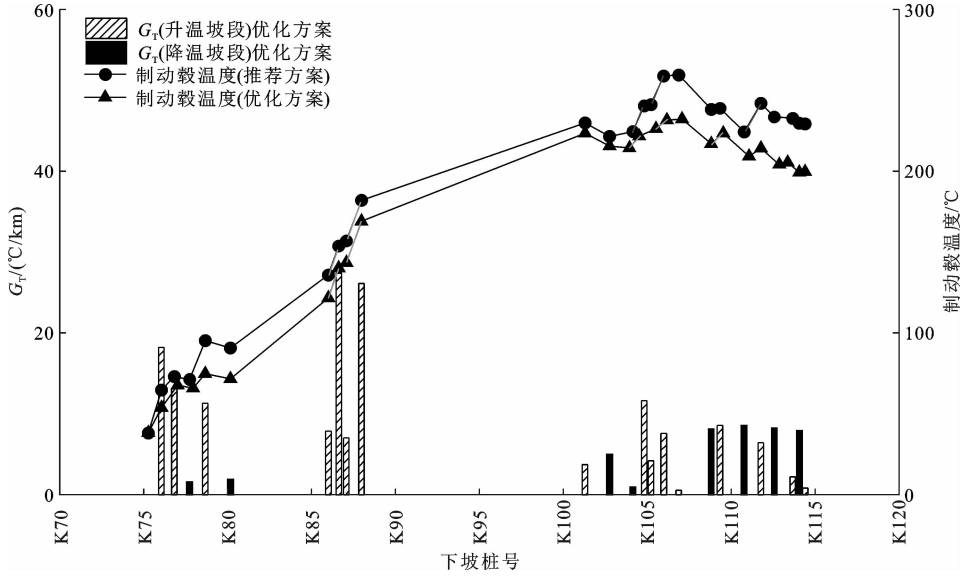

图 7　货车制动毂温升测算对比(推荐方案-优化方案)

Fig. 7　Comparison of temperature rise of truck brake (recommended scheme-optimization scheme)

占路段长度 13.58%，占比减少 31.12%。优化方案 G_T 超过 10 ℃且制动毂温度超过 100 ℃的路段为 3.953 km，占比为 8.87%，相比于原方案降低了 1.23%；坡底温度 183 ℃相较于原方案 210 ℃，降低了 27 ℃。

根据上述数据可以看出，缓和纵坡的应用与优化提高了设计方案的安全性，在一定程度上改善了车路协同性。在优化方案中，货车行车安全性要高于推荐方案，证明了对缓坡段进行合理优化能提高道路安全性。

综上所述，结合实例对货车制动毂温升进行测算对比，结果表明在长陡下坡中应用合理坡度与坡长的缓和纵坡能降低车辆制动毂温度，恢复货车制动性能。

5　结　语

(1)本文选取主导车型基于车辆动力学理论，对六轴铰接列车在仅使用发动机制动时的下坡特性进行了分析，通过公式推导和函数分析建立了挡位-速度-临界坡度模型，求解了货车在 9～12 挡时不同稳定速度下的缓坡临界坡度值。确定挡位时由设计速度与挡位间关系选择 11 挡和 12 挡，将不同挡位对应的缓坡临界坡度 1.8%<i<2.3%作为高速公路连续下坡的缓坡坡度控制指标，并对Ⅰ、Ⅱ类缓坡进行相关定义。在设计中合理插入缓坡能够使货车减速并有助于制动毂降温，恢复其制动性能。因此，非常有必要在连续长下坡路段之间设置缓和坡段。

(2)根据已经得出的缓坡坡度控制指标，分析

了六轴铰接列车的下坡速度特性和制动毂降温特性,分别基于速度特性和降温特性求解了缓坡坡长指标。基于速度特性求解的缓坡坡长,得出了速度折减值在 10、20 km/h 时不同缓坡坡度下的缓坡坡长,将坡长数据绘制为发动机制动减速曲线,该表达形式简洁直观,具有较强适用性。基于降温特性求解的缓坡坡长,以制动毂失效温度 260 ℃为最不利条件,通过平均车速及制动毂参数计算缓坡坡长,得出不同运行速度及温度折减值。

(3)以进入缓坡速度 70 km/h 为例,对基于降速及降温特性得到的缓坡坡长指标进行对比,后者的坡长普遍过大,分析表明基于货车下坡速度特性的缓坡坡长在一定程度上对纵坡设计具有指导意义;基于制动毂降温特性的缓坡坡长相对较大,不宜作为设计参考,仅可作为评价考量。

(4)以西南山区某新建超高桥隧比高速公路作为实例,对其连续下坡进行优化。根据制动毂温度比较来判断实际(推荐)方案是否存在优化空间,并对推荐方案连续下坡进行了缓坡的优化。以制动毂温度作为安全边界条件,对方案中的缓坡按照Ⅰ、Ⅱ类缓坡进行控制,最终对比优化方案和原推荐方案,制动毂温度有所改善,表明长陡下坡中合理坡度与坡长的缓和纵坡对于恢复车辆制动性能有显著作用。

(5)在下阶段的研究中应进行实车试验以验证本文缓坡设计指标的可靠性;同时,应进一步明确连续长下坡路段缓坡的分级设计方法,结合驾驶人行为及制动毂温度在坡顶、坡中和坡底的差异性,提出连续长下坡分坡段(级)的缓坡设计方法。

参考文献:

References:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2017.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing:China Statistics Press,2017.

[2] JTG B01—2014,公路工程技术标准[S].
JTG B01—2014,Technical standard of highway engineering[S].

[3] JTG D20—2017,公路路线设计规范[S].
JTG D20—2017, Design specification for highway alignment[S].

[4] BOWMAN B L. Grade severity rating system[J]. ITE Jounal,1990,60(7):19-24.

[5] COLEMAN M. Use of auxiliary brakes in heavy vehicles[R]. Sydney:Austroads,2014.

[6] 廖军洪,邵春福,邬洪波,等. 连续长大下坡心率与线形指标关系模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2012,12(4):184-189.
LIAO Jun-hong,SHAO Chun-fu,WU Hong-bo,et al. Modeling drivers' heart rate and highway alignment relationship on long steep downgrades[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2012,12(4):184-189.

[7] 阎 莹,刘浩学. 山区公路纵坡路段线形指标对驾驶员心理生理影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008,32(6):1013-1016.
YAN Ying,LIU Hao-xue. Study on effect of alignment index of longitudinal slope sections of mountain roads on drivers' psychology and physiology[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2008,32(6):1013-1016.

[8] 张 娟. 基于驾驶员因素的公路连续长坡路段线形研究[D]. 西安:长安大学,2012.
ZHANG Juan. Study on alignment of continuous long slope sections of highway based on driver factors[D]. Xi'an:Chang'an University,2012.

[9] 周荣贵,江立生,孙家风. 公路纵坡坡度和坡长限制指标的确定[J]. 公路交通科技,2004,21(7):1-4.
ZHOU Rong-gui, JIANG Li-sheng, SUN Jia-feng. The study of highway gradient and grade length limit [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2004,21(7):1-4.

[10] 周 磊. 连续下坡路段汽车行驶特性与制动器制动性能研究[D]. 西安:长安大学,2007.
ZHOU Lei. Study on vehicle driving characteristics and braking performance of brakes on continuous downhill sections[D]. Xi'an:Chang'an University,2007.

[11] 付焱鑫. 新疆乌尉高速长大纵坡事故易发位置辨识及交通安全保障措施研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2017.
FU Yan-xin. Study on accident-prone location identification and traffic safety guarantee measures of Wuwei Expressway in Xinjiang[D]. Wuhan:Wuhan Institute of Technology,2017.

[12] 丁志勇,周子楚,郭忠印. 运行速度预测模型在公路长大纵坡路段设计中的适用性分析及修正[J]. 公路工程,2016,41(5):118-122,138.
DING Zhi-yong, ZHOU Zi-chu, GUO Zhong-yin.

Modification of the operating speed prediction model in the long and steep downgrade[J]. Highway Engineering,2016,41(5):118-122,138.

[13] 林　声,郭忠印,周小焕,等.公路线形空间几何特性模型及其应用[J].中国公路学报,2010,23(增 2):47-52.
LIN Sheng,GUO Zhong-yin,ZHOU Xiao-huan,et al. Models of highway alignment spatial geometric properties and their applications[J]. China Journal of Highway and Transport,2010,23(S2):47-52.

[14] JTG B05—2015,公路项目安全性评价规范[S].
JTG B05—2015,Specifications for highway safety audit[S].

[15] 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. Study on temperature rise model of truck brake hubs on continuous downhill section of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2021,38(9):85-91.

[16] 李清波,谢　珍.公路纵坡设计的理论分析[J].长沙交通学院学报,1998(3):40-46.
LI Qing-bo, XIE Zhen. The theoretical analysise of highway longitudinal grade design[J]. Journal of Changsha Communications University, 1998(3):40-46.

[17] 张　驰,侯宇迪,杨　坤,等.公路长大下坡路段货车制动毂温升模型研究综述[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(3):96-107.
ZHANG Chi,HOU Yu-di,YANG Kun,et al. Review of brake drum temperature rise model for vehicle on long and steep downgrades of highway[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2019,39(3):96-107.

[18] 王宏权.粤东山区复杂地质条件下特长公路隧道路段线路方案研究[J].中外公路,2021,41(2):256-260.
WANG Hong-quan. Research on line schemes of extra-long highway tunnel with in complicated geological condition in mountains of East Guangdong Province[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(2):256-260.

[19] 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 on the characteristics of traffic accidents in continuous long and steep downhill sections[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 75-78,84.

[20] 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 contradiction between safety of long longitudinal slope and coordination between vehicle and road[J]. China Highway,2018(2):62-65.

[21] 赵含雪.基于发动机制动和排气制动的重型商用汽车长大下坡安全性研究[D].西安:长安大学,2014.
ZHAO Han-xue. Study on safety of heavy commercial vehicles on long downhill based on engine braking and exhaust braking[D]. Xi'an:Chang'an University,2014.

[22] 赵含雪,王金洋.重型商用汽车排气制动下坡能力研究[J].甘肃科技,2014,30(9):38-40,128.
ZHAO Han-xue,WANG Jin-yang. Study on downhill braking ability of heavy commercial vehicles by exhaust[J]. Gansu Science and Technology, 2014, 30(9):38-40,128.

[23] 肖润谋,叶燕仙,周晓悦,等.发动机制动失效的坡长临界值计算[J].交通运输工程学报,2006,6(4):122-126.
XIAO Run-mou, YE Yan-xian, ZHOU Xiao-yue, et al. Critical slope length computation of engine brake inefficacy[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2006,6(4):122-126.

[24] 吴明先,杨军超,林宣财,等.高速公路下坡路段缓坡安全性设计研究[J].公路交通科技,2021,38(9):92-97,104.
WU Ming-xian,YANG Jun-chao,LIN Xuan-cai,et al. Study on design of gentle slope in continuous downhill section of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(9):92-97,104.

[25] 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 temperature rise of brake hub[D]. Xi'an:Chang'an University,2020.

[26] 汪双杰,周荣贵,孙小端.公路运行速度设计理论与方法[M].北京:人民交通出版社,2010.
WANG Shuang-jie, ZHOU Rong-gui, SUN Xiao-duan. Highway design theory and method based on op-

erating speed [M]. Beijing: China Communications Press,2010.

[27] WEBB C R. The effect of gradient on fuel consumption and speed of a road vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division,1952,6(1):104-117.

[28] 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 continuous braking performance of large trucks and optimal design of longitudinal slope of mountainous expressway [D]. Shanghai: Tongji University,2009.

[29] 周荣贵,徐建伟,吴万阳.公路连续下坡路段的纵断面控制指标研究[J].公路,2004,49(6):46-51.
ZHOU Rong-gui,XU Jian-wei,WU Wan-yang. Study on longitudinal control index of continuous downhill section of highway[J]. Highway,2004,49(6):46-51.

[30] 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.

[31] 胡昌斌,沈金荣,陈友杰.长下坡路段货车毂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, SHEN Jin-rong, CHEN You-jie. Temperature rise law of friction lining of freight car hub brake on long downhill section[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2009,9(4):49-55.

[32] 张 驰,胡 涛,侯宇迪,等.基于制动毂温升的连续下坡货车事故风险评价模型[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(11):19-29.
ZHANG Chi,HU Tao,HOU Yu-di,et al. Crash risk evaluation model based on brake heating for trucks under continuous downhill road conditions[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2020,48(11):19-29.

[33] 杨宏志,胡庆谊,许金良.高速公路长大下坡路段安全设计与评价方法[J].交通运输工程学报,2010,10(3):10-16,40.
YANG Hong-zhi, HU Qing-yi, XU Jin-liang. Safety design and evaluation method of long and steep downhill section of expressway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2010,10(3):10-16,40.

[34] 张 驰,侯宇迪,秦际涵,等.基于制动毂温升的连续下坡安全设计方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(10):139-150.
ZHANG Chi, HOU Yu-di, QIN Ji-han, et al. Safety design method of long slope downhill slope based on temperature increase of brake drum[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2019,47(10):139-150.