

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.09.012

高速公路下坡路段缓坡安全性设计研究

吴明先¹, 杨军超¹, 林宣财¹, 潘兵宏², 吴善根¹

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 高速公路下坡路段设置缓坡的目的是降低货车行驶的速度, 减少制动毂使用, 提高连续下坡路段的安全性, 现有规范对连续下坡路段缓坡设计指标的规定不够详细, 且缺乏不同缓坡最小长度的规定。根据当前货运主导车型的实际情况, 选取东风DFL4251A15六轴铰接列车主导车型, 对货车在下坡路段的受力状态进行分析, 将发动机制动条件下保持货车匀速的下坡坡度作为缓坡临界纵坡, 并提出了连续下坡路段货车采取不同制动档位时, 不同运行速度对应的缓坡坡度值。根据受力分析结果和制动毂温度降温模型, 分别提出了基于货车速度降低特性和制动毂降温特性的缓坡坡长。结果表明: 发动机制动时货车保持匀速行驶的缓坡均小于规范规定值; 基于货车速度折减特性的缓坡坡长均大于规范中最短坡长的规定值, 说明缓坡设计最小坡长应根据缓坡的作用确定。

关键词: 交通安全; 高速公路; 缓坡设计; 制动毂温度模型; 连续下坡路段; 坡度坡长

中图分类号: U412.33

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2021)09-0092-06

Study on Design of Gentle Slope in Continuous Downhill Section of Expressway

WU Ming-xian¹, YANG Jun-chao¹, LIN Xuan-cai¹, PAN Bing-hong², WU Shan-gen¹

(1. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: The purpose of setting gentle slope on the downhill section of expressway is to reduce truck speed and the use of brake hubs, and improve the safety of the continuous downhill section. The current specifications are not detailed enough for the design indicators of gentle slopes for continuous downhill sections, and there is lack of regulations on the minimum length of different gentle slopes. According to the actual situation of current leading freight vehicle types, selecting the leading type of the Dongfeng DFL4251A15 6-axle articulated train, the force state of the truck on the downhill section is analyzed. Regarding the downhill gradient that keeps the truck at constant speed under the engine braking condition as the critical longitudinal slope of the gentle slope, and the gentle gradient values corresponding to different running speeds when the truck adopts different braking gears on the continuous downhill section are proposed. according to the force analysis result and the brake hub temperature drop model, the gentle slope lengths corresponding to the speed reduction characteristics and brake hub cooling characteristics are proposed respectively. The result shows that (1) when the engine is braked, the gentle slopes on which the truck keeps running at constant speed are all less than the specified values in the specification; (2) the slope lengths of the gentle slopes based on the speed reduction characteristics of trucks are all greater than the specified value of the shortest slope length, indicating that the design of the minimum slope length of the gentle slope should be determined according to the function of the gentle slope.

Key words: traffic safety; expressway; gentle slope design; brake hub temperature model; continuous

收稿日期: 2021-04-25

基金项目: 中交科技基金项目 [2018] 05 号

作者简介: 吴明先 (1963-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 正高级工程师. (wumingxian@sina.com)

downhill section; slope and slope length

0 引言

近年来,我国高速公路建设重心逐步由平原区转入山区,山区高速公路由于高差大,地形、地质条件复杂,在越岭路段,为降低工程造价以及减少对环境的破坏,常常会采用较大和较长的连续纵坡,这中纵坡组合对载重车安全下坡不利,主要表现为长时间制动引起的制动器“热衰退”现象,增加下坡路段货车的事故风险。而在长陡下坡路段合理设置缓坡,可以减轻车辆制动负荷,提高行驶安全性。《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[1](以下简称《路线规范》^[1])指出,我国目前货运主导型车辆仍为六轴铰接列车,其功率重量比为5.2 kW/t,相较于旧规范《公路路线设计规范》(JTG D20—2006)^[2](以下简称《旧路线规范》)以及美国 AASHTO 规范^[3]给出的货运主导车型功率重量比9.1 kW/t和8.3 kW/t,其整体性能偏低,然而《路线规范》^[1]关于缓坡坡度及坡长的规定仍与《旧路线规范》相一致,具体情况为:当设计速度小于或等于80 km/h时,缓坡纵坡应不大于3%;设计速度大于80 km/h时,缓和坡段的纵坡应不大于2.5%。同时最小坡长规定如表1所示。《路线规范》^[1]关于缓坡设计指标所采用的旧规定值,可能与现行货车在连续下坡路段所需要的缓坡纵坡和坡长不相符合,因此需要根据货车实际运行条件对连续下坡路段缓和坡段设计指标进行研究,为设计更合理的纵坡组合提供参考。《路线规范》中对最短坡长的规定仅考虑了行驶平顺性的要求,并不是根据缓坡作用而规定的,因此,也需要研究不同缓坡对应的最小坡长。

表1 高速公路最小坡长规定值

Tab.1 Specified value of minimum slope length of expressway

设计速度/(km·h ⁻¹)	120	100	80
坡长/m	300	250	200

国内外均关于连续下坡交通安全性的研究多是针对连续下坡路段的交通事故统计分析^[4-5],建立了制动毂温度模型^[6-7],并提出了改善措施如避险车道^[8],交通管理等^[9-11]。而在连续下坡与纵断面线形指标方面,法国^[12]研究人员认为,在长大下坡中设置缓坡,将造成行车速度回升,使得长大下坡更加危险。Harwood 等人^[13]以观察的历史数据为基础,提出了交通事故率与纵坡坡度的关系曲线,并

指出连续下坡路段比上坡路段更危险,下坡坡度越陡,事故率越高;汽车速度越快,造成的损失也越大。澳大利亚的 Coleman^[14]对货车驾驶员进行问卷调查并查阅文献,研究了连续下坡路段导致货车失控的严重事故,建立了刹车升温模型。陈斌等^[15]在调查收集既有的连续长大下坡路段交通事故数据和道路设计参数的基础上,讨论了3种线形组合情况下的交通事故特征及成因,研究了交通事故与道路纵断面参数之间的联系。史培龙等^[16]研究发现坡度对制动器的温度影响较大;且当坡度和制动方式相同时,坡长越长,温度升高量越大。苏波等^[17]利用大型货车制动鼓温度实地试验,修正 GSRS 制动毂升温预测模型,并提出了长下坡路段坡度和坡长的限值指标,廖军洪^[18]发现长下坡下部路段坡度较缓,且平纵线形间的协调性较好时可以减小货车制动器的负荷。潘兵宏^[19]收集了大量相关资料和文献,通过路段试验、场地试验和理论分析,对山区高速公路平均纵坡与坡长限制指标进行研究,提出了山区高速公路平均纵坡和坡长限制指标值。曹杰^[20]利用经验公式计算出不同海拔高度的不限坡长的临界坡度值,并从无辅助制动和发动机制动两种情况分析计算相应的缓坡坡长值。

根据前述内容可知,目前研究成果多根据连续下坡路段的制动毂温度,建议采取相应的安全性保障措施,如避险车道、车速限制以及标志标线。并研究了连续下坡纵断面线形指标与交通事故关系,根据事故数据或制动毂温度提出了山区连续下坡的平均纵坡及其坡长指标。关于连续下坡路段的缓坡设计指标研究较少,曹杰^[20]虽然对缓坡的临界纵坡与坡长进行了研究,但是其研究的主导车型功重比为9.33 kW/h,与目前货车主导车型不一致。为确保山区高速公路长大下坡路段大型货运汽车安全行驶,合理的缓坡设计可以起到降低制动毂温度和行驶速度的作用,对减少下坡路段货车制动毂使用次数、降低下坡路段的行驶风险具有实际意义,因此有必要根据现行货车在连续下坡路段的运行情况对缓坡相关设计指标进行研究。

本研究选取东风 DFL4251A15 六轴铰接列车为主导车型,对其在下坡受力状态进行分析,在考虑发动机制动条件下,研究不同设计速度及运行速度对应的缓坡临界纵坡值,并基于速度折减特性和制动毂降温特性,分别研究不同特性下的缓坡坡长值,

为设计人员在高速公路连续下坡设计提供参考。

1 货车下坡受力分析

1.1 主导车型选择

在研究公路纵坡设计时,为使研究结果更具有代表性和说服力,更加贴合实际,需选取现阶段公路的主流货运车型作为主导车型进行研究分析。根据《路线规范》^[1]关于现阶段公路运输货运主导车型的阐述,本研究选取满载下的六轴铰接列车作为研究车型,与《路线规范》一致。主导车型由牵引车及半挂车组成,牵引车型号为东风DFL4251A15,整车长度约18 m,功率质量比为5.7 kw/t。

1.2 主导车型下坡受力分析

本研究参考赵含雪^[21]对六轴载货汽车在发动机制动方式下进行受力分析,建立整车下坡受力模型,采用理论分析法从行车动力学和热力学原理,参考相关经验公式,计算不同入坡速度、坡度和档位对应的缓坡坡长。牵引车与半挂车通过铰链连接,在受力分析中,假设如下:(1)在车辆在直线纵坡上行驶时铰链连接处只传递力,不传递力矩;(2)牵引车与半挂车视为刚体。下坡状态牵引车受力分析见图1,货车受到持续制动力矩 T_b 、空气阻力 F_w 、滚动阻力 F_f 、加速阻力 F_j 、重力 G 、重力沿坡道的分力 F_i 、地面支持力 F_N 。

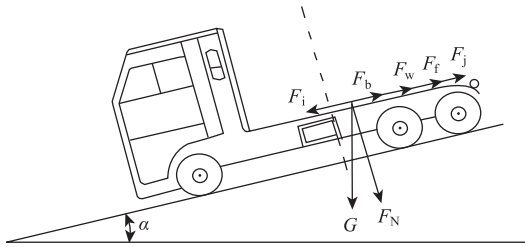


图1 牵引车受力分析

Fig. 1 Force analysis of tractor

由整车受力平衡,得到下坡路段汽车持续制动的行驶平衡方程为:

$$F_i = F_b + F_w + F_f + F_j, \quad (1)$$

$$F_i = Gi, \quad (2)$$

$$F_b = \frac{T_b \cdot i_g \cdot i_0}{r \cdot \eta}, \quad (3)$$

$$F_w = \frac{1}{2} C_D A \rho v^2, \quad (4)$$

$$F_f = Wf, \quad (5)$$

$$f = 0.0076 + 0.000056v, \quad (6)$$

$$F_j = \delta m \frac{dv}{dt}, \quad (7)$$

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 i_k^2, \quad (8)$$

式中, i 为坡度,取 $\tan \alpha = i$; T_b 为持续制动力矩; i_g 为变速器的变速比; i_0 为主减速比; η 为传动效率; r 为车轮的有效半径; δ 为汽车旋转质量系数; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度;一般为 $1.226 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$; W 为车辆载荷; δ_1 为汽车车轮惯性力系数,一般取 $\delta_1 = 0.03 \sim 0.05$; δ_2 为发动机飞轮惯性影响系数,一般载重汽车 $\delta_2 = 0.04 \sim 0.05$; i_k 为变速箱速比,具体的计算公式为: $i_{k(\text{本档})} = V_{\max(\text{高档})} / V_{\max(\text{本档})}$ 。通过以上受力分析,可得到关于坡度和运行速度的表达式,进而建立档位-速度-临界坡度模型,可通过该模型得到不同档位、运行速度下的缓坡临界坡度。

2 连续下坡缓坡坡度控制指标

根据行车动力学理论,货车下坡行驶时,道路坡度使得车辆仅采用发动机制动时即可保持匀速行驶,且坡度小于这个值时,车辆减速行驶,则称此坡度为缓坡的临界纵坡,取其为连续下坡缓坡坡度控制阈值。当货车驶入此缓坡时,货车会减速或者匀速运动,有利于货车挂低档增大发动机制动力,此时货车的主制动器并不工作,因此制动鼓在此时可以进行散热降温,有利于恢复货车的制动性能。

由式(1)~(8)可推导出:

$$mg \sin(\alpha) - F_b - F_w - F_f = F_j = \delta m \frac{dv}{dt}. \quad (9)$$

根据临界纵坡定义,令式(9)右项等于0,因 $\sin \alpha = i / \sqrt{1 + i^2}$,为计算简便,有:

$$\sin(\alpha) = \frac{F_b + F_w + F_f}{mg}, i = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2(\alpha)}}. \quad (10)$$

当采用发动机制动时,式(3)中持续制动力矩 T_b 与转速呈如下二次函数关系^[22]:

$$T_b = -8.224736 \times 10^{-5} n^2 + 3.76413 \times 10^{-1} n + 2.045631 \times 10^{-2}, \quad (11)$$

式中, n 为发动机转速; g 取 9.8 m/s^2 。令:

$$F_b + F_w + F_f = B_2 v^2 + B_1 v + B_0, \quad (12)$$

则联立式(2)~(6)及式(11)得:

$$B_2 = \frac{u_2}{0.142 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{3\pi n}{25v} \right)^3 + \delta_0 m C_2, \quad (13)$$

$$B_1 = \frac{u_1}{0.377 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{3\pi n}{25v} \right)^2 + \delta_0 m C_1, \quad (14)$$

$$B_0 = \frac{u_0}{\eta} \cdot \frac{3\pi n}{25v} + \delta_0 m C_0, \quad (15)$$

式中, v 为货车稳定速度; g 取 9.8 m/s^2 ; u_i 为扭矩系数; C_i 为行驶阻力与车速函数表达式中的阻力系数; δ_0 为空挡时的旋转质量系数。通过以上分析可知, 将式 (10) 中的 $\sin \alpha$ 近似视为 i , 则联立式 (10) 和 (12), 得发动机制动下纵坡 i 关于车速的二次函数为:

$$i = \frac{B_2}{mg}v^2 + \frac{B_1}{mg}v + \frac{B_0}{mg} \quad (16)$$

《路线规范》^[1] 规定, 高速公路设计速度不宜低于 100 km/h , 条件受限时可选用 80 km/h 。在进入连续下坡路段时, 驾驶员先通过降速来挂低档, 不

同挡位对应一定速度范围。当下坡速度按 80 km/h 控制时, 最高可挂至 11 档; 当下坡速度按 100 km/h 控制时, 最高挂至 12 档。因此将 12 档及 11 档发动机制动方式下的临界坡度作为缓坡坡度控制指标 (即取一定条件下的最不利状况), 同时研究表明, 下坡坡度为 $0\% \sim 6\%$ 的范围内时, 大型车的运行速度一般在 $40 \sim 80 \text{ km/h}$ 之间, 因此本研究中将货车最低容许速度取为 40 km/h , 参考各档位对应速度范围, 代入其稳定速度, 得到高速公路设计速度及运行速度下相应的缓坡坡度指标如表 2 所示。

表 2 发动机制动方式下连续下坡缓坡坡度控制指标

Tab. 2 Control value of continuous downhill gentle slope under engine braking mode

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	制动档位	运行速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)										
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
120, 100	12	—	1.60	1.70	1.70	1.80	1.80	1.90	1.90	2.00	2.10	2.30
80	11	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.10	2.20	2.30	2.30	—	—

表 2 中缓坡坡度均为坡度设计阈值, 货车在小于该表对应的坡度上行驶时, 有利于货车减挡降速, 且制动毂处于降温态势, 制动性能有所恢复。表 2 所示缓坡坡度均小于《路线规范》^[1] 规定的 2.5% , 取值规定与行驶速度速度相关, 且划分更加详细, 更有利于保证货车在连续下坡路段运行的安全性, 可为设计人员在连续下坡路段缓坡坡度设计取值提供依据。

3 连续下坡缓坡坡长控制指标

3.1 基于速度特性的缓坡坡长

基于式 (9) 和式 (12), 在等式右边不为零的情况下, 可得:

$$mg\sin(\alpha) - (B_2v^2 + B_1v + B_0) = \delta_j m \frac{dv}{dt} \quad (17)$$

将式 (16) 进行单位换算并对两边进行积分可得:

$$L_v = \int_{v_1}^{v_2} \frac{v}{12\,960 \left(\frac{g \cdot i}{\delta_j \cdot \sqrt{1+i^2}} - \left(\frac{B_2v^2 + B_1v + B_0}{\delta_j m} \right) \right)} dv \quad (18)$$

将不同纵坡和入坡速度值代入式 (18), 可求得不同纵坡、不同速度降低条件下的缓坡坡长。

当货车下坡时运行速度降低值一定的情况下, 缓坡坡度越大, 相应的坡长也越长; 当坡度保持一定的情况下, 减速过程中曲线斜率逐渐增大。这反映了通常在驾驶员制动减速的过程中, 档位由高往

低变化, 发动机制动力变大, 减速度也增大, 降低相同的速度差值所需要的坡长也就越短。对于同一坡度的缓坡而言, 一定距离之内, 坡长越长, 车辆降低的运行速度越多。因此, 设计人员应根据目标速度折减值, 合理地选用缓坡和对应的坡长。进行缓坡设计时, 可利用式 (18) 得到货车下坡过程中速度降低一定数值的所需缓坡长度, 由此根据进入该段纵坡的速度和缓坡的坡度值, 可查询出对应于不同的速度降低值所需的坡长值。

3.2 基于降温特性的缓坡坡长

根据传热学理论, 制动毂的散热方式有 3 种, 分别是热传导、热对流、热辐射。根据相关文献对制动器物理模型的简化分析^[10], 制动毂与周围物体接触面积小, 热阻大, 因此只有很小的热传导散发热量, 可忽略不计。当制动毂温度变化时, 通过热辐射散发的热量最多占散热量的 $5\% \sim 10\%$, 也可忽略不计。因此, 制动毂散热主要考虑热对流, 热对流是指流体各部分之间发生相对位移, 冷热流体掺混所引起的热量传递方式。当货车在缓坡上行驶时, 仅采用发动机制动方式即可匀速下坡, 制动毂散热主要考虑热对流, 此时制动毂与外界空气对流换热。由牛顿冷却公式, 当制动毂因为周围空气的散热而冷却时, 对流换热的热流量 P_d 为:

$$P_d = h_R A_{g2} (T - T_a), \quad (19)$$

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; T 为制动毂温度; T_a 为制动毂周围空气平均温度, 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; A_{g2} 为制动鼓的外表面积。由相关经验公式可知, 鼓式制动器的对流换热系数接近于函数关系:

$$h_R = 5.224 + 1.522\,5Ve^{-0.002\,778\,5V}, \quad (20)$$

式中, h_R 为对流换热系数; V 为平均车速, e 为自然数, 将式 (20) 代入式 (19), 忽略热传导和热辐射的散热作用, 制动鼓的散热热流量近似等于热对流换热热流量为:

$$P_d = (5.224 + 1.522\,5Ve^{-0.002\,778\,5V})A_{g2}(T - T_a)。$$

(21)

制动鼓温度可被近似视为是均匀的, 因此制动鼓温度 T 是行驶时间 t 的函数, 建立方程:

表3 初始温度为 260 ℃ 时对应缓坡坡长

Tab. 3 Corresponding gentle slope lengths when initial temperature is 260 ℃

降温 数值/℃	运行速度/(km·h ⁻¹)					降温 数值/℃	运行速度/(km·h ⁻¹)				
	40	50	60	70	80		40	50	60	70	80
10	860	885	910	935	960	90	7 730	7 950	8 170	8 405	8 640
20	1 715	1 765	1 815	1 865	1 920	100	8 585	8 830	9 080	9 335	9 600
30	2 575	2 650	2 725	2 800	2 880	110	9 445	9 715	9 990	10 270	10 560
40	3 435	3 530	3 630	3 735	3 840	120	10 305	10 595	10 895	11 205	11 520
50	4 295	4 415	4 540	4 670	4 800	130	11 165	11 480	11 805	12 140	12 480
60	5 150	5 300	5 450	5 600	5 760	140	12 020	12 360	12 710	13 070	13 440
70	6 010	6 180	63 55	6 535	6 720	150	12 880	13 245	13 620	14 005	14 400
80	6 870	7 065	7 265	7 470	7 680	160	13 740	14 130	14 530	14 940	15 360

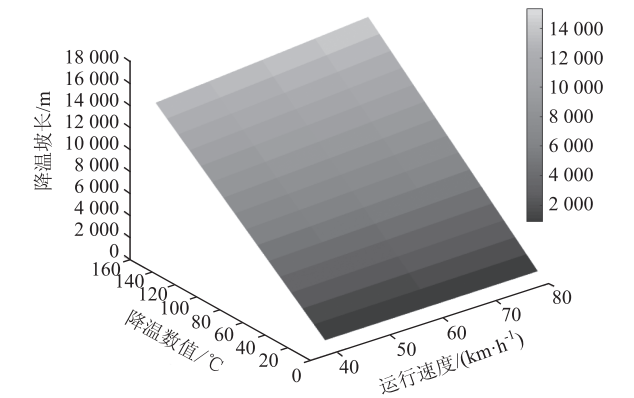


图2 初始温度为 260 ℃ 时对应缓坡坡长

Fig. 2 Corresponding gentle slope length when initial temperature is 260 ℃

在缓坡上行驶时, 采用发动机制动方式时货车主制动器不工作, 制动鼓处于休息降温状态, 降温所需坡长取决于外界空气温度、制动鼓本身温度以及货车运行速度, 与坡度无关。由上图 2 可知当运行速度固定时, 降温所需坡长随降温数值呈线性增长; 当降温数值固定时, 降温所需坡长随运行速度变化趋势同前, 运行速度降低值固定时, 坡长基本保持一致。

$$m_g c_g \Delta T = (P_{bh0} - P_d) \Delta t, \quad (22)$$

式中, m_g 为制动鼓的质量; c_g 为制动鼓比热容。将式 (22) 代入式 (21) 可得:

$$L_T = \frac{m_g c_g (T_2 - T_1)}{(5.224 + 1.522\,5Ve^{-0.002\,778\,5V})A_{g2}(T_2 - T_a)}, \quad (23)$$

式中, L_T 为降低一定温度行驶坡长; T_1 为初温度; T_2 为末温度。

考虑制动鼓的临界失效温度 260 ℃, 以货车制动鼓降温数值为安全边界条件, 通过式 (23) 计算制动鼓在临界温度条件下降低一定温度所行驶的坡长, 计算结果如表 3、图 2 所示。

由图 2 和表 3 的结果可知, 通过设置缓坡来降低制动鼓的温度 30 ℃ 以上时, 需要缓坡长度均超过 2 000 m, 缓坡长度过长, 在实际设计中几乎难以采用。因此, 下坡路段设置缓坡主要目的不是显著降低制动鼓的温度, 而是降低行驶速度, 减少制动鼓的使用次数和强度, 进而避免制动鼓温度进一步升高。对整个下坡过程分析, 当车辆在长下坡路段行驶时, 在陡坡间设置足够长度的缓坡, 可以实现车辆在缓坡段上发动机制动, 在降低车速的同时也能减轻制动鼓的使用负荷。在高强度使用制动鼓后, 让其休息一段时间再使用比连续不间断地高强度使用, 制动鼓温度升高相对缓慢, 能避免车辆为控制车速持续高强度使用制动鼓, 引起制动鼓温度迅速升高超过临界值而失效, 产生严重安全隐患。但要降低制动鼓温度仍需要在设置合理长度的缓坡基础上配合设置降温池实现, 缓坡的设置不能代替降温池的作用。

基于速度降低特性计算得到的缓坡坡长大于表 1 所列《路线规范》^[1] 规定的最小值, 以本研究推荐的缓坡最小长度作为连续下坡路段缓坡坡长参考采用

值,大型货车在进入陡坡前可以利用发动机制动更有利于降低运行速度及控制制动毂温度不过高,保证货车下坡的运行安全。

4 结论

本研究在货车下坡受力分析的基础上,结合行车动力学理论,从仅采用发动机制动即可减速,能减少制动鼓使用次数使制动毂处于降温态势的角度,研究提出了有利于安全行驶的临界缓坡值。并从速度特性与降温特性两个角度研究了高速公路下坡缓坡坡长指标,分别提出了基于速度特性的缓坡坡长计算模型和基于降温特性的缓坡坡长计算模型。主要创新点如下:

(1) 提出了以发动机制动条件下货车匀速下坡临界缓坡值,并综合考虑了车辆不同档位与不同运行速度对于缓坡值取值影响,对缓坡设计指标提供了更加详细的研究与解释。

(2) 通过分析车辆在缓坡上行驶时的速度变化特性和温度变化特性,提出了基于速度特性的缓坡坡长计算模型和基于温度特性的缓坡坡长计算模型。为从安全角度设计缓坡坡长提供了详细的解释和新的思考角度。

(3) 本研究计算所得发动机制动条件下的缓坡坡度值,均小于《路线规范》^[1]规定值,而基于速度折减特性和降温特性计算所得缓坡坡长值,也均大于《路线规范》^[1]规定的最大值。

(4) 研究结果显示下坡路段设置缓坡主要目的是货车降低行驶速度,减少制动毂使用次数和强度,避免制动毂温度升高。但缓坡的设置并不能代替高速公路降温池的作用,明确了设置缓坡对高速公路长下坡的实际意义。

本研究主要从理论角度分析推导了下坡缓坡计算模型,并提出了下坡缓坡坡度及其对应最小坡长建议值,还可以通过实车验证进一步修正参数取值。另外今后的研究还将选择坡度与坡长合适的已建成缓坡路段进行试验,运用工程实例对研究结论进行检验和修正,完善和丰富本研究提出的模型。

参考文献:

References:

- [1] JTG D20—2017, 公路路线设计规范 [S].
JTG D20—2017, Design Specifications for Highway Alignment [S].
- [2] JTG D20—2006, 公路路线设计规范 [S].
JTG D20—2006, Design Specifications for Highway Alignment [S].
- [3] AASHTO. A Policy on Geometric Design of Freeway and Street [M]. Washington. D. C.: AASHTO, 2011.
- [4] 周维东, 邬洪波, 廖军洪. 基于事故预测的山区高速公路长下坡安全评价 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 35 (5): 110—114.
ZHOU Wei-dong, WU Hong-bo, LIAO Jun-hong. Safety Assessment for Long Downgrade of Expressway in Mountainous Area by Method of Accident-prediction [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2016, 35 (5): 110—114.
- [5] 胡立伟, 李林育, 古含焱, 等. 山区长大下坡路段货车行车风险因素识别 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2019, 39 (1): 116—126.
HU Li-wei, LI Lin-yu, GU Han-yan, et al. Driving Risk Factors Identification in Long Downhill Sections of Mountain Area [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2019, 39 (1): 116—126.
- [6] 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 the Automobile Operational Characteristics and Brake Braking Quality of the Freeway in the Continuous Descent [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [7] INFANTINI M B, PERONDI E A, FERREIRA N F, et al. Overheating of Drum Brakes in Downhills [C] // 2006 SAE Brasil Congress and Exhibit. Brasil: SAE, 2006.
- [8] BOWMAN B L, COLEMAN J A. Grade Severity Rating System [J]. ITE Journal, 1990, 60 (7): 19—24.
- [9] Department of Transport and Main Roads. Road Planning and Design Manual [M]. Queensland: Department of Transport and Main Roads, 2001.
- [10] 林煌. 连续长大下坡路段安全保障系统研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
LIN Huang. Research on Security System of Continuous Long and Steep Downgrade Sections [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [11] 屈强. 基于运行速度的山区高速公路长大纵坡路段安全设计研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
QU Qiang. Research on Safety Design of Long Steep Section of Mountain Expressway Based on Operating Speed [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [12] World Road Association. Road Safety Manual [M]. Paris: World Road Association, 2004.

(下转第104页)

- Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [10] COLEMAN M. Use of Auxiliary Brakes in Heavy Vehicles [R]. Sydney: Austroads, 2014.
- [11] 陈立辉, 郭忠印. 高原环境连续下坡路段制动鼓温度预测模型 [J]. 北京工业大学学报, 2020, 46 (7): 772-781.
CHEN Li-hui, GUO Zhong-yin. Prediction Model of Brake Drum Temperature on Continuous Downgrade Segments in High-altitude Environment [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46 (7): 772-781.
- [12] 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. Research on Average Longitudinal Slope of Mountainous Expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [13] 李峰, 刘清君, 桑套刚. 高速公路合理限速对策研究 [J]. 道路交通与安全, 2008, 8 (1): 45-48.
LI Feng, LIU Qing-jun, SANG Tao-gang. Research on Countermeasures for Reasonable Speed Limitation of Freeway [J]. Road Traffic & Safety, 2008, 8 (1): 45-48.
- [14] 邬洪波, 王璇. 高速公路合理限速综合确定方法研究 [J]. 公路, 2016 (12): 170-175.
WU Hong-bo, WANG Xuan. Study of Methodology for Integrated Determination of Optimal Speed Limit for Expressways [J]. Highway, 2016 (12): 170-175.
- [15] 许金良, 白国华, 张晓冬, 等. 新建高速公路限速方案制定原则研究 [J]. 公路, 2019 (10): 181-186.
XU Jin-liang, BAI Guo-hua, ZHANG Xiao-dong, et al. Research on the Principles of Speed Limitation Scheme for New Expressway [J]. Highway, 2019 (10): 181-186.
- [16] 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-axle Articulated Vehicle [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18 (3): 34-43.
- [17] 廖军洪, 邵春福, 邬洪波, 等. 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, et al. Design Methods for Long Steep Downgrades Considering of Brake Temperature of Truck [J]. Journal of Harbin University of Technology, 2014, 46 (12): 114-119.
- [18] 王洪明, 蓝岚, 何操, 等. 高速公路超长下坡隧道群的货车行驶风险与对策研究 [J]. 公路, 2020, (4): 232-237.
WANG Hong-ming, LAN Lan, HE Cao, et al. Research on the Risk and Countermeasures of Truck Driving in Super-long Downhill Tunnel Group of Expressway [J]. Highway, 2020, (4): 232-237.
- (上接第97页)
- [13] HARWOOD D W, COUNCIL F M, HAUER E, et al. Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-lane Highways [J]. Bayes Theorem, 2000.
- [14] COLEMAN M. Use of Auxiliary Brakes in Heavy Vehicles [R]. Sydney: Austroads, 2014.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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 Edition, 2009, 28 (2): 287-289, 297.
- [18] 廖军洪, 邵春福, 邬洪波, 等. 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, et al. Design Methods for Long Steep Downgrades Considering of Brake Temperature of Truck [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46 (12): 114-119.
- [19] 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 Mountain Expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [20] 曹杰. 山区高速公路缓坡设计参数研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
CAO Jie. Research on Gentle Slope Design Parameters of Expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [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. Research on Safety of Heavy Commercial Vehicles on Long Downhill Based on Engine Braking and Exhaust Braking [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [22] 汪双杰, 周荣贵, 孙小瑞, 等. 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-rui, et al. Theory and Method of Highway Operation Speed Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.