

基于制动毂温升的连续下坡安全设计方法

张弛^{1,2} 侯宇迪¹ 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)

摘 要: 为提升高速公路连续下坡行车安全水平, 缓解中国长下坡路段车路协同矛盾, 研究了基于货车制动毂温升的纵坡组合安全设计方法。选取六轴铰接列车为主导车型, 采用理论分析法构建了制动毂温升模型, 通过实车试验验证了模型准确性。收集了试验路段多年事故数据, 基于对货车事故率与制动毂温升的相关性分析, 选取温度达到 200 °C 时下坡距离、坡底温度和温升速率作为纵坡组合安全性分析指标, 对连续下坡纵坡组合设计方法进行了分析。结果表明: 从制动毂温升层面考虑, 连续下坡应从缓坡设置、坡度差控制和坡长组合三方面进行安全设计与优化, 并辅以主、被动防护和交通管控措施; 合理设置缓坡有利于缓解制动毂温升, 但缓坡降温效果有限, 坡度无限趋缓既无益于降低制动毂温度, 也增加了路线长度, 宜根据临界坡度指标合理控制缓坡取值; 相邻坡段坡度差不宜过大, 尽量以坡差较小的纵坡组合进行展线, 宜根据平均纵坡以及最大坡度差回归方程控制坡差; 同时应采用长缓坡和短陡坡的坡长组合形式。由此可最大限度避免连续下坡的货车制动毂超过 200 °C, 提升货车下坡安全。

关键词: 道路工程; 纵坡组合设计方法; 制动毂温升; 长大下坡; 陡缓组合

中图分类号: U412.3

文章编号: 1000-565X(2019)10-0139-12

目前中国西南、西北地区高速公路建设日益增多, 在复杂地形地质条件的限制下形成了较多连续长下坡, 其线形指标较低, 且部分路段为长大桥隧相接, 交通环境复杂, 行车安全难以得到保障。根据相关调查^[1-2], 高速公路连续长下坡历年来交通事故频发, 其中由于货车制动失效导致的事故概率较高, 造成的伤亡人数较多, 泉南高速、漳龙高速等长下坡近五年来因制动失灵驶入避险车道的车辆多达上百起^[3], 货车在连续长下坡的行车风险不容忽视。我国通常采用陡缓结合法进行长下坡纵坡设计, 即在陡坡中插入一段缓坡形成“陡缓陡”的组合形式, 以期能利于货车减速及制动毂降温。《公路工程技术

标准》^[4]和《公路路线设计规范》^[5](下文称标准和规范)对单一纵坡有相应的定量标准, 但其主要是基于货车爬坡性能; 针对连续下坡, 规范仅提出了整体性控制指标, 并从定性角度取消了长下坡中间设置缓和坡段的规定, 该变动主要是为避免以往出现较多的长陡坡接最短缓坡的机械性设计方法, 而未表明长下坡中不可设置缓坡, 也未进一步对纵坡组合设计方法进行阐释。因此标准及规范尚难以指导长下坡纵坡线形的安全设计与优化, 长下坡的行车安全不足以从源头上得到提升。

目前对长下坡纵坡组合设计方法的研究主要是基于驾驶员负荷^[6-10]、三维仿真^[11-13]、运行速

收稿日期: 2019-03-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0803906); 中国博士后科学基金资助项目(2016M590915); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(S2017-ZRJJ-MS-0603)

Foundation items: Supported by the National Key R & D Project(2017YFC0803906), the Postdoctoral Fund of Ministry of Education of China(2016M590915) and the Shaanxi Natural Science Basic Research Project(S2017-ZRJJ-MS-0603)

作者简介: 张弛(1981-)男, 副教授, 博士, 主要从事交通安全与交通 BIM 研究。E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

度^[14-16]和制动毂温度^[17-27]等。驾驶员心生理方面主要利用眼动仪、心电仪等心生理负荷采集设备进行实车试验,建立心率、视点运动轨迹等负荷指标与线形之间的量化模型,以此指导线形设计。三维仿真通过仿真模拟不同条件下的三维线形,从视觉等方面对三维线形下的纵坡参数进行分析。运行速度方法是根据货车下坡速度变化特性,求解利于货车安全降速的纵坡线形。由于长下坡事故大多由载重货车制动毂“热衰退”导致,而前三方面研究鲜有考虑货车制动性能,无法从根本上解决问题,因此现有研究大多集中在制动毂温升层面。对此,国外研究通过温升模型指导下坡的速度控制、标志设置等安全保障设计,如美国FHWA通过五轴半挂车温升模型构建了GSRS系统以评价纵坡安全性^[17]。澳大利亚Austroad利用六轴半挂车温升模型对下坡货车进行速度预警^[18]。而国内研究多关注基于制动毂温度的纵坡设计方法,通过温度与纵坡指标之间的量化关系对纵坡线形进行设计和优化。周荣贵等^[19-23]等先后根据多种主导车型,采用不同方法建立了温升模型以解算临界温度条件下的平均纵坡和坡长,作为长下坡设计安全指标;杜博英等^[24-25]提出可将基于制动器温度的临界坡度作为山区高速长下坡缓和过渡段设计的控制坡度;廖军洪等^[26-27]利用GSRS温升模型对单一展线和设置缓坡展线两种方式的制动器温升进行了对比分析;陈富坚^[28]将温升模型与可靠度结合提出纵坡可靠性设计方法,为深入研究纵坡组合设计奠定了基础。

综上所述,大多数研究仅通过制动毂温度对纵坡线形进行整体性控制,推导出诸如平均纵坡、安全坡长等宏观性指标,缺乏坡段级、微观层面的研究。而相邻坡度及坡长的不良组合、缓坡的设置不当,不利于缓解制动毂温升态势,增加了货车制动失效风险。其次,现有研究大多以比功率为8~9.3 kW/t的货车为主导车型,不符合我国货运车辆大型化发展的趋势。相关调研表明^[29],近年来中国高速公路货运车型大型化趋势显著,以六轴铰接列车为主的半挂列车已成为公路货运主流,其比功率仅为5.12~6 kW/t,与以往纵坡设计主导车型性能差别较大,导致新车与旧路矛盾凸显,且该矛盾将在未来一段时间内存在。因此为缓解车路不协同矛盾,既需从汽车层面逐步提升货车下坡性能及辅助装备,也应合理完善在既有车辆性能条件下的纵坡设计方法。

文中针对以上研究背景,从主导车型及建模方法出发,构建铰接列车制动毂温升模型,通过实车试

验验证模型准确性。以温升模型为基础,采用相关指标对连续下坡纵坡组合设计方法进行定性定量分析,以此为深入研究纵坡线形安全性提供理论依据,有助于复杂连续下坡的安全设计与优化。

1 制动毂温升模型构建

1.1 主导车型确定

文中选取六轴铰接列车为主导车型,该种货车由牵引车及半挂车组成,长约18 m。考虑到中国大型货车中使用发动机制动及排气制动系统较多^[30],而相比排气制动,发动机辅助制动下的制动毂温升更快,制动失效风险更高。受经济性等条件影响,液力缓速器、电涡流缓速器等缓速器系统在中国仍较少采用,同时山区部分高速路段受积雪冰冻的影响,冬季不宜采取淋水降温。因此,对六轴铰接列车在发动机与行车制动器联合制动工况下的制动毂温升进行建模。

1.2 制动毂温升模型建立

目前制动毂温升建模方法主要可分为理论分析法、实测回归法和软件仿真法,文中参考FHWA^[17]对五轴半挂车及苏波^[20]对三轴货车制动毂温度的建模方法,采用理论分析法进行模型构建,即利用行车动力学求解车辆所受地面制动力,结合驱动轮力矩分析求得制动毂的制动力矩,最后根据热平衡计算毂的生散热速率,进而建立发动机辅助制动条件下制动毂温升模型。

(1) 货车受力分析

牵引车与半挂车通过鞍座相连,该鞍座间的耦合作用对牵引车存在一定程度的约束,当整车保持匀速下坡时,假设鞍座处只承受力,不承受力矩。对不进行转向、稳速下坡的牵引车进行受力分析,当坡度较大时,在使用主制动器的同时采用了发动机辅助制动,则货车稳速下坡时其牵引车受力如图1所示。

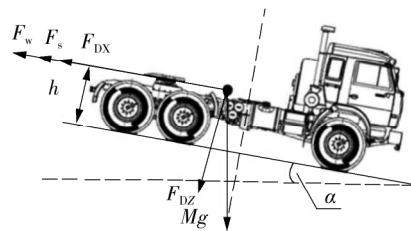


图1 牵引车受力分析

Fig. 1 Force analysis of tractor

由整车受力平衡及经验公式可得:

$$F_w + F_s + F_{DX} = Mg \times \sin\alpha \quad (1)$$

$$F_w = \frac{1}{2} C_p S V^2 \quad (2)$$

$$F_{DX} = M_t \alpha \left(\frac{h_A - h_B}{h_D - h_B} \right) + f \left[M_t \frac{L_V}{L_D} + M_t \alpha \left(\frac{h_A - h_B}{L_D} \right) \right] \quad (3)$$

式中 F_w 为空气阻力, F_s 为制动时车轮所受的地面制动力, F_{DX} 为鞍座处所受纵向力, 可通过对挂车进行受力分析求得^[31] M 、 M_t 为牵引车、挂车总重 f 为滚动阻力系数, C 为空气阻力系数, S 为货车迎风面积; ρ 为空气密度, V 为车速, h_A 、 h_B 、 h_D 分别为挂水质心、双后轴悬架受力点以及鞍座受力点的高度, L_D 、 L_V 为鞍座受力点与挂车后轴悬架受力点距离、鞍座受力点与挂水质心距离。

(2) 驱动轮力矩分析

实地试验表明^[30], 与前轮及挂车车轮相比, 牵引车驱动轮制动鼓的散热条件差、温度上升快, 且第 3 轴轮毂较第 2 轴的温度更高, 加之发动机辅助制动是向驱动轮提供牵阻力从而降低车速, 因此将牵引车第 3 轴驱动轮制动鼓作为研究对象进行建模。对于采用主制动器保持稳定速度下坡的货车来说, 其驱动轮以驱动轴轴线为中心做匀速转动, 此时合力矩为零, 可得驱动轮力矩平衡方程:

$$F_{bd} r_d = N_{bd} + N_a + N_h \quad (4)$$

式中 F_{bd} 为制动时驱动轮所受地面制动力, r_d 为驱动轮动力半径, N_{bd} 为驱动轮制动器产生的制动力矩, N_a 为发动机辅助制动产生的制动力矩, N_h 为驱动轮因轮胎迟滞产生的力矩。

文献 [20] 和 [32] 通过实车下坡试验及经验公式给出了轮胎迟滞力矩和发动机辅助制动时由发动机传动到车轮的制动力矩的算法:

$$N_h = F_d f r_d \times 0.02 / i \quad (5)$$

$$N_a = \left[\left(-8.225 \times 10^{-5} \times \left(\frac{i_k i_0 V}{7.2 \pi r_t} \right)^2 + 3.734 \times 10^{-1} \times \left(\frac{i_k i_0 V}{7.2 \pi r_t} \right) + 2.046 \times 10^2 \right) i_k i_0 \right] / \eta \quad (6)$$

式中 F_d 为驱动轮所受垂直荷载, r_t 为驱动轮滚动半径, η 为传动效率。

货车下坡持续制动时, 各轮制动力 (即车轮所受路面摩擦阻力) 不尽相等, 设驱动轮的制动力分配系数为 β , 则驱动轮制动力为

$$F_{bd} = \beta F_s \quad (7)$$

(3) 热力学分析

温升的热量来自摩擦片与鼓摩擦产生的热量,

假设二者间的摩擦力为 f_{bd} , 二者接触面的相对运动速度为 V_{bd} , Q_{in} 为单个驱动轮制动鼓摩擦生成热量, 忽略制动鼓的热传导及热辐射作用, 仅考虑热对流, 其对流热量为 Q_{out} , 如图 2 所示。

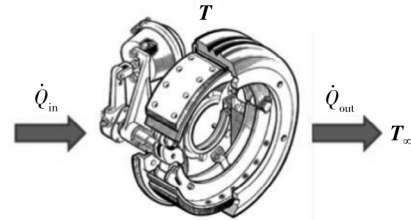


图 2 制动鼓生散热

Fig. 2 Brake drum heat dissipation

根据热力学理论, 可得式 (9) - (11):

$$f_{bd} = N_{bd} / r_d \quad (8)$$

$$Q_{in} = 0.95 f_{bd} V_{bd} (L/V) \quad (9)$$

$$Q_{out} = h_c A (T - T_{\infty}) (L/V) \quad (10)$$

$$m_d c_d \Delta T = Q_{in} - Q_{out} \quad (11)$$

式中 Q_{in} 为单个驱动轮制动鼓摩擦吸热速率, f_{bd} 为摩擦片与制动鼓间摩擦力, V_{bd} 为二者相对运动速度, Q_{out} 为单个驱动轮制动鼓摩擦散热量, h_c 为对流换热系数, A 为制动鼓外表面积, T_{∞} 为周围环境温度, m_d 为制动鼓质量, c_d 为鼓比热容, L 为下坡坡长。

(4) 考虑临界坡度的修正模型

上述温升模型是建立在货车持续使用主制动器的条件下, 但实际下坡过程中当坡度缓于一定值时, 存在不使用主制动器, 仅在发动机制动力及外力作用下便能控制车辆稳速的情况, 此时制动鼓处于降温状态, 将该坡度称为发动机辅助制动下的临界坡度 i_c 。

当坡度小于或等于临界坡度时, 货车仅采用发动机辅助制动以控制车速, 发动机停止供油, 不使用主制动器, 则 $N_{bd} = 0$, 结合式 (4) ~ (7) 可求得发动机辅助制动下的临界坡度, 表 1 列举了高挡下各挡位可达到的速度范围内对应的理论临界坡度值, 其余挡位情况不再赘述。

表 1 六轴铰接式货车 (满载) 临界坡度 i_c

Table 1 Six-axis articulated wagon (full load) critical slope

制动方式	挡位	临界坡度 / %						
		50 ¹⁾	55 ¹⁾	60 ¹⁾	65 ¹⁾	70 ¹⁾	75 ¹⁾	80 ¹⁾
发动机	12	1.69	1.75	1.80	1.87	1.94	2.03	2.10
辅助	11	1.78	1.84	1.91	1.96	2.04	2.13	2.23
制动	10	1.92	2.00	2.08	2.15	—	—	—

1) 为稳定车速 km/h.

根据上述分析可知,当坡度小于临界坡度时, $N_{bd}=0$ 则 $Q_{in}=0$, 此时模型应为纯散热状态下的温升模型. 结合上述式(1) — (11) 可建立考虑临界坡度的制动毂温升模型:

$$T=(T-T_{\infty})e^{\left(\frac{-h_cA^2}{m_d c_d t}\right)}+T_{\infty}, \quad i \leq i_0 \quad (12)$$

$$T=\left(T-\frac{0.95V(\beta F_s r_d-N_a-N_h)+T_{\infty} h_c A}{7.2 r_l h_c A}\right)e^{\left(\frac{-h_cA^2}{m_d c_d t}\right)}+\frac{0.95V(\beta F_s r_d-N_a-N_h)+T_{\infty} h_c A}{7.2 r_l h_c A}, \quad i > i_0 \quad (13)$$

2 制动毂温升模型验证

2.1 实车试验

选取东风 DFL4251A15 六轴铰接式列车为试验车型,以 G5 京昆高速雅安至西昌段三处连续长下坡为试验路段进行实车试验. 该高速下行方向的货车当量交通占比超过 50%, 桥隧比高达 55%, 存在多处连续陡坡与桥隧重合路段. 道路环境复杂, 其相关参数如表 2 所示. 路段下坡整体断面见图 3.

表 2 长下坡道路参数

Table 2 Long and steep downhill road parameters

下坡路段 (试验桩号)	长度/ km	高差/ m	平均 纵坡/%
1 号连续下坡 (ZK2118+340—ZK2093+800)	23.20	720.64	3.11
2 号连续下坡 (ZK2004+810—ZK1974+570)	32.05	737.15	2.30
3 号连续下坡 (K2019+740—K2030+900)	11.16	336.21	3.01

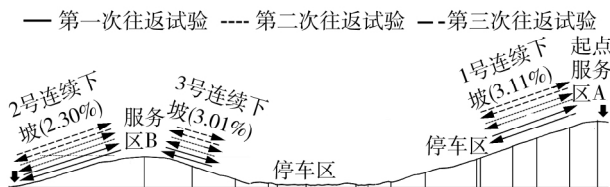


图 3 试验路段断面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vertical alignments of 3 test sections

该试验基于高档(10~12 挡)发动机辅助制动,不开启缓速器及淋水.在满载 49t 条件下,通过主制动器及辅助制动将车速控制在 55~65 km/h 的范围内.选取 3 位经验丰富的货车驾驶员分别进行一次

往返试验,每次试验依次通过 1 号、2 号和 3 号连续下坡.各坡段在安全行驶状态下不停车下坡.仅当制动毂处于危险状态或行至坡底时停车降温.试验全程采用换挡信号采集器、温度信号无线采集和接收器、VGPS 速度仪等仪器,获取了行驶速度、行驶距离、挡位变化位置和两驱动轮内侧制动毂温度等动态数据.取 3 次试验温度的平均值作为实测温度与模型温度进行对比.

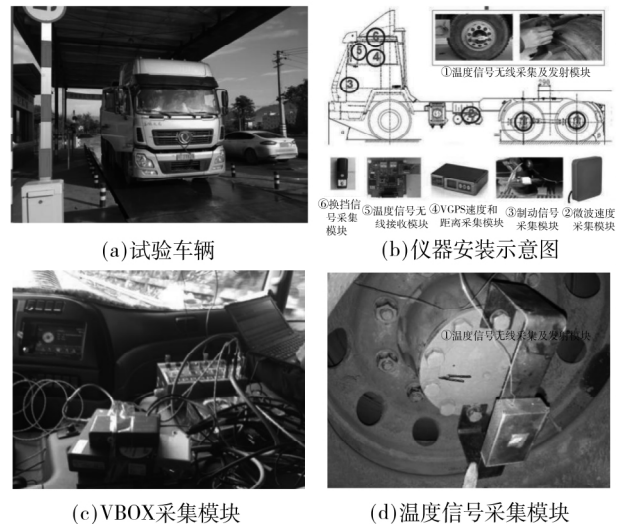


图 4 试验车辆及试验数据采集装置

Fig. 4 Test vehicle and test data acquisition device

2.2 模型验证

将试验车型参数、各坡段速度和挡位等代入制动毂温升模型进行计算,得到变速条件下制动毂温升曲线,并与实测温度进行对比,如图 5(a)、(b)、(c) 所示.

将各坡段温度数据导入 SPSS 软件.经计算 1 号~3 号下坡预测温度与实测温度间的 Pearson 相关系数分别为 0.978、0.980 和 0.962,均高于 0.8,显著性分别为 0.00、0.00 和 0.01,均小于 0.01,表明预测温度与实测温度相关性高度显著.同时,1 号~3 号下坡的平均偏差分别为 17.26、9.21 和 12.31℃,最大偏差分别为 33.52、24.01 和 31.10℃,表明理论温升模型产生的误差水平较低.由于货车制动还受驾驶员行为、平面线形、桥隧构造物、交通流和交通标志等因素的影响,模型预测温度与实测温度间的误差难以避免.综上可知模型预测温度能够很好的反应实测温度的温升趋势,表明理论温升模型可用于复杂连续下坡的货车制动毂温度预测.

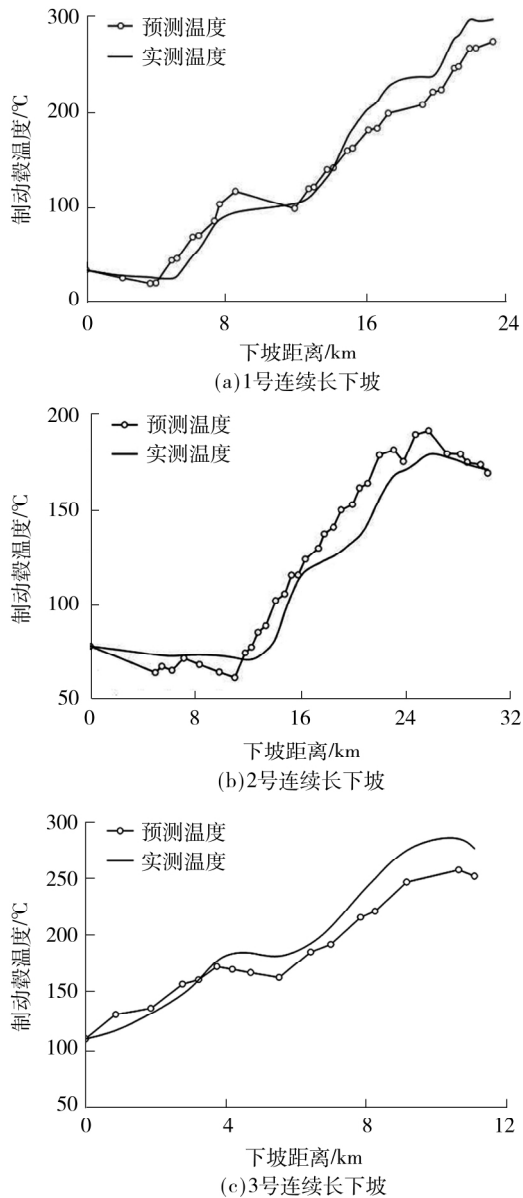


图 5 制动鼓温升对比

Fig. 5 Contrast of brake drum temperature rise

3 考虑制动鼓温升的纵坡组合安全性分析指标

3.1 制动鼓温升与事故率相关性

纵坡线形越不利,连续下坡的货车制动鼓累积温度越高,部分路段温度上升速率越快,因此初步选取制动鼓温度和温升速率作为分析指标。制动鼓温度反映了货车下坡中制动鼓的累积温度,是从宏观角度对纵坡安全性进行界定;温升速率指货车在某一坡度路段上行驶时,每公里距离内的制动鼓温度变化数值,反映了单个坡度的制动鼓温度变化率,其弥补了以往研究中缺少坡段级、微观层面分析指标

的缺陷。

首先分析温度及温升速率与事故率相关性,以进一步论证上述指标的合理性。从高速公路交警部门获取了试验路段 2013—2017 年间六轴货车事故数据,并筛选出“冲出路基、追尾和驶入避险车道”等与制动失灵相关的事故数据。其事故货车总重虽然不尽相同,但由于试验路段在运营期实行了严格的货运车辆超限管控(货车总重限 49 t),因此可将 49 t 作为货车最不利载重;此外,规范中指出满载六轴货车(49 t)以 12 挡发动机制动,且保持 60 km/h 速度持续下坡时相对最不安全^[5],同时通过对试验路段货车速度数据的分析,实测速度分布大多集中在 58~63 km/h。因此,事故货车载重、速度及挡位虽存在一定差异,仍可通过温升模型考量相对最不利条件下制动鼓温升与事故率的相关性。将相对最不利条件下车辆、道路参数代入温升模型,输出三处连续下坡的货车制动鼓温度,并计算不同路段温升速率,通过聚类分别计算同一温度区间和温升速率区间内路段的事故率,结果见图 6。

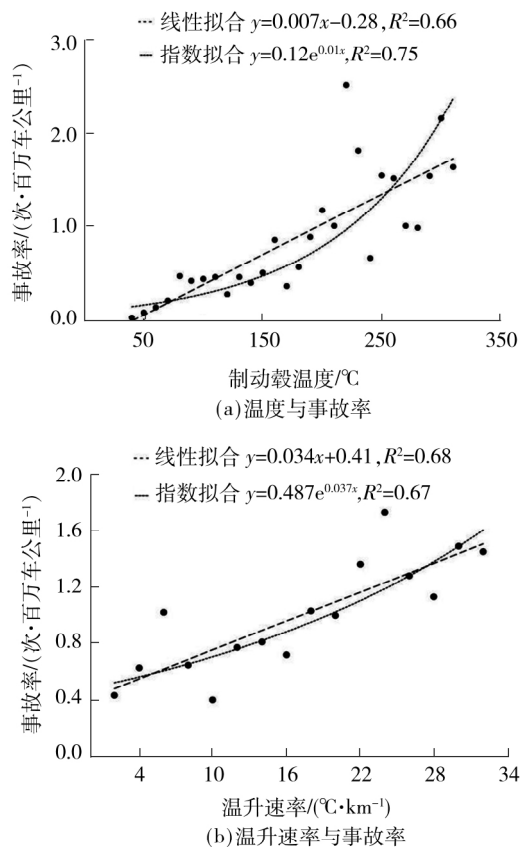


图 6 制动鼓温升与事故率相关性

Fig. 6 Correlation between brake drum temperature and accident rate

由图 6(a) 可知, 温度与事故率呈正相关趋势, 当温度超过 180°C 后, 事故率急剧上升, 二者间关系可用指数或线性关系进行描述, 其拟合优度 R^2 分别为 0.75 和 0.66, 表明二者相关性较强. 即随着制动鼓温度的上升, 货车由于制动失灵发生事故的概率增大, 并在接近 200°C 时显著升高, 这与大多数室内试验测定的 200°C 热衰退温度较为接近. 由图 6(b) 可知, 温升速率与事故率呈正相关趋势, 二者间关系可用指数或线性关系进行描述, 其拟合优度 R^2 分别为 0.67 和 0.69, 表明二者相关性较强. 即随着温升速率的上升, 货车由于制动失灵而发生事故的概率逐渐增大, 货车的行车风险逐渐升高.

3.2 纵坡组合安全性分析指标

根据上述分析, 取 200°C 作为制动鼓发生热衰退的临界温度, 将连续下坡的坡底温度以及制动鼓升至 200°C 时的下坡距离作为纵坡宏观安全性分析指标, 表征货车累积下坡风险. 同时将制动鼓温升速率作为纵坡微观安全性分析指标, 表征货车在某一路段的行车风险.

其中, 温升速率为单位距离内温度的变化率, 其主要由坡度决定, 并与坡度呈非线性关系, 而受坡长影响较小. 将不同坡度和单位坡长值代入温升模型, 可求解各坡度对应的温升速率. 但需注意温升速率与制动鼓温度间存在一定内在关系, 当货车采用联合制动在同一坡度(大于临界坡度) 稳速下坡时, 制动鼓温度持续上升, 而周围空气温度变化相对较小, 鼓内外温差不断增大, 制动鼓与周围空气进行对流换热的速率增大, 而鼓的生热速率不变, 导致制动鼓的温升速率随温度上升而逐渐下降. 当坡度较小、温度较高时, 在该纵坡上的散热流量甚至超过了生热流量, 温升速率小于零, 制动鼓呈降温态势; 当货车在小于等于临界坡度的纵坡上行时, 货车仅采用发动机制动, 此时温升与坡度无关, 温升速率为负值(降温), 鼓的对流换热速率随温度上升而增大, 即降温速率不断增加. 在相对不利条件下, 温升速率随温度的变化趋势如图 7 所示.

综上所述, 可根据连续下坡的坡底温度、制动鼓升至 200°C 时的下坡距离和制动鼓温升速率, 对连续下坡纵坡组合的安全设计方法进行分析.

4 连续下坡纵坡组合安全设计方法分析

4.1 纵坡组合温升特性

目前我国对于连续下坡纵坡设计主要采用陡缓

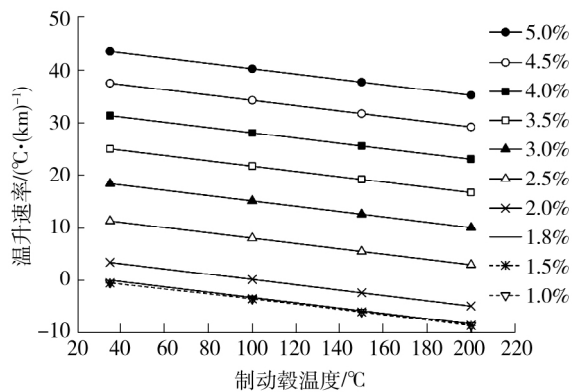


图 7 不同坡度下制动鼓温度与温升速率关系

Fig. 7 Relationship between temperature and temperature rise rate of brake drum under different slope

组合法, 因此基于货车制动鼓温升特性, 从提升货车行车安全角度对陡缓组合的安全设计方法进行分析. 首先仅考虑单个相邻坡段的纵坡组合. 根据前文分析及结合图 7 可知, 货车在相对不利条件下, 以初始温度 T_0 (取环境温度 35°C) 进入某一坡度路段时, 具有在该条件及坡度下对应的理论最大温升速率. 由此可求得不同坡度组合对应的最大温升速率, 如图 8 所示. T_0 及 v 改变时其温升速率分布情况与图 8 相似.

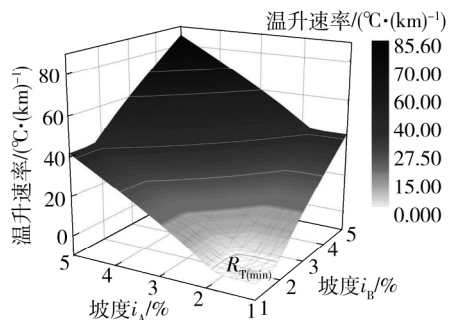


图 8 不同坡度组合对应的制动鼓最大温升速率 R_T

Fig. 8 Maximum temperature rise rate of brake drum corresponding to different slope combinations

由表 1 查得相对不利条件下的临界坡度 $i_c = 1.8\%$, 温升速率具有以下变化特性:

①对于单一坡度 i , 当 $i < i_c$ 时, 温升速率为定值, 其降温数值相对较低 (200°C 时仅为 $-10^{\circ}\text{C}/\text{km}$); 当 $i > i_c$ 时, 温升速率随坡度增大而增大, 且其升温数值相对较高;

② $i_A \leq i_c$ 且 $i_B \leq i_c$ 时 $R_{TA} + R_{TB} = R_{T(\min)} = -2^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 此时温升速率为定值;

③ $i_A \leq i_c$ 且 $i_B > i_c$ 时 $R_{TA} + R_{TB} = \begin{cases} R_{TB} & i_A = i_c \\ R_{TB} - 1 & i_A < i_c \end{cases}$,

此时温升速率不受 i_A 大小的影响, 仅随 i_B 增大而增大;

④ $i_A > i_c$ 且 $i_B > i_c$ 时, 此时温升速率随组合坡度的增大而增大。

由上述温升特性易知, 对于陡缓组合, 降低缓坡坡度(此时陡坡不变)可在一定程度上控制制动鼓温升, 当行驶坡度低于临界纵坡时, 制动鼓为降温态势, 但其数值相对较低, 且不受坡度大小影响。因此, 适当降低坡度能够缓解制动鼓温升, 当坡度取为临界坡度时可获得最大收益; 而继续降低坡度将不影响陡缓组合路段的制动鼓温升, 即缓坡的降温效果是有限的。

4.2 纵坡组合设计参数

进一步分析不同陡缓组合的安全性, 对陡缓组合中缓坡坡度、陡缓坡坡度差和坡长组合 3 种关键参数进行分析。以平均纵坡 3% 为例, 对其单一纵坡展线与不同陡缓组合展线进行对比: 分别以 3% + 3% (单一纵坡)、3.5% + 2.5%、3.8% + 2.2%、4% + 2%、4.2% + 1.8%、4.5% + 1.5% 和 5% + 1% 进行纵坡组合设计, 单个纵坡坡长均取 500 m。为充分明确不同陡缓组合的温升效果, 将各纵坡组合进行重复、连续展线, 参考规范中对连续下坡高差及坡长的界定标准, 使各组合展线均满足“平均纵坡 3%, 总高差 450 m, 总里程 15 km”的道路条件。

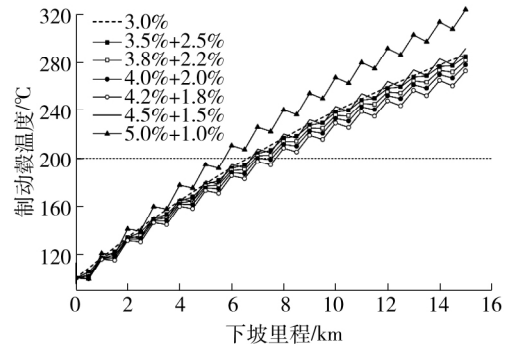
(1) 缓坡坡度

根据上述条件, 以平均纵坡为控制基准, 采用“陡坡 i_s + 缓坡 i_l ”的展线形式, 考量制动鼓在相对最不利条件时的温升态势, 结果如图 9 所示。

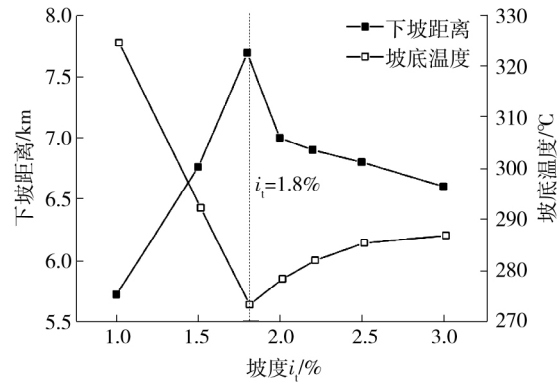
经对比可知:

①当缓坡大于临界坡度(1.8%)时, 随着缓坡坡度减小, 坡底温度逐渐降低, 温度达 200 °C 时的下坡距离逐渐增大, 但二者变化较为缓慢;

②当缓坡等于临界坡度时, 坡底温度达到最低, 同时下坡距离最长; 当缓坡小于临界坡度时, 随着缓坡坡度减小, 下坡距离急剧减小, 而坡底温度急剧升高, 此时减小缓坡反而加剧了温升。这是由于高差及总里程不变时, 陡缓坡的设置具有联动性, 即减小缓坡取值需增大陡坡坡度。由图 7 和图 8 可知, 当缓坡小于临界坡度时, 降温速率并不会随坡度的改变而变化, 但增大陡坡使得升温速率加快, 导致纵坡组合的温升速率增大, 加剧了路段制动鼓温升。因此考虑陡缓坡联动设置时, 缓坡不宜过缓, 应根据临界坡度指标进行合理控制坡度取值。



(a) 制动鼓温升态势



(b) 温度达 200 °C 时下坡距离与坡底温度

图 9 不同坡度组合的制动鼓温升对比

Fig. 9 Comparison of temperature rise of brake drum with different slope combinations

(2) 坡度差

由于坡度与温升速率呈非线性关系, 需将缓坡(陡坡)作为定量以分析坡度差的安全性。当缓坡为定量时, 显然坡度差越大纵坡组合的温升速率越高, 线形安全性越差。因此以安全温升速率 R_T' 为边界条件, 计算缓坡对应的最大坡度差 i_d 以将坡差控制在安全范围内。将 R_T' 定义为陡缓组合限制下的最大温升速率, 采用温升速率低于 R_T' 的陡缓组合进行展线可明显缓解制动鼓的温升, 其值等于温度达到 200 °C 时货车驶过连续下坡内的平均温升速率, 计算方法见下式。

$$R_T' = \frac{\Delta T}{L} \quad (13)$$

式中: R_T' 为陡缓组合对应的安全温升速率, °C/km; L 为制动鼓达到 200 °C 时货车已驶过的连续坡长, km; ΔT 为坡底与坡顶温差, 在上述条件下坡顶为 35 °C、坡底为 200 °C, ΔT 取 165 °C。

通过温升模型得到货车在相对不利条件下制动鼓达到 200 °C 所需的连续坡长(见表 4)。该坡长值与规范中界定的长下坡连续坡长相比更低, 作为温升速率的控制标准更为安全。通过该连续坡长值计

算出不同平均纵坡对应的安全温升速率 R_T' , 如表4所示。

表4 长下坡连续坡长与安全温升速率

Table 4 Long steep downhill continuous slope length and safe temperature rise rate

平均纵坡 /%	连续坡长 L/km	相对高差 /m	安全温升速率 $R_T' / (^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1})$
3.0	11.8	450	13.98
3.5	8.0	330	20.62
4.0	6.1	270	27.05
4.5	4.9	240	33.67
5.0	4.1	220	40.24
5.5	3.6	210	45.83
6.0	3.2	200	51.56

对于纵坡组合“ $i_A + i_B$ ”给定纵坡 A 的坡度 i_A , 根据边界条件:

$$\frac{R_{TA}L_A + R_{TB}L_B}{L_A + L_B} \leq R_T' \quad (14)$$

式中: R_{TA} 、 R_{TB} 分别为相对不利条件下 i_A 和 i_B 对应的温升速率 $^\circ\text{C}/\text{km}$; L_A 、 L_B 分别为纵坡 A 和纵坡 B 的坡长 km 。

该边界条件需首先考虑坡长影响, 对于同一坡度组合, 与纵坡设计常用的长缓短陡的坡长组合相比, 等坡长组合对应的温升速率明显更大, 其计算出的最大坡度差相对较小, 将其作为坡差控制标准更为安全。因此, 取 $L_A = L_B$, 由式(14)结合图7和图8可计算出 i_A 对应的最大坡度差 $i_d = i_B - i_A$; 考虑排水要求单个纵坡不宜小于 0.3%, 以 0.3% 为 i_A 的初始值, 0.1% 为步长, 可求得多个坡度对应的最大坡度差。由于高速公路平均纵坡一般不会超过 4.5%, 图10给出了4种平均纵坡对应的最大坡度差。

对图10中散点进行非线性拟合, 得到不同平均纵坡对应的最大坡度差回归方程, 其在数理意义上均可接受:

①平均纵坡 3.0%: $i_d = 3.7843 - 1.4329i_A + 0.6017i_A^2 - 0.2341i_A^3$ ($0.3\% \leq i_A \leq 2.6\%$), $i_A > 2.6\%$ 时 $i_d < 0$;

②平均纵坡 3.5%: $i_d = 5.2297 - 2.9833i_A + 2.7624i_A^2 - 1.3925i_A^3 + 0.2067i_A^4$ ($0.3\% \leq i_A \leq 3.1\%$), $i_A > 3.1\%$ 时 $i_d < 0$;

③平均纵坡 4.0%: $i_d = 4.6857 + 0.6719i_A - 2.933i_A^2 + 2.179i_A^3 + 0.6977i_A^4 + 0.077i_A^5$ ($0.3\% \leq i_A \leq 3.6\%$), $i_A > 3.6\%$ 时 $i_d < 0$;

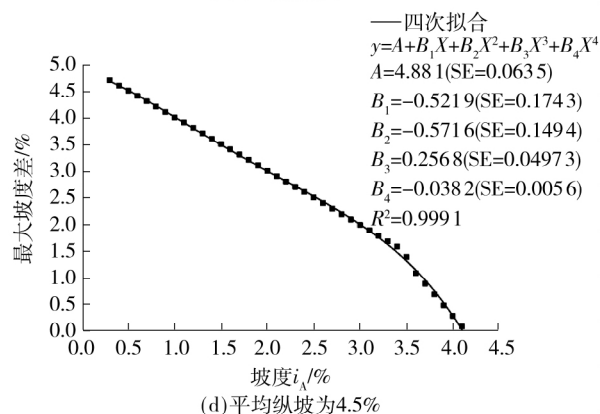
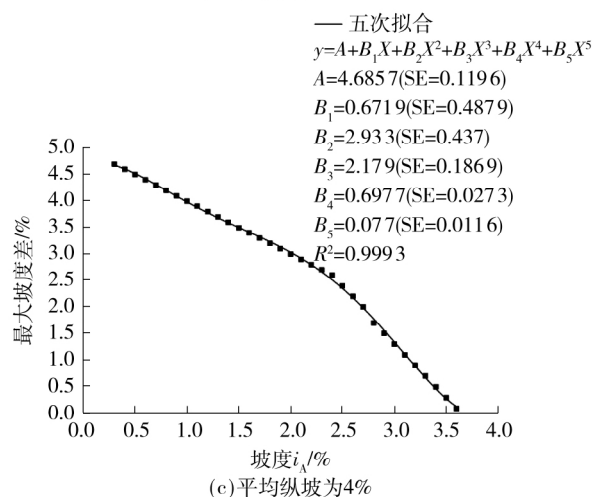
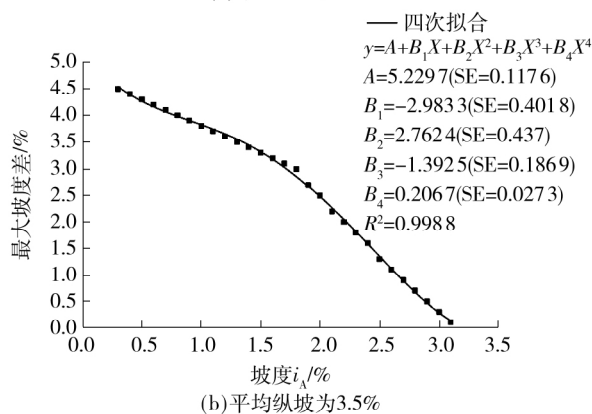
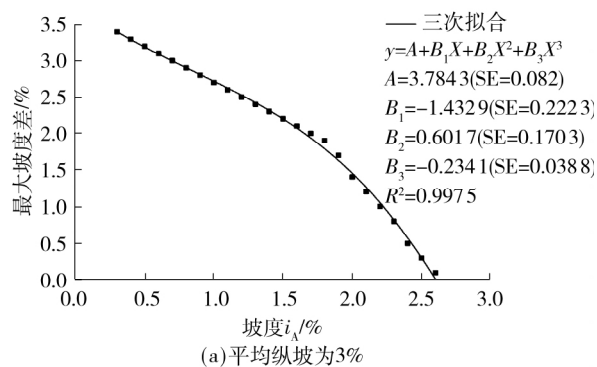


图10 不同平均纵坡对应的最大坡度差

Fig. 10 Maximum slope difference corresponding to different average longitudinal slopes

④平均纵坡 4.5%: $i_d = 4.881 - 0.5219i_A - 0.5716i_A^2 - 0.2568i_A^3 + 0.0382i_A^4$ ($0.3\% \leq i_A \leq 4.0\%$), $i_A > 4.0\%$ 时 $i_d < 0$.

(3) 坡长组合

按陡缓坡之间坡长关系可将坡长组合分为: 长缓短陡组合、长陡短缓组合和等坡长组合. 以平均纵坡为 3%、高差为 450 m、2% + 4% 的坡度组合为控制条件对坡长组合的安全性进行分析, 坡长组合分别为 2% (340 m) + 4% (580 m)、2% (450 m) + 4% (525 m)、2% (500 m) + 4% (500 m)、2% (650 m) + 4% (425 m)、2% (700 m) + 4% (400 m), 第 1、2 组为长陡短缓, 第 3 组为等坡长, 第 4、5 组为长缓短陡, 结果见图 11.

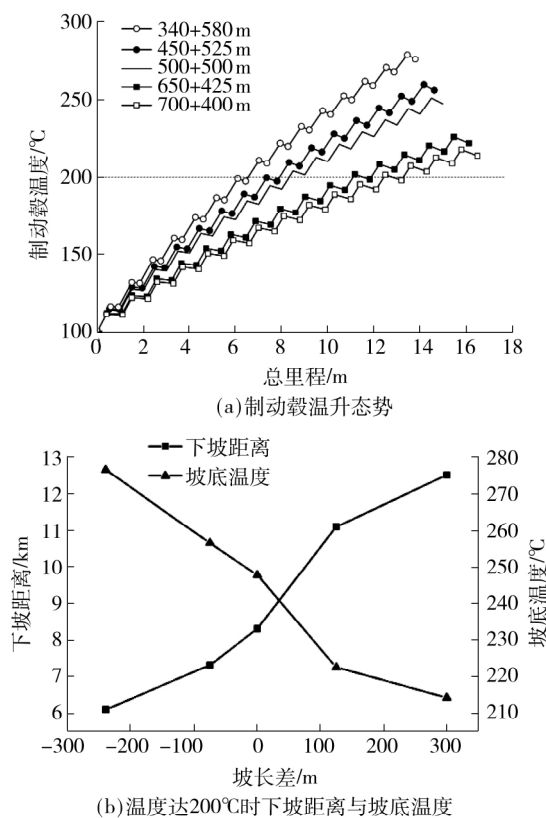


图 11 不同坡长组合的制动毂温升对比

Fig. 11 Comparison of temperature rise with different combination of slope length

经对比可知:

①平均纵坡和高差相同条件下, 温度达 200 °C 时的下坡距离随坡长差(缓坡与陡坡坡长之差)的增大而增大, 坡底温度随坡长差的增加而降低;

②坡长组合对制动毂温升有显著影响, 以长缓短陡、等坡长、长陡短缓组合进行展线的总里程依次

缩短, 而温度达 200 °C 时下坡距离依次减小, 坡底温度依次增加. 这是由于相对缓坡, 陡坡克服同等高差所需距离更短, 而陡坡对应温升速率数值相对较高, 减小陡坡长度增大缓坡长度能够减缓制动毂的温升.

4.3 纵坡组合安全设计与优化建议

综上所述, 从制动毂温升角度考虑, 连续长下坡纵坡组合应从缓坡取值、坡度差控制和坡长组合形式三方面进行安全设计与优化:

(1) 连续下坡中合理设置缓坡有利于缓解制动毂温升, 降低货车行车风险. 当不考虑陡缓坡联动设置时, 单个缓坡坡度越小, 货车行驶时的制动毂温升速率越低, 当小于临界坡度时有利于制动毂降温, 但此时降温效果不受坡度大小影响; 当考虑陡缓坡联动设置时, 缓坡不应过缓, 其坡度宜取为临界坡度或接近临界坡度均有利于降低陡缓组合路段的制动毂温升, 充分发挥缓坡的“降温功能”.

因此, 实际工程中在考虑填挖方和构造物等控制性因素条件下, 宜根据临界坡度指标合理控制缓坡取值, 缓坡无限趋缓既无益于降低制动毂温度, 也增加了路线长度.

(2) 相邻坡段坡度差不宜过大, 尽量以坡差较小的纵坡组合形式进行展线. 宜根据平均纵坡以及最大坡度差回归方程, 对陡缓坡之间的坡度差进行控制, 可使得连续下坡的货车制动毂温度不超过 200 °C.

(3) 坡度组合相同时, 长缓短陡、等坡长和长陡短缓组合的安全性依次降低, 陡坡坡长不应大于缓坡坡长, 宜选取长缓坡加短陡坡的坡长组合形式. 条件受限时可采用等坡长组合. 应避免最大纵坡接最短缓坡的组合, 易导致货车制动毂温度快速上升, 行车风险急剧增大.

(4) 不良纵坡组合设计易加剧连续下坡路段货车制动毂的温升, 如极小坡度(小于临界坡度)与大坡度(接近最大纵坡)组合、长陡坡与短缓坡组合等. 设计阶段可根据连续下坡纵坡设计参数, 对不良纵坡组合路段进行预判, 从而对纵断面方案进行优化. 对于工程条件受限而无法优化的不良组合路段, 应结合全线制动毂温升预测结果分析货车行车风险, 并从主动诱导、被动防护和交通管理角度采取综合安全对策措施. 当存在一定行车风险时应以视线诱导和速度管控为主, 并加强坡顶上游路段的驾驶

宣传和货车加水措施;当行车风险较大时应对停车检修区、自救匝道的设置进行论证,必要时可增设货车专用下坡车道以分离大型载重货车。

5 结语

(1) 选取六轴铰接式列车为主导车型,考虑主制动器与发动机联合制动工况,采用理论分析法构建了制动毂温升模型,通过主制动器临界工作条件对模型进行了修正。选取 G5 京昆高速三处连续长下坡进行实车试验,验证了理论温升模型的准确性。

(2) 收集了试验路段多年事故数据,分析表明制动毂温度、温升速率均与货车事故率存在显著相关性。温度随坡度及坡长的增大而累积上升,反映了纵坡线形的宏观安全性;温升速率为单一坡度下的温度变化率,反映了纵坡坡段的微观安全性,因此采用温度达到 200℃ 时下坡距离、坡底温度和温升速率作为纵坡组合安全性的分析指标。

(3) 基于相对不利行车条件,从降低货车制动毂温升层面分析了连续下坡纵坡组合设计方法。建议从缓坡取值、坡度差控制和坡长组合形式三方面进行安全设计与优化:缓坡设置宜考虑临界坡度及不同坡度的温升速率特性,相邻坡段坡度差宜根据平均纵坡和最大坡度差回归方程控制,坡长组合尽量采用长缓坡加短陡坡的组合形式,以最大程度减缓货车制动毂温升,将连续下坡制动毂温度控制在 200℃ 安全范围内,提升货车下坡安全性。

文中主要从车辆动力学角度出发,结合制动毂温升理论对连续下坡纵坡组合的安全设计方法进行了研究,但其中构建的温升模型未考虑牵引车转向运动,下一步应充分考虑完善该模型。同时,后续将进一步考虑连续下坡中平曲线因素的影响,通过驾驶模拟器深入研究驾驶员在平纵叠加效应下的制动行为,以探索连续下坡的平纵组合安全设计指标与方法。

参考文献:

- [1] 国家统计局编. 中国统计年鉴 2017 [M]. 北京: 中国统计出版社 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: 75-77.
CHEN Bin, YUAN Wei, FU Rui et al. Analysis of traffic accident characteristic on continuous long downgrade sec-

- tion [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering 2009 9: 75-77.
- [3] 朱启韬. 山区长下坡道路安全性评价和避险车道设计研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学 2011.
- [4] JTG B01—2014, 公路工程技术标准 [S].
- [5] JTG D20—2017, 公路路线设计规范 [S].
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 林声, 刘建蓓, 阎莹. 基于驾驶负荷的山区高速公路长大下坡路段安全性评价模型 [J]. 交通运输工程学报, 2013(6): 99-106.
LIN Sheng, LIU Jian-bei, YAN Yin. Safety evaluation model of long-steep downgrade section formontane highway based on driving workload [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering 2013(6): 99-106.
- [9] 杨运兴, 陈芳, 张咏富, 等. 山区高速公路长大下坡路段驾驶员视觉行为特征研究 [J]. 公路 2018(1): 132-137.
YANG Yun-xing, CHEN Fang, ZHANG Yong-fu, et al. Study on visual behavior characteristics of drivers in long and downhill sections of mountainous highways [J]. Highway 2018(1): 132-137.
- [10] 张娟, 朱文强, 李晓伟, 等. 连续长坡路段组合线形与驾驶员瞳孔大小关系的试验分析 [J]. 安全与环境学报 2018(1): 188-193.
ZHANG Juan, ZHU Wen-qiang, LI Xiao-wei, et al. Experimental analysis of the relationship between the combined linear shape of continuous long slope and the pupil size of the driver [J]. Journal of Safety and Environment 2018(1): 188-193.
- [11] LIAO Jun-hong, SHAO Chun-fu, ZHANG Gao-qiang, et al. New algorithm for fitting 3D highway alignment from geometric data [C]//3rd International Congress on Image and Signal Processing, Shan Dong [s. n.], 2010: 2601-2605.
- [12] 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.
- [13] 齐高元. 道路坡度错觉形成机理及整治措施研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学 2017.
- [14] 曹杰. 山区高速公路缓坡设计参数研究 [D]. 西安: 长安大学 2011.
- [15] 胡江碧, 李晓宇, 罗绍建. 基于驾驶行为需求的长大纵坡界定 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(6): 590-594.
- HU Jiang-bi, LI Xiao-yu, LUO Shao-jian. The definition of long steep downgrade based on driver behavior [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(6): 590-594.
- [16] 徐旺. 浙江省高速公路陡坡与缓坡设计指标研究 [D]. 西安: 长安大学 2018.
- [17] Bowman B L. Grade severity rating system(GSRS) -Users manual [R]. Washington DC: Federal Highway Administration(FHWA) , 1989.
- [18] Marcus Coleman. Use of auxiliary brakes in heavy vehicles [R]. Australia: Austroads 2014.
- [19] 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(6): 46-51.
- ZHOU Rong-gui, XU Jian-wei, WU Wan-yang. Research on longitudinal section control index of continuous downhill section of highway [J]. Highway, 2004(6): 46-51.
- [20] 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.
- [21] 苏波, 方守恩, 王俊骅. 基于大货车制动性能的山区高速公路坡度坡长限制研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 287-289.
- SU Bo, FANG Shou-en, WANG Jun-hua. Research on longitudinal slope and slope length limit of mountain expressway based on heavy vehicles braking ability [J]. Journal of Chongqing Jiao Tong University(Natural Science) , 2009, 28(2): 287-289.
- [22] 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 demarcation standards for long and downhill sections of mountainous highways [J]. China Foreign Highway, 2009, 29(6): 6-10.
- [23] 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(3): 10-16.
- YANG Hongzhi, HU Qingyi, XU Jinliang. Safety design and evaluation method for long and downhill section of expressway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010(3): 10-16.
- [24] 杜博英, 方守恩, 迟爽. 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. Application of freight car braking in safety research of highway growing downhill [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(4): 656-659.
- [25] 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.
- [26] 廖军洪, 邵春福, 郭洪波. 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, GUO 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.
- [27] 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.
- [28] 陈富坚, 郑峰, 徐培培. 基于货车制动安全的公路长大下坡可靠性设计方法 [J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(7): 1100-1107.
- CHEN Fu-jian, ZHENG Feng, XU Pei-pe. Reliability design method for long steep downgrades based on trucks' braking safety [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(7): 1100-1107.
- [29] 长安大学运输科学研究院. 2016 中国高速公路运输量统计调查分析报告 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [30] 王剑波. 雅西高速公路 51 km 长大下坡典型货车运行安全测试研究 [D]. 西安: 长安大学 2013.
- [31] 曹志坡. 五轴半挂车弯坡路面行驶驱动载仿真分析 [D]. 重庆: 重庆交通大学 2013.
- [32] 赵雪晗. 基于发动机制动和排气制动的重型商用车长大下坡安全性研究 [D]. 西安: 长安大学 2014.

Safety Design Method of Long Slope Downhill Slope Based on Temperature Increase of Brake Drum

ZHANG Chi^{1,2} HOU Yudi¹ QIN Jihan¹ ZHANG Hong¹

(1. Highway Institute, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Transportation Infrastructure Construction and Management of Digital Engineering Research Center of Shaanxi Province, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: A safety combined design method of longitudinal slope based on the temperature rise of truck brake drum was studied in order to improve the driving safety level of continuous downhill driving on expressway and to alleviate the contradiction between road and vehicle in China. Six-axis semi-trailer were taken as the leading truck, and the brake heating model was constructed by theoretical analysis method. The accuracy of the model was verified by the real vehicle test. The downhill distance when the brake drum temperature reaches 200 °C, the temperature of the slope bottom and the temperature rise rate were selected as the analysis indexes to analyze the combined design method of the longitudinal slope, based on the analysis of the correlation between the accident rate of truck and the temperature rise of the brake drum. The results show that, considering the temperature rise of brake heating, the continuous downhill should be designed and optimized safely from three aspects: transition slope setting, difference control of adjacent slope segments and slope length combination, supplemented by protective measures and traffic management measures. Reasonable transition slope setting is beneficial to relieve the temperature rise of brake heating, but the cooling effect of transition slope is limited. The infinite reduction of slope not only can't help to reduce the temperature of brake heating, but also increases the length of the route. It is advisable to control the slope value reasonably according to the critical slope index. The slope difference of adjacent slope section should not be too large, designing longitudinal alignment as far as possible with the small slope difference of the longitudinal slope combination. It is advisable to control the slope difference according to the average longitudinal slope and the maximum slope difference regression equation. And the slope length combination form of long gentle slope and short steep slope should be adopted. Thus can to the greatest degree minimizes the continuous downhill of the lorry brake hub over 200 °C, improving the safety of the lorry downhill.

Key words: road engineering; vertical combination design method; brake heating; long and steep downhill; combination of steep slopes and transitional slopes

责任编辑: 李 嘉

(上接第129页)

Incorporating Heterogeneity and Subjective Evaluation into Travel Mode Choice

LIU Jianrong WEN Huiying

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Travelers' evaluation on travel mode and heterogeneity of travelers have significant impacts on travelers' choice of travel mode. These impact on travel mode choice were analyzed with the latent-class conditional logit model. Through the confirmative factor analysis, travelers' latent psychological variables, that is, subjective evaluation of travel mode's comfort and reliability, were obtained. The similarities and dissimilarities of in-vehicle time of value, comfort evaluation and reliability evaluation between different latent classes were analyzed by incorporating these latent psychological variables into the latent-class conditional logit model. The study shows that travelers could be divided into two subgroups (class 1 and class 2). On choosing travel mode, travelers in class 1 consider the comfort and reliability of travel mode and have a low value of travel time; while travelers in class 2 don't consider comfort and reliability of travel mode, and have a higher value of travel time than travelers in class 1. The estimated willing-to-pay can be used in planning and evaluation of the public transportation.

Key words: travel mode choice; heterogeneity; latent-class conditional; Logit model; comfort; reliability

责任编辑: 李 嘉

检索工具	EI Compendex 数据库	查证日期	2020年04月08日
收录作者	侯宇迪	署名单位	长安大学公路学院
查证单位	长安大学图书馆	地址	西安市长安大学图书馆信息部 029-82334377
检索人	陈晓平	审核人	徐芳

Safety Design Method of Long Slope Downhill Slope Based on Temperature Increase of Brake Drum

Accession number: 20194407604836

Title of translation:

Authors: Zhang, Chi (1, 2); Hou, Yudi (1); Qin, Jihan (1); Zhang, Hong (1)

Author affiliation: (1) Highway Institute, Chang'an University, Xi'an; Shaanxi; 710064, China; (2) Transportation Infrastructure Construction and Management of Digital Engineering Research Center of Shaanxi Province, Xi'an; Shaanxi; 710064, China

Source title: Huanan Ligong Daxue Xuebao/Journal of South China University of Technology (Natural Science)

Abbreviated source title: Huanan Ligong Daxue Xuebao

Volume: 47 Issue: 10

Issue date: October 1, 2019

Publication year: 2019

Pages: 139-150

Language: Chinese

ISSN: 1000565X

CODEN: HLDKEZ

Document type: Journal article (JA)

Publisher: South China University of Technology

Abstract: A safety combined design method of longitudinal slope based on the temperature rise of truck brake drum was studied in order to improve the driving safety level of continuous downhill driving on expressway and to alleviate the contradiction between road and vehicle in China. Six-axis semi-trailer were taken as the leading truck, and the brake heating model was constructed by theoretical analysis method. The accuracy of the model was verified by the real vehicle test. The downhill distance when the brake drum temperature reaches 200, the temperature of the slope bottom and the temperature rise rate were selected as the analysis indexes to analyze the combined design method of the longitudinal slope, based on the analysis of the correlation between the accident rate of truck and the temperature rise of the brake drum. The results show that, considering the temperature rise of brake heating, the continuous downhill should be designed and optimized safely from three aspects: transition slope setting, difference control of adjacent slope segments and slope length combination, supplemented by protective measures and traffic management measures. Reasonable transition slope setting is beneficial to relieve the temperature rise of brake heating, but the cooling effect of transition slope is limited. The infinite reduction of slope not only can't help to reduce the temperature of brake heating, but also increases the length of the route. It is advisable to control the slope value reasonably according to the critical slope index. The slope difference of adjacent slope section should not be too large, designing longitudinal alignment as far as possible with the small slope difference of the longitudinal slope combination. It is advisable to control the slope difference according to the average longitudinal slope and the maximum slope difference regression equation. And the slope length combination form of long gentle slope and short steep slope should be adopted. Thus can to the greatest degree minimizes the continuous downhill of the lorry brake hub over 200, improving the safety of the lorry downhill. © 2019, Editorial Department, Journal of South China University of Technology. All right reserved.

Number of references: 0

Main heading: Brakes

Controlled terms: Design - Heating - Roads and streets - Safety engineering - Traffic control - Truck transportation - Trucks

Uncontrolled terms: Combination design - Long and steep downhill - Protective measures - Regression equation - Road engineering - Steep slope - Temperature increase - Temperature rise rate

Classification code: 406.2 Roads and Streets - 432.3 Cargo Highway Transportation - 602 Mechanical Drives and Transmissions - 663.1 Heavy Duty Motor Vehicles - 914 Safety Engineering

DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190077

Funding text: Supported by the National Key R & D Project(2017YFC0803906), the Postdoctoral Fund of Ministry of Education of China(2016M590915) and the Shaanxi Natural Science Basic Research Project(S2017-ZRJJ-MS-0603).

Compendex references: YES Database: Compendex

Compilation and indexing terms, Copyright 2020 Elsevier Inc.

Data Provider: Engineering Village