

考虑制动器温度的连续长大下坡纵坡设计方法

廖军洪^{1,2}, 邵春福¹, 邬洪波², 王芳²

(1.城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室(北京交通大学), 100044 北京;

2.交通运输部公路科学研究院 公路交通安全工程研究中心, 100088 北京)

摘要: 为提升连续长大下坡路段安全水平, 研究一种基于制动器温度的纵坡设计方法. 以7个典型连续长大下坡路段为研究对象, 分析了下坡速度、车辆总质量对特定连续长大下坡路段货车制动器温度的影响. 并以车辆到达连续长大下坡终点的制动器温度、制动器温度达到 200 °C 和 260 °C 时距连续长大下坡起点的距离为特征值, 分析了采用等效平均纵坡单一坡度和设置缓坡两种展线形式对货车制动器温度的影响, 提出了连续长大下坡路段区段划分量化标准和纵坡设计建议. 研究表明: 从降低货车制动器温度角度考虑, 连续长大下坡路段应尽可能采用单一坡度展线, 相邻坡段采用不同纵坡坡度时坡差不宜过大, 特别是下部区段.

关键词: 连续长大下坡; 制动器温度; 纵坡; 坡差; 区段划分

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)12-0114-06

Design methods for long steep downgrades considering of brake temperature of truck

LIAO Junhong^{1,2}, SHAO Chunfu¹, WU Hongbo², WANG Fang²

(1.MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology(Beijing Jiaotong University), 100044 Beijing, China; 2. Research Center of Traffic Safety, Research Institute of Highway, MOT, 100088 Beijing, China)

Abstract: To promote the safety level of long steep downgrades (LSD), profile design methods for LSD considering of the brake temperature of truck were studied. Seven typical LSD with different length and average grade percentage were selected. Then the influence of operating speed and gross weight on the brake temperature was analyzed. Furthermore, three characteristic values, i.e. the brake temperature of trucks at the end of the LSD, the distance to the beginning of the LSD when brake temperature up to 200 °C and 260 °C were used to analyze the influence of two different profile design alternatives, one is that unique longitudinal grade is used throughout the whole LSD, another is that different grade percentages are used in different segments, e.g. a steep grade is preceded by a gentle slope. The quantified section classification criterion was presented, and some recommendations were provided. The research shows that from the aspect of reducing the brake temperature of truck, unique grade percentage is recommended. If different grade percentages were used, the difference between any two adjacent segments should be controlled in a small range.

Keywords: long steep downgrades (LSD); brake temperature; longitudinal grade; difference of grade percentages; section classification

受地形地貌条件、区域经济发展和工程投资

等因素的影响, 山区高速公路走廊带选择受限因素多, 导致了大量连续长大下坡路段(以下简称长大下坡)的出现. 我国云南、四川、山西、广东、北京、湖北等近 20 个省份的高速公路均存在长大下坡. 2012 年 4 月通车的雅泸高速公路单个长大下坡已达到 50 km, 平均纵坡近 3%. 受持续降坡的

收稿日期: 2013-10-09.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB725403).

作者简介: 廖军洪(1980—), 男, 副研究员, 博士研究生;

邵春福(1957—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 廖军洪, ynwpl@126.com.

影响, 车辆驶于长大下坡时运行速度呈增长趋势, 为控制速度通常会频繁制动, 易因制动器温度过高导致车辆(特别是重载货车)制动性能大幅度降低或失效, 从而引发交通事故。纵断面线形是长大下坡高差变化的直接反映, 是影响车辆运行速度和制动器温度的重要因素, 与行车安全密切相关, 尤其是对重载货车的影响更为显著。2004 年西部交通建设科技项目^[1]提出了基于下坡安全性的连续纵坡路段坡度和坡长量化标准。苏波、韩跃杰等^[2-3]提出了基于货车制动器温度预测模型的长大下坡路段平均纵坡、总坡长和安全坡长建议值。杨宏志、潘兵宏等^[4-5]基于货车刹车毂温度预测模型, 确定了长大下坡路段合理平均纵坡和坡长, 提出了平均纵坡与坡长限制指标值及其选用原则。吴京梅等^[6]基于国道 G110 北京延庆县城—昌平德胜口段拟建线连续下坡方案, 采用货车制动器温升模型分析了不同坡度、坡长条件下货车制动失灵风险。杜博英等^[7]建立了货车制动器温度模型, 提出了长大下坡临界坡度、安全风险分级指标和评价方法。Mcguire Terry 等^[8]研究了双车道公路长大下坡路段下坡方向设置超车道的必要性和设置方法, 建议在长大下坡距坡底 1/3 处设置超车道, 并尽可能采用 2+1 的横断面形式, 条件受限时可偏移车道中心线为下坡方向提供超车机会。Changjen Lan 等^[9]针对车重功率比高于 120 kg/kW 的重载车辆建立了货车速度曲线图和计算模型, 提出了设置爬坡车道的临界坡长建议。Tiejun Zhang、Yongsheng Chen 等^[10-11]研究了长大下坡路段交通事故与平纵几何线形的关系, 建立了关系模型。

总体来说, 国内外在长大下坡平均纵坡和下坡路段总长度等方面开展了较多研究, 而对长大下坡内坡段组成对行车安全的影响研究较少。然而, 根据经验, 长大下坡相邻坡段组成对驾驶人对前方方位走向(特别是上坡和下坡方向)的判断有较大影响。文献^[12]提到, 相邻路段采用不同的纵坡可能会导致对后续路段纵断面线形的错误判断, 不熟悉道路环境的货车驾驶员会因此采用过高的行车速度。然而, 行业内尚未针对相邻坡段坡差对行车安全的影响开展定量研究, 尚不明确长大下坡坡段组成是否对货车制动器温度有影响或影响的大小。本文以此为出发点, 定量分析长大下坡采用等效平均纵坡单一坡度展线和设置缓坡展线两种形式对货车制动器温度的影响, 为长大下坡纵坡设计提供技术支撑。

1 样本和分析参数的确定

本文基于 2004 年西部交通建设科技项目提出的长大下坡界定标准(平均纵坡分别为 1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0% 时, 所对应坡长若达到 12.5、9.5、7.5、6.0、5.5、4.5、4.0、3.5 km 即为长大下坡), 结合四川、广东、云南等省份长大下坡调研情况, 选取了坡长分别为 7.5、10、15、20、25、30、50 km 的 7 个典型长大下坡作为研究对象, 各路段纵断面设计指标统计见表 1。

表 1 典型长大下坡纵断面设计指标

坡段 编号	坡长/ km	平均纵坡/ %	最大纵坡/ %	最小纵坡/ %	坡段 个数
1	7.5	-2.96	-4.00	-2.20	10
2	10.0	-3.08	-5.00	-1.05	17
3	15.0	-2.46	-4.00	-0.50	25
4	20.0	-2.32	-4.95	-0.80	19
5	25.0	-2.58	-4.00	-0.50	31
6	30.0	-2.29	-3.96	-0.50	38
7	50.0	-2.97	-5.00	-0.50	64

根据工程应用经验, 本文选用行业内较为常用的长大下坡货车制动器温度预测模型(GSRS 模型^[12])对货车在上述 7 个长大下坡路段下坡过程中的制动器温度进行了计算, 提取了货车制动器温度特征值。本文采用的制动器温度预测模型原理为

$$T(x) = T_0 + \{T_\infty - T_0 + K_2 \left[\frac{1}{3.6} (W\theta - F_{\text{drag}}(V))V - P_{\text{eng}}(G_{T_i}, V) \right] \} [1 - e^{-3.6K_1 x/V}] \quad (1)$$

其中: $K_1 = hA_c/m_b C$, $K_2 = 1/hA_c$, h 为 V 的函数; T_∞ 为制动器外部环境温度; T_0 为制动器初始温度; A_c 为制动系统的有效热传导面积; m_b 为制动系统的有效热质量; C 为制动系统的热容量; W 为货车总质量; θ 为坡段纵坡坡度; x 为到坡顶的距离; V 为货车下坡的平均速度; G_{T_i} 为第 i 个档位的传动比。

利用前述模型进行货车制动器温度计算分析时, 需要输入的参数主要包括: 长大下坡各坡段的纵坡坡度和长度、货车下坡速度、货车总质量、货车轴数等。根据典型山区高速公路长大下坡货车运行速度观测数据和计重收费数据统计分析结果, 本文制动器温度计算参数和分析特征值确定如下: 1) 货车代表下坡速度为 60、70、80、90 km/h。2) 货车代表轴数和总质量为 2 轴 30 t、3 轴 40 t、4 轴 50 t、5 轴 60 t、6 轴 70 t。3) 货车制动器温度分析特征值为到达长大下坡终点(以下简称坡底)时制动器的温度、制动器温度达到临界

温度时至长大下坡起点(以下简称坡顶)的距离.研究表明,当制动器温度达到200℃时,货车制动性能开始衰减;当制动器温度超过260℃时,货车制动性能明显下降.因此,本文分析过程中以200℃和260℃作为制动器的临界温度.

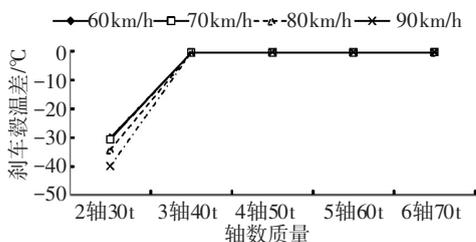
2 特定长大下坡货车制动器温升特性

针对不同总质量、轴数的货车分别以不同代表下坡速度下坡时制动器温度来计算分析,对于某一特定长大下坡,货车下坡过程中制动器温度主要特征:1)随着下坡速度的增加,货车到达坡底时制动器温度变化不大.2)随着下坡速度的增加,货车制动器温度达到200℃和260℃时至坡顶的距离变化不大.3)随着车辆总质量的增加,货车到达坡底时制动器温度呈增加趋势.4)随着车辆总质量的增加,货车制动器温度达到200℃和260℃时至坡顶的距离呈减小趋势.5)随着车辆总质量的增加,货车制动器温度达到200℃和260℃时至坡顶的距离占长大下坡总长度的比例呈减小趋势.6)随着车辆总质量的增加,货车制动器温度由200℃上升至260℃时行驶的距离呈减小趋势,即升温速度更快.

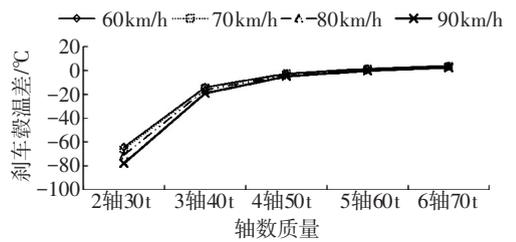
3 坡段组成对货车制动器温度的影响

为分析不同坡段组成对长大下坡货车制动器温度的影响,分别考虑了上述7个长大下坡在设置缓坡(即实际的纵坡坡段组成)和在相同高差情况下采用等效平均纵坡单一坡度两种工况,计算了各代表总质量货车以代表车速下坡时的制动器温度,并基于同一下坡速度和车辆总质量等计算参数对不同展线形式下的制动器温度进行了对比分析,采用的指标主要有:1)货车到达坡底时的制动器温度差.2)制动器温度达到200℃时至坡顶的距离差.3)制动器温度达到260℃时至坡顶的距离差.

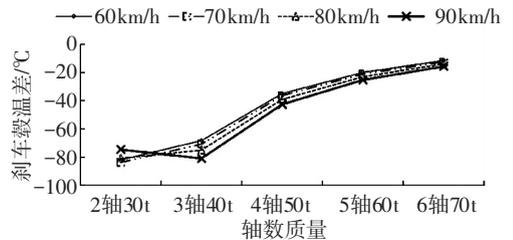
其中,制动器温度差和至坡顶距离差均为采用单一坡度展线与设置缓坡展线时对应物理量的代数差.以货车到达坡底时制动器温度差为例,分析结果见图1.



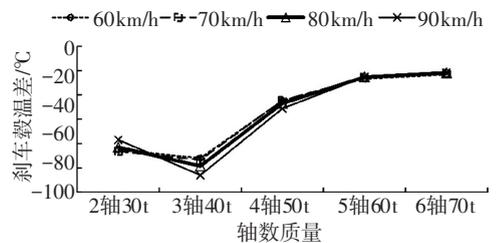
(a) 坡段1坡底制动器温度差



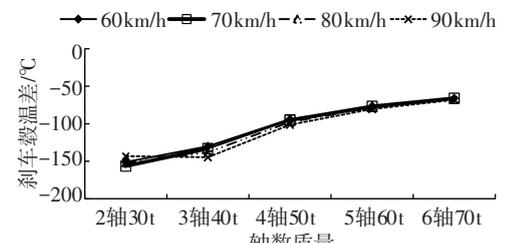
(b) 坡段2坡底制动器温度差



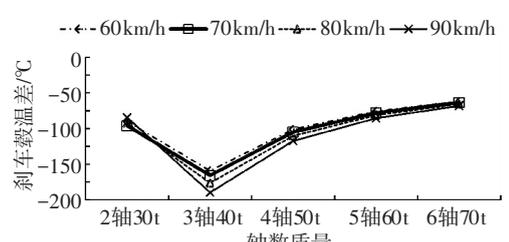
(c) 坡段3坡底制动器温度差



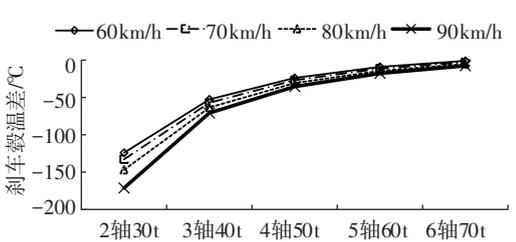
(d) 坡段4坡底制动器温度差



(e) 坡段5坡底制动器温度差



(f) 坡段6坡底制动器温度差



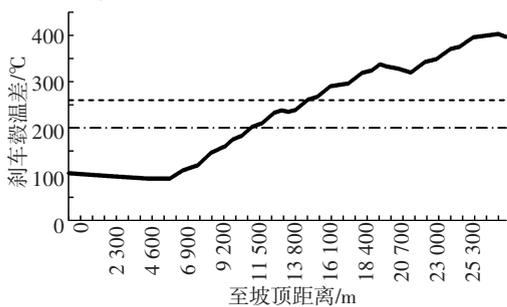
(g) 坡段7坡底制动器温度差

图1 货车到达坡底时制动器温度差对比分析

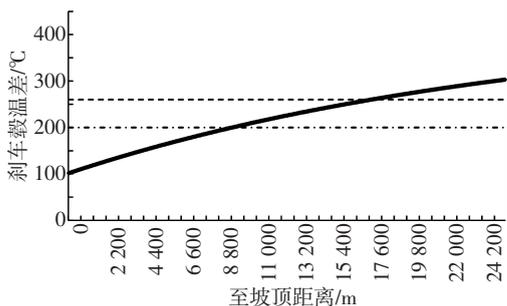
基于7个典型长大下坡分别采用单一坡度展线和设置缓坡展线时货车到达坡底时制动器温度差和制动器温度分别在200、260℃时距坡顶的距

离差计算结果,经综合分析可得出以下结论。

1) 对于同一长大下坡,两种展线形式下货车下坡过程中制动器温度变化趋势有所差异,见图 2。设置缓坡展线时,下坡过程中制动器温度波动较大,局部缓坡路段制动器温度略有下降但总体温升速率较高。采用单一坡度展线时,下坡过程中制动器温度变化幅度较小,总体呈平稳上升趋势,到达坡底时制动器温度较设置缓坡展线时低。



(a) 设置缓坡时制动器温升



(b) 单一坡度时制动器温升

图 2 展线形式对货车制动器温度变化趋势的影响

2) 长大下坡的坡段组成对货车到达坡底时的制动器温度、货车制动器温度分别达到 200 °C 和 260 °C 时至坡顶的距离均有影响。采用单一坡度展线形式时,货车制动器温度相对较低,升温速度相对较慢,到达坡底时制动器温度与设置缓坡时最大温度差为 -171.2 °C。在相同运行速度下,随着车辆总质量的增加,二者温度差值呈减小趋势。在相同车辆总质量下,随着下坡速度的增加,二者温度差值略呈增加趋势,但增加幅度不大。

3) 货车到达坡底时制动器温度差与车辆总质量呈负相关关系,见图 3。随着车辆总质量的增加,差值减小,即两种展线形式对货车制动器温度的影响逐渐减小。

4) 货车到达坡底时制动器温度差随坡长的增加呈先增大后减小的趋势,见图 4。

5) 货车制动器温度分别达到 200 °C 和 260 °C 时至坡顶的距离差变化趋势与车辆总质量有关,见图 5。货车制动器温度达到 260 °C 时至坡顶的距离差随着车辆总质量的增加总体呈减小趋势;达

到 200 °C 时至坡顶的距离差随着车辆总质量的增加呈先减小后增大趋势。

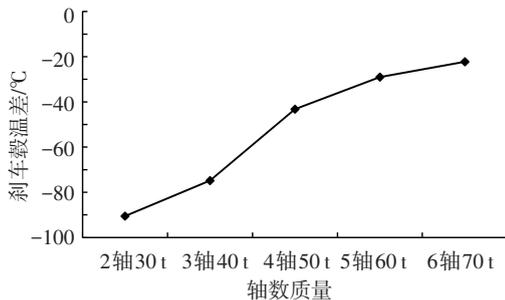


图 3 制动器温度差与车辆总质量的关系

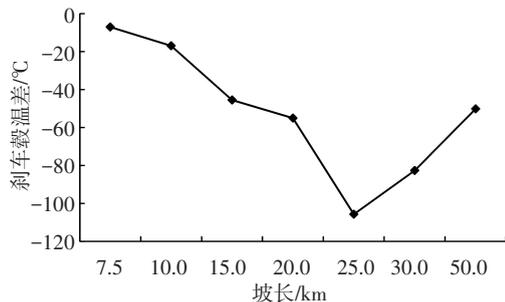


图 4 制动器温度差与坡长的关系

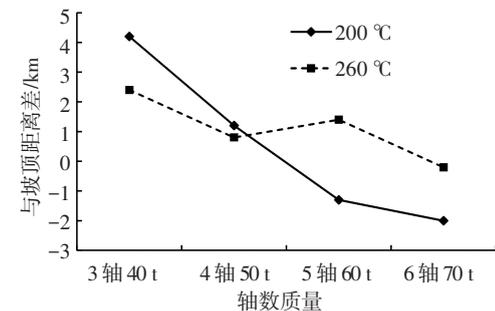


图 5 制动器温度达到 200 °C 和 260 °C 时至坡顶距离差与车辆总质量关系

6) 货车制动器温度分别达到 200 °C 和 260 °C 时至坡顶的距离差变化趋势与长大下坡总长度有关,见图 6。总长度 ≤ 15 km 时,制动器温度达到 200 °C 时至坡顶的距离差呈增加趋势,采用单一坡度展线时比设置缓坡展线时大,升温相对较慢;总长度 ≥ 20 km 时,设置缓坡展线形式至坡顶的距离略大于单一坡度展线形式。总长度 ≤ 30 km 时,制动器温度达到 260 °C 时至坡顶的距离差呈先增加后减小的趋势,采用单一坡度展线时比设置缓坡展线时大,升温相对较慢。总长度 > 30 km 时,设置缓坡展线形式至坡顶的距离略大于单一坡度展线形式。

7) 下坡速度对货车到达坡底时制动器温度差、制动器温度分别达到 200 °C 和 260 °C 时至坡顶的距离差影响不大。

8) 通过采用单一坡度展线或优化相邻坡段组成,部分长大下坡路段货车制动器温度可控制在 200 °C 或 260 °C 以内。

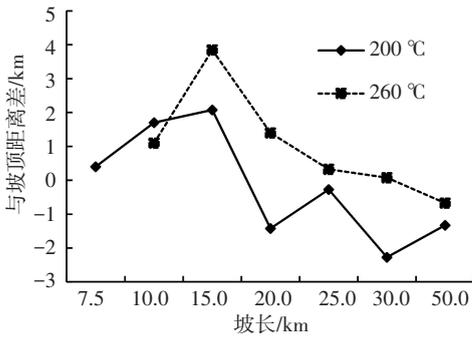


图 6 制动器温度达到 200 °C 和 260 °C 时至坡顶距离差与坡长关系

4 基于制动器温度的长大下坡区段划分

鉴于前述制动器温度计算采用的货车总质量、下坡速度、下坡总长度等参数均考虑了多个省份长大下坡的道路特征和交通特征,具有较好的代表性,进一步基于上述 7 个长大下坡的实际坡段组成数据分析货车制动器温度达到临界温度时至坡顶距离与长大下坡总长度的关系.根据前述不同代表车型以不同代表车速在 7 个长大下坡行驶时货车制动器温度分别达到 200 °C 和 260 °C 时至坡顶距离占长大下坡总长度比例的统计分析结果,本文从制动器温度角度对行业内通常采用的上部、中部和下部 3 种定性的长大下坡区段划分方式进行了量化,提出长大下坡区段划分量化标准:1)长大下坡“上部”区段为 $[0, L_0]$,货车位于该区段时制动器温度通常小于 200 °C,制动器失效可能性较小,运营安全风险相对较低. 2)长大下坡“中部”区段为 $(L_0, L_1]$,货车位于该区段时制动器温度通常超过 200 °C,但小于 260 °C,制动器有可能失效,存在一定的运营安全风险. 3)长大下坡“下部”区段为 $(L_1, L]$,货车位于该区段时制动器温度通常超过 260 °C,制动器失效的可能性较大,运营风险相对较高. 其中 L_0 为长大下坡“上部”区段的终点, L_0 至长大下坡起点的距离为 $0.4L$; L_1 为长大下坡“中部”区段的终点, L_1 至长大下坡起点的距离为 $0.6L$; L 为长大下坡总长度, L 一般在 7.5~50 km 之间.

在进行长大下坡安全保障设计时,对于“上部”区段,可重点以加强诱导和提示为主,对于“中部”区段,可重点以加强行车安全提醒和防护为主,对于“下部”区段,应充分重视重载货车的行车安全需求,采取被动防护和交通管理综合安全对策措施.

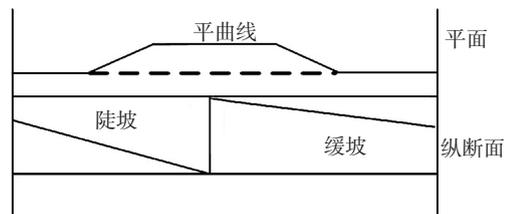
5 长大下坡纵坡设计建议

基于长大下坡制动器温升特性和采用单一坡

度和设置缓坡两种展线形式对货车制动器温度影响的对比分析结果及区段划分量化标准,提出以下长大下坡纵坡设计建议:1)从降低货车下坡过程中制动器温度角度考虑,建议长大下坡尽可能采用单一坡度展线.2)当长大下坡相邻坡段采用不同纵坡坡度时,坡差不宜过大,以减小对制动器温度的影响.3)应避免“接近极限纵坡的陡坡+缓坡”的台阶坡设计.一方面不利于控制制动器温度;另一方面不熟悉道路环境的驾驶员容易将坡度相对较小的缓下坡误认为上坡(见图 7),从而加速行驶,不利于行车安全.4)尽可能避免“缓坡+接近极限纵坡的陡坡”的设计.不熟悉道路环境的驾驶员容易误认为车辆已驶出下坡路段,在缓坡路段加速行驶,进入陡坡路段时车速过快、心理负荷急剧增加,不利于行车安全.5)从货车运营安全风险角度考虑,无法采用单一坡度展线时,建议长大下坡“下部”区段采用相对较缓的平均纵坡,并重视平纵面线形间和相邻路段平面线形间的协调性,以减小对货车制动器温度的影响.6)车辆总质量对货车制动器温度影响显著,确定长大下坡总长度、平均纵坡、限速和安全防护方案时应考虑所在区域货车代表车型的轴数和车辆总质量因素.并在开通运营后加强货车管理,尽可能避免车辆总质量超过 55 t 的货车进入长大下坡,以减小运营安全风险.7)长大下坡交通工程设计时应重点关注“下部”区段的重载货车行车安全需求,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.



(a) 实际道路环境



(b) 平纵面线形组合示意

图 7 某高速公路长大下坡陡坡接缓坡道路环境示例

6 结 论

1) 下坡速度对长大下坡货车制动器温度影响不显著.随着车辆总质量的增加,货车到达长大下坡坡底时制动器温度呈增加趋势.采用单一坡度展线时到达坡底的制动器温度较设置缓坡展线时低,其最大温度差为 $-171.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.随着车辆总质量的增加,两种展线形式对货车制动器温度的影响逐渐减小.货车制动器温度在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时至坡顶的距离差变化趋势与货车总质量和长大下坡总长度有关.

2) 通过采用单一坡度展线或调整纵坡组成,可将部分长大下坡货车制动器温度控制在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内.从降低货车下坡过程中制动器温度角度考虑,长大下坡应尽可能采用单一坡度展线.当长大下坡内相邻坡段采用不同的纵坡坡度时,坡差不宜过大,以消除视错觉、减小对制动器温度的影响.

3) 长大下坡下部区段货车制动器失效风险较高,应尽可能采用相对较缓的平均纵坡,并采取综合安全对策措施.下一步将更深入地研究相邻坡段坡差和平曲线半径对长大下坡行车安全的影响,为长大下坡平纵组合线形设计提供技术支撑.

参 考 文 献

- [1] 刘浩学,付锐,周荣贵,等.连续长大下坡路段安全保障技术研究报告[R].西安:长安大学,2004.
- [2] 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.
- [3] 韩跃杰,许金良,刘永福,等.连续长大下坡路段的安全坡长[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(5):35-39.

- [4] 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.
- [5] 潘兵宏.山区高速公路平均纵坡研究[D].西安:长安大学,2008.
- [6] 吴京梅,杨秀峰,吴玲涛,等.北京国道G110拟建线方案连续下坡路段制动失灵风险分析[J].中外公路,2011,31(1):259-262.
- [7] 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.
- [8] TERRY M, PIERRE C, JOHN M. Downgrade passing lanes on the Canadian trans-mountain highway system [C]//the Innovation and Emerging Issues in Geometric Design Session of the 2005 Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Calgary, Alberta: Condan Higlways Institute Ltd, 2005: 1-22.
- [9] LAN C J, MONICA M. Truck speed profile models for critical length of grade [J]. Journal of Transportation of Engineering, 2003, 129(3): 408-419.
- [10] CHEN Yongsheng, SUN Xiaoduan, HU Shuping. Long down-grade highway segment's safety investigation and causation inference in China [C]//International Conference on Transportation Engineering. Chengdu: ASCE, 2007: 370-375.
- [11] ZHANG Tiejun, LIU Dan, MI Xiaoyi. A research on the safety characteristic of continuous downgrade segment in two-lane highway [C]//International Conference on Logistics for Sustained Economic Development 2010. Chengdu: ASCE, 2010: 1283-1292.
- [12] PIARC. Road safety manual [R]. World Road Association, France: PIARC Technical Committee on Road Safety, 2003.

(编辑 魏希柱)