

# 高速公路连续长下坡路段大型货车专用缓速车道研究

张弛<sup>1,2</sup> 胡涛<sup>1,3</sup> 林宣财<sup>4</sup> 白浩晨<sup>4</sup> 吴善根<sup>4</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 道路基础设施数字化教育部工程研究中心, 陕西 西安 710000;  
3. 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 710000;  
4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘 要:** 为降低大型载重货车的下坡风险, 提升我国高速公路连续长下坡的行车安全性, 研究了连续长下坡路段货车专用缓速车道。分析了大型货车在发动机辅助制动下坡时的行驶特性, 基于货车制动毂温度和速度特性, 提出长下坡路段应在必要时增设货车专用缓速车道。以六轴铰接列车为设计主导车型, 从铰接列车下坡安全性入手研究了缓速车道的架构体系, 明确了缓速车道的设置方法, 提出了包括渐变段、缓冲区和稳速区等在内的车道架构及其线形指标, 分析了缓速车道的合理限速值以及推荐挡位。最后以 G5 京昆高速某长大下坡为例, 通过多种通行方式下的货车制动毂温升数值模拟, 对比验证了缓速车道的安全通行性。结果表明: 相较于自由流速度下坡和分车道限速下坡, 设置缓速车道后坡底制动毂温度分别降低了 114 和 79 °C, 降温幅度分别达到 32.9% 和 25.3%, 且缓速车道路段内最高温度低于安全临界温度, 表明在连续长下坡内增设缓速车道可显著缓解制动毂温升态势, 降低货车制动失效概率。

**关键词:** 道路工程; 缓速车道; 下坡特性; 连续长下坡; 制动毂温升

**中图分类号:** U412.33

**文章编号:** 1000-565X(2020)04-0104-10

近年来, 我国公路建设的重点逐步向西部山区转移, 由于复杂地形和地质条件的限制, 形成了较多连续长下坡路段。大型货车在长下坡路段行驶时, 需长时间使用主制动器, 导致制动器温度持续升高, 造成制动毂发生“热衰退”现象, 严重威胁货车下坡安全。据统计<sup>[1]</sup>, 截止 2017 年, 我国高速公路长下坡的货车制动失效事故数量高居不下, 其中漳龙高速、罗富高速多处避险车道的三年车辆驶入量分别达到了 573 辆和 304 辆; 此外, 2018 年兰海高速、雅西高速等多处长下坡发生重大交通事故。研究表明<sup>[2]</sup>, 我国高速公路货运

车型于近年间发生了巨大变化, 大型半挂铰接列车成为货运主流, 由于其载重量大, 在连续长下坡路段更易产生制动失效, 引发交通事故, 大型货车在连续长下坡的行驶安全性亟待提升。

已有的制动毂温升规律研究<sup>[3]</sup>表明, 道路的纵坡、坡长、线形组合以及下坡的挡位、制动方式的选择是影响货车下坡时制动毂温度升高的主要因素; 车速也是制动毂温度升高的重要因素之一<sup>[4]</sup>, 过高的车速容易导致货车失控, 引发交通事故。对此, 国内外学者进行了大量下坡路段的线形优化、限速管理、安全警示等方面的研究。其中, 周荣

收稿日期: 2019-06-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0803906); 长安大学中央高校基本科研任务费专项资金资助项目 (300102210205)

**Foundation item:** Supported by the National Key Research and Development Plan (2017YFC0803906)

**作者简介:** 张弛 (1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事交通安全与基础设施信息化及数字化相关研究。E-mail: zhangchi@chd.edu.cn

贵<sup>[5-8]</sup>等先后根据制动毂温度与纵坡的关系, 基于不同主导车型, 提出了纵坡和坡长等线形设计指标建议值。然而, 线形优化仅对设计阶段具有指导意义, 对于已建成的连续下坡路段, 国外多通过制动毂温升预测模型以分析货车限速等安全管理手段。如美国 FHWA<sup>[9]</sup> 根据制动毂温升开发的下坡严重程度分级系统 (GSRS), 该系统对下坡货车限速进行了分级管控; 澳大利亚 Austroads<sup>[10]</sup> 通过建立六轴半挂货车温升模型, 对下坡货车进行速度预警; 而国内研究<sup>[11-12]</sup> 多基于对公路事故特征及原因的分析, 从长下坡路段限速管理、安全警示标志等方面进行了探索。此外, 针对下坡失控车辆, Abdelwahab 等<sup>[13-14]</sup> 根据制动毂温度预测结果, 研究了避险车道的设置原则和方法。但避险车道设置条件苛刻, 建设难度较大, 且存在二次事故风险。近年来, 部分学者参考避险车道路面材料的设置, 对下坡减速车道进行了研究, 提出了设置在路侧与主线连续相接、采用摩阻系数较大的路面材料供失控车辆减速的车道。在这方面, 钱勇生等<sup>[15]</sup> 基于温升模型研究了下坡减速车道的构造及路床材料, 并建立了实验路段来验证其减速效果。王志新<sup>[16]</sup> 根据不同联合制动工况下的温升模型提出了一种下坡辅助减速车道, 并对不同路床材料的减速效果进行了重点分析。

综上所述, 目前针对长下坡路段的研究多为线形设计优化, 将避险车道作为运营期安全提升手段, 但避险车道仅能降低事故严重程度。下坡减速车道虽为解决下坡路段交通安全问题提供了一种新思路, 但其功能定位仍是针对失控货车, 利用道路材料进行强制减速, 难以解决货车易发生制动失效的根本问题。随着我国高速公路货运车型的大型化, 主流货运车辆性能与以往纵坡设计的主导车型差距较大, 导致了车路不协同矛盾的出现。为解决连续下坡路段车路不协同的矛盾, 《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)<sup>[17]</sup> 中提出了平均纵坡控制指标, 要求超过该指标时进行路段速度控制并采取通行管理措施, 但规范中并未对所应采取的措施进行具体阐述。对于大型货车下坡的高危现状, 既需改善货车自身性能和辅助装备, 也应提升道路及其配套设施的安全性。

鉴于此, 文中提出建设货车专用缓速车道, 从大型货车下坡速度特性和制动毂温升特性出发, 阐释缓速车道建设的必要性, 并以六轴铰接列车为设计主导车型, 提出缓速车道设置方法和体系架

构, 结合货车制动特性分析了缓速车道限速方法, 最后通过多种通行条件下的制动毂温升数值模拟, 对比论证了缓速车道的安全性。

## 1 缓速车道的提出

文中基于货车在连续下坡路段的行驶特性, 包括速度特性和制动毂温升特性, 从控制制动毂温升速率、降低大小车型之间速差的层面, 提出在连续下坡路段设置货车专用缓速车道。

### 1.1 货车下坡行驶特性分析

由于经济等因素制约, 目前我国大型货车仍普遍装备发动机辅助制动系统<sup>[18]</sup>, 因此文中以六轴半挂铰接列车为例, 对其仅使用发动机辅助制动、不采用主制动器时的行驶特性进行分析。当不考虑转向及铰接处承受的力矩等条件时, 可将六轴半挂铰接列车 (后文简称货车) 看做刚体, 此时其他货车车型的下坡特性与六轴半挂铰接列车相似。

#### 1.1.1 受力分析

货车在下坡路段的受力如图1所示。

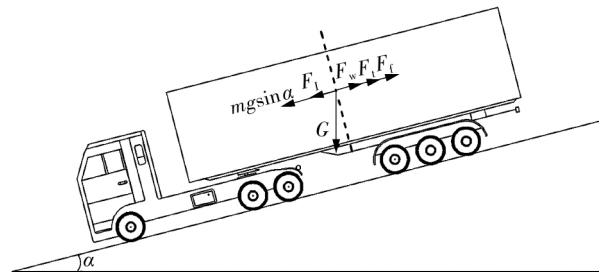


图1 货车下坡受力分析

Fig. 1 Truck downhill force analysis

对整车进行受力分析, 可以得到车辆在下坡行驶时的平衡方程如下:

$$mgi = F_w + F_f + F_1 + F_t \quad (1)$$

$$F_w = \frac{1}{2} CA \rho v^2 \quad (2)$$

$$F_f = Gf \quad (3)$$

$$F_1 = ma \quad (4)$$

$$F_t = N_i i_g i_0 / (r \eta_i) \quad (5)$$

式中:  $F_w$  为空气阻力 (N);  $F_f$  为滚动阻力 (N);  $F_1$  为汽车行驶的惯性阻力 (N);  $F_t$  为发动机辅助制动力 (N);  $m$  为车辆总重 (kg);  $a$  为行驶加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $C$  为空气阻力系数;  $A$  为货车迎风面积 ( $\text{m}^2$ );  $\rho$  为空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $v$  为车速 ( $\text{m/s}$ );  $f$  为滚动阻力系数;  $N_i$  为发动机制动力矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ ),

可表示为发动机转速的一元二次多项式<sup>[19]</sup>,  $N_i = \mu_2 n^2 + \mu_1 n + \mu_0$ , 其中  $n$  为发动机转速 (r/min),  $\mu_0$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$  为发动机转矩拟合系数;  $i_g$ 、 $i_0$  分别为变速箱减速比以及主减速比;  $r$  为车轮工作半径 (m);  $\eta_t$  为传动系的机械效率。

### 1.1.2 速度-坡度特性

当坡度缓于一定值时, 货车在发动机辅助制动及外力作用下, 不采用刹车即可保持匀速下坡, 将该坡度阈值称作发送机辅助制动下的临界纵坡  $i_k$ 。此时惯性阻力  $F_i$  为零, 根据平衡方程可得临界纵坡计算公式为

$$i_k = \frac{F_w + F_f + F_t}{mg} \quad (6)$$

一定挡位下, 在发送机转速范围内, 车辆速度与发动机转速成正比, 关系如下:

$$v = \frac{3 \pi n r}{25 i_g i_0} \quad (7)$$

式 (7) 中各挡传动比为固定值, 车辆速度和发动机转速仅有一个是独立的, 即对于单独某辆车而言, 在车辆行驶的某一时刻, 挡位是定值, 变速器传动比也是定值。通过变换公式, 允许车辆速度和发动机转速均为独立变量, 将各挡位离散的传动比连续化, 即

$$\frac{i_g i_0}{r} = \frac{3 \pi n}{25} \quad (8)$$

由此, 将式 (2)、(3)、(5) 分别代入式 (6), 可以得到货车匀速下坡的速度-临界纵坡计算模型如下:

$$i_k = \left[ \frac{1}{2} C A v^2 + G f + \frac{3 \pi n (\mu_2 n^2 + \mu_1 n + \mu_0)}{25 v \eta_t} \right] / (mg) \quad (9)$$

由于连续纵坡路段的货车挡位密集, 大型货车的发动机转速基本维持在 1800 ~ 2000 r/min 之间<sup>[20]</sup>。将  $n = 1800$  r/min 代入上述临界纵坡计算模型, 求得满载条件下临界纵坡与货车速度的关系, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 速度 60 km/h 对应的临界纵坡最小; 当速度低于 60 km/h 时, 货车能保持匀速而不加速下坡的临界纵坡随速度的降低而明显增大; 当速度高于 60 km/h 时, 该临界纵坡随速度的降低而小幅度降低。也就是说, 控制下坡速度在 60 km/h 以下, 能够获得明显的“安全收益”, 使得货车处于匀速或减速下坡状态。

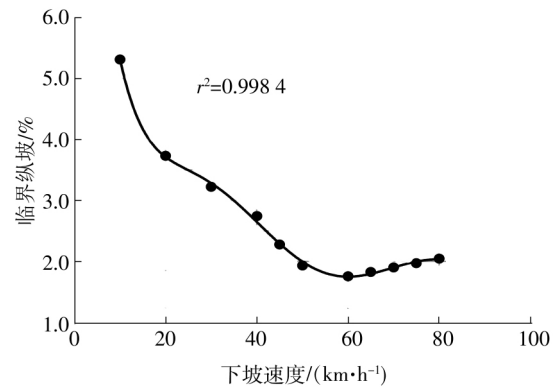


图2 六轴铰接列车下坡速度-临界纵坡特性图

Fig. 2 Downhill speed-critical slope characteristics of six-axle articulated truck

### 1.1.3 制动毂温升特性

目前国内外大多采用世界道路协会 PIARC 在 Road Safety Manual<sup>[21]</sup> 中推荐的制动毂温升模型, 该模型<sup>[8]</sup>以半挂铰接列车为对象, 通过行车动力学与传热学理论求得。尽管国内外车辆在性能、驾驶行为特征等方面存在一定差异, 但根据国内工程应用情况, 该模型预测的制动毂温度与实际情况较为吻合。式 (10) 为此模型的表达式, 利用该模型可对货车制动毂平均温升进行预测, 明确下坡车辆温升特性。

$$T = T_0 e^{-K_1 L/v} + (T_a + K_2 P_B v) (1 - e^{-K_1 L/v}) \quad (10)$$

式中:  $T$  为制动毂温度 (°C);  $T_0$  为制动毂初始温度 (°C);  $T_a$  为环境温度 (°C);  $K_1 = 1.23 + 0.016v$ ;  $K_2 = 0.1 + 0.0013v$ ;  $L$  为从预测位置至坡顶的距离 (m);  $P_B$  为制动力功率 (W), 与车辆总重、纵坡等有关;  $v$  为下坡速度 (km/h)。

### 1.2 缓速车道概念的引入

根据上述制动毂温升模型, 计算 3% 坡度下不同速度对应的温升速率, 拟合关系曲线如图 3 所示。由图可知, 当下坡速度低于 60 km/h 时, 货车的制动毂温升速率明显降低。因此, 通过限制车速在较低的范围, 可以有效缓解制动毂的温升趋势, 降低制动失效概率。

通常可采用横向限速方法对货车进行限速, 即对不同车道或不同车型进行限速管理。然而, 大量研究表明<sup>[22-25]</sup>, 高速公路交通事故率与车速离散性成正比例关系, 即车速离散性越大, 事故发生的概率越高。因此, 四车道高速公路内外车道限速差不宜过大。由图 2 可以看出: 当平均纵坡在 2.0% ~

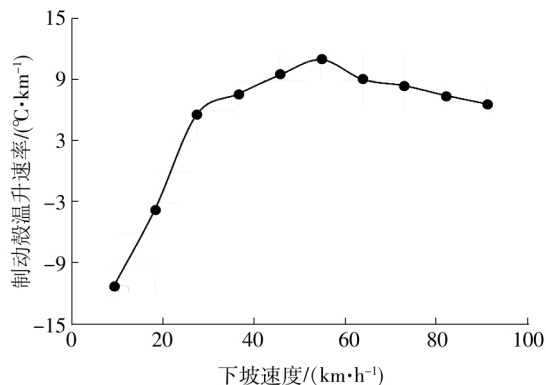


图3 制动毂温升速率-速度关系

Fig. 3 Relationship between brake drum's temperature rising rate and speed

2.5%时,大型货车的下坡安全速度在40~50 km/h之间;而小型车制动性能相对较好,其下坡安全速度一般可达到80~90 km/h。当采用分车型限速方法时,客观上增大了客货车之间的速差,采用分车道限速方法则人为地增大了车道间的速度差异,这种车辆速度上的横向差异容易加大事故风险。因此,在已有道路上进行分车道分车型限速,对货车采用较低的限速值,虽然在一定程度上可以保障其下坡行驶的安全性,减少因货车制动失效引起的事故,但可能会加剧因换道超车等操作引起的冲突,引发更多事故。

综上,为降低货车行驶速度,控制其制动毂温度,同时减小内外侧车道速差以降低换道超车发生事故的概率,文中提出货车专用缓速车道概念,即将下坡路段的大型货车分流至主线外侧专用车道,通过交通管控措施使其减挡降速,在安全速度内下坡。

## 2 缓速车道架构体系

### 2.1 设计主导车型

相关调查研究显示<sup>[26]</sup>,2017年高速公路中六轴铰接列车数量在货车总数中占比最大,达43.41%,其完成的货物周转量比重达83.63%,六轴铰接列车已成为目前高速公路货运的主导车型。此外,目前我国六轴铰接列车的发动机最大功率主要集中在220~450 kW之间,功率质量比仅为5.12~7.50 kW/t,相较于功率质量比为8~12 kW/t的两轴或三轴单体货车,其持续制动性能明显下降,更容易出现制动失效问题。因此,文中将六轴铰接列车作为长下坡路段货车专用缓速车道的设计主导车型。

### 2.2 设置方法

相关文献表明<sup>[5]</sup>:当制动毂温度在200℃以下时,制动器的制动性能会保持相对恒定;制动毂温度达到200℃时,制动性能会发生明显的衰退;制动毂温度超过200℃时,制动性能会持续衰减;当制动毂温度达到260℃时,制动毂的制动性能会出现较大幅度的衰减<sup>[7]</sup>。因此,分别以200和260℃作为缓速车道起点位置和缓冲区减速段终点的控制温度。具体设置方法如下:根据制动毂温升预测模型确定缓速车道的起点;设置渐变段,供车辆变换车道,从主线驶出进入货车专用缓速车道,驶入后视认限速标志,采取紧急制动或联合制动措施,在保证制动毂温度不超过260℃的情况下,降挡减速至限速值;保持低挡低速行驶,到达下坡坡底后,加速驶出。此外,货车专用缓速车道宽度设置为3.75 m,该专用车道经过经济性比较,宜采用拓宽硬路肩形式。设置形式如图4所示。

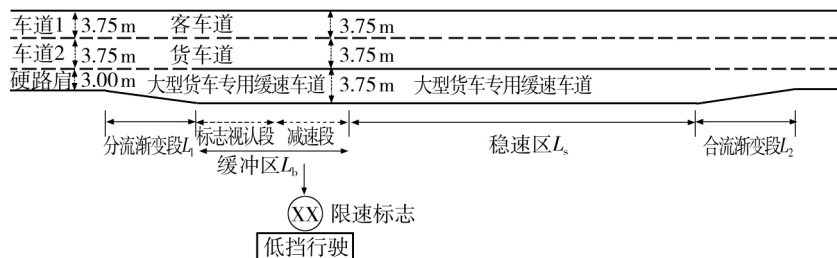


图4 缓速车道设置方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of setting method of low-speed lane

### 2.3 线形设计

货车专用缓速车道是在行车道同侧增设的附加车道,其平面线形和纵坡均与原有道路一致。同时,缓速车道由分流渐变段、缓冲区(标志视认

段及减速段)、稳速区以及合流渐变段(加速车道及渐变段)组成,总长度为 $L_1 + L_b + L_s + L_2$ 。

#### 2.3.1 分流渐变段

为使车辆能够平稳、安全地进入缓速车道,设

置分流渐变段与主线连接。根据《道路交通标志标线》(GB 5768.2—2009)<sup>[27]</sup>,分流渐变段的长度  $L_1$  (m) 可以用以下公式计算:

当  $v \leq 60$  km/h 时,

$$L_1 = \frac{Wv_{85}^2}{155} \quad (11)$$

当  $v > 60$  km/h 时,

$$L_1 = 0.625Wv_{85} \quad (12)$$

式中,  $W$  为车辆渐变宽度 (m),  $v_{85}$  为主线 85% 位车速或期望速度 (km/h)。

由于下坡路段大型车辆的运行速度通常为 40 ~ 80 km/h<sup>[28]</sup>, 结合式 (11) 和 (12), 可计算出不同速度下的分流渐变段长度, 如表 1 所示。

表 1 分流渐变段长度表

Table 1 Length of diversion transition section

速度/(km·h <sup>-1</sup> )	80	70	60	50	40
分流渐变段长度/m	190	165	90	65	40

### 2.3.2 缓冲区

驾驶员经分流渐变段变换车道驶入缓速车道后, 从发现前方限速标志开始, 到认读完成后采取制动措施减速至稳速区限速值, 这一距离路段称为缓冲区。

#### (1) 标志视认段

标志视认段长度  $L_{bl}$  包括标志认读距离以及反应距离。计算公式如下:

$$L_{bl} = \frac{v_f}{3.6}(t_1 + t_2) \quad (13)$$

式中:  $v_f$  为车辆发现标志时的车速 (km/h);  $t_1$  为看完标志牌上内容所必需的时间 (s), 它取决于标志牌上的字数和语言种类, 此处标志为限速标志, 取 1.3 s;  $t_2$  为判断时间, 取 2.7 s<sup>[28]</sup>。

不同车速下对应的标志视认距离计算结果如

表 2 所示。

表 2 不同车速对应的标志视认段长度

Table 2 Length of marking identification section under different speeds

速度/(km·h <sup>-1</sup> )	80	70	60	50	40
标志视认段长度/m	90	80	70	60	45

#### (2) 减速段

根据运动学方程, 减速段长度  $L_{b2}$  的计算公式如下:

$$L_{b2} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{25.92a_d} \quad (14)$$

式中:  $v_1$  为车辆驶入缓速车道的运行速度 (km/h);  $v_2$  为稳速区对应的限速值 (km/h);  $a_d$  为车辆的制动减速度 (m/s<sup>2</sup>), 取为 1.48 m/s<sup>2</sup><sup>[28]</sup>。

单级限速条件下的减速段长度计算结果列于表 3。

表 3 单级限速条件下的减速段长度

Table 3 Length of deceleration section under single-level speed limit condition

初速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	不同末速度下的减速段长度/m			
	70 km/h	60 km/h	50 km/h	40 km/h
80	40	75	—	—
70	—	35	65	—
60	—	—	30	55
50	—	—	—	25

当缓速车道的限速值与主线货车运行速度的差值超过 20 km/h 时, 为防止相邻路段运行速度发生突变, 使车辆可逐步减小到缓速车道的限制速度, 应考虑分级限速方案。最低限速值取为 40 km/h, 考虑二级方案, 限速值梯度为 10 ~ 20 km/h。分级限速方案如表 4 所示。

表 4 分级限速方案

Table 4 Grading speed limit scheme

限速方案 种类	初始速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	限制速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	限制标志 个数	第 1 个限 速标志值	第 2 个限 速标志值	分级限速 方案简写
二级限速 方案	80	40	2	60	40	60 ~ 40
	80	50		60	50	60 ~ 50
	70	40		50	40	50 ~ 40

当采取分级限速方案时, 假设驾驶员在上一级减速完成时刚好看到下一级限速标志, 继续完成标志认读、反应, 直至采取制动措施进行减速。因

此, 多级限速条件下的缓冲区长度可根据单级限速条件下的计算结果确定。综上, 可得出不同限速条件下的缓冲区长度, 如表 5 所示。

表5 缓冲区长度

Table 5 Length of cushioning section

初速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	不同末速度下的缓冲区长度/m			
	70 km/h	60 km/h	50 km/h	40 km/h
80	130	170	270	290
70	—	120	150	240
60	—	—	100	130
50	—	—	—	90

### 2.3.3 稳速区

稳速区(长度为 $L_s$ )是货车在限速条件下稳速的路段,该路段应保证货车在采用联合制动措施控制车速时,制动毂温度不超过极限(260℃)。

稳速区设置至下坡坡底。设置方法为计算路段平均纵坡,根据制动毂温升特性,以温升速率为零时的坡度为临界纵坡,将对应的临界速度作为最大限速值,这样便可保证制动毂温度在稳速区内基本处于降温状态。稳速区的限速设计将在下文详细阐述。

### 2.3.4 合流渐变段

合流渐变段需兼具加速车道和渐变段功能,供车辆加速并换道回到主线;参照加速车道以及渐变段计算方法,合流渐变段取其中较大值。合流渐变段长度 $L_2$ 的计算公式为

$$L_2 = \xi_1 L_1 + \xi_2 l_2 \quad (15)$$

$$l_2 = \frac{v_s^2 - v_{sr}^2}{25.92a_a} \quad (16)$$

式中: $L_1$ 可直接取表1中的值; $l_2$ 为加速所需长度(m); $v_s$ 为主线车流运行速度(km/h); $v_{sr}$ 为缓速车道限制速度(km/h); $a_a$ 为加速度,参照《公路路线设计规范》,加速度一般为0.8~1.2m/s<sup>2</sup>,此处取1.2m/s<sup>2</sup>;  $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 为系数,当 $L_1 > l_2$ 时, $\xi_1 = 1$ , $\xi_2 = 0$ ;当 $L_1 < l_2$ 时, $\xi_1 = 0$ , $\xi_2 = 1$ 。根据式(15)计算合流渐变段的长度,结果如表6所示。

表6 合流渐变段长度

Table 6 Length of confluence transition section

主线运行速度/(km·h <sup>-1</sup> )	80	70	60
合流渐变段长度/m	190	165	90

## 2.4 限速设计

稳速区限速值应根据货车下坡制动特性进一步确定。货车在下坡时所受的阻力来自行驶的阻力、主制动器制动力和发动机辅助制动系统。货车所处

的挡位越低,传动比越大,发动机辅助制动力越大。因此,为减少连续下坡路段主制动器的使用次数,保证制动毂温度在安全范围内,关键是要减速并降挡,充分利用发动机的辅助制动作用来维持稳速下坡。

### 2.4.1 推荐挡位

将1800r/min作为货车的最佳换挡转速,根据设计车型的各挡传动比,由式(8)可计算其最佳换挡速度,并以此定义不同速度下的推荐挡位。

表7 六轴铰接列车各挡位对应的速度区间

Table 7 Speed interval corresponding to each gear of six-axle articulated truck

挡位	传动比	速度区间/ (km·h <sup>-1</sup> )	挡位	传动比	速度区间/ (km·h <sup>-1</sup> )
1	13.15	0~8	7	3.21	25~31
2	10.35	8~10	8	2.53	31~38
3	8.22	10~12	9	2.01	38~50
4	6.52	12~16	10	1.59	50~66
5	5.13	16~20	11	1.25	66~84
6	4.10	20~25	12	1.00	84~100

由表7可知:当速度降到84km/h时,货车宜由12挡降到11挡;当速度降到66km/h时,货车宜由11挡降到10挡,依次类推。

### 2.4.2 稳速区限速值

根据制动毂的温升特性,当货车在某一坡度(大于临界纵坡)的纵坡上保持匀速行驶时,制动毂温度持续上升,毂内与周围空气温差不断增大,毂与空气的对流换热速率增加,而毂的生热速率不变。因此,制动毂的温升速率随着制动毂温度的升高而减小;当货车以临界速度在较小坡度的纵坡(小于临界纵坡)上行驶时,货车仅采用发动机辅助制动即可保持稳速行驶,此时制动毂温升速率小于0,且毂的对流换热速率随着温度的升高而增大,降温速率不断增加。因此,当制动毂温度较高时,制动毂的降温速率大于升温速率,制动毂处于降温态势。

综上,以稳速区内平均纵坡作为临界纵坡,计算制动毂温升速率为零时临界纵坡对应的临界速度,并以该速度作为相应坡度下的限速值,所得结果如表8所示。当车辆以对应的限速值并采取推荐挡位行驶时,可使得制动毂在稳速区内基本保持降温状态。

表8 稳速区限速值

Table 8 Limit speed value of stable speed zone

平均纵坡 /%	限速值 / (km·h <sup>-1</sup> )
> 2.95	宜进行技术论证
2.95	≤ 40
2.75	≤ 50
2.60	≤ 60
2.50	≤ 70
≤ 2.30	不用设置缓速车道

经计算,当稳速区平均纵坡小于2.3%时,宜限速至80 km/h,由前文所述,下坡路段货车的速度一般在40~80 km/h之间,此时可不设置缓速车道。当稳速区内平均纵坡分别在2.30%~2.50%、2.50%~2.60%、2.60%~2.75%、2.75%~2.95%之间时,宜分别限速至70、60、50、40 km/h;考虑高速公路的功能,限速值不宜低于40 km/h,因此,当平均纵坡大于2.95%时,宜结合工程实际进行技术论证,并采用表9建议挡位在相应纵坡上行驶,可使得制动毂温度不超过极限(260℃)。

表9 限速40 km/h条件下的建议挡位

Table 9 Suggested gear when speed is limited to 40 km/h

平均纵坡 /%	建议挡位 (传动比)	平均纵坡 /%	建议挡位 (传动比)
3.5	7挡 (2.86)	3.2	8挡 (2.53)
3.4	7挡 (2.76)	3.1	8挡 (2.41)
3.3	7挡 (2.65)	3.0	8挡 (2.28)

需要注意的是,上述结果是驾驶员在合法操作、低速低挡且车辆性能良好条件下行驶时方能成立的,因而需在稳速区内进行严格的交通管控,如安装监控装置、电子测速装置等。

### 3 安全性检验

目前我国运营公路中暂未建成货车专用缓速车道,文中基于实际路段数据,根据温升预测模型,对大型货车制动毂温升数值进行模拟预测,以检验缓速车道的设置效果与通行安全性。

#### 3.1 路段设计

选取G5京昆高速某段长下坡路段,利用其平均纵坡数据对货车下坡制动毂温度进行预测。路段桩号范围为K172+340—K147+800,全长23.28 km,相对高差为711.73 m,平均纵坡为3.05%。设计速度为80 km/h,货车道最高限速70 km/h,最低限

速60 km/h。根据制动毂温升预测模型,在桩号K159+070处制动毂温度达到200℃,由此处开始设置缓速车道。以路段货车道最低限速值60 km/h作为主线货车运行速度,渐变段长度取90 m;缓速车道内平均纵坡为3.4%,由表8可得,稳速区限速值宜取40 km/h,并根据表9,推荐使用7挡。因此,缓冲区长度取130 m。根据制动毂温升预测模型计算可得,缓冲区终点温度为220℃,小于控制温度(260℃),满足要求。稳速区由缓冲区终点设至坡底;合流渐变段取90 m。具体设置如图5所示。

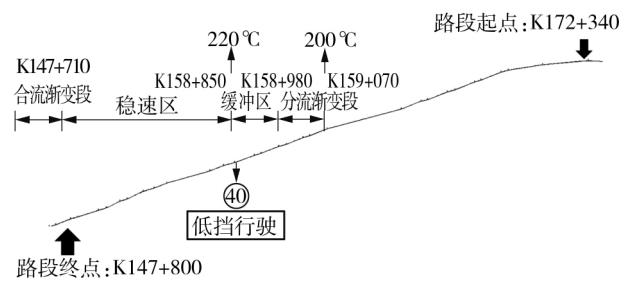


图5 缓速车道的设置

Fig. 5 Setting of low speed lane

#### 3.2 对比分析

当货车以自由流速度下坡时,驾驶员需频繁使用制动器将速度维持在期望范围内,货车行驶的期望速度一般为80 km/h<sup>[29]</sup>,因此可将自由流下坡视为最不利情况。所选取路段由于长下坡距离较长,运营期间发生的货车事故较多,公路管理部门于2018年6月在此路段设置交通特管区,实行分车道分车型限速,货车道限速60 km/h,此措施对于缓解制动毂温度具有一定的效果;因此,通过对比自由流下坡、限速60 km/h下坡和设置缓速车道下坡的制动毂温升趋势,对设置缓速车道的效果进行分析。

在Matlab中编写制动毂温升仿真程序,分别输出3种通行方式下大型满载货车(49 t)的制动毂温升数值,结果如图6所示。

由图6可知,当货车以自由流速度行驶时,在行驶约17.4 km后,制动毂温度达到260℃,坡底温度达到346℃,远远高于安全临界温度。当采用分车道限速,货车以60 km/h匀速下坡时,行驶约21.6 km后制动毂温度达到260℃,坡底制动毂温度仍可达到312℃;当设置缓速车道后,温度在部分路段下降明显,整体温升态势平缓,坡底制动毂

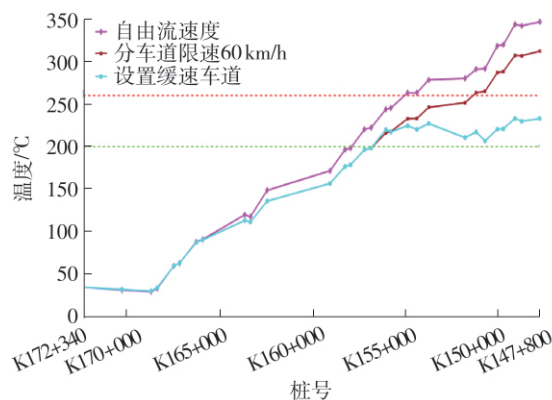


图6 不同通行方式下制动鼓温升的数值模拟结果

Fig. 6 Simulated temperature rising of brake drum under different travel modes

温度仅为 232℃, 低于安全温度阈值 (260℃)。

同时, 3 种通行方式下温度低于 200℃ 的路段分别占总长的 61.72%、66.49%、66.49%, 温度高于 260℃ 的路段分别占总长的 30.49%、14.7%、0%。此外, 设置货车专用缓速车道后, 坡底制动鼓温度较自由流速度下坡时下降了 114℃, 降温幅度达 32.9%; 较分车道限速 60 km/h 下坡时下降了 79℃, 降温幅度达 25.3%。因此, 与自由下坡及分车道限速下坡相比, 设置缓速车道可以有效缓解制动鼓温升, 将温度控制在安全临界温度以内, 此时货车制动失效概率极低。

## 4 结语

文中基于大型货车下坡特性, 提出设置货车专用缓速车道, 以 200 和 260℃ 作为制动鼓的温度阈值, 提出了缓速车道设置方法, 并对缓速车道的平纵面及稳速区限速方案进行了设计, 给出了各部分的推荐设计指标。

为保证货车制动鼓温度在安全范围内, 应采取低速、低挡下坡。文中分析了大型货车下坡的推荐挡位, 结合制动鼓温升速率特性, 提出了稳速区安全限速值。

文中还选取 G5 京昆高速某处长下坡路段, 通过制动鼓温升模型, 对自由流速度、限速 60 km/h 以及设置缓速车道 3 种下坡工况下的制动鼓温升进行了数值模拟。结果表明, 设置缓速车道可有效降低制动鼓温升态势, 使温度维持在安全范围之内。

文中从线形设计及通行管理层面提出了货车专

用缓速车道这一新思路, 并通过数值模拟对设置效果进行了检验。后续研究中, 拟建立相应试验路段, 从实车试验层面验证缓速车道的安全通行性。

## 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] 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.
- [3] 胡昌斌, 沈金荣, 陈友杰. 长下坡路段货车鼓式制动器摩擦衬片温升规律 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(4): 49-55.  
HU Chang-bin, SHEN Jin-rong, CHEN You-jie. Temperature-rising laws of drum brake pad for truck on long downgrades [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 49-55.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(6): 6-10.
- [7] 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.  
YANG Hong-zhi, HU Qing-yi, XU Jin-liang. Safety design and evaluation method for long and downhill section of expressway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3): 10-16.
- [8] 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.
- [9] BOWMAN Brian L. Grade severity rating system [J]. Institute of Transportation Engineers, 1990, 60(7): 19-24.
- [10] COLEMAN Marcus. Use of auxiliary brakes in heavy vehicles [R]. [S. l.]: Austroads, 2014.
- [11] 李宝成. 高速公路连续长下坡路段安全设施设置技术研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [12] 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.
- [13] ABDELWAHAB Walid, MORRAL F John. Determining need for and location of truck escape RAMPS [J]. Journal of Transportation Engineering, 1997, 9(10): 350-356.
- [14] WHITEFORD K David. NCHRP synthesis 178: truck escape ramps [R]. [S. l.]: Transportation Research Board, 1992.
- [15] 钱勇生, 周波, 程永华, 等. 一类减速下坡车道的机理与试验分析 [J]. 中外公路, 2007, 27(4): 5-8.
- QIAN Yong-sheng, ZHOU Bo, CHENG Yong-hua, et al. Mechanism and experimental analysis of a class of deceleration downhill lanes [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(4): 5-8.
- [16] 王志新. 基于汽车行驶安全特性的山区公路连续长大下坡路段辅助减速车道研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [17] 公路路线设计规范: JTG D20—2017 [S].
- [18] 王建波. 雅西高速公路 51 km 长下坡典型货车运行安全测试研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [19] 赵含雪. 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.
- [20] 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.
- [21] World Road Association. Road safety manual [M]. [S. l.]: [s. n.], 2003.
- [22] SOLOMON D. Accidents on main rural highways related to speed, driver, and vehicle [R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1964: 11-17.
- [23] FILDES B N, RUMBOLD G, LEENING A. Speed behaviour and drivers attitude to speeding [R]. Melbourne: Accident Research Centre, 1991: 36-42.
- [24] 裴玉龙, 程国柱. 高速公路车速离散性与交通事故的关系及车速管理研究 [J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 78-82.
- PEI Yu-long, CHENG Guo-zhu. Research on the relationship between discrete character of speed and traffic accident and speed management of freeway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 78-82.
- [25] 吴沙沙, 孙小端, 贺玉龙. 高等级公路不同限速方案车速影响分析 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(6): 1338-1341.
- WU Shasha, SUN Xiaoduan, HE Yulong. Analysis of the influence of different speed limit schemes on highways [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2013, 37(6): 1338-1341.
- [26] 闫晟煜, 肖润谋. 基于收费数据的高速公路运输量指标特征 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(6): 112-120.
- YAN Sheng-yu, XIAO Run-mou. Index characteristics of expressway transportation volume based on toll collection data [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(6): 112-120.
- [27] 道路交通标志和标线: GB 5768.2—2009 [S].
- [28] 欧阳江湖, 杨少伟, 潘兵宏, 等. 隧道出口与高速公路主线收费站净距研究 [J]. 中外公路, 2017, 37(4): 309-313.
- OUYANG Jiang-hu, YANG Shao-wei, PAN Bing-hong, et al. Study on the clearance of tunnel exit and expressway main line toll station [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(4): 309-313.
- [29] 公路项目安全性评价规范: JTG B05—2015 [S].

## Research on Exclusive Low-Speed Lane for Large Truck in Highway Continuous Long Downhill Section

ZHANG Chi<sup>1 2</sup> HU Tao<sup>1 3</sup> LIN Xuancai<sup>4</sup> BAI Haochen<sup>4</sup> WU Shangen<sup>4</sup>

( 1. College of Highway , Chang' an University , Xi' an 710064 , Shaanxi , China; 2. MOE Engineering Research Center of Digital Road Infrastructure , Xi' an 710000 , Shaanxi , China; 3. Transportation Infrastructure Construction and Management Digital Engineering Research Center of Shaanxi Province , Xi' an 710000 , Shaanxi , China; 4. CCCC First Highway Consultants Co. , Ltd. , Xi' an 710075 , Shaanxi , China)

**Abstract:** Exclusive low-speed lane for large trucks was designed to improve the driving safety of large trucks in continuous downhill section of highways. The driving characteristics of large trucks going downhill under the condition of engine auxiliary braking were analyzed. Based on the brake drum temperature and speed characteristics , it was proposed that there is a necessity to construct an exclusive low-speed lane in continuous long downhill section of highways for large trucks. Taking the six-axis articulated vehicle as the guiding type , the low-speed lane structure system was studied for the driving safety of articulated vehicles when going downhill. the setting method of the low-speed lane was clarified. The lane structures including transition section , buffer zone , steady speed zone and its linear shape were proposed. Then the reasonable speed limit and recommended gear of the low-speed lane was analyzed. Finally , taking a long downhill slope in G5 Jing-kun highway as an example , the temperature rise value of the truck brake drum under various traffic modes was simulated , and the passing safety of the low-speed lane was verified. The results show that , compared with the temperature of brake drum in downhill of free-flow speed lanes and in downhill of limit speed lanes , the temperature of brake drum on downhill bottom of the slow-speed lane is reduced by 114 and 79 °C , respectively , and the cooling amplitude can reaches 32.9% and 25.3% , respectively. The maximum temperature in the low-speed lane section is lower than the critical safety temperature. It indicates that setting a low-speed lane in the continuous long downhill section can greatly reduce the rising temperature of the brake drum as well as the probability of brake failure.

**Key words:** road engineering; low-speed lane; downhill characteristics; continuous long downhill; brake temperature rising

检索工具	EI Compendex 数据库	查证日期	2020年9月23日
署名作者	张驰; 胡涛	署名单位	长安大学
查证单位	长安大学图书馆	检索人	张钰诚

## Research on Exclusive Low-Speed Lane for Large Truck in Highway Continuous Long Downhill Section

Accession number: 20202708893476

Title of translation:

Authors: Zhang, Chi (1, 2); Hu, Tao (1, 3); Lin, Xuancai (4); Bai, Haochen (4); Wu, Shangen (4)

Author affiliation: (1) College of Highway, Chang'an University, Xi'an; Shaanxi; 710064, China; (2) MOE Engineering Research Center of Digital Road Infrastructure, Xi'an; Shaanxi; 710000, China; (3) Transportation Infrastructure Construction and Management Digital Engineering Research Center of Shaanxi Province, Xi'an; Shaanxi; 710000, China; (4) CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an; Shaanxi; 710075, China

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

Abbreviated source title: Huanan Ligong Daxue Xuebao

Volume: 48

Issue: 4

Issue date: April 1, 2020

Publication year: 2020

Pages: 104-113

Language: Chinese

ISSN: 1000565X

CODEN: HLDKEZ

Document type: Journal article (JA)

Publisher: South China University of Technology

**Abstract:** Exclusive low-speed lane for large trucks was designed to improve the driving safety of large trucks in continuous downhill section of highways. The driving characteristics of large trucks going downhill under the condition of engine auxiliary braking were analyzed. Based on the brake drum temperature and speed characteristics, it was proposed that there is a necessity to construct an exclusive low-speed lane in continuous long downhill section of highways for large trucks. Taking the six-axis articulated vehicle as the guiding type, the low-speed lane structure system was studied for the driving safety of articulated vehicles when going downhill. The setting method of the low-speed lane was clarified. The lane structures including transition section, buffer zone, steady speed zone and its linear shape were proposed. Then the reasonable speed limit and recommended gear of the low-speed lane was analyzed. Finally, taking a long downhill slope in G5 Jing-kun highway as an example, the temperature rise value of the truck brake drum under various traffic modes was simulated, and the passing safety of the low-speed lane was verified. The results show that, compared with the temperature of brake drum in downhill of free-flow speed lanes and in downhill of limit speed lanes, the temperature of brake drum on downhill bottom of the low-speed lane is reduced by 114 and 79, respectively, and the cooling amplitude can reach 32.9% and 25.3%, respectively. The maximum temperature in the low-speed lane section is lower than the critical safety temperature. It indicates that setting a low-speed lane in the continuous long downhill section can greatly reduce the rising temperature of the brake drum as well as the probability of brake failure. © 2020, Editorial Department, Journal of South China University of Technology. All right reserved.

Number of references: 29

Main heading: Speed

Controlled terms: Automobiles - Brakes - Trucks

Uncontrolled terms: Articulated vehicle - Auxiliary braking - Driving characteristics - Maximum temperature - Rising temperatures - Speed characteristics - Structure systems - Transition sections

Classification code: 602 Mechanical Drives and Transmissions - 662.1 Automobiles - 663.1 Heavy Duty Motor Vehicles

Numerical data indexing: Percentage 2.53e+01%, Percentage 3.29e+01%

DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.190341

Funding Details: Number: 2017YFC0803906, Acronym: -, Sponsor: -;

Funding text: Supported by the National Key Research and Development Plan(2017YFC0803906).

Compendex references: YES

Database: Compendex

Compilation and indexing terms, Copyright 2020 Elsevier Inc.

Data Provider: Engineering Village