

# 基于典型汽车爬坡的高海拔地区公路最大纵坡

许金良<sup>1</sup>, 雷天<sup>1</sup>, 贾兴利<sup>1</sup>, 房建宏<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 青海省交通科学研究院, 青海 西宁 810007)

**摘要:** 以典型车型实地行车试验数据为基础, 建立了载重汽车在不同海拔、坡度下的运行速度-距离曲线。结果表明: 在3 000~5 000 m海拔范围内, 海拔越高, 汽车在相同坡度路段的爬坡速度下降越快, 达到的稳定速度也越低; 高海拔地区设计速度为100、80和60 km·h<sup>-1</sup>公路的最大纵坡与现行标准中规定的相同设计速度下一般地区的公路最大纵坡相比降低了1%~2%。

**关键词:** 公路; 高海拔; 最大纵坡; 汽车; 爬坡特性  
**中图分类号:** U412.33 **文献标志码:** A

## Maximal Gradient of Highway in High-Altitude Area Based on Typical Truck's Climbing Performance

XU Jinliang<sup>1</sup>, LEI Tian<sup>1</sup>, JIA Xingli<sup>1</sup>, FANG Jianhong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Transportation Research Institute of Qinghai Province, Xining 810007, China)

**Abstract:** Based on typical truck's climbing performance in real driving test, the truck's speed-distance curves on different gradients at different altitudes were built. The results show that the truck's climbing speed on slope decreases more rapidly and the stable speed on slope is lower at a higher altitude when the altitude is between 3 000 m and 5 000 m. Then, the maximal gradient of highway with design speed 100, 80 and 60 km·h<sup>-1</sup> in high-altitude area was proposed. Compared with that specified at the same design speed in general area in existing standard, it decreases by 1%~2%.

**Key words:** highway; high altitude; maximal gradient; truck; climbing performance

高海拔(≥3 000 m)地区为气压、空气含氧量及

温度均较低的环境, 会对汽车动力性能产生一定的影响, 易造成汽车启动及爬坡困难, 导致运行速度降低, 路段通行能力下降, 进而影响行车效率与安全。目前, 国内外公路纵坡设计是以汽车动力性能为基础来确定纵坡指标。Lan等<sup>[1]</sup>分析得到了美国典型货车(质量功率比120 kg·kW<sup>-1</sup>)以外的常用货车车型的爬坡性能曲线, 根据常用车型的爬坡性能, 分析公路纵坡上爬坡车道的临界坡长指标。Rakha等<sup>[2]</sup>分析了轮胎与空气动力性对车辆行驶性能的影响, 对道路通行能力手册(HCM)中的货车爬坡性能曲线进行修正, 确定了纵坡上爬坡车道的设置条件。美国国家公路与运输协会(AASHTO)“绿皮书”中, 根据货车在上坡路段的爬坡性能曲线及其在特定纵坡路段的初始速度及平均速度数据, 提出不同速度折减量下的临界坡长值以及组合坡段等效纵坡<sup>[3]</sup>。周荣贵<sup>[4]</sup>利用实车装载上坡试验研究了纵坡与速度及速度随坡长的变化规律, 提出基于运行速度差和满足公路服务水平要求的各级公路最大纵坡坡度与坡长限制值。邢恩辉<sup>[5]</sup>分析了车辆在纵坡上行驶时的动力性能, 从汽车行驶性能角度研究公路纵坡坡度、坡长限制及纵坡组合问题, 并提出相应的设计指标建议值。董忠红等<sup>[6]</sup>在分析重型车辆爬坡速度影响规律的基础上, 提出了坡度和坡长设计控制指标, 建立了坡度与坡长的函数模型。徐进等<sup>[7]</sup>根据大货车爬坡速度预测模型得到了纵坡路段货车行驶速度曲线, 以此判断纵断面设计指标是否合理、是否需设置爬坡车道等。

可见, 上述诸多成果主要是针对一般海拔高度(<3 000 m)取得的, 缺乏高寒高海拔地区汽车动力性能及纵坡设计指标的研究。我国现行的路线设计规范虽然根据海拔高度对纵坡指标值进行了折减, 但规范的制定年限较早, 提出的折减值过于宽泛。随着汽车产业的发展及汽车制造技术的进步, 依据早

收稿日期: 2016-10-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(310821151007)

第一作者: 许金良(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路总体设计及道路交通安全。E-mail: gl15@chd.edu.cn

通讯作者: 雷天(1991—), 女, 博士生, 主要研究方向为道路总体设计及道路交通安全。E-mail: 429121447@qq.com

期典型车型动力特性制定的纵坡设计指标是否适用于现阶段高海拔地区公路设计还需要进一步验证。基于此,本文以载重汽车爬坡行驶特性为研究对象,利用爬坡试验方法采集典型汽车在高海拔地区公路不同坡度上坡路段的行驶速度、距离等数据,分析海拔高度、坡度及坡长对汽车运行特性的影响,从满足汽车动力性能的角度研究高海拔地区纵坡最大坡度的合理性,提出满足行车安全性与舒适性的高海拔地区公路最大纵坡参考值。

## 1 数据采集

### 1.1 试验车型

载重汽车爬坡性能是公路纵坡设计的重要依据,选择合适的车型对公路纵坡设计指标的确定十分关键。汽车自身参数对其爬坡特性有较大影响,公路纵坡设计中主要以汽车质量功率比为基础指标,选取一个满足大部分载重车行驶要求质量功率比的车型作为试验车型<sup>[8-10]</sup>。我国现行标准及规范在制定纵坡指标时选取东风EQ140为典型车型,其质量功率比为 $107 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 。本文以质量功率比为基础依据,考虑到我国载重汽车发展趋势及高海拔地区常用货车类型,同时借鉴国外制订纵坡指标时对质量功率比的考虑,选取质量功率比为 $120 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 的东风EQ1240W型载重车为研究对象,该车型采用东风康明斯C260涡轮增压发动机,其他相关参数如

表1所示。

表1 东风EQ1240W主要参数  
Tab.1 Main parameters of Dongfeng EQ1240W

参数	值
整备质量/kg	11 805
载质量/kg	10 400
质量功率比/( $\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ )	120
总质量/kg	22 920
额定功率/kW	191
最高车速/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	80

### 1.2 试验路段选取

为了研究海拔及坡度变化对汽车动力特性的影响,在选取试验路段时应注意排除其他因素对试验结果的影响。相关研究表明,坡度大于3%的坡段与平曲线进行组合设计时,对行车安全的影响较大。为保证试验结果的可靠性,在选择试验路段时应尽量选取平面线形良好、汽车爬坡特性仅受海拔及纵坡本身影响的纵坡路段。本次试验选取平面线形为直线或平曲线半径大于800m的纵坡路段,以剔除平面线形可能对汽车行驶造成的影响。此外,本文研究的主要目标是确定海拔3 000~5 000m范围内公路的最大纵坡值,因此选取的试验路段主要是该海拔范围内坡度为3%~5%的坡段,不考虑坡度小于3%的缓坡路段。本次试验选取在青海省国道214新建一级公路K200+000~K600+000段内符合要求的路段,试验路段相关信息如表2所示。

表2 试验路段信息

Tab.2 Information of test sections

路段编号	起点桩号	终点桩号	坡度/%	坡长/m	平面线形	海拔高度/m
1	K201+390	K202+370	3.0	980	直线	3 150
2	K199+280	K199+970	4.0	690	平曲线(半径1 200 m)	3 100
3	K212+400	K213+100	5.0	700	平曲线(半径900 m)	3 221
4	K262+740	K263+810	3.3	1 070	平曲线(半径1 000 m)	3 700
5	K260+880	K261+580	5.0	700	平曲线(半径1 000 m)	3 750
6	K557+300	K558+180	3.0	880	直线	4 465
7	K366+200	K367+090	4.0	890	直线	4 253
8	K371+530	K372+230	5.0	700	平曲线(半径1 500 m)	4 282
9	K588+615	K589+215	3.5	600	平曲线(半径1 000 m)	4 660
10	K597+635	K598+530	4.0	895	直线	4 700
11	K572+560	K573+100	5.0	540	直线	4 600

### 1.3 试验设备及数据采集

本次试验使用的设备主要是非接触式光电速度传感仪。光电速度传感仪固定在载重汽车油箱前侧的钢板上(见图1),可以实时记录试验车爬坡过程中的行驶速度及距离。

为了研究载重汽车在高海拔地区不同坡段上的

速度变化情况,选择各设计速度下货车平均运行速度为入坡速度进行载重汽车的爬坡试验,且由于高寒地区通常较少采用 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的设计速度,因此本文主要研究范围界定为海拔3 000~5 000m,设计速度为100、80和 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的公路,各设计速度下公路对应的货车平均运行速度如表3所示<sup>[11-12]</sup>。



图 1 试验车及光电测速传感器安装位置  
Fig.1 Test truck and mounting position of photoelectric speed sensing device

表 3 货车平均运行速度

Tab.3 Average running speed of trucks

设计速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	货车平均运行速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )
100	75
80	70
60	60

试验过程中,试验车分别以 80(满载时能够达到的最大速度)、70、60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  的入坡速度进入试验坡段,驾驶员在尽可能高的挡位将油门踩到底,使载重汽车始终以最大的爬坡能力进行爬坡.整个过程中光电测速仪可直接记录汽车爬坡过程中的时间、速度及距离等数据,同时通过录像等方式记录汽车爬坡过程中的换挡次数及位置.

## 2 高海拔地区载重汽车爬坡特性

### 2.1 高海拔地区载重汽车爬坡动力特性

载重汽车在纵坡路段上行驶时需通过换挡来获取更大的牵引力以便于汽车能够保持足够的动力进行爬坡,汽车的换挡及速度变化可以体现其爬坡动力特性<sup>[9]</sup>.试验结束后,将速度数据从仪器主机中导出,进行室内数据处理工作.对比每个坡段测量的三次数据,剔除由试验仪器误差或其他原因产生的速度突变点(过高或者过低值),可以得出典型汽车在各纵坡坡段的速度-距离散点图,根据记录得到的换挡信息并将其标注在散点图中可以得出载重汽车速度变化及挡位变化情况.以入坡速度为 70  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时(坡底挡位均为 8 挡)载重汽车在海拔 3 200 m 及 4 300 m 附近处不同坡段上爬坡换挡位置及行驶速度数据为例,分析汽车爬坡动力特性.

由图 2a 可知,海拔 3 200 m 附近时,载重汽车在不同坡段以 70  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度进行爬坡时,在坡度为 3% 及 4% 的坡段上,坡长 800 m 范围内均经过一次换挡,坡度为 5% 的坡段上经过两次换挡.坡度为 3% 的坡段上换挡位置约在坡长 750 m 处(换挡速度为 57  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ),坡度为 4% 的坡段上在坡长 450 m

处(换挡速度为 58  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ );坡度为 5% 的坡段上,在坡长 230 m 处由 8 挡换为 7 挡(换挡速度为 60  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ),坡长约 600 m 处由 7 挡换为 6 挡(换挡速度为 46  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

海拔 4 300 m 附近时,坡长 800 m 范围内载重汽车在坡度为 3% 的坡段上坡长约 480 m 的位置处经过一次换挡,在坡度为 4% 及 5% 的坡段上经过两次换挡,具体换挡位置及速度如图 2b 所示.

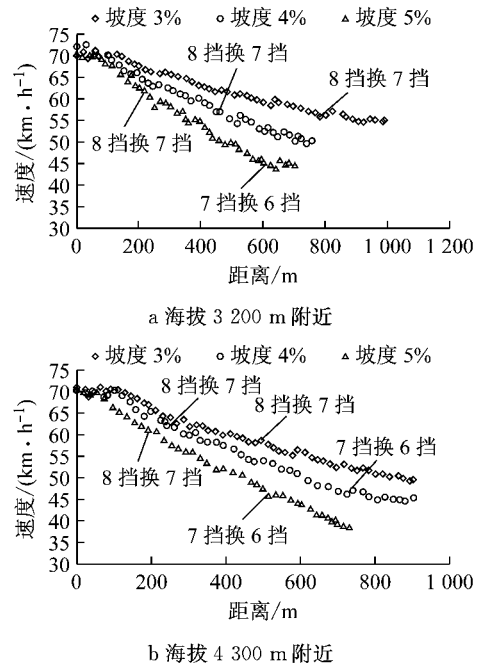


图 2 载重汽车在不同坡段速度变化及换挡位置  
Fig.2 Model truck's speed change and shift position at different sections

从上述分析可得出如下结论:海拔高度及入坡速度相同时,坡度越大载重汽车爬坡速度降低越快,相同坡长范围内换挡次数越多,且同档位变换时对应的换挡位置越早(距离坡底距离越短),表明坡度越大时需要通过更频繁或更及时的换挡来满足其爬坡动力需求.

此外,对比不同海拔处的试验结果可知,坡度相同时海拔越高载重汽车同档位变换时对应的换挡位置越早(即距离坡底距离越短,如坡度为 5% 的坡段上,由 8 挡换为 7 挡,海拔 4 300 m 附近时换挡位置约为坡长 190 m 处,与海拔 3 200 m 附近时换挡位置 230 m 处相比缩短 40 m,7 挡换为 6 挡时对应的换挡位置也相差 80 m 左右),表明海拔较高时汽车爬坡动力性能有所下降.

### 2.2 高海拔地区典型汽车爬坡速度-距离曲线

在整理过后的速度-距离散点数据基础上,将试验车在坡底及坡顶附近的缓坡过渡段数据剔除,对

直坡段速度、距离数据进行拟合外延,可以得到不同海拔不同坡度下载重汽车的爬坡曲线。

按照上述数据处理原则,建立了典型汽车分别以 75、70 和 60 km · h<sup>-1</sup> 的入坡速度在不同海拔处陡坡路段的爬坡速度-距离曲线(见图 3),下面以部分结果为例,分析典型汽车在高海拔地区陡坡路段爬坡特性。

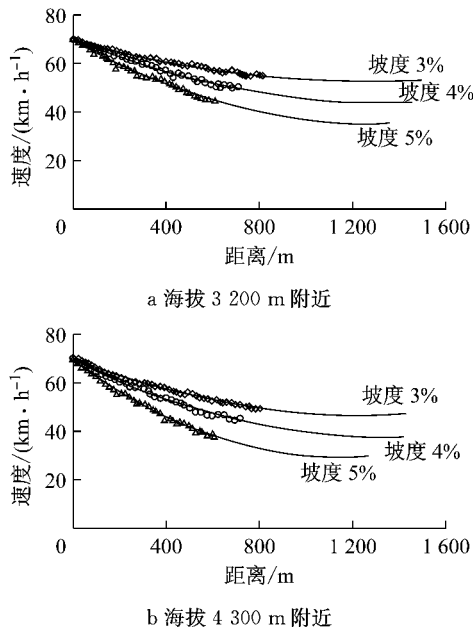


图 3 典型汽车在不同坡段的爬坡速度-距离曲线

Fig.3 Model truck's speed-distance curve at different sections

根据建立的典型汽车爬坡速度-距离曲线可以看出,典型汽车在高海拔地区陡坡路段爬坡速度变化呈现出速度先下降较快然后逐渐趋于平缓的规律,坡长足够长时速度会达到一个稳定值.通过图 3 对比可以看出,入坡速度相同且海拔高度基本相同时,坡度越大典型汽车的爬坡速度下降越快,能够达到的稳定速度也越低,表明坡度对汽车的爬坡速度有明显影响。

### 2.3 海拔对典型货车爬坡特性的影响

将典型汽车在不同海拔处相同坡度路段建立的速度-距离曲线进行对比,可以得出海拔高度变化对典型汽车爬坡特性的影响规律.下面以入坡速度为 75 km · h<sup>-1</sup> 时的结果为例,分析海拔对典型汽车爬坡特性的影响。

根据不同海拔相同坡度坡段上的速度-距离变化曲线的对比可以看出,海拔高度对汽车爬坡性能有明显影响,坡度相同时,海拔越高典型汽车的爬坡速度下降越快.在坡度为 3% 的坡段上,入坡速度为 75 km · h<sup>-1</sup> 时,典型汽车在海拔 4 465 m 处速度下

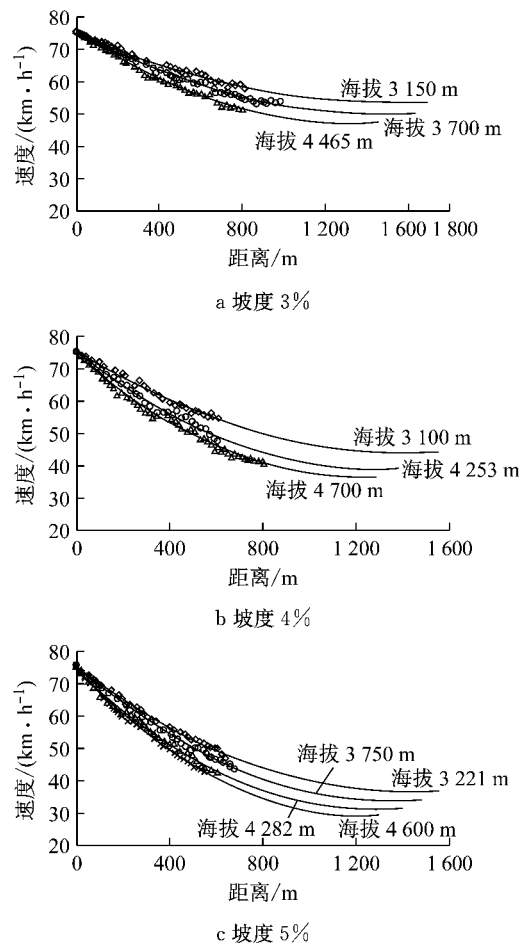


图 4 典型汽车在不同海拔相同坡度坡段上的爬坡曲线

Fig.4 Typical truck's speed-distance curve on the same grade at different altitudes

降与海拔 3 150 m 及 3 700 m 处相比明显较快,最终达到的稳定速度与海拔 3 150 m 处相比降低了 6 km · h<sup>-1</sup>;坡度为 5% 时,典型汽车在四个不同海拔位置处的爬坡曲线呈现出如下规律:海拔越高速度下降越快,达到稳定速度越低,达到稳定速度时对应的坡长也越短,海拔每升高约 500 m 时稳定速度降低约 2~3 km · h<sup>-1</sup>.根据已经建立的高海拔地区典型汽车爬坡速度-距离曲线,可以得出典型汽车在不同坡度路段达到的稳定速度及对应的稳定坡长如表 4 和 5 所示。

将表 4 与 5 进行对比可以看出,典型汽车在海拔 4 300 m 附近相同坡度路段达到的稳定速度与在海拔 3 200 m 附近相比下降约 4~7 km · h<sup>-1</sup>,且海拔越高对应的稳定坡长越短,其他条件相同时典型汽车在海拔 4 300 m 附近处相同坡度下稳定坡长与海拔 3 200 m 附近处相比降低了 100~200 m。

### 2.4 坡度、坡长对典型汽车爬坡特性的影响

根据已经建立的典型汽车爬坡速度-距离曲线,可以得出海拔相同时试验车在不同坡度坡段速度损

表 4 海拔 3 200 m 附近典型汽车稳定速度及稳定坡长

Tab.4 Typical truck's stable speed and its slope length at an altitude around 3 200 m

入坡速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	海拔高度/ m	坡度/%	稳定速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	稳定坡长/ m
75	3 150	3	53	1 400
	3 100	4	44	1 300
	3 221	5	37	1 300
70	3 150	3	52	1 200
	3 100	4	44	1 200
	3 221	5	36	1 200
60	3 150	3	50	1 000
	3 100	4	43	1 000
	3 221	5	35	1 000

表 5 海拔 4 300 m 附近典型汽车稳定速度及稳定坡长

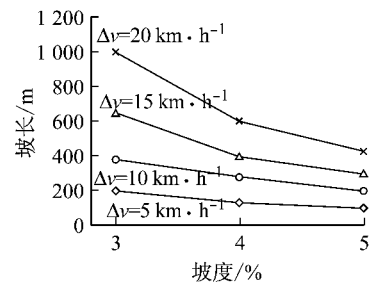
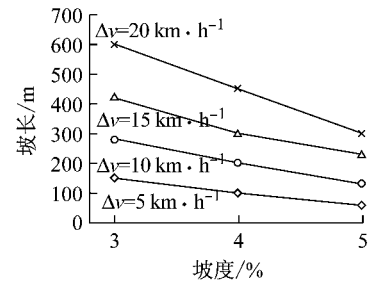
Tab.5 Typical truck's stable speed and its slope length at an altitude around 4 300 m

入坡速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	海拔高度/ m	坡度/%	稳定速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	稳定坡长/ m
75	4 465	3	47	1 200
	4 253	4	39	1 200
	4 282	5	31	1 200
70	4 465	3	47	1 150
	4 253	4	39	1 100
	4 282	5	30	1 100
60	4 465	3	45	900
	4 253	4	39	900
	4 282	5	30	900

失一定值时对应的坡长。

分析图 5 可以得出如下结论:在海拔 3 200 m 附近,坡度越大典型汽车爬坡过程中的速度下降越快,速度损失  $\Delta v$  相同值时对应的坡长越短。入坡速度为  $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,典型汽车在坡度为 4% 的坡段上速度损失相同时对应的坡长与坡度为 3% 的坡段相比下降幅度较大,速度损失为  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时对应的坡长相差 400 m,而坡度为 5% 的坡段与 4% 的坡段相比差距相对较小,速度损失为  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时对应的坡长相差 170 m,且坡度为 4% 坡长仅 600 m 时典型汽车速度损失已达到  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,表明在该海拔高度下,典型汽车在坡度为 4% 的坡段上的爬坡能力与在坡度较低的路段相比明显下降,坡度大于 4% 时坡度对典型汽车运行的影响更为严重,在进行该海拔段纵坡设计时应考虑将坡度 4% 作为一个临界点。

由图 6 可以看出,该海拔高度下典型汽车在坡度为 3%、4% 及 5% 的坡段上速度损失相同时对应的坡长随着坡度的变化趋势较为一致,无明显突变点,且坡度为 3% 时典型汽车在 600 m 以内速度下降已达到  $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,表明该海拔典型汽车在坡度 3% 以上坡段上的爬坡能力均较差。

图 5 海拔 3 200 m 附近典型汽车速度损失与坡长的对应关系(入坡速度  $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )Fig.5 Correspondence between speed loss and slope length at an altitude around 3 200 m (initial speed is  $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )图 6 海拔 4 300 m 附近典型汽车速度损失与坡长的对应关系(入坡速度  $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )Fig.6 Correspondence between speed loss and slope length at an altitude around 4 300 m (initial speed is  $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )

### 3 高海拔地区公路最大纵坡

道路纵坡坡度及坡长值大小对汽车行驶特性有较大影响,在不同的纵坡坡度下,车辆的运行速度变化也不同<sup>[13-14]</sup>。根据典型汽车在高海拔地区的爬坡特性分析可知,上坡过程中汽车的运行速度随着纵坡坡度及坡长的增加而降低,且海拔在 3 000 ~ 5 000 m 范围内时,海拔对载重汽车爬坡特性有明显影响,海拔越高汽车爬坡速度下降越快。

纵坡坡度及坡长的限制主要是依据典型汽车的爬坡速度特性,以将典型汽车在坡道上的行驶速度控制在一个合理的速度范围内为基本原则,当容许速度与稳定速度之差小于  $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  或  $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,可通过限制坡长来控制货车行驶速度。根据国内外研究经验,坡道容许速度通常取设计速度的 50% ~ 60%,或选取速度下降  $15 \sim 25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  范围内的一个固定值<sup>[15-17]</sup>。根据前人经验并结合高海拔地区载重汽车速度分布情况,确定的容许速度如表 6 所示。

表6 各设计速度下坡道容许速度

Tab.6 Allowable speed

设计速度/(km·h <sup>-1</sup> )	容许速度/(km·h <sup>-1</sup> )
100	55
80	50
60	40

前文建立的典型汽车爬坡运行速度-距离曲线表明,海拔高度为3 221 m时,典型汽车以60 km·h<sup>-1</sup>为入坡速度在坡度为5%的坡段上行驶的最终稳定速度约为35 km·h<sup>-1</sup>(见表4),与设计速度60 km·h<sup>-1</sup>时货车容许速度40 km·h<sup>-1</sup>相差不大,表明该设计速度的公路在该海拔高度下可采用坡度为5%的最大纵坡;而入坡速度为75 km·h<sup>-1</sup>及70 km·h<sup>-1</sup>时,稳定速度与容许速度之间差值较大,难以通过限制坡长对货车行驶速度进行控制,因此对设计速度100 km·h<sup>-1</sup>和80 km·h<sup>-1</sup>的公路来说,海拔3 000 m以上时最大纵坡值不应再采用适用于一般地区的5%的值,应进行一定折减.在该海拔高度下坡度为4%的坡段上,入坡速度为75 km·h<sup>-1</sup>及70 km·h<sup>-1</sup>时,典型汽车稳定速度约为44 km·h<sup>-1</sup>,与设计速度为100 km·h<sup>-1</sup>及80 km·h<sup>-1</sup>的公路容许速度相比差值均小于15 km·h<sup>-1</sup>,同时结合2.3节中对图4的分析说明,提出在该海拔下这两个设计速度时采用坡度为4%的最大纵坡.

根据上述原则,以典型汽车在3 000~5 000 m海拔不同坡度路段的速度-距离曲线为依据,本文提出海拔3 000~5 000 m时设计速度为100、80和60 km·h<sup>-1</sup>的公路最大纵坡建议值如表7所示.

表7 高海拔地区公路最大纵坡坡度建议值

Tab.7 Recommended maximal grade of highway in high-altitude area %

海拔高度/m	各设计速度下最大纵坡坡度建议值		
	100 km·h <sup>-1</sup>	80 km·h <sup>-1</sup>	60 km·h <sup>-1</sup>
3 000~4 000	4	4	5
4 000~5 000	3	3	4

经对比,本文提出的高海拔地区公路最大纵坡值与现行的《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)中对一般地区相同设计速度的公路最大纵坡的规定值相比降低了1%~2%.

## 4 结论

(1) 选取质量功率比为120 kg·kW<sup>-1</sup>的汽车,采用典型汽车行车试验方法,建立了典型汽车在海拔3 000~5 000 m范围内、坡度为3%~5%的坡段上的运行速度-距离曲线,得出了海拔高度对汽车爬

坡特性的影响规律.坡度相同时,海拔越高典型汽车爬坡速度下降越快,典型汽车在海拔4 300 m附近相同坡度路段达到的稳定速度与在海拔3 200 m附近相比下降约4~7 km·h<sup>-1</sup>,稳定坡长降低了约100~200 m;另外,在3 000~4 000 m海拔段,4%的坡度为纵坡对汽车动力性能影响程度的一个分界点,坡度大于4%时典型汽车爬坡特性明显较差.

(2) 根据已经建立的高海拔地区典型汽车爬坡速度-距离曲线,结合已有的公路纵坡设计方法,在充分考虑海拔高度、纵坡坡度及坡长对载重汽车行驶特性影响的基础上,提出了海拔3 000~5 000 m范围内设计速度为100、80和60 km·h<sup>-1</sup>的公路纵坡最大坡度建议值,与现行标准中对一般地区相同设计速度下最大纵坡坡度值的规定相比降低了1%~2%.

本文研究成果有助于指导高海拔地区公路纵坡设计,后期将继续展开对高海拔地区公路纵坡坡长限制的研究,以期完善高海拔地区公路设计理论体系.

## 参考文献:

- [1] LAN C J, MENENDEZ M. Truck speed profile model for critical length of grade [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2003, 129(4):408.
- [2] RAKHA H, YU B. Impact of tire and aerodynamic aids on truck performance along upgrade sections [C] // TRB Annual Meeting. Washington DC: Transportation Research Record, 2005:1-15.
- [3] American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO). A policy on geometric design of highway and streets (Green Book) [M]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [4] 周荣贵. 公路纵坡坡度与坡长限制的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2004.  
ZHOU Rongui. Study on highway longitudinal and grade and grade length limit [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004.
- [5] 邢恩辉. 基于汽车行驶性能的公路纵坡设计指标研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
XING Enhui. Research on design indexes of highway grade based on vehicle operating characteristic [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [6] 董忠红, 倪凤英, 柳帅蒙, 等. 长大纵坡路段重型车辆爬坡速度 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(3):1.  
DONG Zhonghong, NI Fengying, LIU Shuaimeng, et al. Heavy truck climbing speed on long and steep longitudinal slope section [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2014, 34(3):1.

- [7] 徐进, 邵毅明, 赵军, 等. 山区道路弯坡组合路段重载车辆行驶速度模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(2): 67.  
XU Jin, SHAO Yiming, ZHAO Jun, *et al.* Speed prediction model of heavy truck driving on curved segment with a slope of mountainous highway [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(2): 67.
- [8] 庄传仪, 赵一飞, 潘兵宏, 等. 公路纵坡设计关键参数研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 39.  
ZHUANG Chuanyi, ZHAO Yifei, PAN Binghong, *et al.* Research on key parameter of highway longitudinal grade design [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 39.
- [9] 刘娟. 山区高速公路连续纵坡路段运行速度研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.  
LIU Juan. Study on the operating speed of continuous longitudinal gradient about mountain area freeway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [10] 雷斌, 许金良, 刘洁. 长大上坡路段载重汽车运行速度预测模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 8.  
LEI Bin, XU Jinliang, LIU Jie. Heavy truck's climbing speed prediction model of long uphill section[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33(6): 8.
- [11] 慕慧. 山区公路分离式断面最大坡长的限制[D]. 西安: 长安大学, 2003.  
MU Hui. The maximal grade line limit of separate section in montane highway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2003.
- [12] 庄传仪. 基于汽车动力特性的山区高速公路爬坡车道设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.  
ZHUANG Chuanyi. Research on the climbing lane design of expressway in mountain terrain based on vehicle operating characteristic[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [13] 汪双杰, 方靖, 韩艳. 青藏公路运行速度特性研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 13.  
WANG Shuangjie, FANG Jing, HAN Yan. Research on operating speed characteristics of Qinghai-Tibet Highway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 13.
- [14] 乔建刚, 温影影, 周荣贵. 基于驾驶行为的高原区公路纵坡折减[J]. 公路交通科技, 2012, 29(1): 128.  
QIAO Jiangan, WEN Yingying, ZHOU Ronggui. Grade compensation of highway in plateau area based on driving behavior[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(1): 128.
- [15] 梁国华, 马荣国, 沈翔, 等. 高速公路爬坡车道设置的有效性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(1): 23.  
LIANG Guohua, MA Rongguo, SHEN Xiang, *et al.* Effectiveness of building climbing lane on expressway [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(1): 23.
- [16] 王博. 山区高速公路平均纵坡的研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.  
WANG Bo. Study on average longitudinal slope of mountainous expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [17] 裴玉龙, 邢恩辉. 高等级公路纵坡的坡度、坡长限制分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(5): 629.  
PEI Yulong, XING Enhui. Grade and its length limitation analysis of highway [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(5): 629.

~~~~~

(上接第 832 页)

- [15] 中国建筑科学研究院, 重庆大学. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 134—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
China Academy of Building Research, Chongqing University. Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer and cold winter zone: JGJ 134—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [16] 张才才, 李振海. 上海市集合住宅气密性能实测及换气性能分析[J]. 节能, 2005(2): 35.  
ZHANG Caicai, LI Zhenhai. Field measurements of airtight performance of Shanghai residential buildings and the analysis the performance of ventilation [J]. Energy Conservation, 2005 (2): 35.
- [17] 中国气象局, 清华大学. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
China Meteorological Bureau, Tsinghua University. China standard weather data for analyzing building thermal conditions [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.
- [18] 潘黎. 基于人体生理参数的清醒和睡眠状态的热舒适研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
PAN Li. The thermal comfort investigation of awakening and sleeping state based on physiological parameters [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.
- [19] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Thermal environmental conditions for human occupancy: ASHRAE standard 55-2013 [S]. [S. l.]: ANSI/ASHRAE, 2013.