

文章编号:1671-6833(2005)04-0072-05

山区公路分离式断面最大坡长限制分析

慕 慧, 杨少伟

( 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)

**摘 要:**从汽车行驶理论入手,以解放CA 141 载重车为标准车型,对汽车的动力性及车辆在道路上的受力情况、运动方程进行分析,并充分考虑汽车在上下坡所受到的诸如空气阻力、海拔高度及车辆载荷等各种影响因素,探讨了山区公路最大坡长限制的确定方法.以分析结果为基础,提出我国《公路工程技术标准》应适当放宽最大坡长限制的建议,同时给出了山区公路最大坡长限制的修改建议值(并通过试验验证了分析的正确性),以供设计人员在设计过程中参考.

**关键词:**公路; 分离式断面; 坡长限制; 汽车动力性; 运行速度; 纵断面设计

**中图分类号:** U 412.33 **文献标识码:** A

0 引言

公路线形是公路的基本骨架,其质量的好坏直接影响着公路使用质量及工程造价.纵断面线形设计是公路线形设计的重要内容,而山区公路的纵断面设计是公路线形设计最关键的一部分,也是近年来公路勘测设计领域备受关注的问题.随着我国高速公路建设向山岭重丘区的延伸,公路纵断面设计显得越来越重要,如何合理运用纵坡度及坡长,在公路使用质量、运营效益及工程投资之间寻找最佳平衡点,是公路线形设计中的一个重要课题.

《公路工程技术标准(JTG B01-2003)》(以下简称“标准”)是我国公路行业长期经验的积累,它包括了各个不同时期路线方面的科研成果,是众多专家、学者智慧的结晶,一直是选线及设计人员从事路线设计工作的依据和指南.但是在实际运用过程中仍存在问题:汽车行驶特性和线形的关系研究不够深入,导致规范中指标值的确定缺乏理论支持;随着社会经济不断发展,汽车性能不断改进,汽车的爬坡能力和制动性能不断提高,而“标准”中坡长计算所采用的代表车型仍为解放CA 140 和东风EQ 140,汽车性能偏低;在公路纵断面线形设计中,确定公路最大允许坡长时,车辆驶入、驶出纵坡的速度,以及坡段上所容许的最低车速(即容许车速)是应考虑的主要因素之一,而“标

准”的指标是根据设计车速制定的,这和汽车的实际行驶速度差别很大;目前在确定最大坡长限制值时,一般不计空气阻力,实际上,忽略空气阻力对坡长值确定的影响是相当大的;目前在确定上坡方向最大坡长限制值时,没有考虑换挡,事实上,驾驶员在上坡过程中,为了克服更大的坡长,一般都会进行换挡操作.由上述原因可见“标准”中关于各级公路纵坡坡长限制的数值与现状不符<sup>[1~3]</sup>.

1 汽车行驶方程式与动力特性

1.1 汽车行驶方程式

车速较高的时候,作用于汽车的空气阻力很大,不能忽略不计,作者考虑了空气阻力的影响,推导出相应的汽车行驶方程式(1)及式(2)<sup>[4~9]</sup>:

$$F_t = F_f + F_w \pm F_i + F_j \tag{1}$$

式中: $F_t = \frac{T_{iq} i_{k0} \eta_T}{r}$ 为汽车驱动力; $F_f = G \cdot f$ 为滚动阻力; $F_i = G$ 为坡度阻力,其前的“+”表示上坡,“-”表示下坡; $F_j = \pm \delta_m \cdot \frac{du}{dt}$ 为加速阻力,其前面的“+”表示加速,“-”表示减速; $F_w = \frac{C_D A u_r^2}{21.15}$ 为空气阻力.将以上各量带入式(1),得

$$U \frac{T_{iq} i_{k0} \eta_T}{r} = G \left( f + \frac{1}{2} \cdot C_D A u_r^2 \pm G \pm \delta_m \cdot \frac{du}{dt} \right) \tag{2}$$

式中: $U$ 为负荷率,一般负荷率  $U = 80\% \sim 90\%$ ;  $T_{iq}$ 为发动机曲轴扭矩; $i_k$ 为变速器的传动比; $i_0$

收稿日期:2005-06-20;修订日期:2005-09-15

作者简介:慕 慧(1976-),女,陕西神木人,长安大学讲师,在读博士研究生,主要从事道路勘测设计.

为主减速器的传动比; $\eta_f$ 为传动系的机械效率; $r$ 为车轮半径; $G$ 为作用于汽车上的重力; $i$ 为坡度; $f$ 为滚动阻力系数; $C_D$ 为空气阻力系数; $A$ 为汽车迎风面积; $\rho$ 为空气密度; $u_r$ 为合成的流入速度,在无风时即汽车的行驶速度; $\delta$ 为惯性力系数; $m$ 为汽车质量.

1.2 汽车动力特性

汽车的动力性能系指汽车所具有的加速、上坡、最大速度等的性能.一般用汽车的动力因数

$$D(D=\frac{F_t-F_w}{G})$$
来表示<sup>[5,9]</sup>,将有关公式代入,得

$$D=\frac{U\gamma\eta_f}{rG}\left[T_{\max}-\frac{T_{\max}-T_N}{(n_N-n_M)^2}\left(n_M-\frac{u\gamma}{0.377r}\right)^2\right]-\frac{C_D A u_r^2}{21.15G}\tag{3}$$

如果道路的高程 $H$ 不是海平面,油门不是全开,汽车不是满载,其总重量为 $G_x$ ,那么汽车功率与总重之比则不是发动机最大功率与满载时汽车总重力之比,而是 $N/G_x$ ,所以 $D$ 要根据具体情况予以修正,设 $D$ 的修正系数为 $\lambda$ ,则

$$\lambda\cdot D=f\pm i\pm\frac{\delta}{g}a\tag{4}$$

式(3)、(4)中: $\gamma$ 为总速比, $\gamma=i_k\cdot i_0$ ;  $u$ 为汽车行

驶速度; $T_{\max}$ 为最大扭矩; $T_N$ 为最大功率所对应的扭矩; $n_M$ 为最大扭矩所对应的转速; $n_N$ 为最大功率所对应的转速; $a$ 为汽车行驶的加速度.

2 坡长限制值

2.1 因素确定

(1) 选定代表车型.研究表明,纵坡对载重汽车速度的影响要比小客车显著得多.在水平路段上,载重汽车平均速度与小客车平均速度近似.和水平路段相比较,载重汽车下坡时速度的增加可达5%,上坡时速度约减小7%或更多,而小客车在4%~5%的坡度上的行驶速度与在平坦公路上的正常行驶速度相比变化不大.所以,公路应当设计成使载重汽车速度不致于降低到尾随的驾驶员不能承受的情况.根据陕南(洋县至勉县高速公路)、陕北(吴堡至子洲高速公路)、关中(渭南至潼关高速公路、西安绕城公路南段、禹门口至闫良高速公路)等几条拟建公路区域交通量OD调查结果分析,现阶段将解放CA141作为代表车型来确定路线坡长限制值是合适的,其综合实载率为70.86%,单位质量功率为10.63kW/t,车型比例为58.8%<sup>[7]</sup>,其主要技术参数见表1.

表1 解放CA141原始计算数据<sup>[8]</sup>  
Tab.1 Originally computing data of Jiefang CA141

$N_{\max}/kW$	$T_{\max}/(N\cdot m)$	$T_N/(N\cdot m)$	$n_N/(r\cdot min^{-1})$	$n_M/(r\cdot min^{-1})$	$n_{\max}/(r\cdot min^{-1})$	$G/N$	$C_D$	$A/m^2$	$R/mm$
99	372	315.1	3 000	1 300	3 450	91 238	0.9	4.383	485
$\delta_1$	$\delta_2$	$i_0$	$i_k$ 一档	$i_k$ 二档	$i_k$ 三档	$i_k$ 四档	$i_k$ 五档	$i_k$ 六档	$i_k$ 倒挡
0.04	0.045	5.897	7.64	4.834	2.856	1.895	1.377	1.000	7.107

(2) 驶入纵坡的速度.可以采用相应于设计车速的平均运行车速作为车辆驶入坡段的速度.由于不同车辆在行驶过程中可能采用不同车速,通常用车辆在道路上的实际行驶速度,见表2.

表2 实际行驶速度与最低容许速度表  
Tab.2 Operating speed and the lowest per mitted speed

设计速度 $/(km\cdot h^{-1})$	实际行驶速度 $/(km\cdot h^{-1})$	最低容许速度 $/(km\cdot h^{-1})$
120	80	60
100	75	55
80	75	50
60	60	40
40	40	25
30	30	20
20	20	15

则对尾随车辆造成不合理的影响.这里将最低容许速度作为坡顶速度,见表2.

2.2 上坡坡长限制值得求解

汽车在坡度为 $i$ 的坡道上进行动力上坡时,如求某一排挡下所能克服的最大坡度与坡长,则驶入速度应是该排挡下最大速度 $u_{\max}$ ,驶出速度为该排挡的临界速度 $u_k$ .如果要求汽车克服更大的坡长和坡度,则汽车在坡道上行驶时须及时换较低排挡,以使车辆获得较大的动力来克服坡度阻力.现以最不利的情況考虑,即汽车在坡道上逆风行驶,根据式(3),得

$$D=\frac{U\gamma\eta_f}{rG}\left[T_{\max}-\frac{T_{\max}-T_N}{(n_N-n_M)^2}\left(n_M-\frac{u\gamma}{0.377r}\right)^2\right]-\frac{C_D\cdot A(u+u_w)^2}{21.15G}\tag{5}$$

式中: $u_w$  为风速.此时, $D$  为  $u$  的二次函数

$$D=P\cdot u^2+Q'\cdot u+W' \tag{6}$$

式中:

$$P=-\frac{1}{G}\left[\frac{7.036U\gamma^3\eta(T_{\max}-T_N)}{r^3(n_N-n_M)^2}+\frac{C_D A}{21.15}\right],$$
$$Q'=\frac{1}{G}\left[\frac{5.305U\gamma^2\eta n_M}{r^2(n_N-n_M)^2}(T_{\max}-T_N)-\frac{C_D A u_w}{10.575}\right],$$
$$W'=\frac{U\gamma\eta}{rG}\left[T_{\max}-\frac{T_{\max}-T_N}{(n_N-n_M)^{2n_M}}\right]-\frac{C_D A u_w^2}{21.15G}.$$

由 $ds=udt$ , 得

$$ds=\frac{u}{a}du \quad (a\neq 0) \tag{7}$$

设初速度  $u_1$ , 终速度  $u_2$ , 对上式积分, 并将车速  $u$  的单位由  $m/s$  化成  $km/h$ , 得

$$s=\frac{1}{12.96}\int_{u_1}^{u_2}\frac{u}{a}du \tag{8}$$

由式(4), 得

$$s=\frac{\delta}{12.96g}\int_{u_1}^{u_2}\frac{udu}{Pu^2+Q'u(W'-\psi)} \tag{9}$$

式中: $\psi=(f\pm 1)\lambda$ , 称为道路阻力系数. 式(6) 利用 MATLAB 6.0 编程计算可以得出在不同坡度、不同海拔高度、不同实载率下的上坡方向的最大坡长限制值.

2.3 下坡坡长限制值的求解

汽车在坡度为  $i$  的坡道上下坡行驶时, 车辆受到发动机惯性制动力( $F_i$ )、空气阻力( $F_w$ )、滚动阻力( $F_f$ )、坡度阻力( $F_i$ )、惯性阻力( $F_j$ )作用, 其受力平衡方程为

$$F_i=F_w+F_f-F_i+F_j=\frac{C_D A(u-u_w)^2}{21.15}+G(f-i)+\frac{\delta G}{g}\cdot\frac{du}{dt},$$

即

$$-(11.25+\frac{i\delta_k u S'}{10.94r})\cdot\frac{V_H i \delta_k}{r\eta}=\frac{C_D A(u-u_w)^2}{21.15}+G(f-i)+\frac{\delta G}{g}\cdot\frac{du}{dt} \tag{10}$$

式中: $S'$  为活塞的行程; $V_H$  为车辆的排气量; $g$  为重力加速度.

由式(1) 可得车辆等速行驶, 发动机做惯性制动的运动方程:

$$F_i=F_w+F_f-F_i+F_j \tag{11}$$

则有

$$i_1=\frac{F_w-F_i}{G}+f \tag{12}$$

由式(12) 可得车辆下行(实载率为 100%) 的理想最大纵坡, 车辆在小于或等于下行理想最大纵坡

的坡道上下坡行驶时, 其坡底速度将小于等于驶入纵坡路段的速度, 所以当纵坡小于等于理想最大纵坡时不限制坡长.

设空气阻力、发动机惯性阻力、车轮阻力以车辆的初速度( $u_1$ ) 计算, 并在速度变化过程中保持不变(偏于安全), 以车辆下行理想最大纵坡基础上的附加坡度力作为车辆动力, 则车辆从初速度  $u_1$  到  $u_2$  的行程为<sup>[7]</sup>

$$S=\frac{u_2^2-u_1^2}{25.92\frac{g}{\delta}(i-i_1)} \tag{13}$$

式中: $i$  为计算坡长限制的最大纵坡; $i_1$  为理想最大纵坡; $S$  为坡长限制值,  $m$ .

计算车辆下行的坡长限制, 关键是如何确定初速度  $u_1$  与终速度  $u_2$ .  $u_1$  取运行车速, 详见表 2. 终速度的取值方法如下: 设计速度  $\geq 80 km/h$ , 取车辆的最高行驶速度  $90 km/h$ ; 设计速度  $\leq 60 km/h$ , 在六档(最高档) 行驶时, 取车辆的最高行驶速度  $90 km/h$ ; 在其他档位行驶时, 取相应排挡的最高行驶速度.

由式(12)、式(13), 可计算得出在不同坡度、不同实载率下的下坡方向的最大坡长限制值. 如果设计路段是整体式, 则取上下坡方向相应坡度下较小的值(即取最不利情况下的坡长值) 作为道路最大坡长限制值见表 3.

表 3 整体式断面坡长限制值										
Tab. 3 The maximal grade length limitation m										
设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	纵坡坡度/%									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
120	—	1 648	735	492						
100	—	—	992	594	327					
80	—	—	—	807	522	341				
60	—	—	—	924	579	369				
40	—	—	—	—	1 389	487	295	212		
30	—	—	—	—	1 086	542	361	271	216	
20	—	—	—	—	—	971	353	216	156	

2.4 路段试验

为验证分析的正确性, 在秦岭山区 5km 二级公路上, 选了三段试验段, 进行了上、下坡试验, 试验车型: 亚星 JS 6820C 32D1; 最高速度: 110 km/h; 负载率: 100%, 试验数据如表 4 所示.

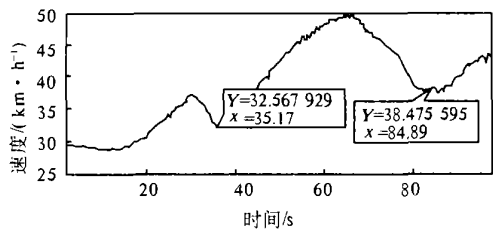
试验结果见图 1、图 2. 由表 3 可知, 当纵坡度

为5%时,设计速度为40km/h 时,不限坡长,而由图 1、图 2 可见,汽车在路段 3 上坡行驶时,速度总体呈增长趋势;下坡行驶时,没有踩刹车的情况下驶出速度约 58km/h,远没有达到最高行驶速度.所以,将其纵坡限制值放大到 1 000m 完全是可行的,同样可得到其它情况下试验结果和理论分析具有相同的变化规律.

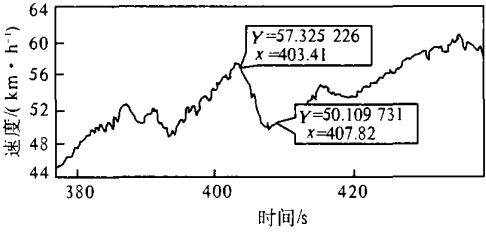
表 4 试验数据

Tab .4 Experimental data

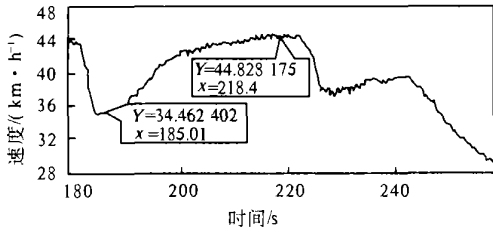
路段	桩号	坡度 /%	坡长 /m	海拔高度 /m
1	K 0+060~K 0+860	7.0	800	1 338.595
2	K 2+340~K 3+140	6.0	800	1 284.130
3	K 3+580~K 4+580	5.0	1 000	1 228.710



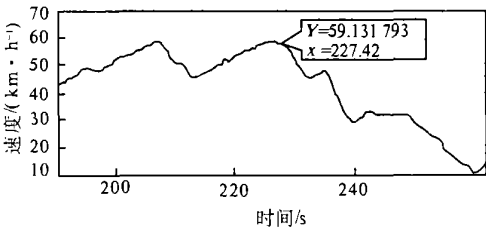
(a) i=5%



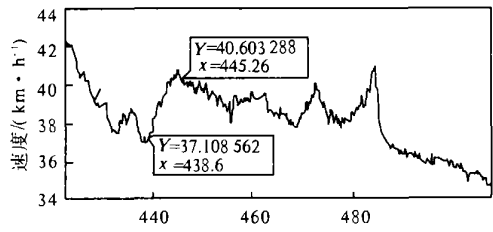
(a) i=5%



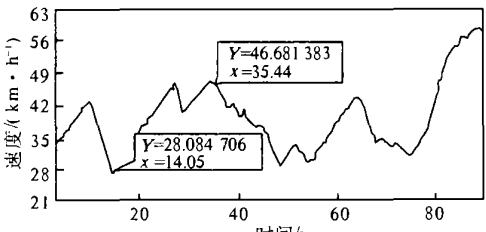
(b) i=6%



(b) i=6%



(c) i=7%



(c) i=7%

图 1 速度—时间关系图(上坡方向)

图 2 速度—时间关系图(下坡方向)

Fig .1 Relationship between speed and time (upgrade)

Fig .2 Relationship between speed and time (downgrade)

表 5 “标准”中关于最大坡长限制及修改建议值

Tab .5 The maximal grade line limitation in Technical Standard of Highway Engineering and proposed value

设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	纵坡坡度/%							
	3	4	5	6	7	8	9	10
120	90Q 1 100)	700						
100	1 00Q 1 200)	80Q 900)	600					
80	1 10Q —)	90Q 1 100)	70Q 800)	500				
60	1 20Q —)	1 00Q 1 200)	80Q 900)	600				
40	—	1 10Q —)	90Q 1 000)	70Q 800)	500	300		
30	—	1 10Q —)	90Q 1 000)	70Q 800)	500	300	200	
20	—	1 20Q —)	1 00Q 1 100)	80Q 900)	60Q 700)	400	30Q 200)	20Q 150)

2.5 坡长限制分析

通过计算、道路试验分析可以得出这样的结论:现行标准规定的坡长限制值确实偏小,这对于路线方案、路线布设、工程数量等都有较大的影响,将导致山区公路的工程数量偏大、投资偏高、施工难度加大.建议适当放宽“标准”的纵坡坡长的限制,调整后的公路纵坡长度限制建议如表 5 所示(括号内为修改建议值).

3 结束语

山区公路路线设计的重点是纵断面设计,在纵断面线形设计中通常使用两项控制参数:容许最大纵坡和最大容许坡长.设计人员在设计过程中掌握这两项指标的尺度和准则是全国泛用的行业标准和规范.势必会出现由于“标准”对最大纵坡和坡长限制做出的统一要求,导致工程数量偏大、路基边坡过高以及危害严重等现象.本文从运行车速的角度,以车一路联合设计为主导思想,探讨了山区公路最大坡长限制问题,进而给出了各

级公路在不同行驶条件下的上、下坡最大坡长限制值的具体计算公式以及整体式断面最大坡长限制的修改建议值,可供公路设计人员及标准修订参考.

参考文献:

[ 1 ] 陈胜营,汪亚干,张剑飞.公路设计指南[M].北京:人民交通出版社,2000.  
[ 2 ] 张乃苍,张 朴.公路路线纵坡设计问题的研讨[J].西安公路学院学报,1990,10( 3 ):9~20.  
[ 3 ] JTGB 01—2003,公路工程技术标准[S].  
[ 4 ] 张雨化.道路勘测设计[M].北京:人民交通出版社,1997.  
[ 5 ] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2000.  
[ 6 ] 晏克非.汽车行驶基本原理与性能[M].北京:人民交通出版社,1997.  
[ 7 ] 石飞荣,杨少伟.高速公路车辆下行最大纵坡及坡长限制分析[J].交通运输工程学报,2001,1( 1 ):68~73.

Analysis of the Maximal Grade Length Limitation for Separate Section of Mountain Highway

MU Hui , YANG Shao —wei

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education , Chang ’an University , Xi ’an 710064, China)

**Abstract :** According to the operational theories of vehicle , taking truck , Jiefang CA141, as standard car , with analysis of vehicle tractive performance of automobile and motive equation of vehicle in the road this paper discusses the determination of the maximal grade line limit for mountain highways after adequately considering such factors as air resistance acting on car , elevation and vehicle load , and finally puts forward the maximal grade line limitation in current Technical Standard of Highway Engineering should be properly enlarged based on the result of the analysis , the paper at the same time offers designers the proposed limitation of the maximal grade line in mountain highway for designers ’ use the correctness of which has been proved through tests .

**Key words :** highway ; separate section ; grade length limitation ; vehicle tractive performance ; operating speed ; profile design