

文章编号:1671-8879(2007)02-0026-04

# 公路弯坡路段线形设计

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:** 根据动力学原理,对汽车在弯坡路段上的运行状态及行车安全性进行了分析。认为弯坡路段之所以成为车辆运行安全隐患的原因是由于设计速度与车辆实际运行速度不协调造成的,在弯坡路段的线形组合设计中应根据车辆的实际运行速度选用技术指标。利用 Matlab 绘制出在不同设计速度下,坡长、坡度与速度的关系图及“速度与半径的关系图”,为设计公路在弯坡路段的线形组合中合理选取技术指标提供了依据。

**关键词:** 道路工程; 公路; 弯坡路段; 线形设计; 汽车行驶特性; 线形组合

**中图分类号:** U412.3      **文献标志码:** A

## Alignment design of curved section of highway

MU Hui, YANG Shao-wei

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

**Abstract:** The vehicle's running state and running safety on curved section of highway are analyzed by dynamics principle. It is pointed out that the accidents at the curved section of highway is caused by the alignment design. The design velocity at the curved section does not cover the vehicle running velocities, the technical parameters for alignment design should be coordinated with the vehicle's actual running velocities. The figures of the lengthe, degree of grade line with velocities, and the figures of velocities with the radius of horizontal curves under different design velocities are presented to provide a basis for selecting technical parameters in alignment design. 3 tabs, 2 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; highway; curved section; alignment design; vehicle's running state; alignment combination

## 0 引言

所谓“弯坡路段”,本文并不是指单纯的弯道路段或坡道路段,而是指“弯”和“坡”结合在一起,尤指“急弯”衔接在“长陡坡”底部的平纵组合路段。弯坡路段是“危险路段”,其线形设计质量对行车安全至关重要。

要。现行《公路工程技术标准》和《公路路线设计规范》<sup>[1-2]</sup>对平、纵、横线形指标都有明确具体的规定,设计时易于遵循。但文献<sup>[1-2]</sup>对公路弯坡路段的线形组合设计方面的要求则只是一些文字上的描述,设计时难以准确地掌握。例如,文献<sup>[1]</sup><sup>10-15</sup>规定陡坡坡底不得与小半径平曲线衔接,但多大、多长的坡度是“长

收稿日期:2005-12-25

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200331881227)

作者简介:慕 慧(1976-),女,陕西神木人,讲师,博士研究生,E-mail:muhuisu@163.com。

陡坡”,多小的半径是“小半径平曲线”,设计人员难以做出判断,往往凭经验和想象做出选择和决定,从而导致不良后果<sup>[3-6]</sup>。为此,本文根据行车动力学的要求,提出弯坡路段的线形组合设计指标量化的计算方法,进而得出不同地形条件下弯坡路段的线形组合设计中平曲线半径、坡度值或坡长的建议值<sup>[7-10]</sup>。

## 1 汽车行驶特性

### 1.1 汽车行驶的动力特性

汽车在道路上行驶,必须同时具备两个条件:第一,汽车牵引力必须平衡于汽车的行驶阻力;第二,牵引力不能大于轮胎与路面之间的附着力,即汽车行驶必须同时满足以下两个关系式

$$\lambda D = f + i + \frac{\delta}{g} a \quad (1)$$

$$T \leq \varphi G_k \quad (2)$$

式中: $D$ 为汽车动力因数; $\lambda$ 为“海拔-功率-总质量”修正系数; $f$ 为滚动阻力系数; $i$ 为道路纵坡度; $\delta$ 为惯性力系数; $g$ 为重力加速度; $a$ 为汽车行驶加速度; $T$ 为牵引力; $\varphi$ 为轮胎与路面间附着系数; $G_k$ 为驱动轮荷载。

### 1.2 车辆下行运动方程式

下行车辆受到发动机惯性制动力  $F$ 、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

$$i_k F = F_w + F_f - F_i + F_j = \frac{C_D A (v - v_w)^2}{21.15} + G(f - i) + \frac{\delta G}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$\text{即 } - (11.25 + \frac{i_0 i_k v S'}{10.94 r}) \frac{V_H i_0 i_k}{r \eta_T} = \frac{C_D A (v - v_w)^2}{21.15} + G(f - i) + \frac{\delta G}{g} \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

式中: $i_k$ 为变速器的传动比; $i_0$ 为主减速器的传动比; $S'$ 为活塞的行程(m); $V_H$ 为车辆的排气量; $r$ 为车轮工作半径; $\eta_T$ 为传动系的机械效率; $C_D$ 为空气阻力系数; $A$ 为汽车迎风面积; $v$ 为行车速度; $v_w$ 为风速; $G$ 为汽车重力。

### 1.3 汽车行驶的稳定特性

汽车在行驶过程中,随着运动状态的改变,汽车的受力情况亦将发生相应的变化。当这种变化达到某一程度时,将引起汽车的纵向或横向失稳,从而导致纵向或横向倾覆、倒溜或侧滑现象的发生。为了保证汽车行驶的稳定,道路设计必须满足以下条件

$$i < i_\varphi = \frac{G_k}{G} \varphi \quad (4)$$

$$R \geq R_{\min} = \frac{v^2}{127(\varphi_h + i_h)}$$

$$\text{或 } v \leq v_{\max} = \sqrt{127 R (\varphi_h + i_h)} \quad (5)$$

$$i \leq i_{\max} - \frac{v^2}{127 R} i_h \quad (6)$$

式中: $i_\varphi$ 为驱动轮不发生滑移的临界纵坡角度; $R$ 为弯道曲线半径; $\varphi_h$ 为横向附着系数; $i_h$ 为横向超高坡度; $i_{\max}$ 为最大纵坡度; $R_{\min}$ 为弯道曲线半径最小值; $v_{\max}$ 为行车速度最大值。

## 2 弯坡路段线形设计

公路的线形组合是否合理,直接影响公路的运营效率和行车安全。对陡坡长直线和小半径平曲线的组合,当汽车从坡顶驶下时,由于本身的重力和动力作用,汽车行驶是一个加速过程。若公路线形突然出现小半径曲线,汽车就会因减速不及而造成事故。可见,为了保证弯坡路段的行车安全,汽车到达坡底进入弯道的车速  $v_d$  应小于弯道的最大容许车速,即  $v_d \leq v_{\max}$ ,或平曲线的半径应大于该速度下的一般最小平曲线半径,即

$$R \geq R_{\min} = \frac{v_d^2}{127(\mu + i_{h,\max})} \quad (7)$$

式中: $\mu$ 为横向力系数,设计横向力系数为 0.10~0.17,占极限横向磨阻系数的比例较小,安全度较高,基本上可以避免横向滑移的危险,确定一般圆曲线最小半径的横向力系数为 0.05~0.06; $i_{h,\max}$ 为最大超高值,文献<sup>[1]</sup><sup>67</sup>规定超高值变化范围为 6%~10%,计算圆曲线最小半径时,分别用 6%、8%和 10%的超高值代入计算; $v_d$ 为汽车到达坡底进入弯道的速度。

根据计算要求,需要知道某一坡度及坡长下汽车驶入平曲线的实际运行速度,然后根据该速度选取相应的平曲线半径。

### 2.1 理想最大纵坡

理想最大纵坡  $i_1$  是指设计车辆(载货车)在油门全开的情况下,持续以初速度  $v_1$  等速行驶所能克服的坡度。则由式(1)可得

$$i_1 = \lambda D_1 - f \quad (8)$$

这里以解放 CA141 载货车作为代表车型(表 1),由式(8)可计算出各行车(实载率为 100%)速度下的理想最大纵坡(表 2)。车辆在小于或等于理想最大纵坡上行驶时,其在坡底的速度将小于或等于驶入纵坡路段的速度,则与其相接的平曲线半径大于驶入速度所对应的平曲线半径,即可保证行车的安全。

表1 解放CA141原始计算数据

|         |              |                       |                   |                           |                           |                               |       |
|---------|--------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------|
| $V_H/L$ | $N_{max}/kW$ | $T_{max}/(N \cdot m)$ | $T_N/(N \cdot m)$ | $n_N/(r \cdot \min^{-1})$ | $n_M/(r \cdot \min^{-1})$ | $n_{max}/(r \cdot \min^{-1})$ |       |
| 5.56    | 99           | 372                   | 315.1             | 3000                      | 1300                      | 3450                          |       |
| $G/N$   | $C_D$        | $A/m^2$               | $R/m$             | $S'/m$                    | $\delta_1$                | $\delta_2$                    | $i_0$ |
| 91238   | 0.9          | 4.383                 | 485               | 0.1016                    | 0.04                      | 0.045                         | 5.897 |

变速器传动比  $i_k$

|      |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1档   | 2档    | 3档    | 4档    | 5档    | 6档    | 倒档    |
| 7.64 | 4.834 | 2.856 | 1.895 | 1.377 | 1.000 | 7.107 |

表中: $N_{max}$ 为发动机最大功率; $T_{max}$ 为最大扭矩; $T_N$ 为最大功率对应的扭矩; $n_N$ 为最大功率对应的转速; $n_M$ 为最大扭矩对应的转速; $n_{max}$ 为发动机最高转速; $\delta_1$ 为车轮惯性系数; $\delta_2$ 为发动机飞轮惯性影响系数。

表2 理想最大纵坡

|                              |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 计算行车速度/( $km \cdot h^{-1}$ ) | 120 | 100 | 80  | 60  | 40  | 30  | 20  |
| 理想最大纵坡/%                     | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 1.2 | 2.7 | 2.9 | 3.0 |

### 2.2 弯坡路段线形设计

设空气阻力、发动机惯性阻力、车轮阻力以车辆的初速度  $v_1$  计算,在速度变化过程中保持不变(出于安全考虑),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,则由式(3)可得车辆在坡度为  $i$  的坡道上行驶的坡长、坡度与速度的关系式为<sup>[3]</sup>

$$s = \frac{v_2^2 - v_1^2}{22.92g(i - i_1)/\delta} \quad (9)$$

式中: $v_1$ 为车辆初速度(km/h),采用路段上的实际运行速度,其值见表3; $v_2$ 为车辆的终速度(km/h)。

表3 实际行驶速度

|                              |     |     |    |    |    |    |    |
|------------------------------|-----|-----|----|----|----|----|----|
| 设计速度/( $km \cdot h^{-1}$ )   | 120 | 100 | 80 | 60 | 40 | 30 | 20 |
| 实际行驶速度/( $km \cdot h^{-1}$ ) | 80  | 75  | 65 | 50 | 35 | 30 | 20 |

据式(7)、式(9),用Matlab可绘出“速度与平曲线半径”、“坡长、坡度与速度”的关系图,如图1、图2所示。

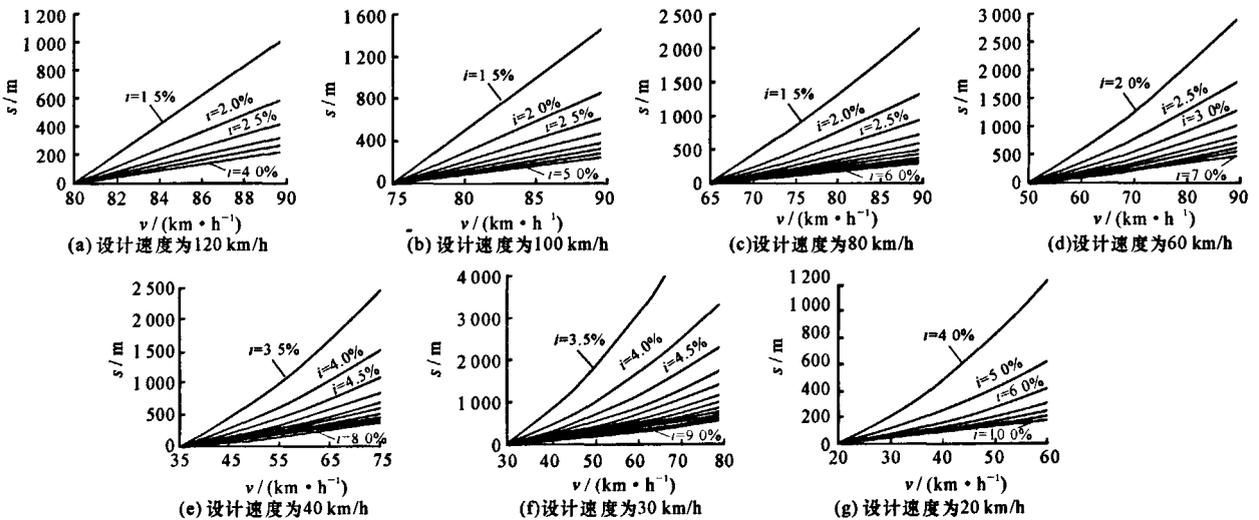


图1 坡长  $s$ 、坡度  $i$  与速度  $v$  的关系

在公路选线和线形设计过程中,当纵坡坡度和坡长受到地形等实地条件限制时,需要选定  $i$  和  $s$ ,可以在对应的“坡长、坡度与速度的关系图”(图1)上找出对应的速度  $v$ ,然后根据  $v$  在“速度与平曲线半径的关系图”(图2)上找出对应的最小平曲线半径  $R_{min}$ ,则只要设计半径  $R > R_{min}$ ,就可以保证行车的安全。当弯道半径和纵坡坡度(或坡长)受到限制时,需选定  $R$  和  $i$ (或坡长  $s$ ),在“速度与平曲线半径的关系图”上根据  $R$  选取  $v$ ,然后根据  $v$  在“坡长、坡度与速度的关系图”上找出对应的最大

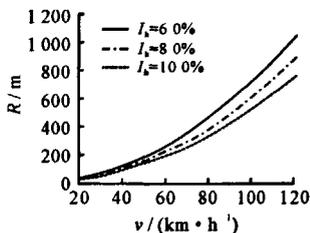


图2 速度  $v$  与平曲线半径  $R$  的关系

坡长  $s_{max}$ (或最大纵坡  $i_{max}$ ),则设计中选  $s < s_{max}$ (或  $i < i_{max}$ ),即可以保证行车安全。设计时应注意,所有线形指标的采用均应符合文献<sup>[1]</sup><sup>14-15</sup>和文献<sup>[2]</sup><sup>20</sup>的相应规定。

### 3 结语

公路线形设计中,弯坡路段是交通的危险路段,而文献<sup>[1-2]</sup>对此却只作了定性的说明,并没有定量的规定,这使设计人员在设计过程中很难把握。本文根据汽车的行驶特性,对陡坡长直线与小半径平曲线组合的线形,作了具体的分析,运用车辆的实际运行速度进行验算,推导出相应的计算公式,绘制了各指标间的关系图,可供设计人员在公路弯坡路段线形设计中参考。

## 参考文献:

## References:

- [1] JTJ B01-2003, 公路工程技术标准[S].
- [2] JTJ 011-94, 公路路线设计规范[S].
- [3] 石飞荣, 杨少伟. 山区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(2): 68-73.  
SHI Fei-rong, YANG Shao-wei. The maximum longitudinal slope and its length of mountain-expressway under the condition of vehicle's driving down[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(2): 68-73.
- [4] 毛大德. 从汽车行驶特性分析公路弯坡路段线形设计[J]. 公路与汽运, 2001, 4(2): 28-30.  
MAO Da-de. Study on alignment design of road section of curved ramp according to vehicle operational characteristics[J]. Highways & Automotive Applications, 2001, 4(2): 28-30.
- [5] 杨少伟, 石飞荣, 潘兵宏, 等. 可能速度及其在公路线形设计中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(3): 1-4.  
YANG Shao-wei, SHI Fei-rong, PAN Bing-hong, et al. Application of possible velocity in design for highway alignment[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(3): 1-4.
- [6] 颜 强, 吴国雄, 孙家驷, 等. 平面线形组合与衔接的定量分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 30-32.  
YAN Qiang, WU Guo-xiong, SUN Jia-si, et al. Quantitative analysis of the combination and joint of plane alignment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(3): 30-32.
- [7] 刘道宣. 线形组合设计对高速公路运营安全的影响[J]. 广西交通科技, 2003, 28(1): 57-59.  
LIU Dao-xuan. The influence of linear combination design to the operational safety of expresshighways[J]. Guangxi Communication Science and Technology, 2003, 28(1): 57-59.
- [8] 吴德华, 王选仓, 季求知, 等. 陕西公路平纵线形指标[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(2): 46-49.  
WU De-hua, WANG Xuan-cang, JI Qiu-zhi, et al. Plat and profile linear index of Shaanxi road[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(2): 46-49.
- [9] 张雨化. 道路勘测设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [10] 陈胜营. 公路设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- WANG Xue-xin. Experimental investigation on performances of emulsified asphalt-cement composite cementitious material [J]. Municipal Engineering Technology, 2005, 22(3): 394-396.
- [3] 李 江, 陈忠达, 封晨辉. 水泥-乳化沥青混合料配合比设计试验方法研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(9): 31-33.  
LI Jiang, CHEN Zhong-da, FENG Chen-hui. Study of test method and cement-emulsified asphalt mixture ratio[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(9): 31-33.
- [4] 秦永春, 徐 剑, 黄颂昌, 等. 乳化沥青试验方法及相关内容的研究[J]. 石油沥青, 2004, 18(6): 27-31.  
QIN Yong-chun, XU Jian, HUANG Song-chang, et al. Research on emulsified asphalt test methods and concerned contents[J]. Petroleum Asphalt, 2004, 18(6): 27-31.
- [5] 陈拴发, 郑木莲, 杨 斌, 等. 破裂水泥混凝土路面板沥青加铺层温度应力影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 25-30.  
CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian, YANG Bin, et al. Thermal stress influence factors of asphalt overlay on cement concrete pavement cracking slab[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 25-30.
- [6] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 双层水泥混凝土路面板的温度应力[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 10-12.  
TAN Zhi-ming, YAO Zu-kang, LIU Bo-ying. Thermal stress analysis of two-layered concrete slabs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2): 10-12.
- [7] 郭朝华. 乳化沥青水泥混凝土(EACC)面层材料研究[D]. 西安: 长安大学, 1999.
- [8] 王东阳, 陈淑贤. 流态混凝土高效减水剂 CAN 与水泥适应性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(3): 26-29.  
WANG Dong-yang, CHEN Shu-xian. Additive CAN of liquied concrete and adaptability of cement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 26-29.
- [9] JTJ 052-2000, 公路沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [10] JTG D40-2002, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].

(上接第 15 页)