

文章编号: 0451-0712(2005)01-0024-06

中图分类号: U412.3

文献标识码: B

基于运行安全的山区高速公路 路线设计及实例

余景顺¹, 林国涛¹, 苏永和²

(1. 中交公路规划设计院 北京市 100010; 2. 山东东泰交通规划设计院 淄博市 255000)

摘 要: 从运行速度的设计思想出发, 探讨了山区高速公路平曲线半径及超高、连续纵坡、视距、隧道线形等对车辆运行安全的影响。通过典型实例, 介绍了山区高速公路路线设计基本参数的确立、方案选定及采取的运行安全措施。

关键词: 高速公路; 运行速度; 路线设计; 安全

随着国民经济的迅速增长, 我国公路建设进入了良好的发展时期。高速公路建设只用十余年的时间就走过了西方发达国家几十年的发展历程, 成绩斐然。但是, 与西方发达国家一样, 我国的道路交通安全形势也十分严峻。近年来, 我国道路交通事故死亡的绝对数已高居世界第一, 并以较高的比例增长。根据预测, 我国道路交通事故将在来来十年达到高峰。交通部在《2001 年~2010 年公路水路交通行业政策及产业发展序列目录》中明确指出, 在新建重大公路项目的设计阶段, 增加道路安全审计环节, 提高道路的安全设计水平。2004 年 9 月, 交通部又发布了《公路项目安全性评价指南》, 这对我国高等级公路的安全性评价工作的开展, 以及进一步保障和提高我国公路的行车安全将起到积极作用。

传统的公路路线设计——设计速度法, 是在选定的设计速度下, 结合地形和工程规模, 在规定的平、纵指标范围内选定路线设计参数, 并在条件许可时, 尽量采用高指标, 以获得公路的最高运输性能。这一设计思想无疑将导致实际车辆的运行速度与线形指标相脱离。在平原区, 因纵坡等因素变化小, 路线设计参数一般主要受平面地物控制, 其设计速度与运行速度差异较小。但在山区, 由于工程规模与地形条件密切相关, 桥隧结构物占路线比例较大, 平纵面指标明显变化, 路线设计中, 某些参数选取不当, 或参数的最小值同时出现时, 往往形成事故黑点, 对行车安全构成威胁。因此, 基于运行安全的高速公路路线设计, 是在研究车辆实际运行速度的前提下, 结

合地形变化优化线形, 以满足安全、环保要求, 实现可持续发展的战略。

基于运行安全, 本文从运行速度的设计思想出发, 探讨了山区高速公路平曲线半径及超高、连续纵坡、视距、隧道线形等对车辆运行安全的影响。通过典型实例, 介绍了山区高速公路路线设计基本参数的确立、方案选定及采取的运行安全措施。

1 运行速度与设计速度

国内外路线设计实践及研究表明, 根据设计速度法, 采用符合规范要求的单项独立的路线参数构成的公路几何线形, 不能有效地保证汽车行驶的安全性。汽车在公路上行驶时, 驾驶者一般是依据道路的行车条件(线形几何条件、路面状况、气候条件及交通密度)及车辆本身的性能来确定自己的车速。只要条件允许, 驾驶者总是倾向于采用较高的速度行驶, 因此采用运行速度法设计比传统的设计速度法有很明显的安全效益, 因而正得到日益广泛的应用。澳大利亚、法国、德国、英国等国家采用运行速度法设计, 我国则一直沿用设计速度法。

设计速度 V : 在公路设计要素均起控制作用的良好条件下, 公路特定路段上能保持的最高安全速度。它是一个定速, 通常作为一个路段的基础参数的最低设计标准。

运行速度 V_{85} : 在特定路段长度上测定的第 85 个百分点上的车速。即在干净、潮湿条件下, 85% 的驾驶员行车不会超过的速度。运行速度 V_{85} 的确定,

——万方数据——

收稿日期: 2005-12-08

一般可由调查点绘制的运行速度累计分布曲线求得。

运行速度法的设计流程是在前期确定的初始平纵面线形的基础上,通过运行速度预测模型推算各路段的运行速度,并以此为标准检验和修正初期平纵几何设计,最终确定曲线半径、超高、视距等设计参数。

《公路工程技术标准》(JTGB01—2003)中,已引入了运行速度的概念,并建议在速度变化路段、爬坡车道、超高等受限制路段进行运行速度检验。路线线形设计应使运行速度 V_{85} 大于设计速度 V ,且运行速度 V_{85} 与设计速度 V 之差小于20 km/h;相邻设计路段的线形指标应逐渐变化,当速度梯度小于10 km/h/100 m时,认为是连续的。当不符合上述条件时,应调整平纵面线形。

我国《公路项目安全性评价指南》中,推荐了两种运行速度计算方法。方法一采用交通部公路科学研究所“公路运行速度研究”课题成果,方法二采用澳大利亚运行速度计算法。表1、2列出了直线与大半径($R>1\,000\text{ m}$)、小半径($R<1\,000\text{ m}$)曲线路段的运行速度。

表 1 直线与大半径($R>1\,000\text{ m}$)路段运行速度 km/h

设计速度	60	80	100	120
小客车运行速度	80	95	110	120
大货车运行速度	55(70)	65(85)	75(100)	75(100)

注:小客车运行速度两种方法结果一致,大货车运行速度括号内为澳大利亚小客车运行速度下对应的大货车的运行速度。

表 2 小半径曲线($R<1\,000\text{ m}$)路段运行速度

曲线半径/m	小客车运行速度/(km/h)	大货车运行速度/(km/h)
250~300	72(88)	46
300~350	76(92)	47
350~400	78(97)	48
400~450	80(102)	52
450~500	83(106)	53
500~550	87(107)	54
550~600	90(109)	55
600~700	92(110)	56

注:小客车运行速度括号内为澳大利亚小客车运行速度,大货车运行速度两种方法结果一致。

由表1、2可知:
通常情况下,在较低设计速度($V=60、80\text{ km/h}$)
的路段,小客车以高于设计速度15~20 km/h的速

度运行;在较高设计速度($V=100、120\text{ km/h}$)的路段,小客车的运行速度接近设计速度,而大货车的运行速度则始终低于设计速度15~25 km/h,甚至更低。我国山区高速公路设计速度多采用80、100 km/h时,路线线形的设计应充分考虑这一因素。在同一设计速度路段,当地形困难时,应设法提高路线线形指标;而地形简单时,则需严格限制长直线、大半径平曲线的运用,以约束车辆运行条件,从根本上消除运行速度的突变。

我国大货车的运行速度显著低于设计速度及小客车运行速度,与小客车运行速度相比,最大速度差达35~45 km/h。当交通量增长到一定程度,行车视距不足,超车变得十分困难,由于大小车型的运行速度差异而导致的交通事故明显增加。对于一条确定的山区高速公路的路线线形来说,当大型车比例超过30%,路线设计参数的确定则很难兼顾大小车型的运行条件。因此,对于山区重载交通道路,适当增设爬坡车道、分车道限速行驶可作为改善运行速度差的辅助措施。

2 平曲线半径及超高

2.1 平曲线半径

平曲线半径的选取应在行驶力学上保证汽车行驶的安全、舒适。事故调查资料显示,当平曲线半径 $R<1\,500\text{ m}$ 时,半径越小,事故率越高;当 $R<600\text{ m}$ 时,事故率增加到全路事故率的1.5倍,当 $R<400\text{ m}$ 时,事故率增加到2.0倍。

路线规范中“一般最小”和“极限最小”平曲线半径,是以汽车在曲线上能安全而顺适地行驶为条件确定的,其实质是汽车行驶在曲线部分时,所产生的离心力等横向力不超过轮胎与路面的摩阻力所允许的界限。根据舒适性差异,分别计算出“一般最小”和“极限最小”平曲线半径。

以设计速度 $V=80\text{ km/h}$ 为例,分别计算设计速度和相应的运行速度下,圆曲线半径的“一般最小”和“极限最小”值。见表3。

表 3 设计速度和运行速度下的“一般最小”和“极限最小”圆曲线半径

计算参数	设计速度 $V=80\text{ km/h}$		运行速度 $V=95\text{ km/h}$	
	一般最小	极限最小	一般最小	极限最小
f	0.06	0.13	0.053	0.123
i	0.07	0.08	0.063	0.08
R/m	387(≈400)	240(≈250)	613(≈650)	350

由表 3 可知,当设计速度 $V=80\text{ km/h}$,实际运行速度为 95 km/h ,在相同的行驶舒适程度下,实际需要的一般最小半径为 650 m 。当采用一般最小平曲线半径 $R=400\text{ m}$ 时,取 $i=0.07$,按实际运行速度反算 $f=0.108>0.10$,车辆转弯行驶时已明显感觉有曲线存在,行车的舒适程度和安全性开始降低。

此外,对于“极限最小”圆曲线半径,在考虑实际运行速度的路线设计中,应严格限制使用。即使采用比“极限最小”半径稍大的圆曲线半径,尽管做到了线形指标的逐渐过渡,但很难引起驾驶员的足够注意,行车速度一般不会有大的改变。“极限最小”圆曲线不仅表现出行车不舒适,而且往往因超高与速度不匹配而导致驾驶员操作不当引发事故。

对于大半径平曲线的运用,与地形密切相关。在平原区,一般平曲线 $R>2\ 500\text{ m}$,半径大小对事故率的影响不明显。而对于山区,如果普遍采用 $R=2\ 500\text{ m}\sim 4\ 000\text{ m}$,由于小客车的运行速度对路线纵坡的敏感性较低,其运行速度一般可达 $100\sim 110\text{ km/h}$,因此,适宜的设计速度应为 100 km/h 。对于设计速度为 80 km/h 的高速公路,为有效限制小客车的高速运行,则应限制大半径平曲线的使用。

2.2 超高及加强

在平曲线上设置超高,其目的是形成向心力,以平衡高速行驶车辆的离心力。我国现行公路路线设计规范中,根据设计速度、圆曲线半径及气候条件,最大超高值在一般地区按 8% 、积雪冰冻地区按 6% 分别计算出曲线超高值供实际选用。

下坡与平曲线组合在一起的临时作用,对铰接货车的稳定性造成不利影响。为消除这一影响,应提高陡坡路段的平曲线超高横坡度。在高速公路情况下,当 $i>3\%$ 时,可视为陡坡。

超高加强按下式计算:

$$i=i_0+(P_i+i_0)/6$$

式中: P_i 为纵坡; i_0 为设计速度下查表所得超高。

在不同的设计速度下,应结合车辆的实际运行速度,合理确定超高横坡度。

以设计速度 $V=80\text{ km/h}$ 为例,分别计算设计速度和相应的运行速度 $V_{85}=95\text{ km/h}$ 时, $R=1\ 000\text{ m}$ 的平曲线超高。取最大超高 8% ,设计速度下的超高值为 4% ,而运行速度下的超高值为 6% 。因此,对于以 **小客车为主** 的高速公路,在考虑小客车的实际运行速度的前提下,原则上超高设置应予以加

强 $1\%\sim 2\%$ 。而对于重载交通道路,大货车的运行速度低于设计速度 15 km/h ,按照 $V=65\text{ km/h}$, $i=4\%$ 计算的横向力系数 f 接近 0,而按超高加强后的路拱横坡 $i=6\%$,计算的横向力系数 f 为负,说明大货车在曲线上受到向心加速度的作用,可能发生向曲线内侧滑移并导致翻车。因此,对重载交通道路,应在充分研究运行速度的基础上,慎重选择超高及超高加强。

3 纵坡及连续纵坡

研究表明,高速公路 $i=2.5\%\sim 4\%$ 的坡段,比一般平坦路段事故率高 $10\%\sim 20\%$ 。对于小客车,在 $i=4\%\sim 5\%$ 的坡度上,与在平坦公路上正常行驶速度相比,速度变化不大。而对于货车,根据其爬坡性能的不同,上坡路段的速度可以降低 7% 或更多,在下坡路段速度增加约 5% 。

路线规范中“最大纵坡及坡长”的规定,考虑了经济因素和汽车行驶性能的要求,并以 15 km/h 的速度差作为确定某一给定坡度最大坡长的一般设计准则。其原因是当低于这一速度时,将对后面的车流造成很大的影响,而且当速度变化量大于 15 km/h 时,事故数明显激增。如果设计坡长大于限制长度,尤其是交通量达到或接近通行能力时,或货车比例较高时,应考虑增设爬坡车道专供慢行车辆行驶。

国内外的事故资料都表明,下坡路段的事故发生频率明显高于上坡路段,特别是长大下坡路段。对下坡路段的事故原因进行分析,肇事车辆 60% 以上为大中型货车,一般多发生在下坡方向的坡底路段,且越靠近坡底段,因制动失效而引起的事故越集中。车辆在下坡路段由于连续的刹车制动,造成刹车片发热,磨损严重,导致刹车失灵。而对于长大下坡与小半径平曲线的不利组合情况,往往由于线形条件超出了驾驶员对前方道路情况的预料,形成事故频发点。

对于平均纵坡 4.8% 的长下坡,制动器温度升高接近 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的路程长度约在 5 km 左右,此时克服高差 240 m ;而对于平均纵坡 4% 的长下坡,制动器温度升高接近 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的路程长度约在 $7\sim 8\text{ km}$,此时克服高差 320 m 。因此,对于越岭高速公路的平均纵坡,当相对高差为 $200\sim 500\text{ m}$ 时,不宜大于 4.5% 。

当连续长大下坡路段从设计上无法避免时,应妥善安排缓和坡段和陡坡,并选择合适位置设置避险车道。

4 视距

考虑实际运行速度下的小客车停车视距,从运行安全的角度出发,应在根据设计速度计算的停车视距的基础上适当予以提高。以设计速度 80 km/h 为例,路面潮湿状态下,按行驶速度为 68 km/h、 $f=0.31$ 计算的小客车停车视距为 110 m。若考虑运行速度为 95 km/h,路面潮湿状态的行驶速度按 80 km/h、 $f=0.30$ 计算的停车视距为 140 m,接近设计速度 80 km/h 和 100 km/h 停车视距的中间值。

货车的停车视距比小客车长,是由于:货车的悬挂系统和轮胎是按承重时效率最高的原理设计的,因此货车在空车时制动性能差;货车的轴间荷载分布不均匀,一条轴发生侧滑会导致其余车轴失稳;铰接货车刹车不灵;货车在曲线上行驶时比在直线需要更长的刹车距离。尽管货车驾驶员由于眼睛位置较高能看见相当远处障碍物的垂直面,但这一优势不足以补偿货车不良的制动性能。

澳大利亚设计手册推荐了运行速度下的货车停车视距。

表 4 运行速度下的货车停车视距

运行速度/(km/h)	一般值/m	最小值/m
50	87	80
60	120	111
70	158	148
80	202	190
90	251	238

在设计速度 $V=80、100$ km/h 的高速公路上,我国货车的运行速度通常在 65~75 km/h 之间,其最小停车视距应在 111~190 m 范围。《公路工程技术标准》(JTG B01-2003)条文说明中规定了检验用的货车停车视距分别为 125 m、180 m。由于在一些情况下还满足不了货车停车视距的要求,《公路工程技术标准》(JTG B01-2003)规定:在高速公路、一级公路以及大型车比例高的二、三级公路,应采用货车停车视距对相关路段进行检验。

5 隧道线形

隧道事故率一般为其他路段的 2~3 倍,洞口附近事故率约占隧道事故的 33%。隧道事故以追尾最为典型,撞固定物次之。事故发生的主要原因是由于车辆运行速度高、路面磨光以及隧道内的烟尘导致的隧道内能见度降低。

根据停车视距要求,当设计速度 $V=100$ km/h,视距 $S=160$ m; $V=80$ km/h,视距 $S=110$ m。根据隧道一般横断面布置,计算出在保证隧道内停车视距前提下的隧道最小平曲线半径分别为 800 m、500 m。

为保证隧道内车辆的安全行驶,中短隧道内线形设计时应避免设置 S 型反向曲线;长大隧道必须设置 S 型反向曲线时,其反向曲线间应设置一定的缓和曲线或直线段予以过渡。

凸型竖曲线上的车辆在接近变坡点时,前方的视距较小,通过变坡点后迅速进洞,容易导致隧道洞口的安全事故;在凹型竖曲线底部,司机视线距离路面有一定的高度,由于洞室内设备的遮挡,行车视距影响较大,因而行车速度突然降低,影响洞口安全。隧道路线线形设计应禁止洞口附近长、大下坡与小半径平曲线的不利组合。

在长大隧道的封闭环境下长时间行车,司机容易感到疲劳。如果隧道出口为直线,则司机将过早地发现洞口这个显著目标,其结果将导致司机加速行车。为防止隧道内的高速行驶诱发事故,司机自发现洞口至行驶到洞口的运行时间应控制在 15~20 s,以此作为控制长大隧道平曲线半径的依据。

表 5 隧道行车速度和出口平曲线半径

行车速度/(km/h)	50	60	70	80
出口平曲线半径/m	1 000	1 800	3 000	4 000

一般情况下,长大隧道为安全计,出口平曲线半径 $R<3\,000$ m。

对于长大隧道而言,隧道的通风量一般与隧道纵坡的平方级数成正比,因此从洞内卫生条件分析,长大隧道的纵坡以小为宜,对长度大于 2 km 的隧道,纵坡控制在 2.0%~2.5% 以下为宜。

6 路线设计实例

太原至澳门国家重点公路山西境晋城至济源高速公路经过山西黄土高原东南部,越太行山南端,与河南相连,山地部分一般海拔高度 700~1 150 m,平原海拔高度为 100~200 m,地形高差大,山势陡峭,沟谷发育,重车比例 45%,为典型的山区重载交通道路。全线采用双向四车道高速公路标准,设计速度 80 km/h,路基宽度 24.5 m。设大中桥 4 558 m/12 座,隧道 13 242 m/9 座,桥隧占路线总长 59%。

6.1 运行速度的运用和检验

根据设计速度 $V=80$ km/h,考虑小客车及大货

车的运行速度,结合沿线地形,初步确定平曲线控制指标 R 以 $600\sim 2\,000\text{ m}$ 较为适宜。在初步布设沿线结构物和路线越岭高程后,拟定路线几何参数,运用

车辆速度预估模型(隧道运行速度降低按 $5\sim 10\text{ km/h}$),对重点路段 $K13+800\sim K21+600$,通过绘制运行速度断面图,进行运行速度检验。见图1。

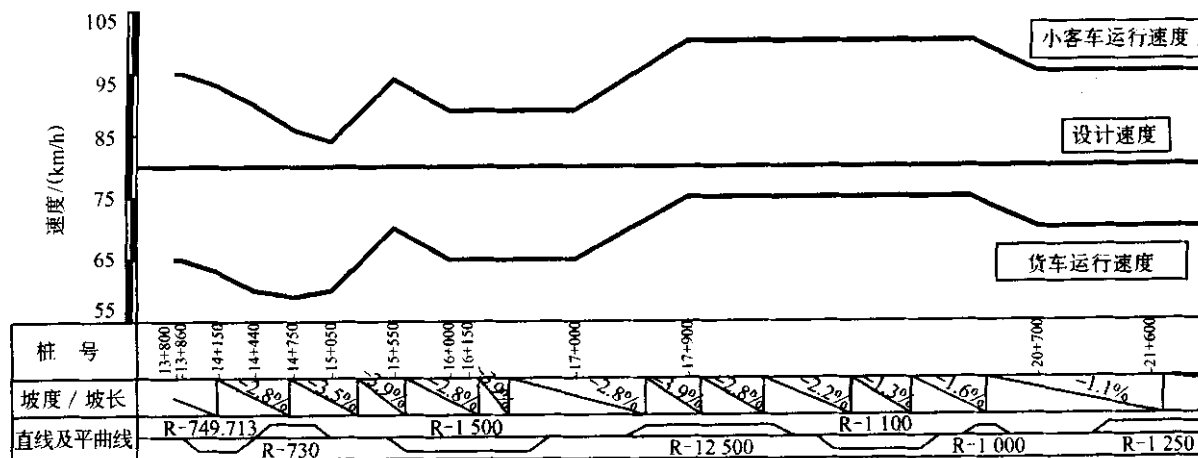


图1 运行速度断面图

由图1,小客车的运行速度变化经历了小半径平曲线路段($R=749.7\text{ m}$ 、 $R=730\text{ m}$)的减速、陡坡路段($i=-3.5\%$ 、 -3.9%)的加速、 $K16\sim K17$ 隧道路段的稳速后,在 $R=1\,250\text{ m}$ 的曲线下坡段再次加速, $K17+900\sim K20+200$ 速度相对稳定。全路段小客车最大运行速度为 100 km/h ,最小运行速度为 84 km/h ,相邻路段速度差小于 $10\text{ km/h}/100\text{ m}$ 。

货车的最大运行速度为 75 km/h ,最小运行速度为 56 km/h ,运行速度呈现与小客车相似的变化规律,但在数值上低于设计速度 $5\sim 24\text{ km/h}$ 。

运行速度检验结果表明,本路段的平纵面设计几何参数的选定满足行车安全要求。

6.2 超高及加强

考虑本项目重车比例较大,在一般路段,大货车的运行速度相对设计速度偏低,如果在保障小客车在弯道上的舒适性而提高超高横坡度,势必给大货车的行车安全构成不利影响。因此,一般路段的超高设计仍按设计速度取定,仅在 $K10+460\sim K10+800$ 、 $K17+485\sim K18+580$ 两个路段的下坡方向,因纵坡较大($i=-3.5\%$ 、 -3.9%),为保障铰接货车在弯道上的刹车稳定性,对超高进行了加强设计,在设计速度对应的超高横坡度的基础上,按提高 1% 取定。

6.3 连续纵坡

在路线方案选定中,K线方案范洼隧道以南路段,地势险峻,路线不可避免地在断崖绝壁上布线,

山岭地面标高为 800 m ,路线左侧仙神河底标高为 $400\sim 250\text{ m}$,相对高差达 400 m 以上。而路线在此段设计高程为 $630\sim 533\text{ m}$,构造物施工极为困难。针对K线方案范洼隧道以南路段平均纵坡较大($3.2\%/7\text{ km}$)、施工条件差、连拱隧道多、环境破坏严重,提出了提前降坡、利用月湖泉特长隧道($4\,780\text{ m}$)越岭的C线方案,将平行于仙神河悬崖断壁布线调整为垂直布线,避免了高填深挖带来的地质灾害,使环境破坏降低到最小程度,同时降低了越岭平均纵坡,确保行车安全。如图2。



图2

本项目 $K14+140\sim K18+500$ 路段内,路线长 $4\,360\text{ m}$,平均纵坡 3.15% ,为预防或避免大型车辆刹车失灵而导致的安全事故,在本路段内设置了2处降温水池和2处避险车道。

6.4 视距检验

对重点路段 $K13+860\sim K15+050$ 的视距,采用了设计速度 $V=80\text{ km/h}$ 分别对小客车、货车进行停

车视距检验;同时,作为对比分析,根据小客车的实际运行速度85~95 km/h、停车视距 $S=140\text{ m}$,对该路段进行了相应的横净距核算。

表 6 K13+800~K15+050 停车视距检验

视距/m	半径/m	计算横净距/m	实际横净距/m	差值/m	备注
110	749.713	2.017	3.375	1.358	小客车、设计速度
	730	2.072	3.125	1.053	
140	749.713	3.268	3.375	0.107	小客车、运行速度
	730	3.356	3.125	-0.231	
125	749.713	2.605	3.375	0.770	货车、设计速度
	730	2.676	3.125	0.449	

根据表6,设计速度 $V=80\text{ km/h}$,在平曲线半径 $R=730\text{ m}$ 的路段,小客车、货车的停车视距满足安全视距要求。当采用小客车运行速度计算的停车视距140 m时,对于 $R=730\text{ m}$ 半径的平曲线,路基横断面布置应予以适当加宽。

6.5 隧道线形

根据沿线隧道的布设情况,结合车辆实际运行速度,对全线隧道的进出口路段的平纵面线形及组合进行检验核查。一般隧道进出口平曲线按 $R=1\ 000\sim2\ 000\text{ m}$ 布设,特长隧道控制 $R<3\ 000\text{ m}$,以限制车辆超速行驶,确保隧道路段行驶安全。

本项目月湖泉至拍盘路段(K21+000~K30+048),由仙神河大桥(墩高170 m的部分预应力矮塔斜拉桥)连接月湖泉及拍盘两座特长隧道构成直线+同向曲线平面线形,其桥梁部分为直线段,两座特长隧道均以连拱形式进洞,然后过渡至小间距和正常分离式隧道形式。经线形优化,对月湖泉特长隧道出口偏角控制为 14° ,隧道进出口附近两同向曲线 $R_1=1\ 700\text{ m}$ 、 $R_2=1\ 300\text{ m}$ 。

7 结语

由于运行速度与车辆实际运行特征的符合性,与设计速度设计法相比,运行速度设计法可以有效地减少由于线形设计脱离实际行车状况而导致的交通安全事故,因此,在适合我国交通运行特征的路线

运行速度设计方法尚未完全建立起来之前,在山区高速公路的路线设计实践中,应充分考虑运行速度,保障路线各项设计指标之间的相容性,对于提高公路行车安全具有重要意义。

(1)在选择路线几何参数之前,应充分研究公路沿线地形、道路行驶车辆构成,并重视不同车型车辆的运行特征,构筑良好的公路路线线形。

(2)参照已有公路运行速度预估模型,推算并绘制沿线运行速度图,对路线各项指标进行符合性和相容性检验,适时调整。

(3)应综合考虑路线线形及沿线构造物、沿线设施、环境条件等因素,比选并优化路线方案。

(4)对重载交通道路的上坡路段,充分考虑爬坡车道的设置和分速行驶;在连续下坡路段,增设降温水池和避险车道,以改善和提高运行安全,减少交通事故的发生。

参考文献:

[1] JTG B01-2003,公路工程技术标准[S].
[2] 中华人民共和国交通部. 公路项目安全性评价指南[S]. 2004.
[3] JTJ 001-94,公路路线设计规范[S].
[4] FHWA. Evaluation of Design Consistency Methods for Two-Lane Rural Highways. 1999.