

文章编号:1001-7372(2009)04-0039-06

公路纵坡设计关键参数研究

庄传仪^{1,2}, 赵一飞¹, 潘兵宏¹, 张 驰¹

(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. 山东交通学院 土木工程系, 山东 济南 250023)

摘要:为了确定用于纵坡设计的主导车型,选择了几段典型纵坡路段进行了实地速度观测,通过分析轻型客车和货车在纵坡坡度 $i > 3\%$ 和 $i \leq 3\%$ 的上坡路段车辆运行特性,由汽车在坡道上的运动方程推导出功率质量比计算模型,并提出了一套汽车功率质量比计算的试验方法。在实地观测数据的基础上,计算出该路段的功率质量比值,由15%位货车功率质量比得出公路纵坡设计主导车型的功率质量比。结果表明:纵坡坡度对轻型客车上坡行驶车速影响不大;小于3%的纵坡坡度对货车上坡行驶的速度影响很小;陡坡对货车车速影响显著,在临近坡顶处,货车处于一种稳定、匀速的行驶状态;试验路段地区高速公路纵坡设计主导车型的功率质量比为 $8.0 \sim 8.33 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$;根据汽车功率质量比计算模型和试验方法,确定不同地区、不同公路等级货车功率质量比,由此可以建立最大纵坡坡度、不同纵坡的最大坡长等几何线形设计参数。

关键词:道路工程;纵坡设计;实测分析;功率质量比;汽车行驶特性;主导车型

中图分类号:U412.3

文献标志码:A

Research on Key Parameter of Highway Longitudinal Grade Design

ZHUANG Chuan-yi^{1,2}, ZHAO Yi-fei¹, PAN Bing-hong¹, ZHANG Chi¹

(1. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Civil Engineering, Shandong

Jiaotong University, Jinan 250023, Shandong, China)

Abstract: In order to determine the representative type of truck, several typical longitudinal grade sections were selected to observe the field speed. Through analyzing the operating characteristics of passenger cars and trucks on upgrades under different longitudinal gradients which are more than 3 percent and 3 percent or less 3 percent separately, the computation model of power-to-weight ratios could be inferred from the equation of motion when a truck moved on upgrades, and a set of experiment approach was proposed to compute power-to-weight ratios. According to the field test data, the power-to-weight ratios of the expressway were got, and the power-to-weight ratio of the representative type of truck was got from the 15 percent of trucks' power-to-weight ratios. Results show that there is little influence of the longitudinal grade on the upgrade speed of passenger cars; there is also little influence of the longitudinal grade on the upgrade speed of truck when the grade is less than 3 percent. There is an obvious influence of the grade on the speed of truck. The truck generally keeps a state of uniform speed near the top of upgrade. The power-to-weight ratios of a representative type of truck are about $8.0 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$ to $8.33 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$.

收稿日期:2008-10-24

基金项目:陕西省交通科技项目(04-09k)

作者简介:庄传仪(1980-),男,山东青州人,长安大学工学博士研究生, E-mail:jcc1717@sina.com。

in the testing expressway. This method can be referred to determine the truck power-to-weight ratio in other regions in order to form the geometry design parameters of the maximal longitudinal gradient and critical length of grade.

Key words: road engineering; longitudinal grade design; field test analysis; power-to-weight ratio; vehicle operating characteristic; representative type of truck

0 引言

近年来,中国高等级公路建设的重心已转向中西部地区,中西部地区地形、地质条件复杂,环境保护工作难度大,纵坡设计成为路线设计的关键。已有的工程建设实践表明,山岭重丘区的公路纵坡设计问题不仅对公路造价影响比较大,有时还会因纵坡设计不够科学而舍弃了其他经济、技术指标都不错的路线设计方案,从而影响到路线方案的合理性。

由于中国公路建设起步较晚,对路线设计的几何参数缺乏深入系统的研究,如纵断面设计时,最大纵坡坡度、坡长限制值和缓和坡段参数等最重要的控制性指标,都是依据 8 t 货车(功率质量比是 $9.3 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的爬坡性能曲线确定的^[1-2]。中国关于代表车型的选取,基本是根据某地区调查的车型及其总质量进行统计分析,计算出货车载重吨位的分布情况,根据载重吨位的累积分布曲线,选取一个满足大部分货车需要的合适车型的大致吨位,如取其累积分布曲线 85 % 位所对应的货车载重吨位,作为试验的额定载重,再考虑中国交通组成的主流货运车型,确定用于纵坡设计的主导车型^[3-4]。主导车型一经选定,用于纵坡设计的各设计要素如纵坡坡度、坡长限制值等参数都将确定,相应的爬坡车道、避险车道等的设置条件、设计参数亦将确定^[5-8]。但根据汽车行驶的动力学和运动学理论,以货车总质量作为主导车型的选择依据,缺乏理论根据,将导致用于纵坡设计的主导车型不能真实反映中国公路交通现状,造成设计车型与实际运行车型不一致的弊端,给国家公路建设造成不必要的损失。因此,本文中将对汽车上坡运行特性展开研究,提出用于纵坡设计主导车型选择的理论依据,建立汽车功率质量比计算模型,设计出一套可行的试验方法,为合理确定公路路线最大纵坡坡度和不同纵坡的最大坡长,提供基础依据。

1 上坡路段车辆运行特性

车辆行驶速度在上坡路段不可避免地受到影响,不同的纵坡坡度、坡长,对其影响程度变化很大。

目前除微型客货车外,几乎所有的轻型客车都能爬上 4 % ~ 5 % 坡度的陡坡而不至于比平坡路段的速度有明显的降低,但纵坡坡度对货车的影响程度要比轻型客车大得多。

1.1 纵坡坡度 $i > 3\%$

笔者在陕西省西铜高速公路和云南省玉元高速公路几段典型纵坡路段进行了实地速度观测。试验路段 1 为西铜高速公路长 980 m、纵坡坡度为 3.9 % 的上坡路段,具体采集数据点见图 1;试验路段 2 为西铜高速公路长 3 020 m 的组合纵坡路段,纵坡坡度均大于 3 %,具体采集数据点见图 2。

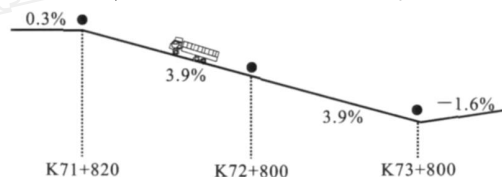


图 1 西铜高速公路车速采集试验路段 1

Fig. 1 Experiment Section 1 for Vehicle Speed Measurement of Xitong Expressway

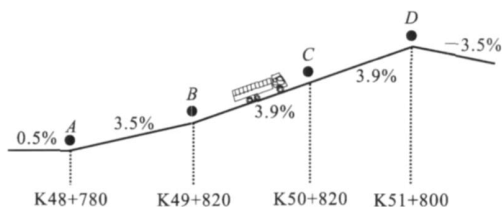


图 2 西铜高速公路车速采集试验路段 2

Fig. 2 Experiment Section 2 for Vehicle Speed Measurement of Xitong Expressway

通过观测数据分析,从表 1、2 可以看出:

(1) 轻型客车上坡运行情况。由上坡运行车速数据统计分析可知,2 个试验路段坡底轻型客车的平均行驶速度分别为 90.6 、 $103.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,坡中平均行驶速度分别为 83.0 、 $91.2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (或 $90.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$),坡顶的平均行驶速度分别为 79.6 、 $87.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。以坡中(或坡中 1)为界,从坡底到坡中速度分别减小 7.6 、 $12.5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,从坡中到坡顶速度分别减小 3.4 、 $3.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从表 1 可以看出,轻型客车在长上坡路段行驶时车辆的运行速度受到坡度和坡长的影响,有连续减速的过程,但受到

表 1 试验路段 1 的上坡运行车速统计结果

Tab.1 Statistical Results of Vehicle Operating Speeds on Upgrades of Experiment Section 1							
类型		轻型客车			货车		
桩号		K73+800	K72+800	K71+820	K73+800	K72+800	K71+820
位置		坡底	坡中	坡顶	坡底	坡中	坡顶
车速/ (km·h ⁻¹)	平均值	90.6	83.0	79.6	60.4	35.9	33.0
	标准偏差	21.90	13.89	14.60	15.10	17.18	16.88
	最大值	133	119	109	102	95	80
	最小值	76	66	60	23	13	10
样本数		89	89	89	234	234	234

表 2 试验路段 2 的上坡运行车速统计结果

Tab.2 Statistical Results of Vehicle Operating Speeds on Upgrades of Experiment Section 2									
类型		轻型客车				货车			
桩号		K48+780	K49+820	K50+820	K51+800	K48+780	K49+820	K50+820	K51+800
位置		坡底	坡中 1	坡中 2	坡顶	坡底	坡中 1	坡中 2	坡顶
车速/ (km·h ⁻¹)	平均值	103.7	91.2	90.3	87.6	71.6	47.2	46.1	45.5
	标准偏差	18.7	12.6	11.7	14.2	15.2	13.8	14.1	13.1
	最大值	128	123	120	118	102	93	91	89
	最小值	82	78	79	75	32	18	16	15
样本数		67	67	67	67	108	108	108	108

始进入纵坡的一段坡长,减速幅度尤其大,之后速度趋于稳定,达到一种匀速的行驶状态。

1.2 纵坡坡度 i 3 %

图 3 为云南玉元高速公路的 3 条上坡路段的货车运行速度,纵坡坡度均小于等于 3 %。从图 3 可看出:货车在坡度小于 3 %的纵坡路段上坡行驶时,速度基本不再降低,运行受到的影响轻微;在坡度为 2 %的纵坡路段,货车行驶一段距离后速度反而有一定程度的提高。

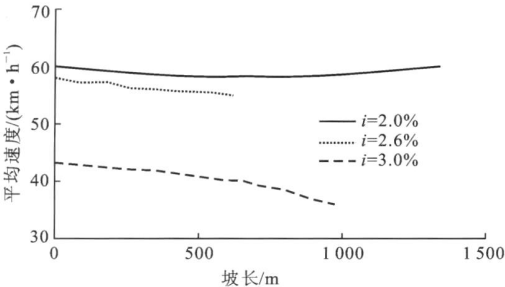


图 3 货车上坡运行速度
Fig.3 Operating Speed of Truck on Upgrades

2 主导车型的选择

2.1 理论依据

实地速度观测发现:载货汽车在长、陡纵坡路段行驶时,在接近坡顶处汽车会达到一种稳定、匀速的行驶状态。因此,每一纵坡都有一个稳定速度和达

的影响较小。

(2)货车上坡运行情况。2 个试验路段坡底货车的平均行驶速度分别为 60.4、71.6 km·h⁻¹,坡中平均行驶速度分别为 35.9、47.2 km·h⁻¹(或 46.1 km·h⁻¹),坡顶的平均行驶速度分别为 33、45.5 km·h⁻¹。以坡中(或坡中 1)为界,从坡底到坡中速度分别减小 24.5、24.4 km·h⁻¹,从坡中到坡顶速度分别减小 2.9、1.7 km·h⁻¹。可见,长陡坡路段对货车运行的影响特别大,货车有明显的连续减速的过程,减速幅度较轻型客车显著,并且在开

到稳定速度的坡长,该稳定速度称为平衡速度,对应的坡长称为平衡坡长。纵坡坡度越大,平衡速度就越小,达到平衡速度的坡长也越短;纵坡坡度越小,平衡速度越大,达到平衡速度的坡长相对越长。

从平直路段进入上坡路段,货车总体上有先加速冲坡然后减速最后匀速的过程,在达到平衡速度以前,汽车的行驶过程可以简化为匀减速运动。根据汽车在纵坡上的运行速度特性,纵坡坡度对速度的影响模型采用参考文献[9]的仿真模型,即

$$v_2 = v_1 + t \frac{g}{1 + \frac{P}{v_1 g} - \frac{13 K A v_1^2}{m} - (f + i)} \quad (1)$$

式中: v₂ 为进入纵坡 t 时间后的车辆速度; v₁ 为 t 时间之前的车辆速度; t 为仿真过程中的时间推进步长; P 为车辆的功率质量比; A 为迎风面积,大型车 A = 6.2 m²,轻型客车 A = 2.0 m²; K、分别为车辆的风阻系数和惯性阻力系数, = 0.01,轻型客车 K = 0.002 5,大型车 K = 0.003 5; f、i 分别为滚动阻力系数、纵坡坡度, f = 0.015^[10]; g 为重力加速度,取 9.8 m·s⁻²; m 为车辆空载质量加实际载质量。

从式(1)的表现形式可以看出:车辆在纵坡上的行驶速度主要受坡前引道的初速度 v₁ 和汽车自身的功率质量比 P 的影响^[11],汽车的功率质量比是影响上坡道货车运行速度最重要的参数之一。单位质

量所分配的功率越大,汽车在上坡路段的行驶速度就越高,汽车的爬坡性能就越好;具有相同功率质量比的汽车,动力性能基本上一致,也基本上具有相同的爬坡性能。

根据汽车行驶的动力学和运动学理论,每一种车辆的运行特征是可以计算得到的。车辆动力性能基本一致时,上坡行驶的运行速度与用节气门控制的发动机输出功率有直接关系,汽车的功率质量比随坡度、坡长而变化,并不是一个恒定的值。根据汽车的行驶特性及燃油经济性的要求,货车在纵坡路段上坡行驶时,发动机的负荷率即节气门的开启量会逐渐趋于稳定;临近长、陡坡坡顶,随着货车速度趋于匀速,其功率质量比也将趋于一恒定值。

2.2 模型的建立

纵坡设计参数,如最大纵坡坡度、坡长限制等的规定主要是依据公路货运汽车主导车型的爬坡性能曲线,同时考虑坡底的入坡速度与允许的速度差确定的^[12]。而爬坡性能曲线是在主导车型的技术参数的基础上,根据汽车行驶的动力学及运动学理论,计算得出纵坡坡度与汽车行驶速度以及速度随坡长的变化规律,根据容许的速度折减量和货车驶入纵坡的入坡速度等参数,计算出各纵坡坡度下的临界坡长值。可见,纵坡设计参数关键取决于公路货运汽车主导车型的选取,而主导车型的选择又是以汽车功率质量比作为基础,功率质量比是影响汽车上坡行驶的最重要的参数。

车辆在坡道上受到汽车牵引力 T 和各种行驶阻力的共同作用,其中行驶阻力包括空气阻力 R_w 、滚动阻力 R_r 、坡度阻力 R_i 和惯性阻力 R_l 。

根据牛顿力学平衡理论,上坡行驶时的平衡方程为

$$T = R_w + R_r + R_l \tag{2}$$

式中: $R_w = \frac{13 K A v^2}{21.15}$, K 为空气阻力系数,货车 $K = 0.825$, A 为迎风面积,一般 $A = 0.9 \times 2.47h$, h 为车高, v 为临近坡顶的货车行驶速度; R_r 为道路阻力,包括滚动阻力和坡度阻力, $R_r = mg(f + i)$; R_l 为惯性阻力, $R_l = m \frac{dv}{dt}$ 。

汽车发动机的功率 $p = Tv$, 为了便于分析,将式(2)作如下变换

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{p}{v} - \frac{13 K A v^2}{21.15} - mg(f + i) \tag{3}$$

由汽车爬坡性能和路段测速调查可知,在临近长、陡上坡坡顶断面的货车基本处于匀速行驶状态,

即 $dv/dt = 0$, 同时将式(3)等号两端乘以 v/m , 即可构造出汽车功率质量比 P 的计算模型

$$P = g(f + i) v + \frac{13 K A v^3}{21.15 m} \tag{4}$$

从式(4)的表现形式可以看出:货车功率质量比仅与坡顶速度、迎风面积及车质量有关。功率质量比可以通过观测临近长、陡坡坡顶断面的货车车速、车质量及迎风面积求得。在式(4)中,货车总质量一般采用动态称重系统称取,在没有安装动态称重系统的地区,可通过电子磅等静态称重设备称取货车总质量,注意尽量避免对后续行驶车辆造成干扰;迎风面积一般通过测量货车实际高度,或通过数码照片图像处理技术^[13]计算,无条件时,亦可参考表3所列的几种常见货车的迎风面积。

表3 货车迎风面积

Tab. 3 Truck Frontal Areas

货车类型		迎风面积/ m ²
整车或半挂	平顶	6.7
	高顶	8.0
厢式车	矮型	8.0
	高型	8.6
油罐车	平顶	6.7
自卸车	2 轴	6.5
	3~4 轴	7.7
仓栅式		8.7
东风 1041		5.8

注:迎风面积为 $0.9Bh$, B 为车宽。

在中国的公路货运汽车交通组成中,货车功率质量比有较大的不均匀性,用于纵坡设计的车型,应以功率质量比作为选择依据,选取一个满足大部分货车行驶要求的功率质量比值,通常取其累积分布曲线 15 % 位的功率质量比作为设计依据,具有 15 % 位功率质量比性能的汽车作为纵坡设计的主导车型。

2.3 试验方法

为了获取该地区现阶段交通流中货车的功率质量比,根据上述理论和计算模型,采用如图4所示的试验方法,观测记录货车在临近长陡坡路段坡顶的行驶速度、车质量、迎风面积、车型等参数。速度观测时试验人员应尽量隐蔽,以减少对驾驶员的干扰,保证样本数据的真实性。为了保证观测数据的精度,样本量的选取按照统计学的要求,计算得出最小观测的车辆数为 400。

野外车辆速度观测试验对路段的选取有一定的要求。为了保证试验的准确性,排除其他影响因素,



图4 货车功率质量比观测位置

Fig. 4 Measuring Positions for Truck Power-to weight Ratios

选择的试验路段应具有以下特点:

- (1) 道路路面状况良好。
- (2) 试验路段纵坡均为单一纵坡,无变坡点,要求纵坡坡度大于等于 3.5 %。
- (3) 试验坡段越长越好,坡长不小于 800 m。
- (4) 平曲线半径大于 600 m。
- (5) 汽车运行处于自由流状态,并且运行轨迹位于行车道上。

此外,选择试验路段时还要考虑其他的一些因素,如道路建成后道路状况可能会发生某些变化,在开始试验之前,首先对选定路段进行实地踏勘检测,以考察实地情况与原始设计资料是否一致,是否满足观测要求;选择天气晴朗,风力不大的时期进行试验。在受干扰较多的公路,如一级、二级和三级公路上进行车速观测时,应尽可能地采取措施减少外界带来的干扰,剔除受外界干扰的数据样本,并对驾驶员的驾驶操作进行调查,确定不同等级公路上货车行驶时的节气门开启量大小。汽车功率质量比计算模型的理论基础和上述试验要求,均适用于除高速公路外的其他等级公路,因此,汽车功率质量比理论计算模型与试验方法适用于不同地区、不同等级的公路。

3 实例分析

试验路段 1 位于西铜高速公路 K73 + 800 ~ K71 + 820 处,其平曲线半径为 700 m 和 800 m,纵坡坡度为 3.9 %,坡长为 1 980 m,试验观测点选择在临近坡顶处,桩号为 K71 + 740。

根据观测数据,计算出功率质量比,使用数理统计和分析的方法,得到如图 5 所示的货车功率质量比频率分布。由图 5 可以计算出 15 %位功率质量比约为 $6.37 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

试验路段 2 位于西铜高速公路 K49 + 820 ~ K51 + 800,其平曲线半径为 2 000 m,纵坡坡度为 3.9 %,坡长为 1 980 m,试验观测点选择在临近坡顶处,桩号为 K51 + 700。

根据观测数据,计算出该路段的功率质量比,使

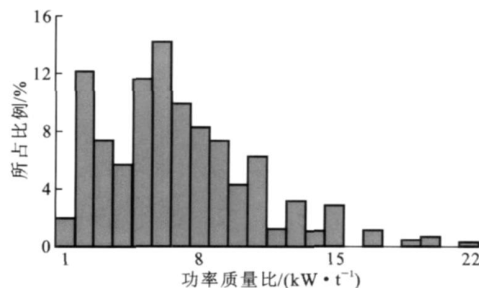


图5 西铜高速公路路段 1 功率质量比统计结果

Fig. 5 Statistical Results of Power-to weight Ratios for Section 1 of Xitong Expressway

用数理统计和分析的方法,得到如图 6 所示的货车功率质量比频率分布。由图 6 可以计算出 15 %位功率质量比约为 $6.13 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

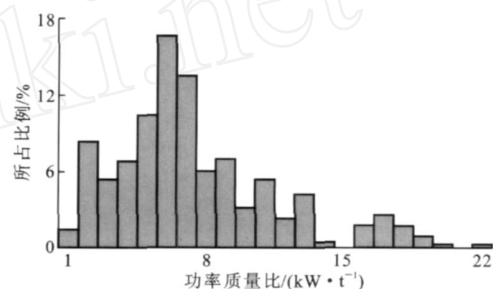


图6 西铜高速公路路段 2 功率质量比统计结果

Fig. 6 Statistical Results of Power-to weight Ratios for Section 2 of Xitong Expressway

综上所述,西铜高速公路 15 %位功率质量比为 $6.13 \sim 6.37 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$,其值分布于一个较小的区间。因试验数据为汽车实际运行的功率质量比,据资料显示,一般坡顶货车的输出功率负荷率为 90 %,机械效率为 85 %,因此,额定条件(额定载重、100 %输出功率负荷率和 100 %机械效率)下,该地区高速公路纵坡设计主导车型的功率质量比约为 $8.0 \sim 8.33 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

4 结 语

(1) 典型纵坡路段实地车速观测试验发现:纵坡对轻型客车上坡行驶车速影响不大;坡度小于 3 % 的纵坡对货车上坡行驶影响很小,尤其在较缓的上坡路段,货车行驶一段距离后速度反而有一定程度的提高;陡坡对货车车速影响显著,并且在刚进入上坡过程的一段坡长时车速下降幅度较大,之后车速下降变缓,最后会达到一种稳定、匀速的行驶状态。

(2) 考虑在临近长、陡上坡坡顶断面时,货车基本处于匀速爬行状态,根据汽车在坡道上的运动方

程推导出功率质量比计算模型为: $P = g(f + i)v + \frac{13}{21.15} \frac{KA v^3}{m}$, 货车功率质量比 P 仅与货车总质量、货车迎风面积和临近坡顶的行驶速度有关。

(3) 车速观测试验路段要求均为单一纵坡, 无变坡点, 纵坡坡度大于等于 3.5%, 坡长不小于 800 m, 平曲线半径大于 600 m, 汽车运行处于自由流状态, 并且运行轨迹位于行车道上, 道路路面状况良好。

(4) 通过试验数据观测和计算确定西铜高速公路纵坡设计主导车型的功率质量比约为 $8.0 \sim 8.33 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$, 仅限于试验路段所在地区参考。

(5) 计算货车功率质量比的理论模型和试验方法适用于高速公路、一级公路、二级公路以及三级公路; 参照本文方法确定出不同地区或省份的汽车功率质量比后, 以此可以建立公路最大纵坡坡度、不同纵坡的最大坡长等几何线形设计参数。

参考文献:

References:

- [1] JTGB01—2003, 公路工程技术标准[S].
JTGB01—2003, Technical Standard of Highway Engineering[S].
- [2] JTGD20—2006, 公路路线设计规范[S].
JTGD20—2006, Design Specification for Highway Alignment[S].
- [3] 石飞荣, 杨少伟, 赵永平, 等. 山区高速公路车辆上坡最大纵坡及坡长限制[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(5): 27-30.
SHI Fei-rong, YANG Shao-wei, ZHAO Yong-ping, et al. Maximum Longitudinal Slope and Its Length of Mountain-expressway when Vehicle's Driving Up[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(5): 27-30.
- [4] 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.
- [5] 杨少伟, 许金良, 李伟, 等. 路线设计中车辆行驶速度预测模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(3): 53-55.
YANG Shao-wei, XU Jin-liang, LI Wei, et al. Prediction Model of Vehicle Speed for Highway Route Design[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(3): 53-55.
- [6] 杨少伟, 张驰, 王海君, 等. 公路线形设计中的可能速度预测模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 36-39.
YANG Shao-wei, ZHANG Chi, WANG Hai-jun, et al. Prediction Model of Possible Velocity in Highway Alignment Design[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(2): 36-39.
- [7] 杨少伟. 道路勘测设计[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2006.
YANG Shao-wei. Highway Survey and Design[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [8] 余志生. 汽车理论[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
YU Zhi-sheng. Automobile Theory[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [9] ST JOHN A D, KOBETT D R. Grade Effects on Traffic Flow Stability and Capacity[R]. Washington DC: NCHRP, 1978.
- [10] 周荣贵, 孙家凤, 吴万阳, 等. 高速公路纵坡坡度与运行速度的关系[J]. 公路交通科技, 2003, 20(4): 34-37.
ZHOU Rong-gui, SUN Jia-feng, WU Wan-yang, et al. Relationship Between Running Speed and Gradient of Expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(4): 34-37.
- [11] 荣建. 高速公路基本路段通行能力研究[D]. 北京: 北京工业大学, 1998.
RONG Jian. Research on the Basic Capacity of Expressway[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 1998.
- [12] HARWOOD D W, TORBIC D J. Review of Truck Characteristics as Factors in Roadway Design[R]. Washington DC: NCHRP, 2003.
- [13] 阮志刚. 汽车迎风面积测量方法的研究[J]. 汽车科技, 2006(6): 27-29.
RUAN Zhi-gang. Study on Test Method of Measuring Automotive Frontal Area[J]. Automobile Science & Technology, 2006(6): 27-29.