

文章编号:1671-1637(2013)06-0014-06

高速公路上坡路段载重车辆运行速度特性

许金良¹, 雷 斌^{1,2}, 李 诺³

(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. 西安市地下铁道有限责任公司, 陕西 西安 710016; 3. 中国民航工程咨询公司, 北京 100621)

摘 要:对内蒙古地区高速公路的交通组成、载重车辆功率、载质量、质量功率比进行了统计分析, 确定了高速公路上坡路段的主导车型。依据修正的速度预测模型, 分别绘制了不同坡度(1%~6%)、坡长、载质量(30、40、50、55 t)、质量功率比(80、120、160、200 kg·kW⁻¹)、初始入坡速度(0、20、40、60 km·h⁻¹)下的主导车型运行速度曲线, 并从汽车动力学角度研究了曲线变化的原因。分析结果表明:内蒙古地区运煤高速公路主导车型为福田欧曼 ETX9 系重卡;载重车辆在一定坡道上行驶, 当达到平衡速度之后, 速度不再随坡长的增加而降低;坡度越大, 速度降低越快, 最后达到的平衡速度越小;车辆载质量越大, 速度降低越快;质量功率比越小, 车辆爬坡性能越好;初始速度越高, 车辆达到平衡速度所行驶的距离越长。

关键词:高速公路;载重车辆;运行速度;主导车型;质量功率比

中图分类号:U412.366

文献标志码:A

Operating speed characteristics of heavy vehicle on expressway uphill section

XU Jin-liang¹, LEI Bin^{1,2}, LI Nuo³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Xi'an Metro Co., Ltd., Xi'an 710016, Shaanxi, China; 3. Civil Aviation Engineering Consulting Company of China, Beijing 100621, China)

Abstract: The traffic composition, heavy vehicle power, load mass and mass-to-power ratio of expressway in Inner Mongolia were analyzed, and the typical vehicle on expressway uphill section was determined. Based on the corrected speed prediction model, the operating speed curves of typical vehicle under different slope gradients(1%-6%), slope lengths, load masses(30, 40, 50, 55 t), mass-to-power ratios(80, 120, 160, 200 kg·kW⁻¹) and initial speeds into slope(0, 20, 40, 60 km·h⁻¹) were drawn, and the reasons of curve changes from vehicle dynamics perspective were studied. Analysis result shows that Foton Auman ETX9 heavy truck is the typical vehicle on the expressway for coal transportation in Inner Mongolia. When heavy vehicle runs on a certain slope, the vehicle speed will not decrease with the increase of slope length after reaching balancing speed. The bigger the slope gradient is, the faster the vehicle speed drops, the lower the final balancing speed is. The bigger the load mass is, the faster the vehicle speed drops. The smaller the mass-to-power ratio is, the better the vehicle climbing performance is. The higher the initial speed is, the longer the distance for vehicle to reach balancing speed is.

收稿日期:2013-07-18

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2011 318 362 810);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZD021, 2013G1211003)

作者简介:许金良(1966-),男,山东曹县人,长安大学教授,工学博士,从事道路总体工程与交通安全研究。

2 tabs, 11 figs, 11 refs.

Key words: expressway; heavy vehicle; operating speed; typical vehicle; mass-to-power ratio

Author resume: XU Jin-liang(1966-), male, professor, PhD, +86-29-82334441, gl15@chd.edu.cn.

0 引言

近年来,中国大多数高速公路上载重车辆比例逐年升高,超载现象严重。由于载重车辆对高速公路上其他车辆的运行干扰较大,对交通流畅通性产生不利影响,会降低交通运行效率,在高速公路上坡路段这一影响尤为严重。国家汽车工业“十五”规划重点强调要发展适应高速公路需要、功率在 220 kW 以上的大中型车,并且出台了一系列对重型汽车市场产生深远影响的政策法规,鼓励货车向大型化、重型化方向发展。据统计,“十一五”期间,中国重型货车占载货车的比例达到 16%,这一比例有望在“十二五”进一步提高^[1]。在以往的研究中,用于纵坡相关分析的代表车型多采用小客车或中型载货汽车^[2],未能结合中国高速公路交通构成的变化。

在运行速度特性研究上,钟小明等采用大量的实测数据建立了相应的两阶段平曲线路段大型车运行速度统计模型^[3];孟宪强等对高速公路纵坡上中型车自由流运行速度特性进行了研究,建立了质量功率比与运行速度、坡长、坡度的函数关系模型^[4];王林等结合实测数据论证了高等级公路运行速度的计算方法及在道路运营管理中的应用^[5];汪双杰等在统计分析中引用离差的概念,得出用于路线设计的运行速度应取速度累计分布曲线上的 85%分位值的结论^[6];贺玉龙等基于实测数据对比研究了中美公路运行速度与交通安全相关性^[7]。国外开展重载车辆运行速度研究较早,美国《通行能力手册》和 AASHTO 提出了各纵坡度下的卡车行驶曲线图;Jessen 等在对大型载重汽车运行速度实地调研的基础上,建立了半径-运行速度预测模型^[8];Misaghi 等采集自由流状态下大型载重汽车运行速度数据,建立了双车道运行速度预测模型^[9]。目前,国内外对大型载重汽车运行速度特征分析形式较为单一,预测模型缺乏针对性,研究的适用性不强,如美国的卡车行驶曲线图研究成果在应用中具有一定的局限性:模型参数取值时没有考虑实际道路条件;模型考虑情况较少,曲线图中卡车速度均不超过 90 km·h⁻¹,质量功率比仅考虑了 120 kg·kW⁻¹的情况等。

针对目前国内相关规范应用情况与实际符合度不高,实际道路、车辆参数选取适用性和针对性不

强,尤其针对质量功率比这一指标,各地区存在的差异更为突出,因此,本文以 G6 高速公路内蒙古呼集段为研究对象,用实测数据修正了上坡路段载重车辆运行速度预测模型,分别绘制了不同坡度、坡长、载质量、质量功率比及初始入坡速度条件下主导车型的速度变化曲线,深入分析了车辆的运行特性及其影响因素。

1 主导车型的确定

中国高速公路中行驶的不同车型车辆的性能差别较大,交通组成复杂,将交通流中的车辆进行科学、合理的分类是研究载重车辆运行特性的基础。

因本文依托工程正处于施工建设阶段,无法进行车辆组成的调查,故选择与依托工程平行的 G6 京藏高速作为实地调研对象,其在交通组成上与在建道路具有相似特性。交通组成资料来源于 G6 重要收费站——蒙冀界收费站,此收费站位于内蒙古与河北交界处,近几年,由于 G6 高速公路呼集段车流量骤增,从该收费站进出的车流量非常大,高峰时,出区的平均车流量就有 41 000 pcu·d⁻¹,其中货车占主要部分。依据此站统计数据,可以得出 G6 高速公路内蒙古呼集段主要交通组成。

1.1 统计资料分析

为了解内蒙古地区运煤高速公路主要交通组成情况,对蒙冀界收费站资料进行调查分析。由于调查路段的交通量非常大,为统计方便并保证数据的完整性,选取有代表性的时间段进行分析,选取的时间段及样本量见表 1。

表 1 样本统计
Tab. 1 Sample statistics

| 时间段 | 9:00~10:00 | 12:00~13:00 | 15:00~16:00 | 0:00~1:00 |
|---------|------------|-------------|-------------|-----------|
| 样本量/veh | 399 | 408 | 503 | 343 |

1.1.1 交通组成分析

根据收费站统计资料可以看出,一型车和七型车占有较大的比例,其他车型所占比例较小,故本文在分析时将其他车型划为一类统计,结果见图 1。一型车指核定载质量不满 1.5 t 的货车或小于 10 座的客车,七型车指核定载质量不小于 15 t 的货车。

由图 1 可以看出,不同时间段内交通组成中七型车均占有较大的比例,基本都在 60%以上,在

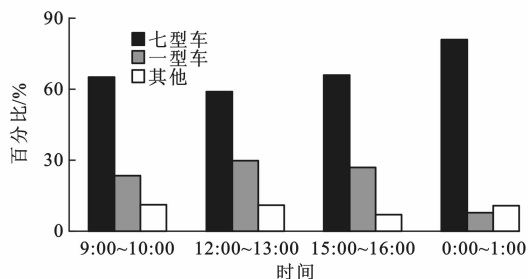


图1 调查路段车型组成

Fig. 1 Composition of vehicles on investigated section

0:00~1:00 时间段内,七型车所占比例达到 81%,12:00~13:00 段内七型车比例有所下降,一型车比例偏高。由统计分析,调查小组选用七型六轴大型铰接车辆为调查对象,记录所测车辆的发动机功率,为后续主导车型的确定提供依据。

1.1.2 载重车辆功率统计

以六轴载重车辆的功率为分析对象,选取调查所得到的 145 个有效样本,进行分析。由图 2 可以看出,内蒙古地区六轴载重车辆功率均大于 200 kW,不小于 250 kW 的车辆占到 41%,大于 220 kW 的车辆共占 78%。

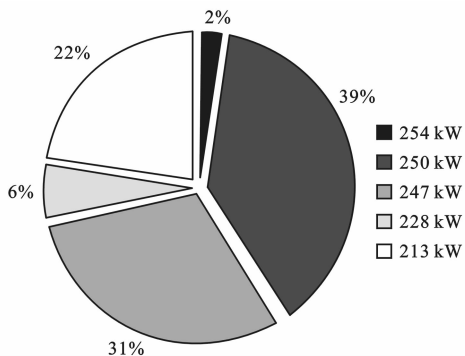


图2 车辆功率统计

Fig. 2 Statistics of vehicle powers

1.1.3 载质量统计分析

通过对收费站资料整理,选取 15:00~16:00 时间段内车辆载质量统计结果,共得到 283 个有效样本,绘制直观图。由图 3 可以看出,本路段内运行车辆载质量普遍较高,所占比例最大的是 49 t 载重车辆,占总样本量的 52%,向下依次是 50、47、46 t,由此可以确定内蒙古地区载重车辆典型载质量为 49 t。

1.1.4 质量功率比统计分析

质量功率比是衡量汽车运行特性的重要参数,在道路纵坡设计时,常选择其作为重要的设计依据。由于中国道路交通组成非常复杂,车型种类较多,货车的质量功率比表现出很大的不均匀性,因此,通常选取 85% 位的质量功率比性能的汽车作为研究路

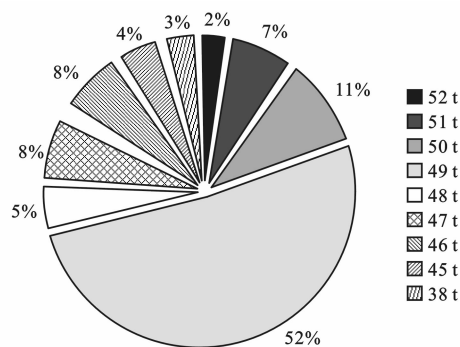


图3 车辆载质量统计

Fig. 3 Statistics of vehicle load masses

段的主导车型^[10]。

目前,获取载重车辆质量功率比的方法主要有 2 种:对货车进行称重,记录其额定功率,此方法工作量大,实施较困难,但得出的数据较准确;运用公式间接计算质量功率比,此方法简便,但计算结果不够准确。本文为准确得出内蒙古地区车辆质量功率比,采用第 1 种方法,统计得出该路段载重车辆的质量功率比分布状况,见图 4。

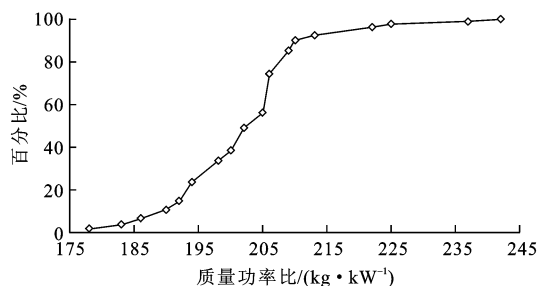


图4 质量功率比统计

Fig. 4 Statistics of mass-to-power ratios

由图 4 可以看出,调查路段 85% 位的质量功率比为 $209 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 。

1.2 主导车型确定

车辆在爬坡过程中导致速度降低的主要因素是车辆爬坡性能不足,影响车辆爬坡性能的直接原因是车辆的质量功率比,因此,本文选取质量功率比作为车辆分类的标准。

由图 4 可以看出,85% 位的质量功率比为 $209 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$,因所测值为行驶状态下汽车的质量功率比,据统计资料显示,通常情况下货车在坡顶的输出功率(即负荷率)为 90%,机械效率为 85%^[7],因此,在额定条件(额定载质量、100% 输出功率和 100% 机械效率)下,该地区主导车型的质量功率比约为 $273 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 。根据内蒙古地区交通组成,确定福田欧曼 ETX9 系重卡为主导车型(图 5),性能参数见表 2。



图 5 主导车型

Fig. 5 Typical vehicle

表 2 主导车型的性能参数

Tab. 2 Performance parameters of typical vehicle

| | | |
|----------------------------|------|---------------|
| 车辆型号 | | 福田欧曼 ETX9 系重卡 |
| 整备质量/t | | 12.495 |
| 最大总质量/t | | 25.000 |
| 外部尺寸/m | 车身长度 | 9.280 |
| | 车身宽度 | 2.495 |
| | 车身高度 | 3.400 |
| 最高车速/(km·h ⁻¹) | | 92 |
| 最大爬坡度/% | | 25 |
| 发动机型号 | | 潍柴 WP10.290 |
| 最大输出功率/kW | | 213 |

2 基于卡车性能的速度预测模型

为便于预测实际道路上车辆运行速度,杨宏志等研究建立了基于经典力学理论的运行速度预测模型,运用 Visual Basic 编写了基于卡车性能的运行速度预测软件,其运用的基本原理如下^[11]。

车辆驱动力为

$$F_t = 3\,600\beta\eta \frac{P}{V} \quad (1)$$

$$F_{\max} = 9.806\,6M_{\text{ta}}\mu \quad (2)$$

$$F = \min\{F_t, F_{\max}\} \quad (3)$$

车辆总阻力为

$$R = R_a + R_r + R_g \quad (4)$$

空气阻力为

$$R_a = C_1 C_d C_h A V^2 \quad (5)$$

滚动阻力为

$$R_r = 9.806\,6C_r(C_2 V + C_3) \frac{M}{1\,000} \quad (6)$$

坡度阻力为

$$R_g = 9.806\,6MI \quad (7)$$

车辆加速度为

$$a = \frac{F - R}{M} \quad (8)$$

$$a(t_i) = \frac{F(t_i) - R(t_i)}{M}$$

汽车运动方程为

$$\begin{cases} \left[\frac{dV(t_i)}{dt} \right] = [a(t_i)] \\ \left[\frac{dx(t_i)}{dt} \right] = [V(t_i)] \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} V(t_i) = V(t_{i-1}) + a(t_{i-1})\Delta t \\ x(t_i) = x(t_{i-1}) + V(t_{i-1})\Delta t \end{cases}$$

式中: A 为迎风面积; C_d 为空气阻力系数; C_h 为坡度阻力系数; C_r 为滚动阻力系数; F 为实际驱动力; F_{\max} 为最大驱动力; F_t 为驱动力; M 为车辆总质量; M_{ta} 为作用于驱动轴的总质量; P 为发动机功率; R 为总阻力; R_a 为空气阻力; R_g 为坡度阻力; R_r 为滚动阻力; V 为运行速度; a 为运行加速度; C_1 为系数,取 0.047 285; C_2 、 C_3 为系数,分别取 1、2; η 为发动机传动效率; μ 为路面摩擦因数; β 为传动系统机械效率; t_i 为*i*时刻车辆行驶时间; $x(t_i)$ 为车辆位移;括号内带 t_i 变量为 t_i 对应变量值; I 为坡度。

基于上述基本原理,开发了运行速度预测模型,其主要输入界面见图 6。主要输入参数包括汽车参数和道路参数,计算中,利用实测数据对模型验证后进行参数修正,得到与实际道路较为吻合的模型,改变主要参数的取值就可得到不同的速度变化趋势,借此分析不同的坡度、坡长、车辆载质量、质量功率比以及不同入坡速度对典型载重车辆运行速度的影响。

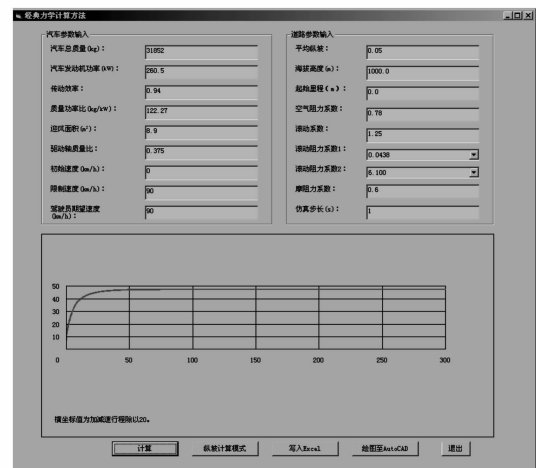


图 6 预测模型主要操作界面

Fig. 6 Main interface of prediction model

3 上坡路段载重车辆运行速度分析

3.1 坡度、坡长对载重车辆运行速度的影响

坡度和坡长的影响主要考虑车辆的动力性、在各档位的速度稳定性、在上坡路段上的最小允许速

度以及速度衰减指标等。

3.1.1 坡长影响

由预测软件计算坡长为4 km时载重车辆运行速度,车型选用所确定的主导车型,载质量为49 t,初始速度为 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,坡度选择3%平均纵坡,得出坡长与速度的关系,见图7。

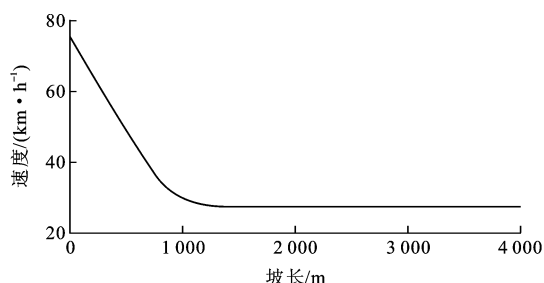


图7 坡长与速度的关系

Fig. 7 Relationship between slope length and speed

由图7可以看出,载重车辆在入坡开始阶段速度降低较快,随后缓慢的降低,最终达到平衡速度。车辆开始入坡阶段是发动机驱动力和车辆阻力寻找平衡点的过程,当坡长达到一定距离后,车辆会在一个基本稳定的状态下行驶,不会再发生较大的变化,此时,车辆驱动力和阻力值平衡,加速度为0,车辆运行速度达到该档位的平衡速度。

3.1.2 坡度影响

为了得出较明显的速度变化特征,本文在分析坡度对载重车辆运行速度的影响时,选取1%~6%六种不同纵坡度为研究对象进行速度预测,并绘制速度变化曲线。车型选用所确定的主导车型,载质量为49 t,初始速度为 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,得出坡度与速度的关系,见图8。

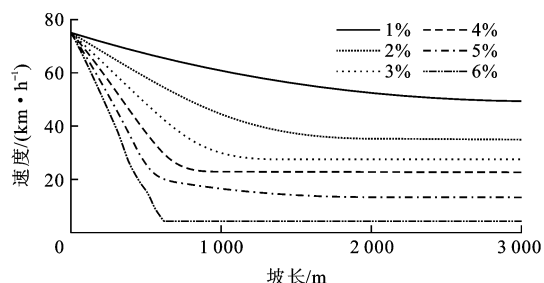


图8 坡度与速度的关系

Fig. 8 Relationship between slope gradient and speed

从图8可以看出,不同纵坡条件下,载重车辆的速度变化差异较明显,车辆在纵坡上行驶时,速度均呈下降趋势,当坡长增大到一定值后,其速度不再降低,因此,每一纵坡都有一个平衡速度;运行速度在达到稳定值之前,速度减小的速率与坡度值的变化一致,坡度越大,速度下降越快;坡度越大,平衡速度

就越小,与达到平衡速度对应的坡长也就越短,反之,平衡速度越大,达到平衡速度的坡长就越长。

车辆在坡道上行驶,受到向下分力的作用,刚开始上坡,驱动力不足以平衡向下的力,车辆呈减速状态,坡度越大,向下分力越大,减速度就越大,所以大的坡度下速度下降的越快;速度逐渐降低,驱动力慢慢增大,当两种力达到平衡时,速度就不再变化,达到稳定。

3.2 车辆载质量对运行速度的影响

在分析载质量对运行速度的影响时,选择30、40、50、55 t四种不同载质量,车型选用所确定的主导车型,初始速度为 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,坡度选择3%平均纵坡,得出载质量与速度的关系,见图9。

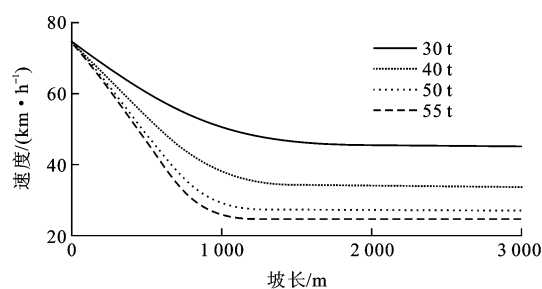


图9 载质量与速度的关系

Fig. 9 Relationship between load mass and speed

从图9可以看出,不同载质量条件下,车辆的速度变化差异较明显,载质量越大,平衡速度越小,而且速度下降越快,速度下降到平衡速度所经过的距离越短,随着载质量的增加,速度下降变缓。主要原因在于:车辆在坡道上行驶,受到向下的分力作用,刚开始上坡,驱动力不足以平衡向下的力,车辆呈减速状态,载质量越大,向下分力越大,减速度就越大,所以载质量大时速度下降的越快;速度逐渐降低,驱动力慢慢增大,当两种力达到平衡时,速度就不再变化,达到平衡速度。随着速度减慢,空气阻力和滚动阻力会降低,这会导致减速度降低,从而速度变化趋势减小。

3.3 质量功率比对运行速度的影响

质量功率比是指车辆总质量和车辆的实际运行功率之间的比值,即车辆运行过程中单位功率所负担的荷载质量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 。

在分析质量功率比对运行速度的影响时,选择80、120、160、200、240 $\text{kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 五种不同情况,初始速度选取 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,坡度选择3%平均纵坡,得出质量功率比与速度的关系,见图10。

由图10可以看出,不同质量功率比条件下,车辆的速度变化差异较明显,不同质量功率比下车辆

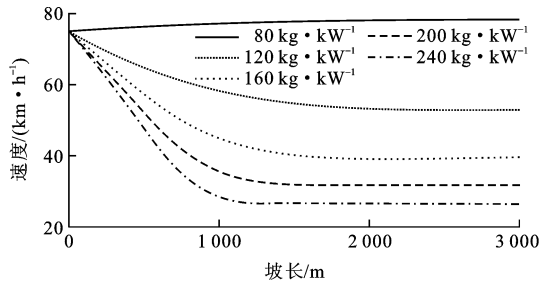


图10 质量功率比与速度的关系

Fig. 10 Relationship between mass-to-power ratio and speed

最后达到的平衡速度不同; $80 \text{ kg} \cdot \text{kW}^{-1}$ 的质量功率比的曲线呈现上升趋势,说明此质量功率比的平衡速度大于所设定的初始速度 ($75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$),其余呈下降趋势,说明其余质量功率比的车辆的平衡速度低于给定的初始速度,而且质量功率比越大,平衡速度越低,随着质量功率比的增大,速度的降低幅度有所减小。

质量功率比的值越大,说明车辆单位功率所负担的质量越大,车辆在受力时重力越大,坡度阻力和滚动阻力越大,驱动力相对变小,加速度变小,相应的爬坡过程就会变的越困难,速度降得就越低,所以在选择主导车型的质量功率比时,选取85%位的值,这样路段内85%的车辆质量功率比在主导车型以下,即85%的车辆爬坡能力都优于所选主导车型。

3.4 初始速度对运行速度的影响

在分析初始速度对车辆运行速度的影响时,选取初始速度分别为 $0, 20, 40, 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 车型选用所确定的主导车型,载质量为 49 t , 平均纵坡为 3% , 得出不同初始速度达到平衡速度前的速度变化特征,见图11。

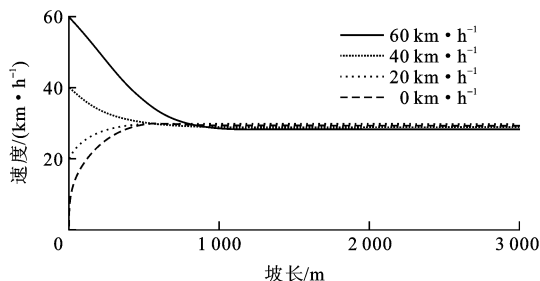


图11 初始速度与运行速度的关系

Fig. 11 Relationship between initial speed and operating speed

由图11可以看出,不同的初始速度进入同一段纵坡后,其速度变化规律不同。不同初始速度的车辆最后都会达到一个平衡速度,当初始速度高于平衡速度时,汽车处于减速状态;当初始速度低于平衡速度时,车辆会先加速到平衡速度,然后保持平衡速

度不变。车辆加速的时候要比减速的时候更快达到平衡速度。

车辆在坡道上行驶,所受到的力有驱动力、坡道阻力、滚动阻力、空气阻力,前2个力不会随速度变化,后2个力都与速度有关,在其他条件一定时,最后会达到受力平衡,稳定在某个速度值。加速状态与减速状态的加速度分别为

$$a_1 = \frac{F - R_g - R_r - R_a}{M}$$

$$a_2 = \frac{R_g + R_r + R_a - F}{M}$$

已知 $F > R_g$, 则 $|a_1| > |a_2|$, 所以车辆在加速过程中的速度变化比减速过程中的速度变化要快。

4 结 语

(1)运用对货车进行称重,记录其额定功率的方法,统计载重车辆质量功率比。选取85%位的质量功率比作为主导车型的质量功率比,由统计数据确定出内蒙古地区运煤高速公路主导车型。

(2)得出不同坡度、坡长、载质量、质量功率比和初始速度条件下载重车辆运行速度变化特征:载重车辆在一定坡道上行驶,随着入坡距离增加,速度逐渐降低,当达到平衡速度之后,速度不再随坡长的增加而降低;车辆在不同纵坡路段行驶,速度呈下降趋势,坡度越大,速度降低越快,最后达到的平衡速度越小;车辆载质量越大,速度下降越快,随着载质量继续增大,速度下降趋势变缓;质量功率比越小,车辆爬坡性能越好;初始速度越高,车辆达到平衡速度所行驶的距离越长。

(3)本文研究结论对于道路设计者和管理部门具有现实指导意义,如根据不同坡度、坡长、载质量、质量功率比和初始速度条件下速度的变化曲线,可以限定在特定坡度、坡长条件下车辆的载质量,以保证车辆运行速度不致降低过大,从而影响道路通行能力及道路安全,这也是需要进一步研究的工作。

参考文献:

References:

- [1] 陈荫三,李彬,肖润谋. 2010年中国高速公路网运输状态[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 68-73.
CHEN Yin-san, LI Bin, XIAO Run-mou. Transportation status of Chinese expressway network in 2010[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6): 68-73. (in Chinese)

- [2] 杨少伟,许金良,李伟,等. 路线设计中车辆行驶速度预测模

(下转第35页)

- 9(2): 66-73. (in Chinese)
- [9] LIU Tang-hong, ZHANG Jie. Effect of landform on aerodynamic performance of high-speed trains in cutting under cross wind[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(3): 830-836.
- [10] 周丹,田红旗,鲁寨军.大风对路堤上运行的客运列车气动性能的影响[J].交通运输工程学报,2007,7(4):6-9.
ZHOU Dan, TIAN Hong-qi, LU Zhai-jun. Influence of strong crosswind on aerodynamic performance of passenger train running on embankment[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 6-9. (in Chinese)
- [11] 高广军,段丽丽.单线路堤上挡风墙高度研究[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(1):254-259.
GAO Guang-jun, DUAN Li-li. Height of wind barrier on embankment of single railway line[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(1): 254-259. (in Chinese)
- [12] 李燕飞,田红旗,刘辉.高速铁路开孔式挡风墙外形优化研究[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(10):3207-3212.
- LI Yan-fei, TIAN Hong-qi, LIU Hui. Optimization of windbreak wall with holes in high-speed railway[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(10): 3207-3212. (in Chinese)
- [13] 田红旗.中国列车空气动力学研究进展[J].交通运输工程学报,2006,6(1):1-9.
TIAN Hong-qi. Study evolvement of train aerodynamics in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 1-9. (in Chinese)
- [14] 高广军,田红旗,姚松,等.兰新线强横风对车辆倾覆稳定性的影响[J].铁道学报,2004,26(4):36-40.
GAO Guang-jun, TIAN Hong-qi, YAO Song, et al. Effect of strong cross-wind on the stability of trains running on the Lanzhou-Xinjiang railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(4): 36-40. (in Chinese)
- [15] CARRARINI A. Reliability based analysis of the crosswind stability of railway vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(7): 493-509.
- ~~~~~
- (上接第19页)
- 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. (in Chinese)
- [3] 钟小明,元海英,荣建,等.用于路线设计的小客车速度模型研究[J].北京工业大学学报,2005,31(2):155-160.
ZHONG Xiao-ming, YUAN Hai-ying, RONG Jian, et al. Research on operating speed models of free-flowing passenger car for alignment design of highway[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2005, 31(2): 155-160. (in Chinese)
- [4] 孟宪强,边成友,李一微,等.高速公路纵坡上的中型车自由流运行速度模型[J].长江大学学报:自然科学版,2006,3(2):100-102.
MENG Xian-qiang, BIAN Cheng-you, LI Yi-wei, et al. A model of free flow operation speed of mid-duty trucks on highway gradient[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2006, 3(2): 100-102. (in Chinese)
- [5] 王林,杨帆,雷明臣.高等级公路运行速度调查与分析[J].黑龙江交通科技,2009(7):193-194,196.
WANG Lin, YANG Fan, LEI Ming-chen. Investigation and analysis of highway speed[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2009(7): 193-194, 196. (in Chinese)
- [6] 汪双杰,方靖,周荣贵,等.公路运行速度特征研究[J].中国公路学报,2010,23(增):24-27,46.
WANG Shuang-jie, FANG Jing, ZHOU Rong-gui, et al. Research on operating speed characteristics of highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(S): 24-27, 46. (in Chinese)
- [7] 贺玉龙,汪双杰,孙小端,等.中美公路运行速度与交通安全相关性对比研究[J].中国公路学报,2010,23(增):73-78.
HE Yu-long, WANG Shuang-jie, SUN Xiao-duan, et al. Operating speed and highway safety in China and the United States[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(S): 73-78. (in Chinese)
- [8] JESSEN D R, SCHURR K S, MCCOY P T, et al. Operating speed prediction on crest vertical curves of rural two-lane highways in Nebraska[J]. Transportation Research Record, 2001(1751): 67-75.
- [9] MISAGHI P, HASSAN Y. Modeling operating speed and speed differential on two-lane rural roads[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(6): 408-418.
- [10] 孟祥海,关志强,郑来.基于几何线形指标的山区高速公路安全性评价[J].中国公路学报,2011,24(2):103-108.
MENG Xiang-hai, GUAN Zhi-qiang, ZHENG Lai. Safety evaluation of mountainous expressway based on geometric alignment indexes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 103-108. (in Chinese)
- [11] 杨宏志,许金良.基于卡车性能的道路纵坡运行速度预测仿真软件[CP/DK].北京:北京凯迈乐知识产权代理有限公司,2012.
YANG Hong-zhi, XU Jin-liang. Longitudinal slope road running speed prediction software based on truck performance simulation[CP/DK]. Beijing: Beijing Kaimale IP Agent Co., Ltd., 2012. (in Chinese)