

文章编号:1671-8879(2014)03-0023-05

长大纵坡路段重型车辆爬坡速度

董忠红¹,倪凤英¹,柳帅蒙¹,刘 学²

(1. 长安大学 道路施工与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 江苏华通动力重工有限公司,江苏 镇江 212003)

摘 要:为了确定合理的坡度和坡长,建立了适宜于长大纵坡路段特点的重型车辆动力学模型。模型中的轮胎和悬架既能够承受垂向荷载作用,也可以承受沿坡道方向的水平荷载作用;利用发动机的转矩特性和动力传递系统的挡位转换关系,研究了重型车辆爬坡过程中的速度变化规律,分析了轴载、入坡速度、坡度和坡长等因素对车辆爬坡速度的影响。研究结果表明:爬坡过程中,车辆驱动力矩变化复杂,而车辆速度呈单调下降状态;当坡长足够长时,总存在某一稳定速度,坡度越大、轴重越高,车速下降越快,稳定速度就越小;入坡速度对稳定速度没有影响,但入坡速度越高,稳定坡长越大。在分析爬坡速度影响规律基础上,提出了坡度和坡长设计控制指标,建立了合理坡度与坡长的函数模型,可供山区公路路线设计参考。

关键词:道路工程;长大纵坡;重型车辆;坡度;坡长;车速

中图分类号:U412

文献标志码:A

Heavy truck climbing speed on long and steep longitudinal slope section

DONG Zhong-hong¹, NI Feng-ying¹, LIU Shuai-meng¹, LIU Xue²

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Jiangsu Huatong Kinetics Co Ltd,

Zhenjiang 212003, Jiangsu, China)

Abstract: To determine the reasonable grade and grade length, a dynamic heavy truck model was set up, which could be suitable to the characteristics of steep and long longitudinal slope. The tire and suspension could bear forces not only in the vertical direction but also in the horizontal direction along slope. With consideration of the torque characteristics of the engine and the stall conversion relationship of the power transmission system, the speed variation during the heavy truck climbing process was studied. The influences of axle load, entrance speed, grade and grade length on the truck speed were analyzed. The results show that the change of the heavy truck drive torque is quite complex during the climbing process, but the speed is always in decline. If the grade length is long enough, there is always a steady speed. With the increase of grade and axle load, the decline of the speed will be faster, and the steady speed will be lower. The entrance speed has no influence on the steady speed, but with the increase of the entrance speed, the steady length will be longer. Based on the above analysis, the control indicators

收稿日期:2013-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51008030);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC100,CHD2011ZD001)

作者简介:董忠红(1975-),男,河南开封人,副教授,工学博士,E-mail:dzhong@chd.edu.cn.

of grade and grade length are put forward, and then a function model on the relationship between grade and grade length is built up. The results can provide reference for route design of highway in mountain area. 9 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; long and steep longitudinal slope; heavy truck; grade; grade length; vehicle speed

0 引言

随着高速公路建设的重心向山岭重丘区转移,近些年来修筑了大量坡度较大、坡长较长的长大纵坡路段。目前,这些路段出现了严重的早期破坏现象,许多在平整路段使用效果良好的路面结构,在该类路段却过早地出现了大量的车辙和滑移破坏现象,这与其承受的荷载特点具有直接关系。李明国等研究发现,重型车辆爬坡过程中速度的大幅下降是引起长大纵坡路段出现早期破坏的关键原因^[1]。而影响重型车辆爬坡过程中速度下降规律的因素,除车辆本身因素外,主要是纵坡的坡度和坡长,因此,确定合理的坡度与坡长是延长长大纵坡路段路面使用寿命,改善道路服务能力的有效途径。另一方面,为了缩短道路里程,减小工程投资规模和自然环境破坏程度,提高安全性和公路通行能力,进行路线设计时,也需要考虑确定合理的坡度和坡长。

国内外学者已对车辆爬坡过程中的速度特性进行了大量研究。周荣贵等采用现场调查方法提出了纵坡路段车辆速度预估模型^[2-3];符铎等采用坡道上汽车平衡方程,研究了车辆爬坡性能^[4-5]。实际车辆在爬坡过程中,发动机输出扭矩不断变化,尤其是坡度比较大,坡长比较长的情况下,时常需要多次换挡。而且,车辆与路面之间的接触关系以及车辆振动,对其爬坡过程也产生严重影响。现有研究没有考虑这些因素对车辆爬坡过程中速度变化的影响。

为此,本文基于系统动力学理论,建立了适合长大纵坡路段特点的重型车辆动力学模型;选择典型重型车辆,研究车辆爬坡过程,提出合理的坡度与坡长设计限制指标,建立限制指标之间的函数关系模型,为山区路线设计提供理论依据。

1 重型车辆动力学模型

1.1 长大纵坡路段的荷载特性

需要建立的车辆动力学模型,应与长大纵坡路段的荷载特性相适应,与普通路段比较,其突出特点表现为:①既有垂直于路面的垂向荷载,又有沿坡道方向的水平荷载,部分弯道位置还有侧向水平荷载;

②荷载大小既受车辆载重影响,还受路面状况影响,也与车辆的垂直和水平振动有关;③车辆爬坡过程中,时常需要换挡,不同挡位牵引荷载差异严重,同一挡位下牵引荷载也不是定值。

1.2 重型车辆模型的建立

综合考虑长大纵坡路段的特点,采用虚拟样机技术,利用国际通用的虚拟仿真软件——ADAMS 软件,建立图 1 所示的 7 自由度的 1/2 车辆动力学模型。

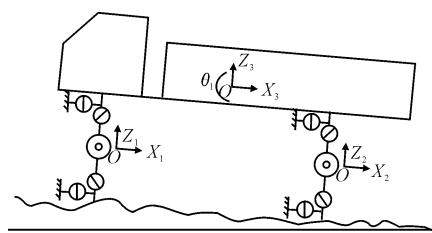


图 1 车辆动力学模型

Fig. 1 Dynamic heavy truck model

车辆模型中自由度包括簧下质量的垂向振动和水平振动、簧上质量的垂向振动与水平振动以及俯仰振动,共 7 个自由度。

采用纯解析解模型——UA 模型模拟重型车辆的充气橡胶轮胎,主要参数包括垂向刚度、垂向阻尼、纵向滑移刚度、滚动摩擦因数、滑动摩擦因数等参数^[6]。该轮胎模型考虑了轮胎与路面之间的纵向和侧向松弛效应,可以承受垂向荷载和水平荷载的联合作用,适合于长大纵坡路段的荷载特征。

采用 3 连杆 SAE 法模拟重型车辆的悬架机构^[7]。钢板弹簧主叶片采用 3 个长度不同的连杆模拟,与吊耳构成具有 2 个自由度的 4 连杆机构。连杆之间采用扭转弹簧连接,模拟钢板弹簧的刚度。悬架模型同样既可以承受垂向荷载作用,也可以承受水平荷载作用。

1.3 发动机外特性与换挡

车辆爬坡过程中,既受到发动机的驱动作用,也受到坡道方向的阻力作用,驱动力小于阻力时,车辆减速,发动机转速下降。转速下降到一定程度,需要通过换挡,增加发动机输出扭矩,抵抗外界阻力作用。

下页图 2 为本文采用的带有调速器的柴油发动机输出转矩特性曲线,呈倒 U 型,表示发动机转速与

输出扭矩的关系。车辆爬坡过程中,输出扭矩与车速按该曲线表示的函数关系动态变化。在所建立的车辆模型中,施加以该函数关系表示的动态驱动力矩。

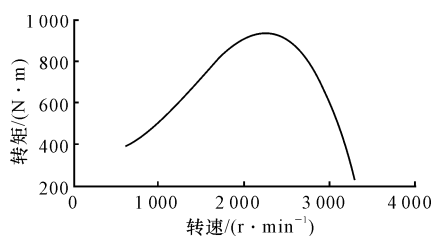


图 2 发动机输出转矩特性曲线

Fig. 2 Engine output torque curve

正常情况下,发动机工作在最大输出转矩的转速,燃油经济性最佳。但当输出转矩难以克服车辆承受的阻力时,发动机转速下降,车速降低,发动机工作点向左侧移动,进而换挡,改变传动比,提高输出力矩,增大发动机转速。不同挡位下车辆的驱动力矩如图 3 所示。

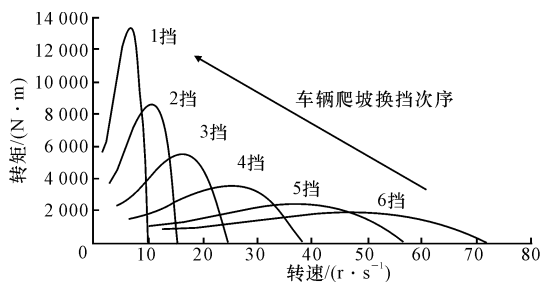


图 3 各挡位的车辆驱动力矩

Fig. 3 Truck drive torques at different shifts

2 车辆速度特性

以中国典型货车东风 EQ1108G 为例,分析车辆爬坡过程中的速度变化规律^[8]。其主要动力学模型相关参数如下所述。

(1)采用 EQ1108G6DJ16 载货汽车底盘;整备质量 4 570 kg,质心距后桥 2.048 m;车身总长 7.22 m,货箱总长 4.8 m,后悬 2.02 m,载质量质心设定于货箱中部;前后桥轴距 3.95 m;采用 A130 型 6 档变速器,除倒挡外各挡位传动比分别为 5.606、3.627、2.313、1.487、1、0.79,主减速器速比 6.33。

(2)采用 9.00R20 普通钢丝子午线轮胎,轮胎自由半径 509.5 mm,宽度 239 mm,胎压 700 kPa,垂向刚度 1 003.4 N/mm,垂向阻尼 3 000 N·s/m,纵向滑移刚度 76 026.11 N/mm,滚动摩擦因数 0.012、滑动摩擦因数 0.9。

(3)前悬架采用半椭圆形钢板弹簧,规格 1 350×75×11-1/10-8。后悬架采用二级复式钢板弹簧,主副

簧均为半椭圆形钢板弹簧,规格分别为 1 450×75×11-12 和 1 000×75×9-9。基于等刚度原理,根据 3 连杆 SAE 计算方法,前悬架采用长度分别为 468.75、412.5、468.75 mm 的 3 连杆结构模拟,连杆间的等效扭转弹簧刚度为 4.01×10^4 N·m/rad。后悬架采用长度分别为 506.25、437.50、506.25 mm 的 3 连杆模拟,等效扭转弹簧刚度为 7.73×10^4 N·m/rad。

模型中主要考虑货物及车辆自重等重力荷载、牵引荷载与风载,摩擦阻力和坡道阻力视为车辆与纵坡组成系统的内部荷载。车辆牵引荷载根据发动机外特性和传动比确定,风载是车辆速度的函数,根据文献[9]计算确定方法,以反馈阻力模式施加于动力学模型中。

2.1 坡度和坡长对爬坡速度的影响

参考《公路路线设计规范》(JTG D20—2006)的相关规定,研究坡度从 1%~7% 等 7 个坡度等级下,车辆爬坡过程中的速度变化。设定后桥轴重为双胎标准轴载 100 kN,入坡速度为 80 km/h。图 4、图 5 为不同坡度的车辆爬坡速度和驱动力矩。

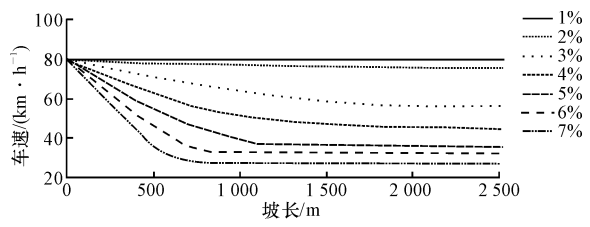


图 4 不同坡度的车辆爬坡速度

Fig. 4 Climbing speeds under different grades

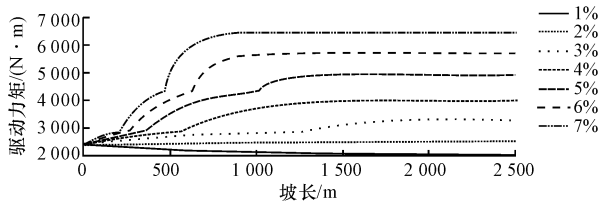


图 5 不同坡度的车辆驱动力矩

Fig. 5 Drive torques under different grades

由图 4、图 5 可得如下结论。

(1)对于坡度较小的 1% 坡度,车辆爬坡过程中速度不变,匀速行驶。原因在于该情况下坡道阻力较小,在最高挡位下发动机驱动力矩能够克服坡道阻力,实际交通中,发动机油门不必开到最大。

(2)对于坡度大于 1% 的各种坡度,车辆速度呈单调下降趋势,即使在换挡瞬间,也不存在瞬时加速现象,坡度越大,速度下降越快。

(3)车辆驱动力矩变化比较复杂,1% 和 2% 的小坡度情况下,不需要换挡,车辆驱动力矩基本不

变;坡度超过 2%后,需要换挡,在换挡瞬间,驱动力矩迅速上升。

(4)大于 1%的各种坡度,车辆最后均达到 1 个稳定速度,随着坡度的增加,稳定速度减小,达到稳定速度的稳定坡长也减小;6%坡度的稳定速度和稳定坡长分别为 3%坡度的 58.4%和 47.8%。

2.2 轴重对爬坡速度的影响

为研究轴重对长大纵坡路段车辆速度特性的影响,以后桥轴重为控制指标,选取后桥轴重为 65.7、100、130、160、200 kN 这 5 个轴重等级进行分析。设定纵坡坡度为 4%,爬坡长度为 2 500 m,入坡速度为 80 km/h。图 6 为不同轴重等级下车辆爬坡的车速变化。

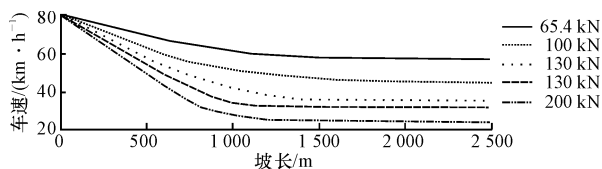


图 6 不同轴重的车辆爬坡速度

Fig. 6 Climbing speeds under different axle loads

由图 6 可知,轴重对车辆爬坡速度影响严重,随着爬坡长度的增加,重型车辆的车速均有一定的下降,轴重越大,车速下降越快。以爬坡 500 m 为例,对于后桥轴重为 100 kN 的标准轴载下,车速从 80 km/h 下降到 63 km/h,下降了 17 km/h。而轴重为 200 kN 时,车速下降到 50 km/h,下降了 30 km/h,为标准轴重下的 1.76 倍。车速降低导致路面受到车辆荷载作用时间延长,重载低速状态下,加速了沥青混合料的流动变形,形成车辙。这正是长大纵坡路段,尤其是坡顶位置易于形成车辙的原因。因此,在山岭重丘区,更应该严格控制超载运输现象。

2.3 入坡速度对爬坡速度的影响

选择坡度为 4%、后桥轴重为 100 kN 的标准轴载下,研究入坡速度对车辆爬坡速度的影响。图 7 为入坡速度分别为 40、50、60、70、80、90、100 km/h 时,车速随坡道位置的变化。

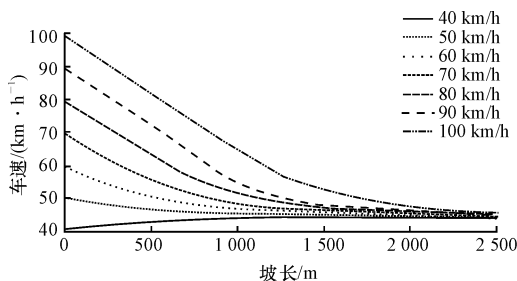


图 7 不同入坡速度的车辆爬坡速度

Fig. 7 Climbing speeds under different entrance speeds

由图 7 可知:①不同入坡速度下,最终稳定速度相同,说明入坡速度对稳定速度没有影响;②速度为 40 km/h 时,存在加速爬坡现象,主要原因在于入坡速度小于稳定速度;③速度下降部分的曲线基本平行,但达到稳定速度时的爬坡长度差异较大,因此入坡速度不影响车速下降速度和稳定速度,仅影响稳定坡长,这正是上坡前,货车司机需要加速冲坡的原因。

2.4 坡度坡长限制指标的确定

最大纵坡坡度和最大坡长是长大纵坡路段路线设计的重要参数。确定合理的坡度和坡长是平衡施工成本、保护环境和提高车辆通行能力的核心工作。确保重载货车不影响其他车辆的运行,不对跟随车辆产生干扰,是确定合理坡度和坡长的基本原则。常常通过确定允许最小车速来确定合理的坡度与坡长。

对于允许最小车速,目前缺乏一个广泛接受的良好准则,根据国内外经验,一般选取设计速度的 50%~60%。山区公路沿线地形地貌复杂,设计速度偏低,中国比较常用的山区高速公路设计速度为 80 km/h。因此,易于将 40~48 km/h 作为允许最小速度。另外,笔者研究发现,车辆速度小于 45 km/h 时,随着车速的降低,路面动力响应迅速增加,对路面的破坏作用加剧^[10]。因此,综合考虑车辆通行能力和路面力学性能,以 45 km/h 作为允许最小车速,研究确定合理的坡度和坡长设计控制指标。

由前面分析可知,入坡速度和轴重对车辆爬坡速度也有严重影响,为提高本文研究的应用价值,以山区高速公路中单后桥货车的平均运行速度作为入坡速度,经广泛调查,这里取具有代表性的 60 km/h 作为入坡速度。轴重设定为标准轴载 100 kN。

本文采用的东风 EQ1108G 车辆,功率质量比为 12.33 kW/t,额定载质量为 5 t,以其性能为基础确定的合理坡度与坡长,具有良好的应用价值。

下页图 8 给出了各个坡度下的车辆爬坡速度。下页图 9 给出了坡度与最大坡长之间的关系。

为便于推广应用,采用麦夸特法(Levenberg-Marguardt)对坡度与最大坡长进行函数拟合,得到二者函数关系为

$$y = \frac{1}{-2.4366x^2 + 0.4358x - 0.0129} \quad (1)$$

式中: x 为坡度值(%); y 为最大坡长(m)。

需要说明的是,该函数仅适合于确定坡度大于 4%的纵坡所对应的坡长;坡度小于 4%时,仅从车

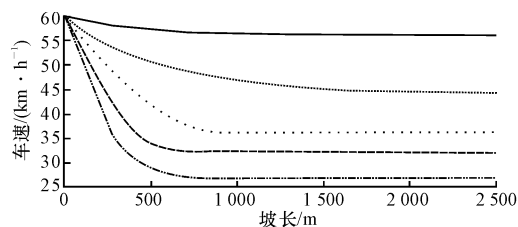


图8 不同坡度的车辆爬坡速度

Fig. 8 Climbing speeds under different grades

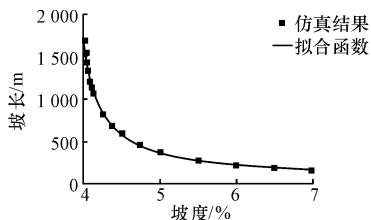


图9 坡度与最大坡长的关系

Fig. 9 Relationship between grade and maximum grade length

辆通过性而言,不需要限制坡长。

3 结 语

(1)建立了适合于长大纵坡路段特点的重型车辆动力学模型,该车辆模型既可分析车辆垂向振动,也可分析水平振动,适于研究长大纵坡路段的车辆荷载特性。

(2)坡度和轴重对车辆爬坡速度影响严重,坡度越大、轴重越高、车辆稳定速度越低、稳定坡长越小,则车辆爬坡速度下降越快。

(3)入坡速度对稳定速度和车辆速度下降影响较小,但对稳定坡长影响较大;入坡速度越高,稳定坡长越长。

(4)坡度小于4%时,可以无限制坡长;坡度大于4%时,最大允许坡长可由式(1)确定。

参考文献:

References:

[1] 李明国,牛晓霞,申爱琴.山区高速公路沥青路面的抗车辙能力[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(6):19-22.
LI Ming-guo, NIU Xiao-xia, SHEN Ai-qin. Anti-rut ability of asphalt pavement on mountain freeway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 19-22. (in Chinese)

[2] 周荣贵,江立生,孙家风.公路纵坡坡度和坡长限制指标的确定[J].公路交通科技,2004,21(7):1-4.
ZHOU Rong-gui, JIANG Li-sheng, SUN Jia-feng. The study of highway gradient and grade length limit

[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(7): 1-4. (in Chinese)

[3] 许金良,叶亚丽,苏英平,等.双车道二级公路纵坡段车辆运行速度预测模型[J].中国公路学报,2008,21(6):31-36.
XU Jin-liang, YE Ya-li, SU Ying-ping, et al. Operating speed prediction model on gradient section for two-lane secondary highway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 31-36. (in Chinese)

[4] 符铎,高捷.高速公路纵坡路段货车运行车速预测[J].公路交通科技,2008,25(6):139-143.
FU Xin-sha, GAO Jie. Operating speed predicting model for trucks on freeway's longitudinal slope section[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 139-143. (in Chinese)

[5] 庄传仪,赵一飞,潘兵宏,等.公路纵坡设计关键参数研究[J].中国公路学报,2009,22(4):39-44.
ZHUANG Chuan-yi, ZHAO Yi-fei, PAN Bing-hong, et al. Research on the key design parameter of highway longitudinal slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 39-44. (in Chinese)

[6] 陈军. MSC, ADAMS 技术与工程分析实例[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
CHEN Jun. MSS, ADAMS technical and engineering examples[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese)

[7] 朱毅杰.重型卡车两种悬架模型的开发与仿真[D].长春:吉林大学,2009.
ZHU Yi-jie. Development and simulation of two suspension models for heavy truck[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)

[8] 吴定才.东风EQ1108G、EQ1141G汽车结构与使用维修[M].北京:人民交通出版社,2001.
WU Ding-cai. Structure and maintenance of Dongfeng EQ1108G and EQ1141G[M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)

[9] 郭正康.现代汽车列车设计与使用[M].北京:北京理工大学出版社,2006.
GUO Zheng-kang. Design and application of modern trailer truck[M]. Beijing: Beijing Institute of Press, 2006. (in Chinese)

[10] 董忠红,吕彭民.轴载与速度对半刚性沥青路面动力响应的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(1):32-36.
DONG Zhong-hong, LU Peng-min. Influence of axle load and speed on dynamic response of semi-rigid base of asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 32-36. (in Chinese)

