

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.002

基于东风天龙牵引车爬坡能力的公路纵坡及坡长分析

陈旭^{1,2}, 吴瑞麟², 邓海龙³, 许天会³(1. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院;
3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司)

摘要:该文选取东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)作为目标车型,计算其在海平面高程下满载和超载时的动力因数以及爬坡的最大坡长限制值,发现目标车型的实际爬坡性能与中国现行的公路纵断面设计标准相差较大。当纵坡较大时,规范中规定的最大坡长限制值已经远远超过了目标车型所能爬上的坡道长度;而当道路纵坡较小时,若车辆入坡速度较大,即使货车超载,目标车型的爬坡能力也能较好地适应规范的要求。

关键词: 道路工程; 动力因数; 最大纵坡; 最大坡长; 超载

1 研究背景

基于“武汉市城市出入口道路及干线公路网发展研究项目”(WHJT-CZH-2016-1C178)。在项目调研过程中,发现部分城镇化地区公路上大型铰接列车在坡度较大的上坡路段对道路通行能力的不利影响比较突出,该文因此针对大型铰接列车的爬坡动力性能问题进行研究。城镇化地区公路是连接主城区城市道路与外围公路的出入口道路,作为公路的同时兼具有部分城市道路属性,是城市对外客货运交通的重要走廊,其交通流量大且交通组成中大型货车占比较高,部分道路运营过程中出现在上坡路段因重载货车动力性能不足,爬坡速度较慢,从而产生移动交通瓶颈的现象。相关研究表明:货车低速行驶产生的交通移动瓶颈对道路的通行能力、服务水平及行车安全均会产生不同程度的影响。因此针对中国当前载重货车的爬坡性能对纵坡坡度及坡长设计指标进行研究很有必要。

公路纵坡和坡长是公路纵断面设计中非常重要和关键的一部分,对公路里程长短、工程规模的大小、公路的行车安全、通行能力以及驾驶员行车舒适度都有非常重要的影响。然而,现行的JTG B01—2014《公路工程技术标准》以及JTG D20—2017《公路路线设计规范》中关于纵坡坡度及坡长限制设计标准相关规定的主要依据车型是东风EQ140。随着中国汽车行业

的不断发展,目前中国高速公路上的主流货运车型为六轴铰接列车,其无论是载货质量还是发动机性能都与东风EQ140货车有较大差别。因此,目前中国公路纵断面设计的相关标准能否较好地指导相关设计人员对道路竖曲线进行最优化设计存在疑问,当前公路纵坡设计标准依据的标准车型与公路上实际运行车型存在的差异,是否是导致部分公路纵坡上货车低速行驶产生交通移动瓶颈的原因也值得探究。据此,该文选取当前高速公路常见的六轴铰接列车作为研究目标,对其爬坡能力进行研究。

2 汽车动力特性分析

2.1 目标车型选取

选取东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)作为研究车型,通过与生产商联系,获得目标车型及其发动机技术参数如表1、2所示。

2.2 动力因数分析

汽车动力因数是指汽车在海平面高程上,满载情况下,每单位车重克服道路阻力和惯性阻力的性能。该值可以较为直观地反映汽车的爬坡性能。根据文献[4],汽车动力因数 D 的计算方法如式(1)所示:

$$D = \frac{UM\gamma\eta_T}{r \cdot G} - \frac{KAv^2}{21.15G} = \frac{U\gamma\eta_T}{rG} \left[M_{\max} - \frac{M_{\max} - M_N}{(n_N - n_M)^2} \left(n_M - \frac{v\gamma}{0.377r} \right)^2 \right] - \frac{KAv^2}{21.15G} \quad (1)$$

收稿日期:2020-05-02(修改稿)

基金项目:武汉市城市出入口道路及干线公路网发展研究项目(编号:WHJT-CZH-2016-1C178)

作者简介:陈旭,男,硕士研究生. E-mail:1666916307@qq.com

表 1 东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)发动机技术参数

最大扭矩 $M_{\max}/$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	最大功率扭 矩 $M_N/$ ($\text{N}\cdot\text{m}$)	最大扭矩所对 应的转速 $n_M/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	最大功率所对 应的转速 $n_N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	工作轮 半径 r/m	空气阻 力系数 K	汽车迎 风面积 A/m^2
2 460	1 922	1 200	1 900	0.515	0.8	9.425
负荷率 U	汽车满载 重量 G/N	传动器速比 i_0	传动系统的 机械效率 η_T	汽车车轮惯性 力影响系数 δ_1	发动机飞轮惯性 力影响系数 δ_2	
0.85	48 800	3.42	0.85	0.04	0.05	

表 2 东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)各档位变速比

档位	变速比 i_k	档位	变速比 i_k
I	12.1	VII	2.71
II	9.41	VIII	2.11
III	7.31	IX	1.64
IV	5.71	X	1.28
V	4.46	XI	1.00
VI	3.48	XII	0.78

式中: M 、 M_{\max} 、 M_N 分别为发动机曲轴扭矩、最大扭矩、最大功率所对应的扭矩; n_N 、 n_M 分别为发动机最大功率所对应的转速、最大扭矩所对应的转速; U 为负荷率; γ 为总变速比; η_T 为传动系统的机械效率; r 为车轮工作半径,取未变形半径的 0.95 倍; v 为汽车行驶速度; K 为空气阻力系数; A 为汽车迎风面积; G 为汽车满载时的总重力。

由式(1)可知:汽车动力因数 D 是关于速度 v 的二次函数。则式(1)可写为:

$$D=Pv^2+Qv+W$$

(2)

式中:

$$P=-\frac{1}{G}\left[\frac{7.036U\gamma^3\eta_T(M_{\max}-M_N)}{r^3(n_N-n_M)^2}+\frac{KA}{21.15}\right]$$

(3)

$$Q=\frac{5.305U\gamma^2\eta_Tn_M}{r^2G(n_N-n_M)^2}(M_{\max}-M_N)$$

(4)

$$W=\frac{U\gamma\eta_T}{rG}\left[M_{\max}-\frac{M_{\max}-M_N}{(n_N-n_M)^2n_M^2}\right]$$

(5)

根据表 1、2 中的参数及式(3)~(5),可以分别求得东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)满载时在海平面高程上采用不同档位行驶时的 P 、 Q 、 W 数值,如表 3 所示。

表 3 东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)不同档位下的 P 、 Q 、 W 值

档位	γ	P	Q	W
I	41.382 0	$-6.055\ 8\times10^{-3}$	$6.817\ 9\times10^{-2}$	$1.067\ 0\times10^{-1}$
II	32.182 2	$-2.848\ 7\times10^{-3}$	$4.123\ 5\times10^{-2}$	$8.297\ 7\times10^{-2}$
III	25.000 2	$-1.335\ 8\times10^{-3}$	$2.488\ 4\times10^{-2}$	$6.445\ 9\times10^{-2}$
IV	19.528 2	$-6.370\ 6\times10^{-4}$	$1.518\ 3\times10^{-2}$	$5.035\ 1\times10^{-2}$
V	15.253 2	$-3.039\ 7\times10^{-4}$	$9.263\ 0\times10^{-3}$	$3.932\ 8\times10^{-2}$
VI	11.901 6	$-1.447\ 9\times10^{-4}$	$5.639\ 5\times10^{-3}$	$3.068\ 7\times10^{-2}$
VII	9.268 2	$-6.877\ 0\times10^{-5}$	$3.420\ 0\times10^{-3}$	$2.389\ 7\times10^{-2}$
VIII	7.216 2	$-3.285\ 3\times10^{-5}$	$2.073\ 2\times10^{-3}$	$1.860\ 6\times10^{-2}$
IX	5.608 8	$-1.582\ 2\times10^{-5}$	$1.252\ 5\times10^{-3}$	$1.446\ 1\times10^{-2}$
X	4.377 6	$-7.913\ 3\times10^{-6}$	$7.629\ 6\times10^{-4}$	$1.128\ 7\times10^{-2}$
XI	3.420 0	$-4.163\ 4\times10^{-6}$	$4.656\ 7\times10^{-4}$	$8.818\ 0\times10^{-3}$
XII	2.667 6	$-2.367\ 4\times10^{-6}$	$2.833\ 2\times10^{-4}$	$6.878\ 0\times10^{-3}$

2.3 目标车型外特性曲线计算

汽车行驶时每一档位都存在各自的最大动力因数 D_{\max} ,而与之对应的行车速度称为临界速度,用 v_k 表示。在这一档位上,当汽车行驶速度大于 v_k 时,若道路阻力增加(如道路局部纵坡增大、路面出现坑洼或松

软等),汽车可以在原档位降低车速以获得较大的 D 值来克服道路阻力,待阻力减小时可立即提高到原来的速度行驶;当汽车行驶速度小于 v_k 时,若道路阻力增加,汽车减速行驶而 D 值随之减小,此时不换档或开大节流阀,汽车将因发动机熄火而停止。因此,临界

速度 v_k 是汽车稳定行驶的极限速度,汽车通常都会采用大于该档临界速度 v_k 的车速作为行驶速度,并在车速降至 v_k 时换抵档行驶。

汽车不同档位临界速度可由式(6)计算:

$$v_k = -\frac{Q}{2P} \tag{6}$$

同时,汽车在不同档位下行驶的最高速度可由式(7)计算:

$$v_{\max} = \frac{0.377rn_{\max}}{\gamma} \tag{7}$$

根据式(6)、(7)可以计算得到东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)在不同档位下的临界速度及最高速度,结果如表 4 所示。

表 4 东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)各档位的
临界速度及最高速度 km/h

档位	v_k	v_{\max}	档位	v_k	v_{\max}
I	5.63	8.91	Ⅶ	24.87	39.80
Ⅱ	7.24	11.46	Ⅷ	31.55	51.12
Ⅲ	9.31	14.76	Ⅸ	39.58	65.77
Ⅳ	11.92	18.89	X	48.21	84.27
V	15.24	24.18	Ⅺ	55.93	107.86
Ⅵ	19.47	31.00	Ⅻ	59.84	110.00

在海平面高程和满载条件下,根据式(2)及表 3、4 所列数据,将计算得到的东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)动力特性数值绘图如图 1 所示。

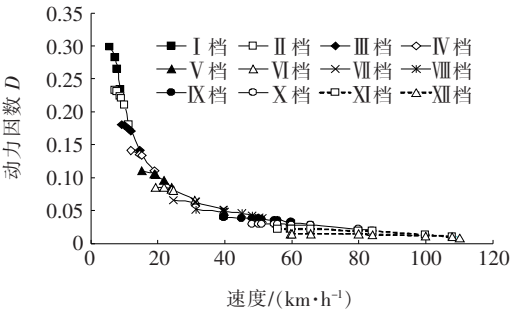


图 1 东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)动力特性图

在实际公路货运过程中,由于盲目追求经济效益等原因,车辆超载情况十分严重。根据河南省高速公路管理部门对 2015 年 5 月省内高速公路超限车辆的调查统计显示,5 月份河南省通行货运车辆 5 908 190 pcu,其中超载 30%以下车辆占比 22.16%,超载 30%~50%车辆占比 4.13%,超载 50%~100%车辆占比 1.33%,由此可见,每年中国超载车辆数目之巨大。因此,作为学术研究,该文还分别对东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)超载 20%、50%、100%时的动力特性进行研究,计算得到不同载重情况下Ⅶ~Ⅺ档动力因数结果如图 2 所示。

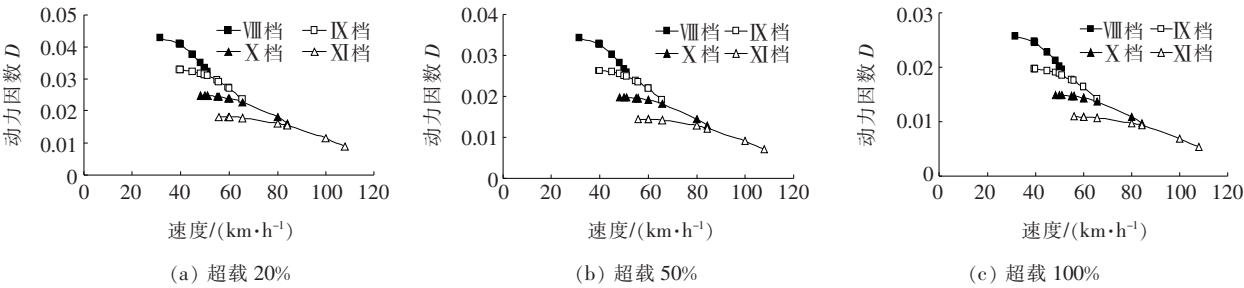


图 2 东风天龙动力因数图

3 最大坡度分析

3.1 理想最大纵坡

理想最大纵坡是指设计车型在油门全开的情况下,持续以希望速度等速行驶所能克服的纵坡。希望速度对小客车为设计速度,对载重车为汽车最大行驶速度。汽车以希望速度等速行驶时所克服的坡度与此时汽车的动力因数的关系可以用式(8)表示:

$$i = \lambda D - f \tag{8}$$

式中: f 为滚动阻力系数,该文取 0.01; i 为道路纵坡;

λ 为海拔荷载修正系数,海平面高程下取 1。

根据图 1 中数据,取设计速度 120 km/h 时东风天龙牵引车希望速度为 110 km/h,其他设计速度时希望速度与设计速度相等,则根据式(8)可以计算得到东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)在海平面高程下不同设计速度的理想最大纵坡如表 5 所示。

3.2 不限长度最大纵坡

不限长度最大纵坡是指设计车型在油门全开情况下,持续以容许速度等速行驶所能克服的纵坡。容许速度一般为设计速度的 1/2~2/3,高速路取低限,低速路取高限。

根据这一原则,按照该文在不同设计速度下所取的容许速度值,以及图2的动力因数和式(8)计算得到的海平面高程下东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)的无限长度最大纵坡值见表6。

表5 理想最大纵坡

设计速度/ (km·h ⁻¹)	希望速度/ (km·h ⁻¹)	目标车型 档位	理想最大纵坡/%			
			满载	超载20%	超载50%	超载100%
120	110	Ⅲ	-0.07	-0.22	-0.38	-0.53
100	100	Ⅱ	0.38	0.15	-0.09	-0.31
80	80	Ⅰ	1.16	0.81	0.44	0.08
60	60	Ⅰ	2.28	1.72	1.19	0.63

注:表中负数表示下坡。

表6 无限长度最大纵坡

设计速度/ (km·h ⁻¹)	容许速度 V ₂ / (km·h ⁻¹)	无限长度最大纵坡/%			
		满载	超载20%	超载50%	超载100%
120	60	2.28	1.72	1.19	0.63
100	55	2.56	1.95	1.38	0.77
80	50	3.00	2.34	1.68	1.01
60	40	3.89	3.08	2.27	1.45

4 最大坡长限制(上坡)分析

公路最大坡长限制分为最大坡长限制(上坡)和最大坡长限制(下坡)两个方面。最大坡长限制(上坡)主要考虑车辆动力性能问题,而最大坡长限制(下坡)则是考虑车辆制动性能涉及的行车安全问题。考虑到篇幅限制,该文在此只分析最大坡长限制(上坡),即汽车进入坡道行驶后从坡底初始车速 V₁ 降低到最低容许速度 V₂ 时所行驶的距离。大货车上坡时,由于受到坡道阻力的作用,其行驶速度会下降,当坡道较长时,其行驶速度会因发动机动力不足而大幅下降,从而产生交通移动瓶颈,对高等级公路而言将会产生交通堵塞,进而带来交通安全隐患,并将影响道路的通行能力及运输经济效益。因此,凡是坡度大于无限长度最大纵坡值的纵坡都应限制其坡道长度。

汽车在纵坡上行驶的最大坡长限制值 S 是关于汽车行驶速度的函数,其相关关系可用式(9)表示:

$$S = \frac{1}{12.96} \int_{v_1}^{v_2} \frac{V}{a} dV = \frac{\delta}{12.96 g \lambda} \cdot \int_{v_1}^{v_2} \frac{dV}{PV^2 + QV + \left(W - \frac{f+i}{\lambda}\right)}$$

(9)

由表5可知:东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)在海平面高程下满载时在平坡上的最大行驶速度为100~110 km/h,综合考虑目标车型的性能以及各等级公路的设计速度限制,分别取目标车型在不同设计速度及载重情况下由平坡道驶入上坡道时的坡底初始车速值如表7所示。

表7 坡底初始车速

设计速度/ (km·h ⁻¹)	坡底初始车速 V ₁ /(km·h ⁻¹)			
	满载	超载20%	超载50%	超载100%
120	100	100	90	80
100	100	100	90	80
80	80	80	80	80
60	60	60	60	60

则根据式(9)可以计算得到东风天龙牵引车(DFH4251AX4AV)在海平面高程下满载时和超载时不同坡度下的最大坡长限制值分别如表8、9所示。由表8可以看出,目标车型的爬坡性能不能满足中国现行的公路规范中关于纵坡的设计要求。特别是对于纵坡较大,设计速度较低的道路,坡度越大,设计速度越低,目标车型的爬坡性能较规范要求的汽车爬坡能力差距越大。

同时,由表8还可知,车辆在坡底的入坡速度对目标车型的爬坡长度影响较大,入坡速度越大,最大坡长限制计算值越大。因此,对于山岭地区的长大纵坡上坡路段可在坡底适当设置一定长度的缓坡、平坡或者反坡作为冲坡路段以便于车辆加速,积蓄动能,有助于大货车爬坡。

对比表8、9可以看出:车辆超载会明显降低车辆的爬坡性能,目标车型所能克服的公路最大坡长计算值随超载程度的增大而减小。特别是对于设计速度较低,纵坡较大的道路,相较于车辆满载情况,车辆超载

表 8 满载情况下不同设计速度时最大坡长限制值

设计速度/ (km·h ⁻¹)	目标车型 档位	不同纵坡坡度(%)时的最大坡长/m							
		3		4		5		6	
		计算值	规范值	计算值	规范值	计算值	规范值	计算值	规范值
120	XI	1 295.3	900	887.9	700	—	—	—	—
100	XI	1 431.1	1 000	965.4	800	729.2	600	—	—
80	X	1 320.4	1 200	741.9	900	517.5	700	397.6	500
60	IX	4 642.4	1 200	715.2	1 000	401.2	800	279.4	600

表 9 超载情况下的最大坡长限制值

设计速度/ (km·h ⁻¹)	超载量/ %	不同纵坡(%)下最大坡长限制值/m			
		3	4	5	6
120	20	1 125.9	797.5	—	—
	50	996.8	730.9	—	—
	100	895.0	674.8	—	—
100	20	1 238.9	875.0	676.7	—
	50	1 093.8	800.5	631.4	—
	100	979.8	738.0	591.9	—
80	20	975.3	621.0	456.0	360.4
	50	776.2	534.5	407.8	329.6
	100	645.8	469.5	368.9	303.8
60	20	1 019.5	481.3	316.1	235.4
	50	601.8	363.9	261.0	203.5
	100	428.9	292.9	222.4	179.3

导致目标车型所能克服的最大坡长计算值明显降低,与目前中国的规范标准值差距明显;而对于设计速度较高,坡度较小的道路,即使目标车型超载达到100%,目标车型所能克服的最大坡长限制值与规范标准值也相差不大,因此对于设计速度较高,坡度较小的道路,货车超载对车辆爬坡能力影响较小,超载车辆爬坡能力基本可以满足规范的爬坡要求,这可能是导致平原地区货车超载现象严重的原因之一。

5 结论

以东风天龙牵引车为例,通过对东风天龙牵引车的动力特性研究,得到以下结论:

(1) 目标车型的爬坡能力不能满足现行规范要

求,且道路纵坡越大,设计速度越低时,目标车型在坡道上的行驶速度降低到道路容许速度时所能克服的道路纵坡长度与规范标准值相差越大。

(2) 坡底入坡速度对目标车型的爬坡能力影响较大,入坡速度越大,最大坡长限制计算值越大。对于山岭地区长大纵坡路段,坡底设置一定长度的冲坡路段有助于大货车更好地适应中国当前公路纵坡设计规范的要求。

(3) 货车超载会明显降低车辆的爬坡性能,减小车辆的爬坡长度,且其对车辆的爬坡性能下降的影响随道路纵坡的减小而减弱。当道路设计速度较高,坡度较小时,即使目标车型超载达100%,其行驶速度降低到道路容许速度时所克服的纵坡长度也与规范标准值相差不大,基本可以满足规范的爬坡要求,这也是平原地区货车超载现象严重的原因之一。

参考文献:

[1] 高学辉,王刚,刘艳忠,等.基于移动瓶颈理论的高速公路重载货车影响效应研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2010(3).

[2] 刘艳忠.高速公路重载货车移动瓶颈理论研究[D].东南大学博士学位论文,2014.

[3] 王凯.基于元胞自动机的高速公路重载货车移动瓶颈研究[D].华中科技大学硕士学位论文,2017.

[4] 吴瑞麟,李亚梅,张先勇.公路勘测设计[M].武汉:华中科技大学出版社,2010.

[5] JTG B01—2014 公路工程技术标准[S].

[6] JTG D20—2017 公路路线设计规范[S].

[7] 刘晨阳.货车超载运输对公路的危害及经济效益影响[D].河南农业大学硕士学位论文,2016.

[8] 王军平,吕纪云,陈昶.高速公路超限检测及劝返车道设置技术研究[J].中外公路,2019(1).