

货车挂挡下坡速度变化特征仿真研究^{*}

万远航, 邵毅明

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

摘要:为使驾驶员在长大下坡时能根据货车负荷和路况合理利用发动机制动,减少因制动器失效导致的事故多发现象,开展货车挂挡下坡速度变化特征仿真研究,通过 Truksim 建立车辆模型和不同道路场景,对挡位、载重量、路面附着系数、道路坡度与货车挂挡下坡速度之间的关系及影响机理进行分析。结果表明,坡度、挡位、载重量与货车挂挡下坡速度成正相关,其中挡位的正相关性最强;货车挂挡下坡速度与路面附着系数通过地面给轮胎的反切向力发挥作用,低路面附着系数与货车挂挡下坡速度成负相关,货车空载时表现更显著。

关键词:汽车;载重货车;发动机制动;下坡速度特征

中图分类号:U469.2

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)01-0001-05

近年来,中国西部山区公路货车重、特大交通事故频发。一方面是由于西部山区道路沟谷交错、地形起伏,为降低成本,设计和建设中部分路段采用极限参数,伴随着陡坡、弯坡组合,增加了潜在安全风险。另一方面,由于货车吨位大、质心高,不具备轿车在纵坡路段良好的操纵性能和制动性能,反而在下坡伴因庞大的重力势能转化速度陡增。因此,货车需具有一定的持续制动力来抵消转化的重力势能,避免速度增长过快。

目前限制货车速度的方式分为主制动限速和辅助制动限速。主制动限速是指驾驶员踩制动器进行制动限速,该方式能在较短时间内吸收较大功率,但频繁踩刹车会导致刹车毂发热,产生热衰退现象。辅助制动限速包括发动机制动、排气制动等,相比于主制动限速,辅助制动限速在单位时间内吸收的功率较小,但可在很长时间内保持相对稳定,由于货车在长大下坡过程中时间较长,采取辅助制动往往在减小制动器工作负荷上能取得良好效果。发动机制动作为辅助制动的一种方式,利用发动机压缩行程产生的压缩阻力、内摩擦力和进排气阻力对驱动轮形成制动作用,体现于驾驶员挂挡下坡等操作上。

目前围绕货车纵坡道路行驶安全展开了大量研究,但以制动器温升模型、安全坡长、货车纵坡速度预测、道路线形为主,鲜有基于发动机制动分析车辆纵坡速度变化特征;多以客车和半挂车为研究对象,缺少关于物流运输主流车辆(两轴厢式货车)的研

究;仅以驾驶员选择挡位和道路坡度来分析车辆挂挡自行下坡速度变化特征,未从车辆自身状态(载重量)方面分析速度变化特征;以实车试验为主,因考虑驾驶员人身安全局限性,实车试验仅在良好路面测试,缺少在低附着系数路面上的货车挂挡自行下坡车速变化研究。为此,该文在现有发动机制动研究的基础上,以两轴厢式货车为研究对象,通过 Truksim 建立不同道路场景及车辆模型,分析挡位、载重量、道路坡度、路面附着系数与货车挂挡自行下坡速度的关系。

1 货车挂挡自行下坡分析

为探究货车挂挡自行下坡速度变化影响因素并为仿真分析提供依据,利用汽车理论对货车长大下坡路段挂挡行驶进行受力分析(见图 1)。

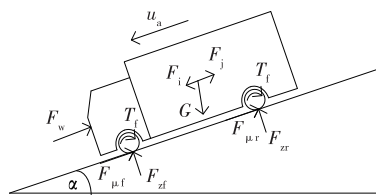


图 1 货车在长大下坡路段的受力分析

根据图 1,货车在长大下坡路段挂挡行驶时的平衡方程为:

$$F_i = F_f + F_w + F_j + F_b \quad (1)$$

式中: F_i 为重力沿坡面的分力(N); F_f 为滚动阻力(N),按式(2)计算; F_w 为空气阻力(N),按式(3)计

^{*} 基金项目:重点产业共性关键技术创新专项(cstc2015zdcy—ztzx30001)

算; F_j 为加速阻力,按式(4)计算; F_b 为挂挡制动力(N),按式(5)计算。

$$F_f = Gf \cos \alpha \quad (2)$$

式中: f 为滚动阻力系数, $f=0.007\ 6+0.000\ 056u_a$; u_a 为汽车行驶速度(m/s)。

$$F_w = \frac{C_d A}{21.15} u^2 \quad (3)$$

式中: C_d 为空气阻力系数; A 迎风面积(m); u 为汽车行驶速度(m/s)。

货车在下坡路段挂挡行驶时,平移质量惯性力和旋转质量惯性力矩组成惯性阻力 F_j :

$$F_j = \delta m a \quad (4)$$

式中: δ 为汽车旋转惯性矩转换系数; a 为汽车行驶加速度(m/s²)。

$$F_b = \frac{T_b i_g i_0}{r \eta} \quad (5)$$

式中: T_b 为发动机制动扭矩(N·m); i_g 为变速器速比; i_0 为主减速器速比; r 为车轮滚动半径(m); η 为传动系机械效率。

将式(2)~(5)代入式(1),得到货车在下坡路段挂挡行驶方程式:

$$G \sin \alpha = Gf \cos \alpha + \frac{C_d A}{21.15} u^2 + \frac{T_b i_g i_0}{r \eta} + \delta m a \quad (6)$$

根据式(6),若车辆类型已定,货车下坡自行挂挡车速大小与自车载重量、道路坡度、发动机制动力矩有关,而发动机力矩与当前货车所挂挡位和路面附着系数有关。因此,从载重量、道路坡度、路面附着系数、货车所挂挡位四方面对货车挂挡下坡速度变化进行分析。

2 仿真建模及研究方案

2.1 车辆道路模型的建立

以两轴厢式货车为研究对象,车辆模型选用Trucksim货车代表模型,车辆模型及主要参数分别见图2和表1。



图2 车辆仿真模型

表1 车辆主要参数

参数	数值	参数	数值
簧上质量/kg	4 455	箱体高度/mm	2 000
质心高度/mm	1 175	手动挡位数	7
轮距/mm	2 030	最大扭矩/(N·m)	900
车轮半径/mm	510		7.59、5.06、
发动机功率/kW	150	传动比	3.38、2.25、
箱体长度/mm	6 000	(I~Ⅶ)	1.5、1.0、
箱体宽度/mm	2 000		0.75

选取山区下坡道路为研究对象,根据各级公路最大坡长规范标准,结合中国西部山区地形情况,分别建立坡度 i 为4%、5%、6%、7%、8%的下坡道路场景,坡长取极限参数400 m。道路模型见图3。



图3 下坡道路模型

2.2 研究方案

根据货车下坡挂挡行驶方程式,载重量、道路坡度等因素会影响货车挂挡自行下坡车速变化,故从挡位、载重量、坡度、路面附着系数四方面对货车挂挡自行下坡速度变化特征进行仿真分析。

(1) 挡位。由于货车挂I挡速度过低、挂V挡及以上挡位速度又过高,仅研究II~IV挡位速度变化特征。

(2) 载重量。所选4×2单桥驱动货车满载为6 t,考虑到中国货车超载现象较普遍,载重量分别取4、6、8 t。

(3) 路面附着系数。路面附着系数取0.2、0.3、0.5、0.8,分别对应结冰、积雪、湿润和干燥路面。

(4) 道路坡度。选取坡度为4%、5%、6%、7%、8%的下坡道路。

(5) 挡位初速度。受传动比影响,车速和挡位存在匹配关系,各挡位与发动机转速范围都有一个对应速度区间,为使仿真参数选择合理,对货车各挡位速度区间进行确定。在Trucksim中,让货车分别挂I、II、III、IV挡在平直路面加速行驶,I、II、III、VI挡位速度上限分别为15.5、23.4、35.1、52.5 km/h,故仿真中II、III、IV挡位初速度设为20、30、40 km/h。仿真分析方案见表2。

表 2 货车挂挡自行下坡速度变化仿真分析方案

项目	挡位	载重量 m/t	初速度/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	路面附着系数 μ	道路坡度 $i/\%$
不同挡位挂挡速度特征	Ⅱ	6	20	0.85	4~8
	Ⅲ	6	30	0.85	4~8
	Ⅳ	6	40	0.85	4~8
不同载重量挂挡速度特征	Ⅱ	4	20	0.85	8
	Ⅲ	6	30	0.85	8
	Ⅳ	8	40	0.85	8
不同附着系数挂挡速度特征	Ⅱ	6、8	20	0.2、0.3、0.5、0.85	8
	Ⅲ	6、8	30	0.2、0.3、0.5、0.85	8

3 仿真结果与分析

3.1 不同挡位挂挡速度变化特征

图 4 为货车在Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ挡位,不同坡度时的速

度变化情况。

从图 4 可知:1) 不同坡度下货车在Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ挡位挂挡自行下坡时速度呈递增趋势,即货车自行挂挡下坡速度因重力势能转化出现了增长,且车速增

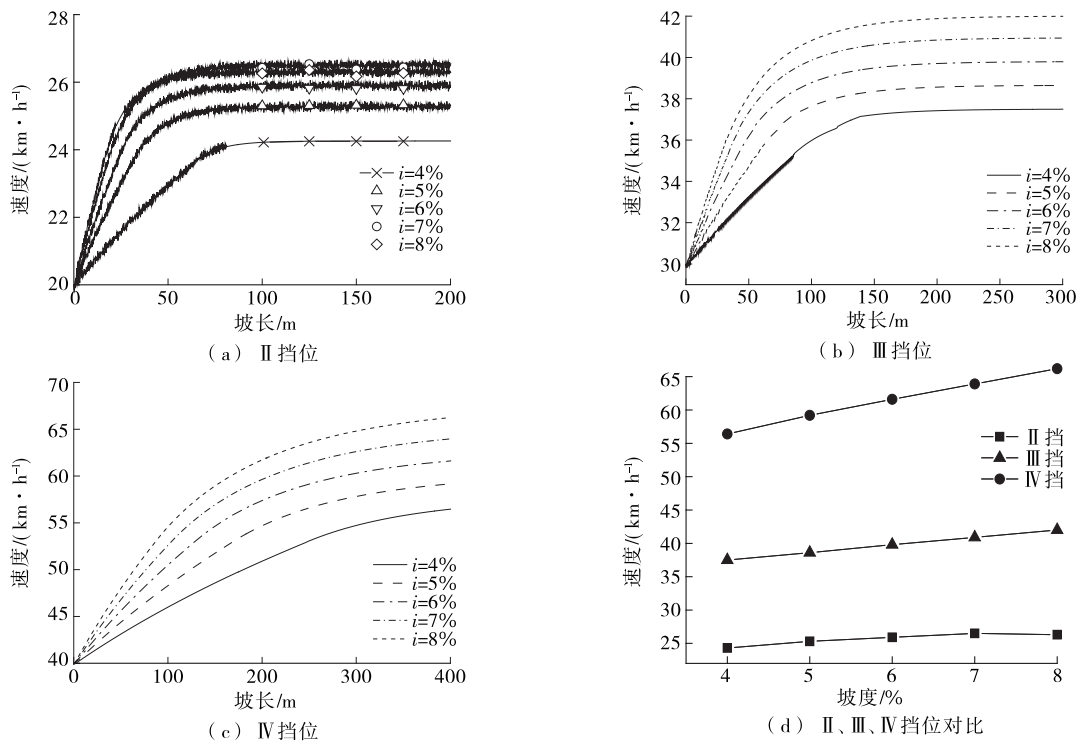


图 4 货车在不同坡度下的速度变化

长呈先急后缓的趋势。货车挂挡自行下坡时,速度增大会带动发动机曲轴加速旋转,单位时间内对活塞做功增大,导致发动机曲轴制动力矩变大,因而车速增长先急后缓。2) 货车在挂Ⅱ、Ⅲ挡位自行下坡时,速度能在坡长 400 m 内达到稳定,分别稳定于 24.3~26.3 和 37.5~42 km/h;挂Ⅳ挡位自行下坡时,速度在 400 m 坡长处集中于 56.4~66.2 km/h。3) 货车挂Ⅱ挡位自行下坡时,货车发动机制动力矩

会钳制车速,车速曲线出现明显振荡,坡度越大,该现象越明显。4) 相比于坡度对挂挡车速的影响,挡位高低是决定挂挡车速大小的最关键因素。货车分别在坡度 4% 和 8% 时挂Ⅳ挡自行下坡,到达 400 m 坡长处速度差值达 11.6 km/h。

3.2 不同载重量挂挡速度变化特征

图 5 为货车在不同载重量,挂Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ挡位时的速度变化情况。

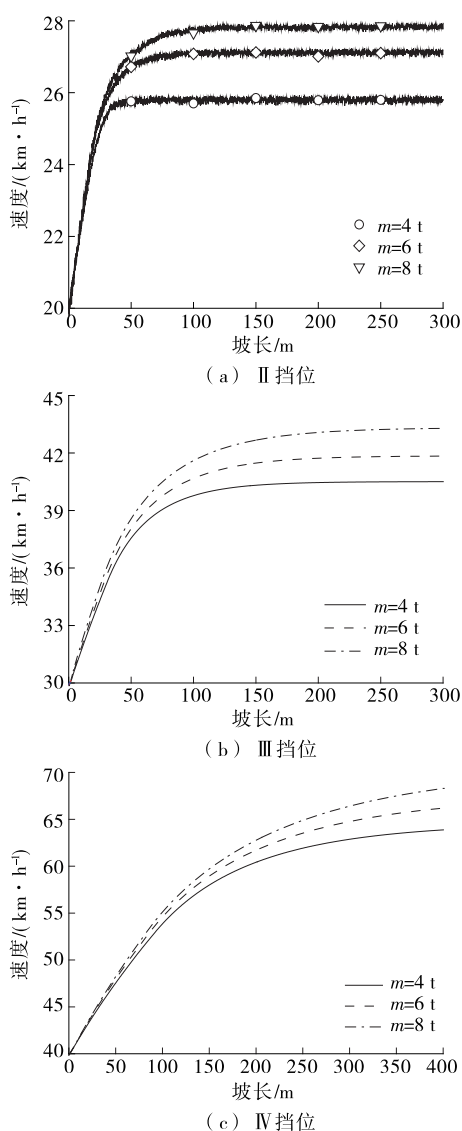


图5 货车在不同载重量下的速度变化

由图5可知:1) 货车在Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ挡位挂挡自行下坡的速度与载重量成正相关,载重量越大,挂挡下坡转化的重力势能越大,下坡速度越快。2) 货车在坡度8%的道路上挂挡行驶时,Ⅱ挡位挂挡自行下坡速度为25.8~27.8 km/h,Ⅲ挡位为40.5~43.2 km/h,Ⅳ挡位挂挡速度在坡长400 m处集中于63.8~68.3 km/h。3) 货车在纵坡上挂挡自行下坡时,载重量对挂挡自行下坡速度增长的影响较弱。超载车辆在山区道路事故频发的原因主要为载重量越大,制动器制动更易产生热衰退现象,同时货车质心变高,横向操纵稳定性变差。

3.3 不同路面附着系数挂挡下坡速度变化特征

图6为货车在不同路面挂挡下坡的速度变化情况,图7为在不同路面挂挡下坡时发动机制动力矩

的变化情况。

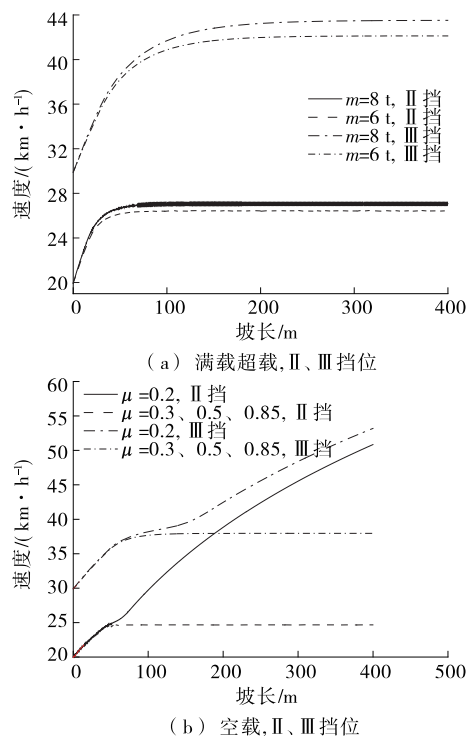


图6 货车在不同路面下的速度变化

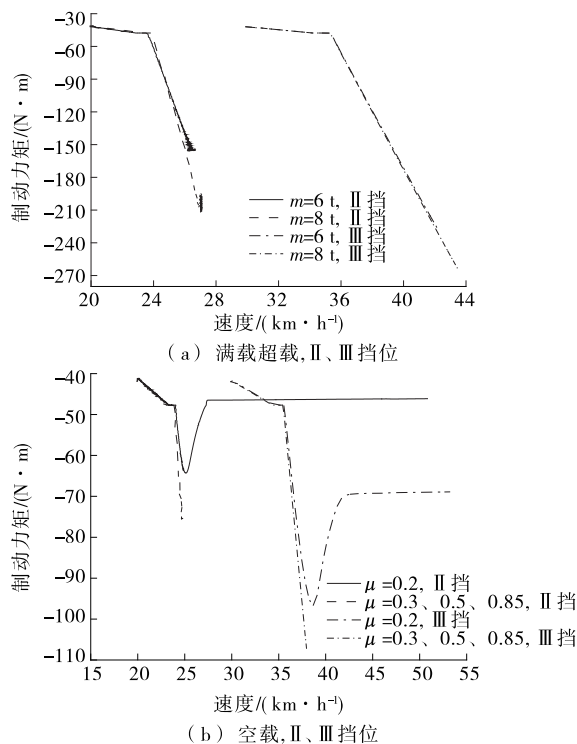


图7 不同路面下发动机制动力矩的变化

由图6可知:1) 货车以6和8 t载重量在4种不同路面附着系数、坡度为8%的下坡道路挂Ⅱ、Ⅲ挡位自行下坡时,下坡速度能在结冰、积雪、湿润、干

燥路面上保持稳定,速度分别稳定于25.8~27.8和40.5~43.2 km/h。2) 货车以空载状态在坡度为8%的结冰道路挂挡自行下坡时,速度快速增长,而在其他路面上发动机制动力能钳制车速的增长。

由图7可知:1) 货车挂Ⅱ、Ⅲ挡位自行下坡时,6 t载重量对应的发动机曲轴制动力矩绝对值分别稳定于156和225 N·m,8 t载重量时分别稳定于184和265 N·m,即发动机曲轴制动力矩与载重量大小和挡位高低成正相关。2) 发动机曲轴制动力矩绝对值增长呈先缓后急的趋势,货车挂挡下坡开始时,发动机曲轴转速较低,在压缩行程产生的压缩阻力、内摩擦力和进排气阻力较小,而随着重力势能的转化,车速快速增大,当前挡位车速对应的发动机曲轴当量转速超过发动机最大转速,压缩阻力、内摩擦力和进排气阻力陡增,导致发动机曲轴制动力矩绝对值急剧上升。3) 货车以空载状态在结冰路面挂Ⅱ挡自行下坡时,发动机曲轴制动力矩绝对值最初与其他路面相重合,达到64 N·m时迅速衰减并稳定于46.5 N·m;其他路面则稳定于96.5 N·m。货车挂挡自行下坡速度增大,所需发动机制动力增大,而发动机制动力矩是依靠地面给轮胎的反作用力实现的,在结冰路面上,地面给车轮的反作用力有限,车轮发生抱死,切向反作用力减小,以致发动机曲轴制动力矩绝对值减小。

综合图6、图7,在低路面附着系数区间,货车挂挡自行下坡速度与路面附着系数成负相关,货车空载时表现更显著。

4 结论

该文以两轴厢式货车为研究对象,利用 Truck-sim 仿真分析货车挂挡下坡速度变化特征,并利用发动机制动原理和汽车理论分析速度变化原因,为道路安全研究及长大纵坡中驾驶员如何根据货车负荷和路况选择合适的挡位挂挡制动提供参考。主要结论如下:

(1) 坡度大小、挡位高低、货车载重量大小与货车挂挡自行下坡速度成正相关,其中挡位的正相关性最强;载重量、坡度、挡位同时增长时,挂挡自行下坡速度差值成一定倍数增长。

(2) 两轴货车以满载状态(6 t)在坡度为4%~8%道路上挂挡自行下坡时,Ⅱ挡挂挡速度稳定在25.8~27.8 km/h,Ⅲ挡挂挡车速稳定在40.5~43.2 km/h,Ⅳ挡挂挡车速在坡长400 m处集中在63.8~

68.3 km/h。据此货车驾驶员可在长大下坡路段根据货车负荷和路况选择合适挡位。

(3) 货车以空载状态在结冰路面挂挡下坡时,由于路面附着系数小,地面给轮胎的反向作用力有限,发动机曲轴制动力矩过小,不能钳制车速的增长。因此,低路面附着系数与货车挂挡自行下坡速度成负相关,货车空载时表现更显著。

参考文献:

- [1] 赵轩,余强,袁晓磊.重型货车长下坡行驶制动器温升模型的研究[J].汽车工程,2015,37(4).
- [2] Guo Yingshi, Wang Chang. Temperature rise model of drum brake[J]. 2013 International Conference on Mechanics and mechatronics[C]. 2013.
- [3] 胡昌斌,沈金荣,陈友杰.长下坡路段货车鼓式制动器摩擦衬片温升规律[J].交通运输工程学报,2009,9(4).
- [4] 韩跃杰,许金良,刘永福,等.连续长下坡路段的安全坡长[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(5).
- [5] 杨宏志,胡庆谊,许金良.高速公路长大下坡路段安全设计与评价方法[J].交通运输工程学报,2010,10(3).
- [6] 王志新,余强,赵轩,等.长大下坡路段载货汽车行驶速度预测研究[J].公路交通科技,2017,34(7).
- [7] 胡江碧,王维利,王健.高速公路不同线性组合路段划分研究[J].中国公路学报,2010,23(增刊1).
- [8] 徐进,罗庆,毛嘉川,等.考虑弯道几何要素和交通量影响的汽车行驶速度预测模型[J].中国公路学报,2012,25(5).
- [9] 陈之强.高速公路超长爬坡路段重载车辆行驶状态安全稳定性分析[J].科学技术与工程,2017,17(24).
- [10] 余强,陈荫三,马建,等.客车发动机制动下坡能力[J].长安大学学报:自然科学版,2003,23(2).
- [11] 赵含雪.基于发动机制动和排气制动的重型商用汽车长大下坡安全性研究[D].西安:长安大学,2014.
- [12] 崔二娟,袁黎,周志将.长下坡公路交通安全诊断与改善设计研究[J].公路与汽运,2012(3).
- [13] 余强,陈荫三,马建,等.客下车排气制动能力研究[J].客车技术与研究,2005(3).
- [14] 李都厚.基于公路长下坡车辆制动性能的事故预防研究[D].西安:长安大学,2010.
- [15] 胡立伟,李林育,王森,等.基于台架试验的长下坡路段满载中型货车制动风险阈值研究[J].公路交通科技,2017,34(7).
- [16] 余强.汽车下坡持续制动性能研究[D].西安:长安大学,2000.