

基于逻辑门限值的爆胎车辆制动仿真研究

夏勇生, 吴东升, 平兰兰, 许万友

(安徽建筑大学 电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:为研究汽车防抱死制动系统(ABS)在爆胎工况下的有效性,基于逻辑门限值控制设计了ABS控制系统,结合动力学软件 CarSim 与 Simulink 设计控制系统,以轮胎滑移率为控制对象,以纵向制动距离和横向偏移量为衡量标准,对正常驾驶和爆胎工况下的汽车采用不同的制动方式进行仿真研究。结果表明,在汽车正常行驶和爆胎工况下,逻辑门限值 ABS 控制器都能起到实时的制动效果,但不同的制动策略有着较为明显的差别;爆胎工况下,汽车的纵向制动距离较正常行驶的汽车有所延长,此时前左、右侧控制策略中的四轮独立控制策略的轮胎没有出现抱死现象,制动效果最佳。

关键词:逻辑门限值;滑移率;爆胎工况;仿真分析

中图分类号:U463.5

文献标志码:A

文章编号:1671-5322(2021)02-0011-06

爆胎是汽车行驶过程中的一种极其危险的特殊状况,属于突发事件。爆胎发生时,由于反应时间短暂,多数驾驶员会采取紧急制动措施,让防抱死制动系统(ABS)触发启动条件,控制制动压力使轮胎滑移率保持在一定范围内。为减少爆胎造成的损害,学者对轮胎模型与制动控制进行了大量的研究。郭孔辉^[1]院士带领团队提出 UniTire 统一轮胎模型并对其进行试验验证,结果表明该轮胎模型用于车辆仿真和控制都能精确地表达各种复杂工况下的力学特性;后来,王英麟^[2]基于 UniTire 轮胎模型在车辆动力学软件 CarSim 上进行了爆胎车辆动力学研究。

在制动控制方面,目前主流的控制方法有逻辑门限值^[3-7]、PID(Proportion Integral Differential)控制、滑模变结构控制和模糊控制等。其中,PID 控制的适用性较单一,且对被控对象的参数变动比较敏感^[8];而滑模变结构控制性能好,但设计复杂;模糊控制鲁棒性高,但参数调试整定繁琐^[9];只有逻辑门限值控制方法,不需要建立具体的数学模型,并且对非线性系统控制也有一定的效果,即用逻辑门限值设计 ABS 系统,简单且易于设计,并具有实时性,无需具体数学模型,因

此在实际汽车制动系统中多使用简单的逻辑门限值控制方法。

在用逻辑门限值设计 ABS 系统方面,李刚等^[10]研究了一种轴荷不同的 ABS 逻辑门限值控制策略,并设计了控制器,且驾驶模拟器硬件在环制动试验台进行了试验;王琳等^[11]设计了逻辑门限值 ABS 制动器,制动效果具有实时性,制动距离较无 ABS 系统的车辆减少了 13.2%。

目前对 ABS 系统的研究多数是对单轮模型或者整车模型进行设计,并未考虑轮胎模型的建模理论和特殊状况下的实际效果,对车辆爆胎状况下的紧急制动研究更是少之又少。本文采用逻辑门限值控制方法设计 ABS 系统,并基于不同的轮胎控制策略,对正常行驶和爆胎状况的汽车紧急制动系统采用仿真软件分别进行研究。

1 轮胎模型

汽车行驶过程中会产生不同的运动情况,如发生纵滑、侧偏和侧倾等。本文为研究汽车爆胎时的车辆制动情况,需要更加真实地还原实际爆胎时的轮胎状态。因此以轮胎为研究对象,选取纵滑-侧偏联合工况,此时轮胎爆胎前的受力分

收稿日期:2020-10-22

基金项目:国家自然科学基金(61471002);安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2016JD11)。

作者简介:夏勇生(1995—),男,安徽巢湖人,硕士生,主要研究方向为汽车稳定性控制。

析如下:

$$\begin{cases} F_x = -\frac{\phi_x}{\phi}\mu_x F_z \bar{F} \\ F_y = -\frac{\phi_y}{\phi}\mu_y F_z \bar{F} \\ M_z = -F_y \cdot D_x - F_x \cdot D_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_x 、 F_y 、 F_z 分别为轮胎的纵向力、侧向力、垂向力,N; M_z 为轮胎的回正力矩,N·m; ϕ_x 为统一纵向滑移率, ϕ_y 为统一侧向滑移率, ϕ 为统一滑移率; μ_x 为纵向摩擦系数, μ_y 为侧向摩擦系数; $\bar{F}$ 为无量纲总切力,实际上是系数; D_x 、 D_y 分别为轮胎的回正力臂与侧向偏距,m。

根据爆胎力学特性试验^[12],265/75 R16 型号的汽车轮胎在爆胎瞬间,有效滚动半径比爆胎前减少了 100 mm,其他主要力学参数如轮胎滚动阻力系数、径向刚度、侧偏刚度、纵滑刚度等在短时间内也发生巨大变化。爆胎前后轮胎各主要力学参数变化关系如下^[12]:

$$\begin{cases} R_{rc} = 30 \cdot R_{i0} \\ K_z = \frac{1}{15} \cdot K_{z0} \\ K_y = \frac{1}{15} \cdot K_{y0} \\ K_x = 28\% \cdot K_{x0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_{i0} 、 R_{rc} 分别为轮胎爆胎前与爆胎后的滚动阻力系数; K_{z0} 、 K_z 分别为轮胎爆胎前与爆胎后的径向刚度,N/m; K_{y0} 、 K_y 分别为轮胎爆胎前与爆胎后的侧偏刚度,N/rad; K_{x0} 、 K_x 分别为轮胎爆胎前与爆胎后的纵滑刚度,N。

由于爆胎模型是轮胎阶跃跳变后的理论模型,故爆胎轮胎简化后的力学模型如下:

$$\begin{cases} \bar{F}_x \propto K_x \\ \bar{F}_y \propto K_y \\ \bar{F}_z \propto K_z \\ \bar{M}_z \propto k_1 K_x + k_2 K_y \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_1 、 k_2 为拟合参数。

2 逻辑门限值 ABS 系统

2.1 逻辑门限值制动系统设计

汽车紧急制动过程中,车轮运动状态在滚动与滑动之间循环变化,使得轮胎滚动阻力系数在最大值附近波动,以提供最大减速摩擦力,保持最

佳制动力的效果。常用车辆滑移率来描述轮胎滚动与滑动之间的变化。车辆滑移率 s 定义为:

$$s = \frac{u - u_w}{u} \times 100\% = \frac{u - rw}{u} \times 100\% \quad (4)$$

式中: u 为车速,km/h; u_w 为车轮线速度,km/h; r 为车轮有效滚动半径,mm; w 为车轮角速度,rad/s。

BURCKHARDT 等^[13]提出一种常用路面的附着系数,其与滑移率 s 之间的函数关系如下:

$$\mu(s) = C_1(1 - e^{-C_2s}) - C_3s \quad (5)$$

式中: μ 为路面附着系数; C_1 、 C_2 、 C_3 为路面拟合参数。不同标准路面的拟合系数如表 1 所示。

表 1 标准路面拟合参数

Table 1 Fitting parameters of standard pavement			
路面	C_1	C_2	C_3
冰	0.050	306.39	0.001
雪	0.195	94.13	0.065
湿鹅卵石	0.400	33.71	0.120
湿沥青	0.856	33.82	0.347
干水泥	1.196	25.17	0.537
干沥青	1.281	23.93	0.520

附着系数 μ 和滑移率 s 之间的关系如图 1 所示。显然,拟合参数影响曲线的凸出程度。

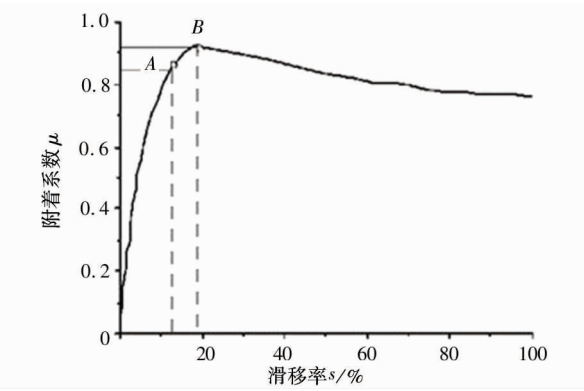


图 1 $\mu - s$ 函数曲线
Fig 1 $\mu - s$ function curve

图 1 中,点 A、B 分别为车轮滚动与滑动的临界点。当车轮滑移率在 AB 范围内时,表明车轮在滚动与滑动之间变化,此时应充分利用路面摩擦力的阻力作用,以达到最佳的制动效果。为此,要输出保压信号到制动器,以保持制动压力不变。当滑移率 s 大于 B 点滑移率时,表明车轮滑移率偏大,车轮一直处于滑动状态,此时车轮速度较慢,制动压力过大。为此,要输出减压信号,让液压系统减小制动力矩。当滑移率 s 小于 A 点滑移率时,表明车轮滑移率偏小,车轮一直处于滚动状

态,此时车轮速度较快,制动压力较小。为此,要输出增压信号,让液压系统增大制动力矩。根据上述原理确定逻辑门限值控制流程,如图2所示。

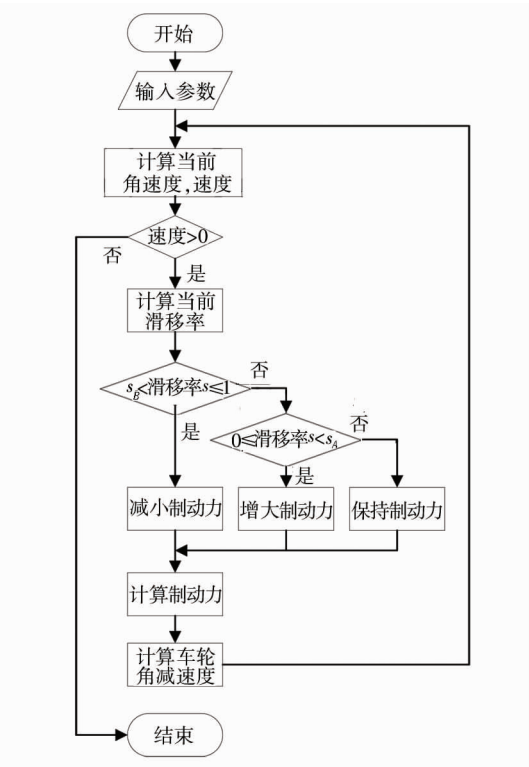


图2 逻辑门限值原理流程
Fig 2 Logic threshold principle flow

(注:图中当前滑移率计算面向的对象是单个轮胎,在运用ABS控制策略时需要根据控制策略决定计算几个轮胎的滑移率)

2.2 ABS 控制策略

以通道划分制动策略,目前有单通道制动和双通道制动。单通道制动是对轴对称轮同时制动,但只能输出一个控制信号的策略。因汽车两侧轮胎滑移率不同,在单通道制动策略下需要比较两侧轮胎滑移率大小,并选择其中一个高滑移率或低滑移率作为输出控制信号。双通道制动是对轴对称上的两侧轮胎独立制动的控制策略。

3 仿真与分析

基于理论分析,对门限值范围进行仿真敲定,得到滑移率最佳门限值范围为0.12~0.16。在最佳门限值范围内,使用图3的ABS联合仿真系统对汽车进行紧急制动,利用CarSim软件建立车辆模型、Simulink软件建立ABS控制模型。

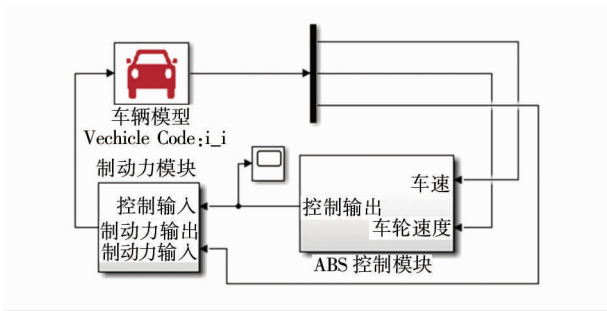


图3 ABS联合仿真图
Fig 3 ABS co-simulation diagram

3.1 正常行驶的汽车

对以100 km/h正常行驶的汽车在无ABS控制、有ABS控制在四轮独立和前后轴控制的策略下,利用上述软件得到其制动距离与速度变化情况,分别如表2、图4所示。对有ABS控制的以100 km/h正常行驶的汽车在四轮独立和左右侧控制的策略下,利用上述软件得到其制动距离情况,如表3所示。表2、表3中的“前”表示前轴,“后”表示后轴,“左”表示左侧,“右”表示右侧,“单”表示单通道,“双”表示双通道,“高”表示选择大的滑移率作为参考输出控制,“低”表示选择小的滑移率作为参考输出控制。

由表2可知,正常行驶的汽车在紧急制动时,有ABS制动的车辆,采用不同的制动策略,制动结果均未发生任何变化,纵向制动距离较无ABS制动系统,缩短了10.04%;横向位移没有发生变化,这是因为有ABS制动系统的车辆正常行驶

表2 多种制动策略仿真
Table 2 Simulation of multiple braking strategies m

控制策略		纵向制动距离	横向制动距离
未使用 ABS	无 ABS	49.307	0
	四轮独立	44.358	0
	前单高、后双	44.358	0
	前单低、后双	44.358	0
	前双、后单高	44.358	0
使用 ABS	前双、后单低	44.358	0
	前单高、后单高	44.358	0
	前单高、后单低	44.358	0
	前单低、后单高	44.358	0
	前单低、后单低	44.358	0

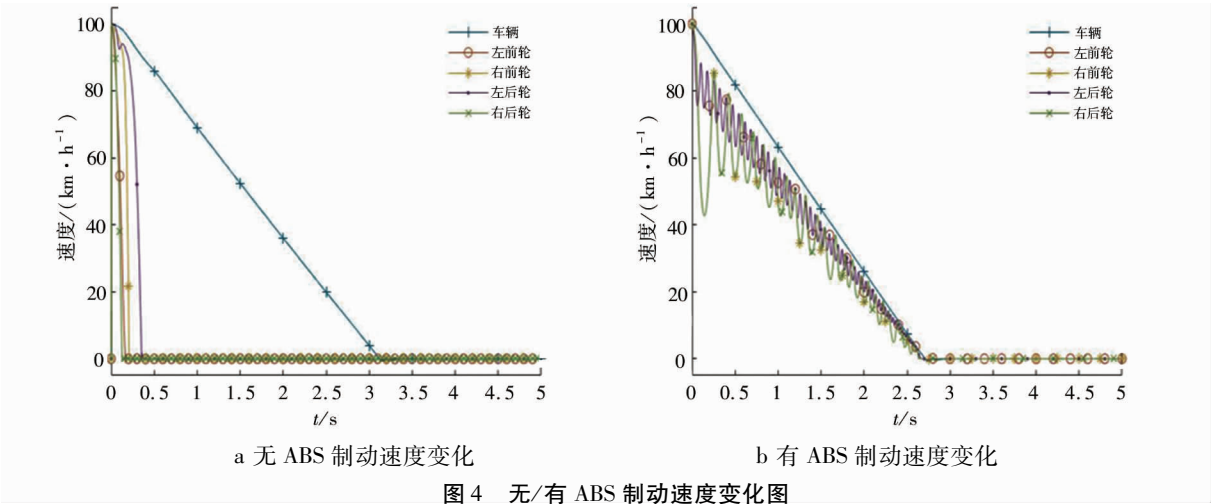


图 4 无/有 ABS 制动速度变化图
Fig 4 Change chart of braking speed without/with ABS

表 3 左、右侧控制策略制动仿真 Table 3 Braking simulation of left and right side control strategy		
控制策略	纵向制动距离	横向偏移距离
四轮独立	44.358	0
左单高、右双	45.013	0.239
左单低、右双	46.838	-2.552
左双、右单高	45.013	-0.239
左双、右单低	46.838	2.552
左单高、右单高	44.989	0
左单高、右单低	47.041	3.216
左单低、右单高	47.041	-3.216
左单低、右单低	51.468	1.100

时,在对前轴双轮和后轴双轮分别使用四轮独立式单通道、双通道制动时,制动力关于运动方向对称,横向受力为 0,故横向偏移距离为 0。

表 3 显示:采用左、右侧控制策略时,组合控制策略较独立控制的纵向制动距离有所增加,并且出现了横向偏移量。由于左、右侧是平行于车辆运动方向,采用左、右侧控制策略时,左、右侧两个平行运动的轮胎出现了控制不同步的现象,导致横向受力不等于 0,出现偏移量。

综合表 2 和表 3,显然除了左单低、右单低控制策略制动的情况,其他控制策略下 ABS 制动系统都能实现制动距离的缩短。

由图 3 可知,正常行驶的车辆没有 ABS 时,车轮线速度在约 0.5 s 内减小为 0;有 ABS 时,车轮线速度变化缓慢,且随着车辆速度逐渐减小为 0,说明正常行驶的车辆在 ABS 系统运用前、后轴控制策略时,制动效果未发生任何变化,均制动有效。

3.2 爆胎情况下的汽车

在前面 ABS 控制的车辆仿真系统中,假设发生左前轮爆胎,采用不同的制动控制策略,得到爆

胎时前、后轴控制结果如表 4 所示,左、右侧控制结果如表 5 所示。表 4、表 5 中“前”“后”“左”“右”“单”“双”“高”“低”含义同前。

表 4 爆胎时前、后轴轮胎控制策略结果 Table 4 Results of tire control strategy for front and rear axles during tire burst		
控制策略	纵向制动距离	横向偏移距离
1 四轮独立	58.222	-4.479
2 前单高、后双	60.153	-4.915
3 前单低、后双	79.430	10.047
4 前双、后单高	46.053	0.811
5 前双、后单低	57.164	-3.966
6 前单高、后单高	47.056	-0.103
7 前单高、后单低	59.111	-4.429
8 前单低、后单高	54.119	8.879
9 前单低、后单低	59.710	23.733

表 5 爆胎时左、右侧轮胎控制策略结果 Table 5 Results of control strategy for left and right tires during tire burst		
控制策略	纵向制动距离	横向偏移距离
10 四轮独立	46.007	0.767
11 左单高、右双	47.024	-0.095
12 左单低、右双	53.256	-2.183
13 左双、右单高	46.050	0.808
14 左双、右单低	51.787	16.273
15 左单高、右单高	47.045	-0.102
16 左单高、右单低	54.334	11.538
17 左单低、右单高	53.297	-2.188
18 左单低、右单低	67.098	5.448

比较表 4、表 5 可以发现:从整体上看,左、右侧控制策略无论在纵向制动距离,还是横向偏移距离上均优于前、后轴控制策略。

由于路面宽度一般在 3 m 左右,在表 4、表 5 的两个控制策略组合中分别舍弃偏离道路较多的轮胎控制策略,并以制动距离较短为原则,得到

前、后轴控制策略中的编号4前双、后单高,编号6前单高、后单高2种;左、右轴控制策略中的编号10四轮独立,编号11左单高、右双,编号13左双、右单高,编号15左单高、右单高4种控制策略。这6种制动控制策略的车轮速度变化曲线如图5所示。

对比图5中不同轮胎控制策略的车轮速度变化情况,发现有且仅有图5c左、右轴控制策略中的四轮独立控制时轮胎速度没有迅速降为0,而是呈现波动下降,直至车速降为0,即未出现轮胎抱死现象。爆胎后轮胎由于摩擦阻力变大,若制动后轮胎出现抱死情况会导致轮胎持续滑动,大

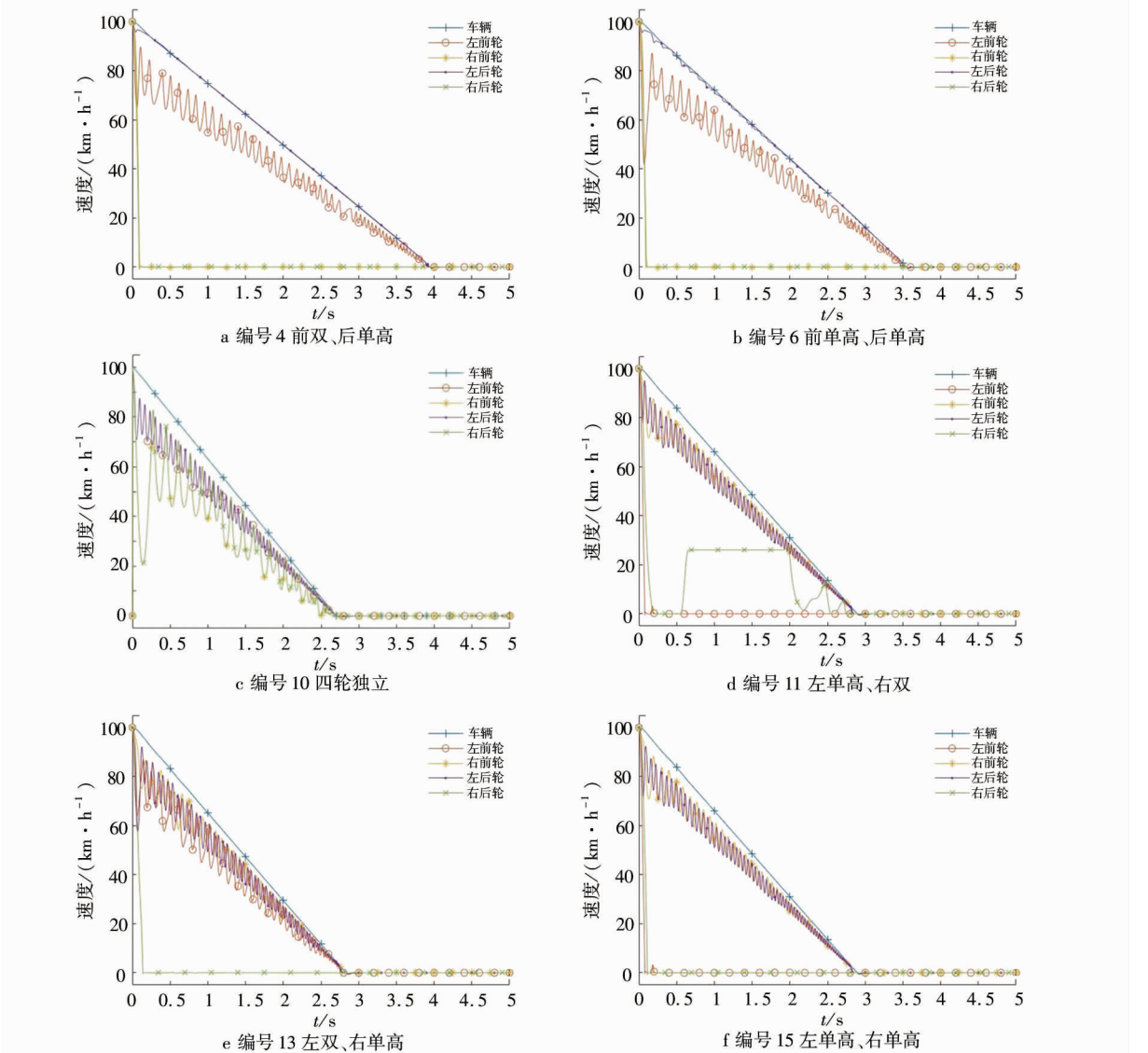


图5 不同策略制动速度变化
Fig 5 Braking speed change of different strategies

概率会出现轮胎脱毂,导致车辆失控翻车,从而引发重大事故。因此,爆胎轮胎要尽可能保持转动状态。

对比表3、表5,可以发现爆胎时车辆纵向制动距离较正常行驶的汽车有所延长,这是由于汽车在特殊行驶工况下,制动效果有所下降,导致纵向制动距离轻微增长。在制动策略组合中,高选控制会超前对滑移率较低的轮胎进行制动,低选控制会滞

后对滑移率较高的轮胎进行制动,因此理论上,高选或低选控制都会错开某一轮胎的最佳制动时间;而独立控制时,每个轮胎不存在超前和滞后的问题,因此控制效果较佳。在汽车正常行驶时,车辆运动过程是一种极其稳定的过程,ABS制动系统能完全发挥作用,此时各种控制方式差别不太大;而特殊行驶工况下,由于制动效果有了轻微下降,导致纵向制动距离轻微增长,此时各种控制方

式的差距越来越明显。同时,汽车爆胎时,爆胎后的车轮有效滚动半径发生了变化,导致悬架拉伸与每个轮胎垂向力发生改变,从理论上讲也只有进行轮胎独立控制才能达到最佳制动效果。

实验仿真与理论分析结果表明,左、右侧控制策略中的四轮独立控制策略都是最优的控制策略,此时轮胎没有出现抱死现象。

4 结论

在设计的逻辑门控制策略下,基于 UniTire 统一轮胎模型和爆胎模型,运用 CarSim 软件建立了

汽车 ABS 动力学模型,对正常行驶的车辆和爆胎车辆分别采用不同控制策略进行仿真,得到如下结论:

(1)逻辑门限值设计的 ABS 控制器能有效缩短制动距离,保持车轮转动、车辆可控,不发生侧滑、失控现象;

(2)正常行驶工况,不同策略的 ABS 制动效果差距明显,其中四轮独立控制策略效果最佳;

(3)爆胎工况下,不同的轮胎控制策略效果存在较大差距,其中左、右侧控制策略中的四轮独立控制时轮胎没有出现抱死现象,制动效果最佳。

参考文献:

- [1] 郭孔辉. UniTire 统一轮胎模型[J]. 机械工程学报,2016,52(12):90-99.
- [2] 王英麟. 基于 CarSim 与 UniTire 的爆胎汽车动力学响应研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [3] 刘朝涛,狄科宏,宋鹏宇. 基于门限值控制的单轮 ABS 控制器仿真设计[J]. 电工技术,2019(12):9-11.
- [4] 王伟达,丁能根,张为,等. ABS 逻辑门限值自调整控制方法研究与试验验证[J]. 机械工程学报,2010,46(22):90-95,104.
- [5] 郑太雄,马付雷. 汽车 ABS 逻辑门限值控制方法研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2011,23(4):453-457.
- [6] 李寿涛,马学用,郭鹏程,等. 一种变逻辑门限值的车辆稳定性控制策略研究[J]. 汽车工程,2015,37(7):782-787.
- [7] 何仁,李梦琪. 基于路面识别的复合制动与 ABS 集成控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2020,41(1):20-26.
- [8] 李萍,陈学文,张衍成. 基于 ABS 的车辆动力学建模与仿真分析[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),2014,34(1):43-46,52.
- [9] 李静,石求军,刘鹏,等. 基于纵向车速估算的商用车 ABS 神经网络滑模控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(4):1017-1025.
- [10] 李刚,王野,赵德阳. 基于逻辑门限值的汽车 ABS 控制策略与试验研究[J]. 现代制造工程,2017(7):12-16.
- [11] 王琳,张安霞. 基于逻辑门限控制的汽车 ABS 仿真分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2019,32(4):25-30.
- [12] 陈子越. 汽车爆胎行驶稳定性控制策略仿真研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [13] BURCKHARDT M, REIMPELL J. Fahrwerktechnik:Radschlupf-Regelsysteme[M]. Wurzburg, Germany:Vogel Verlag,1993.

Simulation Research on Braking of Tire Burst Vehicle Based on Logic Threshold

XIA Yongsheng, WU Dongsheng, PING Lanlan, XU Wanyou

(School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei Anhui 230601, China)

Abstract: In order to study the effectiveness of anti lock braking system (ABS) under tire burst condition, an ABS control system is designed based on logic threshold control. Combined with the dynamics software CarSim and Simulink, the control system is designed. The tire slip rate is taken as the control object, and the longitudinal braking distance and transverse offset are taken as the measurement standards. The simulation research is carried out on the vehicle under normal driving and tire burst condition using different braking modes. The results show that the logic threshold ABS controller can achieve real-time braking effect under normal driving and tire burst conditions, but different braking strategies have obvious differences. Under tire burst condition, the longitudinal braking distance of the vehicle is longer than that of the normal driving vehicle. At this time, the four wheel independent control strategy tires in the front left and right control strategies do not appear lock up phenomenon, and the braking effect is the best.

Keywords: logic threshold; slip ratio; tire burst condition; simulation analysis

(责任编辑:李华云)