

# 基于虚拟样机技术的重型汽车 ABS 模糊控制研究

李韶华, 黄宏伟, 李 灿

石家庄铁道大学机械工程学院, 石家庄 050043

**摘要** 在 ADAMS/Car 中建立三轴重型载货汽车的虚拟样机模型, 包括前后悬架、动力总成、转向系统、稳定杆、制动系、轮胎及车身, 同时还考虑了轮胎、悬架弹簧、减振器等部件的非线性。利用 Matlab/Simulink 建立了基于滑移率的防抱死制动系统 ABS 模糊控制系统。分别在高附着路面、低附着路面及分离系数路面上进行不同载重下的直线制动仿真, 计算汽车制动时的动态特性, 并与无 ABS 的常规制动进行比较。结果表明, 本文设计的基于滑移率的 ABS 模糊控制策略对于重型汽车具有良好的控制效果, 使车轮的滑移率控制在最佳滑移率附近, 防止了车轮的抱死, 在制动距离、制动时间及制动稳定性方面都有较突出的优势。

**关键词** 重型汽车; ABS; 模糊控制; ADAMS/Car; Matlab/Simulink

**中图分类号** TP391.9

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.04.005

## ABS Fuzzy Control of Heavy Vehicle Based on Virtual Prototype Technology

LI Shaohua, HUANG Hongwei, LI Can

School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

**Abstract** An anti-lock braking system for a heavy vehicle was simulated based on ADAMS and Matlab/Simulink. A nonlinear heavy vehicle dynamic model was built in ADAMS/Car, including the front and the rear suspension systems, the vehicle body, the engine system, the steering system, the antiroll system, the brake system, and the tire dynamic model. The nonlinear characteristics of the tire, the bushing spring and the damper were considered so as to reveal the dynamic performance of the vehicle accurately. A fuzzy control Anti-lock Braking System (ABS) model based on the wheel slipping rate was built in Matlab/Simulink. Then the straight-line braking simulations were carried on three types of roads with high friction coefficient, low friction coefficient and split friction coefficient under different vehicle loads. In a joint simulation, the braking dynamic responses of the heavy vehicle were compared with the case of a general brake without ABS. It is shown that the ABS fuzzy control based on the slipping rate as designed in this paper performs very well for the heavy vehicle. The wheel slipping ratio could be maintained near the optimal slipping ratio, and each wheel is prevented from locking up. In addition, the braking distance, the braking time, and the braking stability are greatly improved.

**Keywords** heavy vehicle; ABS; fuzzy control; ADAMS/Car; Matlab/Simulink

### 0 引言

随着中国运输业和重型汽车工业的快速发展及汽车行驶速度的提高, 用户对重型汽车的制动性和安全性的要求也越来越高。但是, 重型汽车惯性大、车身长、侧倾中心高, 进行实车制动性实验非常困难。因此, 对于重型汽车制动性及防抱死制动系统 ABS 的仿真研究越来越受到关注。

在对重型汽车制动系统的仿真研究中, 主要有 3 种方法: 第 1 种基于 ADAMS/Car 建立虚拟样机模型进行制动性能分析, 但不能很好地进行控制策略的研究<sup>[1-3]</sup>; 第 2 种是在 Matlab/Simulink 中建立车辆模型, 并施加制动控制系统<sup>[4-6]</sup>, 但这种方法没有考虑车辆制动过程中的轴荷变化及整车机构运动学非线性的特点, 并且忽略了车轮滚动阻力的变化, 因

收稿日期: 2012-10-23; 修回日期: 2012-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072159); 河北省自然科学基金杰出青年基金项目(E2012210025)

作者简介: 李韶华, 副教授, 研究方向为车辆动力学及控制, 电子信箱: lishaohua@stdu.edu.cn

此与真实情况有较大差别;第3种是近年来出现的 ADAMS-Matlab 联合仿真方法,该方法既可以对复杂车辆系统进行精确建模,又能方便地进行控制策略设计,并可以通过联合仿真分析各种工况下的汽车动力学特性,因而受到越来越多学者的重视<sup>[7-9]</sup>。但是,目前的联合仿真研究多集中在两轴轿车,对多轴重型汽车制动性及控制策略的研究不多见。

在现有的重型汽车 ABS 研究中,主要采用的是逻辑门限值控制方法<sup>[4,9]</sup>。但是,这种算法的控制逻辑相对复杂,控制参数需要根据车型不断地调试才能获得,并且制动过程中轮速波动较大。而模糊控制采用类似于人脑的模糊推理方法,结合实际经验,具有不依赖对象、简单实用等优点,特别适用于复杂的非线性系统<sup>[10-11]</sup>。目前 ABS 模糊控制策略大多针对两轴轿车开发,应用于重型汽车的 ABS 模糊控制的研究尚少见。

本文采用联合仿真方法研究重型汽车的 ABS 模糊控制策略。首先,在多体动力学软件 ADAMS/Car 中建立了三轴重型汽车整车模型,在 Matlab/Simulink 中设计了基于滑移率的 ABS 模糊控制系统。然后,通过 ADAMS/Control 接口将两者集成起来进行联合仿真。结果表明,所提出的 ABS 模糊控制策略在高附着系数路面、低附着路面和分离系数路面上都能取得良好的控制效果,在重型汽车上具有广阔的应用前景。

## 1 重型汽车建模

### 1.1 整车模型

精确的整车模型是仿真的基础,本文在 ADAMS/Car 平台上采用面向对象的建模方法,建立了某重型汽车的非线性整车多体模型<sup>[12]</sup>。整车模型包括前后悬架、转向系、车身、动力总成、制动系、车轮及轮胎模型。建模过程中,考虑到车辆实际模型的非线性的特点,建立了非线性的轮胎及悬架模型,使得车辆模型更加接近真实的车辆。轮胎力采用 Fiala 模型,轮胎侧偏刚度取为 227300N/m,轮胎纵滑刚度取为 186900N/m。悬架减振器的阻尼力按下式计算

$$F=c\dot{x}+\eta c\dot{x}^n \quad (1)$$

式中, $c$ 为阻尼系数,取为 50636,单位为  $N \cdot s/m$ ; $\eta$ 为非对称性参数,取为 0.5; $\dot{x}$ 为减振器柱塞与套筒之间的相对速度; $n$ 为指数,取为 1.25,表示阻尼力的非线性形式。

建立的车辆主要参数如表 1 所示,装配好的整车模型如图 1 所示。

### 1.2 制动器模型

对汽车进行制动控制,主要是对制动器输出的制动力矩进行控制。为了使 Matlab/Simulink 能够输出数据到 ADAMS/Car 里,以执行增压、降压、保压等操作,需要建立输入型状态变量。以左转向轮为例,具体步骤如下。

(1) 在 ADAMS/Car 的模板模式下,打开制动器的模板及菜单栏 Build 的 System Elements 选项,建立名称为 left\_

表 1 车辆参数

Table 1 The parameters of the vehicle model

产品商标	东风牌
外形尺寸	11650mm×2462mm×2880mm
总质量/kg	25000
轴距/mm	5900+1300
整备质量/kg	7240
轴数	3
制动系统	鼓式
前悬(后悬)/mm	1245(2315)
接近角(离去角)/(°)	32(13)
前轮距/mm	1940
后轮距/mm	1860
前(后)钢板弹簧片数	8(12)
轮胎数	10
轮胎规格	10.00R20
前、后轴荷/kg	7000、18000(后轴为并装双轴)

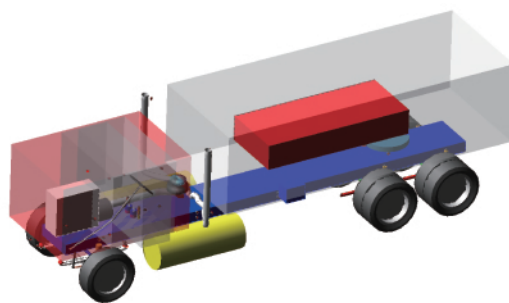


图 1 重型汽车模型

Fig. 1 The heavy vehicle model

front\_drive\_trigger\_signal 的状态变量。

(2) 在菜单栏下的 Build 的 System Elements 选项里对 left\_brake\_torque\_VAR 这个变量进行修改。修改过的制动器模型中的制动力矩按计算程序如下:

```
M=varval(_m_sc_truck_air_drum_brakes.left_front_drive_trigger_signal)
*varval(_m_sc_truck_air_drum_brakes.brake_line_pressure)
*varval(_m_sc_truck_air_drum_brakes.load_sensitive_pressure_metering_front_drive)*_m_sc_truck_air_drum_brakes.pvs_brake_mu
*_m_sc_truck_air_drum_brakes.pvs_pressure_to_torque_cnvt
*STEP(VARVAL(_m_sc_truck_air_drum_brakes.left_front_drive_wheel_omega),-0.0175,1,0.0175,-1)
```

left\_brake\_torque\_VAR 变量提供了该系统与其他系统进行数据交换的接口,能在制动仿真时调用此变量对整车进行制动。

## 2 ABS 模糊控制系统构建

本文采用 6 通道 6 传感器的 ABS 布置方案,即每个轮胎上都有一个独立的传感器及控制装置。这种配置的方式能够使每个车轮的滑移率控制在最佳滑移率附近。

### 2.1 滑移率计算

本文建立的控制系统的滑移率为控制目标,滑移率是一个直接反映轮胎与地面之间的滑移现象的表征量,计算公式为

$$\lambda = \frac{v - \omega r}{v} \times 100\% \quad (2)$$

其中,  $v$  为车轮中心的速度;  $r$  为车轮的滚动半径;  $\omega$  为车轮的角速度。

根据式(2),在 Matlab/Simulink 里建立如图 2 的滑移率计算模型。其中, In1 为角速度输入, In2 为车速输入, Out1 为滑移率输出。

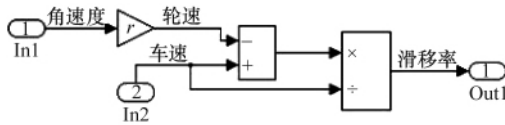


图 2 滑移率计算模型

Fig. 2 The calculation model of slipping ratio

当轮胎具有最高的纵向附着系数  $\mu$  和最大的侧向附着系数  $u_1$  时,车辆在制动过程中才能获得最好的制动效能及行驶稳定性,此时车轮的实时滑移率必须处在最佳滑移率附近。本文研究的路面为高附着系数路面(干沥青路面、湿混凝土路面)、低附着系数路面(冰雪路面)及分离系数路面(左侧路面系数 0.8,右侧路面系数 0.2),其最佳滑移率分别为 0.2, 0.08, 左侧 0.2、右侧 0.08。

### 2.2 模糊控制器的设计

(1) 变量的选取及其变化范围的确定。

比较容易获得的信息量是车辆实时的滑移率与最佳滑移率之间的误差  $E$  及误差  $E$  的变化率  $EC$ ,因此本文建立了输入量为滑移率误差  $E$  和滑移率误差变化率  $EC$ ,输出量为制动压力变化加权系数  $U$  的典型的双输入单输出控制系统。

滑移率  $\lambda$  的大小范围为  $[0, 1]$ ,当设定的最佳滑移率  $\lambda_0$  为 0.2 时,滑移率误差  $E$  的变化范围相应为  $[-0.2, 0.8]$ 。滑移率误差变化率  $EC$  的范围取为  $[-60, 60]$ ,制动压力变化加权系数  $U$  的取值范围为  $[-1, 1]$ 。

(2) 系统隶属函数的设计。

考虑到系统的性能及控制规则的复杂度,选取 {负大(NB),负中(NM),零(ZE),正小(PS),正中(PM),正大(PB)} 划分误差  $E$  区间,选取 {负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZE),正小(PS),正中(PM),正大(PB)} 划分误差变化率  $EC$  以及加权系数  $U$  的区间。考虑到控制系统的灵敏度及鲁棒性,隶属度函数选为三角形分布函数,具体如图 3、图 4 所示。

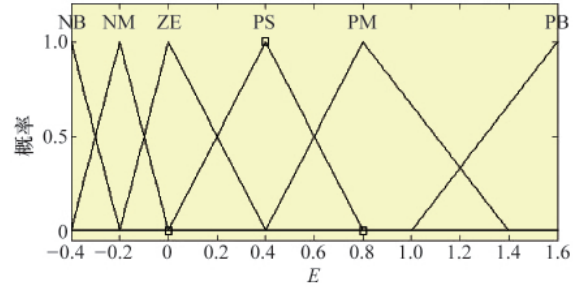


图 3 滑移率误差  $E$  的隶属度函数

Fig. 3 The slave function of slipping ratio error  $E$

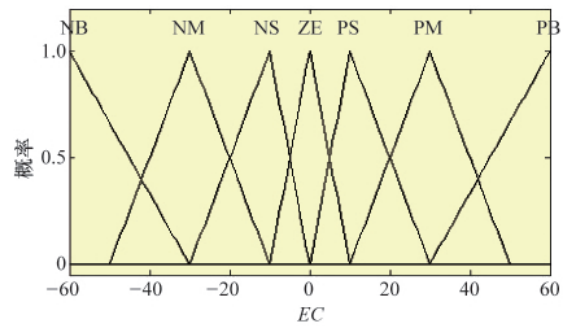


图 4 滑移率误差变化率  $EC$  的隶属度函数

Fig. 4 The slave function of changing rate of slipping ratio error  $EC$

由于实际制动过程中制动器具有迅速降压、中速降压、慢速降压、保压、慢速加压、中速加压及迅速加压的过程,所以本文把制动压力变化加权系数  $U$  在论域  $[-1, 1]$  上划分为 7 档:负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZE),正小(PS),正中(PM),正大(PB)。具体如图 5 所示。

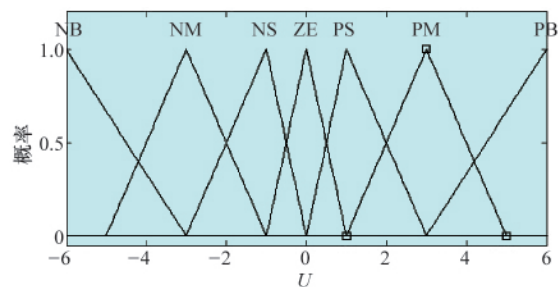


图 5 制动压力变化加权系数  $U$  的隶属度函数

Fig. 5 The slave function of the weighting coefficient  $U$  for brake pressure changes

(3) 模糊规则的设计。

模糊条件语句如下:

$$\text{if } E \text{ and } EC \text{ then } U \quad (4)$$

最佳滑移率  $\lambda_0$  是控制器的目标控制量,当滑移率误差  $E > 0$  时,表明车辆制动过强,即制动压力过大,必须减小制动压力。所以,当滑移率误差  $E > 0$  时,且误差变化率  $EC \geq 0$  时,

要迅速消除误差  $E$ ,则需要制动压力变化加权系数  $U$  取负大或负中;当滑移率误差  $E$  变小后,要想保证控制系统的稳定性且防止过大的超调量,就需要制动压力变化加权系数  $U$  为零或者负小、正小。当滑移率误差  $E < 0$  时,表明此时车辆制动不足,即制动压力偏小。当误差变化率  $EC \leq 0$  时,则需要迅速增大制动力,故此时制动压力变化加权系数  $U$  可取正大或正中。依此类推,可以得出 42 条经验规则。然后,分析仿真得到的实际控制效果,进一步对经验规则进行了一些必要的调整,最终得到的制动压力变化加权系数  $U$  模糊控制规则如表 2 所示。

表 2 制动压力变化加权系数  $U$  的模糊控制规则

Table 2 The fuzzy control rule of weighting coefficient  $U$  for brake pressure changes

$E$	$EC$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	ZE
NM	PM	PM	PS	PS	ZE	ZE	NS
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NM
PS	PS	ZE	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB
PB	NS	NM	NM	NM	NB	NB	NB

本控制器模糊逻辑推理采用 Mamdani 极大极小值的方法,并采用重心法解模糊<sup>[13]</sup>。至此,ABS 模糊控制器已经建成,如图 6 所示。

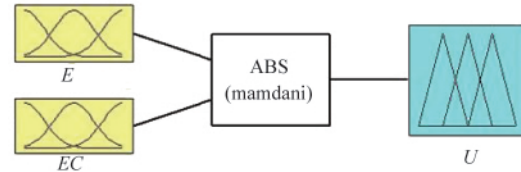


图 6 ABS 模糊控制器

Fig. 6 ABS Fuzzy controller

### 3 ADAMS/Car 与 Matlab/Simulink 联合仿真的实现

ADAMS/Car 的输入输出量是和 Matlab/Simulink 中设计的控制系统进行数据通信的接口。ADAMS/Car 中建立的输出量是控制系统的输入量,控制系统的输出量是返回到 ADAMS/Car 的输入量,从而使得 ADAMS/Car 和 Matlab/Simulink 形成一个闭环控制。由于 ABS 控制中需要利用车轮转速及车速计算车轮滑移率,因此 ADAMS/Car 整车模型的输出量(即控制器模型的输入)为 6 个车轮转速及整车车速。由于需要实时控制车辆的制动力矩,因此 ADAMS/Car 整车模型的输入量(即控制器模型的输出)为制动器模型中建立好的 6 个制动力矩变化系数。

在 Matlab/Simulink 中将带有三轴制动器的整车虚拟样机模型转化为 S-Function 模型加入到控制模型中,从而使整车模型和 ABS 控制模型连接形成一个完整的 ABS 联合仿真。实际的 ABS 系统具有动态特性,会造成制动力矩相对于控制指令有一定的迟滞。因此,在控制系统中设置了迟滞时间为 10ms<sup>[14]</sup>。整车的联合仿真模型如图 7 所示。

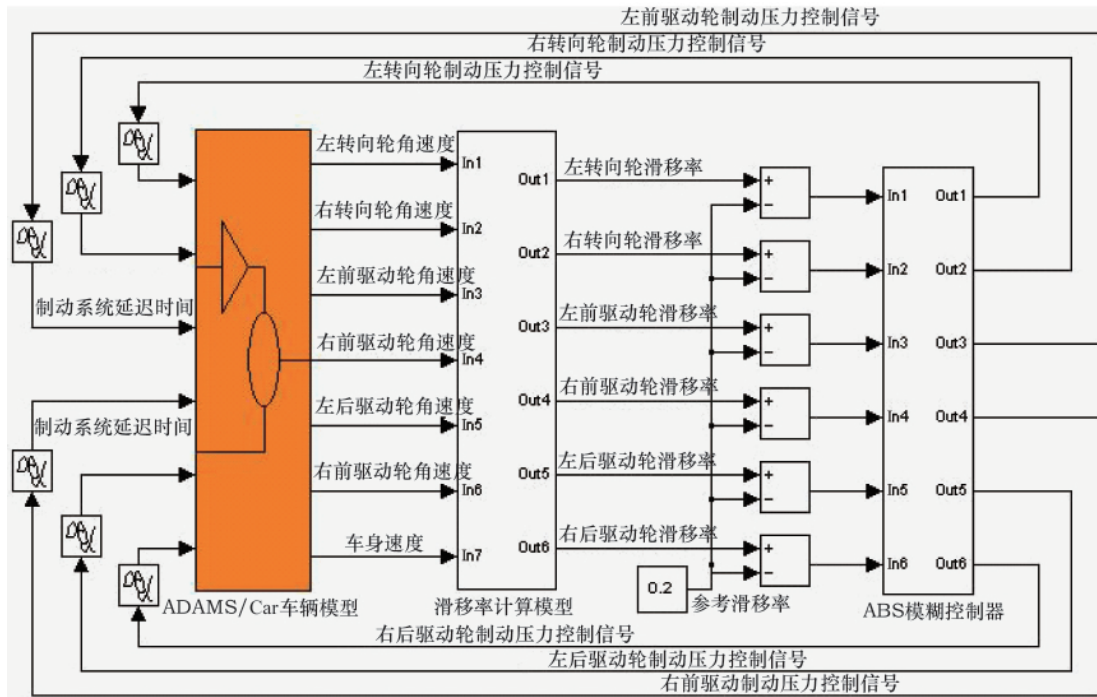


图 7 重型汽车联合仿真模型

Fig. 7 The jointimulation model of the heavy vehicle

联合仿真的具体过程为:

- (1) 系统在指定的时间给整车施加一个制动踏板力;
  - (2) 将实时监测各车轮转速和车速并输入到滑移率计算模块计算滑移率  $\lambda$ ;
  - (3) 把各轮实时滑移率  $\lambda$  与最佳滑移率  $\lambda_0$  的差值  $E$  传输到模糊控制系统;
  - (4) 模糊控制系统根据模糊控制规则运算得到各轮制动压力变化加权系数  $U$ , Simulink 将该值输入到车辆的制动系统。
- 这样 Matlab/Simulink 中建立的 ABS 模糊控制系统就可以实时地对 ADAMS/Car 整车模型中的制动系统制动压力进行调节,使车轮滑移率  $\lambda$  始终处在最佳滑移率  $\lambda_0$  附近。

#### 4 仿真结果分析

选取 3 种路面:附着系数为 0.8 的高附着沥青路面,附着

系数为 0.2 的低附着冰雪路面,以及左轮附着系数为 0.8、右轮附着系数为 0.2 的分离系数路面。分别以初速度 64.4,32.2,40.0km/h 直线行驶,然后急踩制动,制动强度为 100,即:从 0~1s 内将制动踏板踩到底。在整个仿真过程中,方向盘处于直线状态,初始仿真步长设为 0.01s。

##### 4.1 制动效能及制动时间

制动效能是指汽车迅速降低车速直至停车的能力,它的评价指标为制动减速制动距离,直接影响汽车的行驶安全性。因为紧急制动时驾驶员的心理受到很大压力,所以这里把制动时间也看作一项评价指标。由联合仿真得到有与无控制的制动距离及制动减速度如图 8、图 9 所示。

为了更明显地分析本文设计的 ABS 模糊控制在不同路面上的制动效果,列出了有控制与无控制车辆的制动距离和制动时间,如表 3 和表 4 所示。

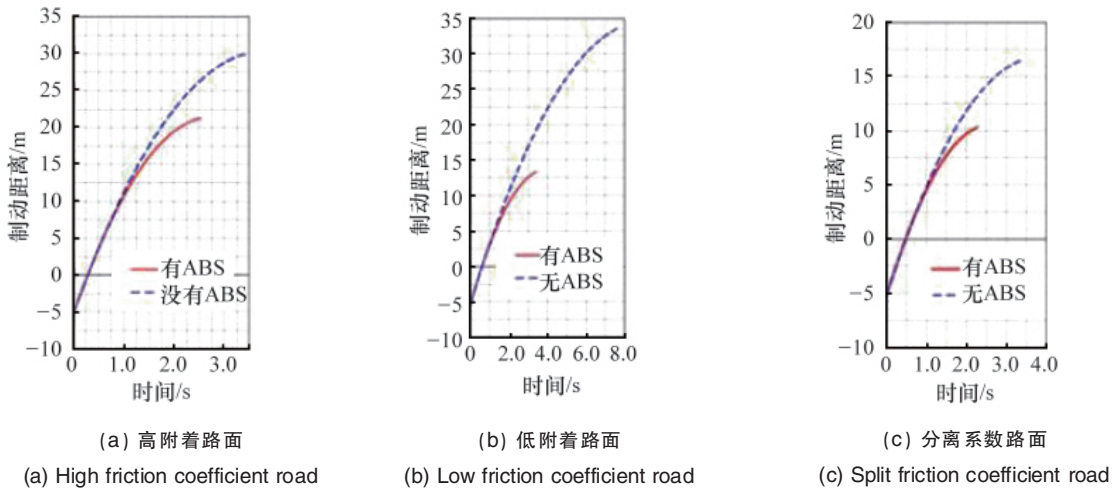


图 8 制动距离  
Fig. 8 Brake displacement

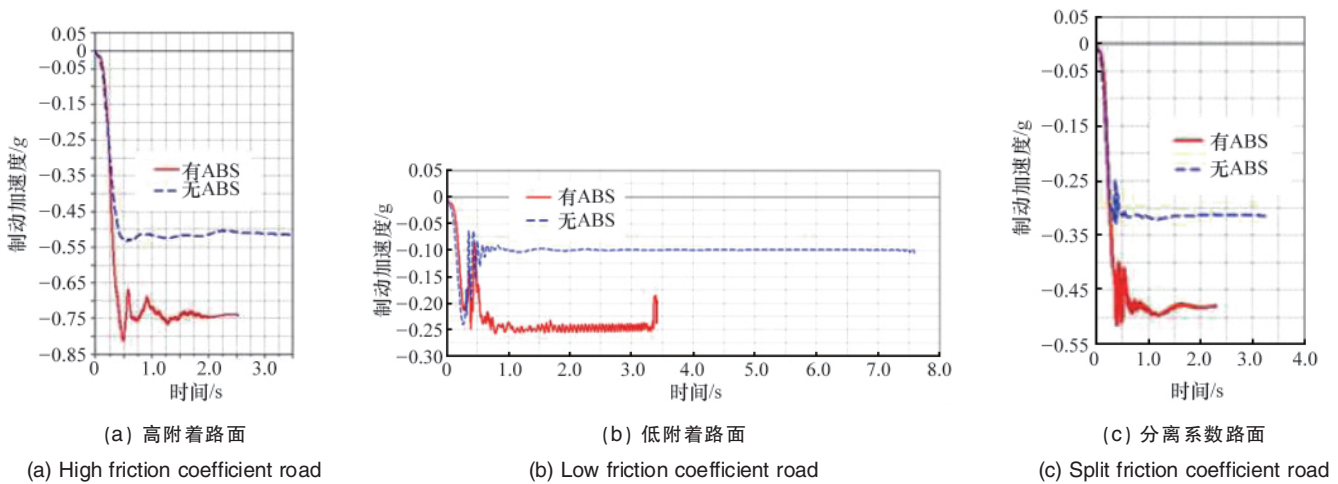


图 9 制动加速度  
Fig. 9 Brake acceleration

表 3 纵向制动距离分析表

Table 3 Analysis table of vehicle longitudinal displacement

路面	制动距离/m		缩短百分比/%
	模糊控制	无控制	
高附着路面	21.22	30.065	28.42
低附着路面	13.32	33.477	60.22
分离系数路面	10.309	16.407	37.17

表 4 制动时间分析表

Table 4 Analysis table of vehicle braking time

路面	制动时间/s		缩短百分比/%
	模糊控制	无控制	
高附着路面	2.535	3.5	27.57
低附着路面	3.42	7.59	54.94
分离系数路面	2.31	3.34	30.87

从图 8、图 9 及表 3、表 4 可以看出:

(1) 施加 ABS 模糊控制后,车辆的制动距离减小,制动时间缩短。在低附着路面的效果最好,分离系数路面次之,高附着系数路面的效果较差。

(2) 有 ABS 控制的车辆制动减速度大于无控制车辆,且波动激烈。原因是控制器根据各个轮胎的实时滑移率调整制动力矩,轮胎纵向力不断进行变化。

因此,本文设计的控制器在 3 种路面上都能够提高制动效能、缩短制动时间,且控制效果明显。

#### 4.2 滑移率及车轮转速

由联合仿真可以得到 3 种路面上各个轮胎滑移率的变化情况。为了节省篇幅,只给出了分离系数路面中处于低附着路面的轮胎(右侧轮胎)滑移率及轮速车速对比图(图 10~图 15)。

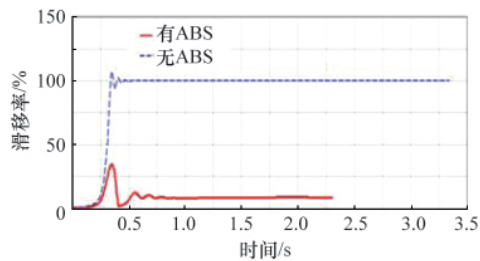


图 10 右转向轮滑移率

Fig. 10 Slipping rate of right steering wheel

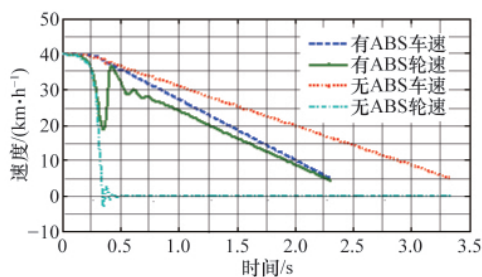


图 11 右转向轮转速与车速对比

Fig. 11 Comparison between vehicle velocity and wheel velocity

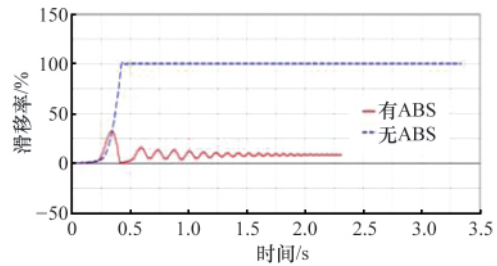


图 12 右前驱动轮滑移率

Fig. 12 Slipping rate of right-front drive wheel

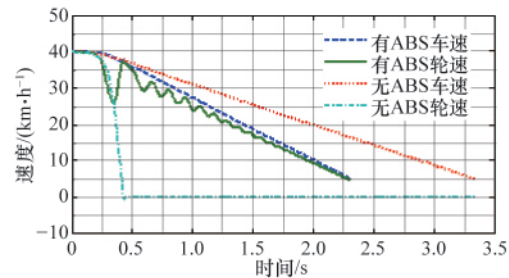


图 13 右前驱动轮转速与车速对比

Fig. 13 Comparison between vehicle velocity and wheel velocity

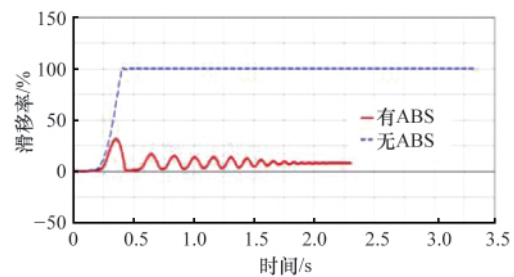


图 14 右后驱动轮滑移率

Fig. 14 Slipping rate of right-rear drive wheel

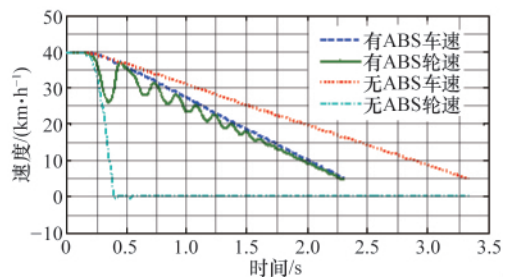


图 15 右后驱动轮转速与车速对比

Fig. 15 Comparison between vehicle velocity and wheel velocity

从图 10~图 15 可以看出:

(1) 右侧轮胎的滑移率都控制在了最佳滑移率 8%左右,这个时候地面对轮胎能够提供最大的纵向力,这有利于缩短制动的距离。从调整的速度看,驱动轮比转向轮要慢,并且波动也稍大于转向轮。

(2) 从轮胎的抱死情况看,没有安装 ABS 的车辆在制动中,右转向轮在 0.31s 时出现抱死,早于驱动轮抱死时间 0.39s 和 0.48s。转向轮的提前抱死对车辆的安全行驶有极大的影响,严重时会造成车辆的侧翻,而安装 ABS 的车辆则很好地避免了各车轮抱死。

(3) 从轮速车速的对比看,装有 ABS 的车辆的车速都在不断地进行调节,这不但防止了车轮抱死,还使车辆轮胎的滑移率维持在最佳滑移率左右。并且,有 ABS 控制的车辆的车速减小得更迅速,制动效果更好。

通过联合仿真可知,本文设计的 ABS 模糊控制器在 3 种路面上都能使车轮滑移率保持在最佳滑移率附近,有效地防止了车轮抱死,提高了车辆制动的稳定性。

## 5 结论

本文基于 ADAMS/Car 和 Matlab/Simulink 联合仿真进行了重型汽车 ABS 模糊控制的研究,建立了整车虚拟样机模型、三轴制动系统模型和 ABS 模糊控制系统。研究发现,对于高附着的沥青路面、低附着的冰雪路面及分离系数路面,本文设计的基于滑移率的 ABS 模糊控制在制动过程中都能达到良好的制动效果。与不加控制的汽车相比,在制动距离、制动时间以及制动稳定性方面都有较突出的优势,符合社会对重型汽车制动系统的需要。

## 参考文献 (References)

- [1] Wang J, Song C X, Jin L Q. Modeling and simulation of automotive four-channel hydraulic ABS based on AMESim and Simulink/Stateflow[C]. Intelligent Systems and Applications (ISA), 2010 2nd International Workshop on, Wuhan, May 22-23, 2010.
- [2] 宋年秀, 苏建, 王东杰, 等. 半挂汽车列车弯道行驶制动稳定性[J]. 交通工程运输学报, 2010, 10(1): 50-55.  
Song Nianxiu, Su Jian, Wang Dongjie, et al. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 50-55.
- [3] 万振, 高峰, 丁靖, 等. 多轴车制动的动力学模型及制动性能分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(3): 365-369.  
Wan Zhen, Gao Feng, Ding Jing, et al. China Mechanical Engineering, 2008, 19(3): 365-369.
- [4] 郭芹凤. 重型卡车 ABS 控制器的硬件在环仿真研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.  
Guo Qin Feng. Research on the hard ware-in-the-loop simulation of ABS controller of heavy truck[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [5] Song J H. Performance evaluation of a hybrid electric brake system with a sliding mode controller[J]. Mechatronics, 2005, 15(3): 339-358.
- [6] 段军峰. 基于排气门制动的重型汽车山区连续下坡安全性研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.  
Duan Junfeng. Safety study of heavy vehicle driving downhill basing on exhaust valve brake[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [7] Zhang X Q, Yang B, Yang C. Research on ABS of multi-axle truck based on ADAMS/Car and Matlab/Simulink[J]. Procedia Engineering, 2012, 37: 120-124.
- [8] 李新. 基于 Simulink/Adams 的多轴车辆 ABS/ASR 系统仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011.  
Li Xin. Multi-Axis vehicle ABS/ASR system simulation research based on Simulink/Adams[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [9] 郝赫. 多轴重型汽车刚弹耦合虚拟样机分析与匹配[D]. 长春: 吉林大学, 2011.  
Hao He. Analysis and matching on rigid-flexible coupling virtual prototype of heavy-duty truck with multi-axes [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [10] 李志高. 汽车 ABS 的控制算法与仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.  
Li Zhigao. The control algorithm and simulation study for automotive ABS[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [11] 李君, 喻凡, 张建武. 基于道路自动识别 ABS 模糊控制系统的研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 26-29.  
Li Jun, Yu Fan, Zhang Jianwu. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 26-29.
- [12] 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. Examples of technology and engineering analysis by using MSC.ADAMS[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008.
- [13] 张国良, 邓方林, 曾静, 等. 模糊控制及其 MATLAB 应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.  
Zhang Guoliang, Deng Fanglin, Zeng Jing, et al. Fuzzy control and MATLAB applications[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003.
- [14] 张云清, 熊小阳, 陈伟, 等. ADAMS 与 Simulink 的 ABS 模糊控制仿真研究[J]. 公路交通科技, 2007(11): 148-158.  
Zhang Yunqing, Xiong Xiaoyang, Chen Wei, et al. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007(11): 148-158.

(责任编辑 刘志远)

## 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。