车辆防抱死制动系统仿真研究

张远东，王建正

（天津工业大学管理学院，天津 300387）

摘要：建立适用于计算机仿真的车辆动力学模型，包括单轮车辆模型、轮胎模型、制动系统模型、路面模型和控制模型，并采用车辆动力学原理和 Matlab/Simulink 仿真相结合的方法，建立了 Matlab/Simulink 仿真程序模块，并分析了普通制动系统和装有防抱死制动系统（anti-lock braking system，ABS）车辆制动过程中各参数的动态变化规律。经过与已有的单轮实验研究对比，证实该仿真计算结果较为理想，为 ABS 制动过程的研究提供了一套有效的方法。

关键词：车辆工程；车辆；防抱死制动系统；仿真

中图分类号：U463.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-2850(2012)06-1124-8

Simulation study of the vehicle anti-lock braking system

ZHANG Yuandong，WANG Jianzheng

(*College of Management*，*Tianjin Polytechnic University*，*Tianjin* 300387，*China*)

Abstract：The paper established simulation models of anti-lock braking system (ABS)，including single-wheel vehicle model，tire model，brake system model，road model and control model. Using the method which combines the vehicles principle of dynamics and the Matlab/Simulink simulation，the establishment obtains the Matlab/Simulink simulated program module. The simulation has analyzed the ordinary braking system and is loaded with guards against holds in the ABS vehicles brake process various parameters dynamic change rule. Simultaneously passing through with the monowheel experimental study contrast which has confirmed the simulation computation result is very good，providing sets of effective methods for the ABS brake process research.

Key words：vehicle engineering；vehicle；anti-lock braking system；simulation

0 引言

汽车是当今世界最主要的交通工具之一，而汽车运输的安全性、经济性和舒适性是人们所关注的焦点。汽车的制动性能是表征汽车行驶安全性的一个重要指标，随着汽车拥有量和汽车行驶速度的不断提高，研究和改善汽车的制动性能已成为汽车设计与开发的重点。汽车 ABS 在各种车辆上已经得到广泛应用，并成为汽车主动安全控制的一个重要研究方向，也是现代汽车研究的重要课题。

汽车 ABS 计算机仿真检测系统通过对车辆与道路等的仿真，能模拟道路实验的状况，指导 ABS 产品的设计开发和评价，减少路试次数，缩短出厂周期，降低产品费用与实验风险，是 ABS 开发生产和评价的有力辅助工具。因此，文章借助前人研究的基础和经验[1]，基于汽车制动系统动力学理论的研究，学习掌握 Matlab/Simulink 建模和计算分析方法，建立汽车单轮车辆模型、轮胎模型、制动系统模型、路面模型及控制模型，为达到仿真可行性与可信度的统一，对模型进行合理的简化。采用 Matlab 7.0/Simulink 对数学模型进行图形建模和仿真分析，通过仿真实验得到不带 ABS 和带有 ABS 车辆的车速、轮速、滑移率、制动力矩和制动距离曲线，以及几种不同路面的附着系数与滑移率的关系。并将二者的仿真结果进行对比分析，得到了比较满意的结果，为整车的动力学仿真平台建立打下了基础[1]。

作者简介：张远东（1987—），男，硕士研究生，主要研究方向：物流工程、交通运输
通信联系人：王建正，教授，主要研究方向：企业信息化. E-mail：tjpuwjz@163.com

1 车辆 ABS 的 Matlab/Simulink 模型

利用 Matlab 7.0/Simulink 对汽车 ABS 的各个子系统进行图形仿真建模，包括单轮车辆模型子系统、轮胎模型子系统、制动模型子系统、滑移率计算子系统、控制器模型子系统等。

1.1 路面纵向附着系数模型的建立

由于课题不考虑车辆的转弯制动，因此忽略车轮的侧向受力，采用简单且常用的 PACEJKA 提出的魔术公式[2]（不考虑侧向滑移）：

$$\varphi_S = \varphi_0 + A\sin(B\arctan\{Cs - D[Cs - \arctan(Cs)]\}), \tag{1}$$

其中，φ_0 为车轮在纯滚动时的附着系数，一般情况下设为 0；A，B，C，D 为待定参数，都是与路面有关的常数；s 为滑移率。通过改变这些参数，可模拟不同的路面附着系数[3]。

通过 Simulink 模型由上面的数学模型得模拟图（如图 1 所示）。

进行仿真分析得到附着系数与滑移率的关系（如图 2 和表 1 所示）。

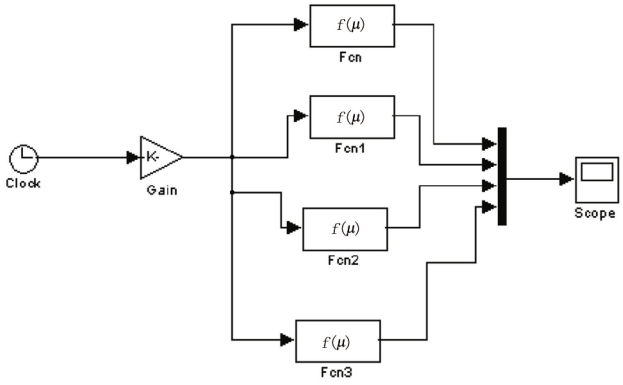


图 1 仿真程序图

Fig. 1 Simulation module

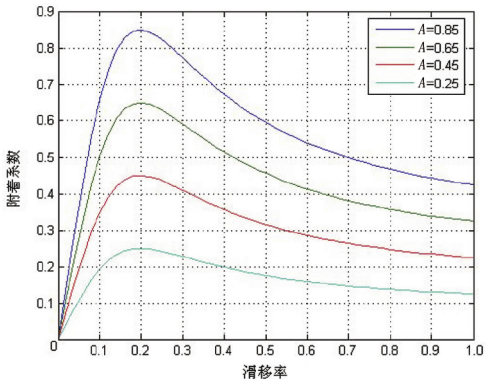


图 2 几种不同路面的附着系数模拟示意图

Fig. 2 Simulation diagram of adhesive coefficient simulation of several road

表 1 曲线参数

Tab. 1 Curve parameters

曲线名	A	B	C	D
曲线 1	0.85	2.0	6.0	0.8
曲线 2	0.65	2.0	6.0	0.8
曲线 3	0.45	2.0	6.0	0.8
曲线 4	0.25	2.0	6.0	0.8

1.2 车轮受力仿真模块的建立

在很多场合下，为简化问题，可以采用四分之一车体模型[4]，也就是一个单轮的车辆模型。本研究主要进行车辆的制动性能检测，对于仿真检测实时性要求较高，为简化研究问题，采用单轮模型，忽略空气阻力和车轮滚动阻力，已知单轮模型动力学公式如下：

车辆运动方程为

$$M\dot{v} = -\mu F_S; \tag{2}$$

车轮运动方程为

$$I\dot{\omega} = \mu F_S R - M_b; \tag{3}$$

车轮纵向摩擦力为

$$F_S = N\mu; \tag{4}$$

制动力矩为

$$M_b = at; \tag{5}$$

其中，M 为汽车质量；μ 为附着系数；N 为地面的支撑力；F_s 为地面附着力；R 为汽车轮胎半径；M_b 为汽车制动时的制动力矩；I 为车轮等效转动惯量；v 为汽车速度；ω 为轮胎角速度；a 为制动器制动因数；t 为时间。

单轮车辆子系统的 Simulink 仿真模型是根据以上公式建立起来的图形模块。以制动器制动力矩 M_b 和纵向附着系数 μ 为输入；以车身速度 v、车轮角速度 ω 及制动距离为输出，并将车身速度 v 和车轮线速度 $R\omega$ 送入滑移率计算子模块进行仿真（如图 3 所示）。

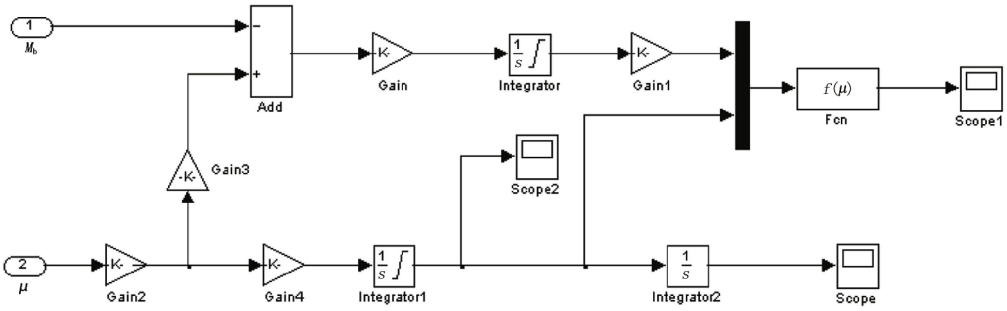


图 3　车辆系统仿真程序图

Fig. 3　Vehicle system simulation module

1.3　路面仿真模块的建立

用双线性模型来简化轮胎模型，轮胎模型用 2 个直线方程来表达，即双线性数学模型：

$$\begin{cases} \mu = \dfrac{\mu_h}{S_e} S, \quad S \leqslant S_e; \\ \mu = \dfrac{\mu_h - \mu_g S_e}{1 - S_e} - \dfrac{\mu_h - \mu_g}{1 - S_e} S, \quad S > S_e; \end{cases} \tag{6}$$

其中，S_e 为最佳滑移率；μ_h 为峰值附着系数；S 为车轮滑移率；μ_g 为滑移率为 1.0 时对应的附着系数；μ 为纵向附着系数。

路面模型子系统的 Simulink 仿真模型是根据上面的双线性数学模型建立起来的图形模块[5]。如图 4 所示，它以滑移率 S 为输入，以纵向附着系数 μ 输出，并将附着系数 μ 为送入单轮车辆子系统进行仿真。

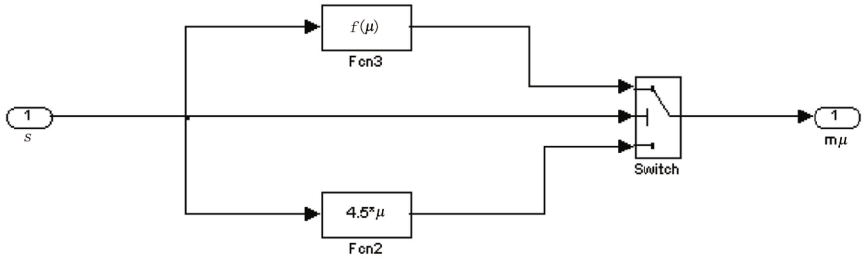


图 4　路面仿真程序图

Fig. 4　Simulation module of the road

1.4 制动模块的建立

在制动时，首先要克服制动器及制动缸中的弹簧回位力，假定克服弹簧力所需压力为 P_m，则相应的制动力矩可以表达为

$$M_b = \begin{cases} 0, & P - P_m \leqslant 0; \\ k_p(P - P_m), & P - P_m > 0, \end{cases} \tag{7}$$

其中，k_p 为制动器制动因数；M_b 为制动器制动力矩；P_m 为克服弹簧回位力所需的气液压力，即制动初始延迟；P 为气液压力。

为便于控制算法研究，在进行仿真时假设制动器为理想元件，认为其非线性特性较弱并忽略其滞后带来的影响。车轮制动器制动转矩是制动管路压力的函数，可表达为

$$M_b = k_p \cdot P(t), \tag{8}$$

其中，M_b 为制动器扭矩；$p(t)$ 为制动缸压力；k_p 为制动器制动因数。

制动模型子系统的 Simulink 仿真模型，是根据上述两式的数学模型建立起来的图形模块[6]。如图 5 所示，以控制器的控制信号为输入，制动器的制动力矩 M_b 为输出，并将制动器制动力矩 M_b 送入单轮车辆子系统进行仿真。

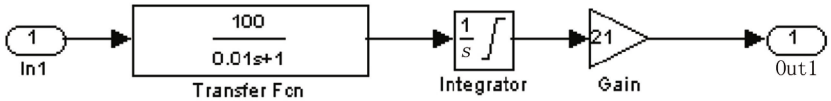


图 5 制动模型仿真程序图

Fig. 5 Brake simulation module

1.5 滑移率模块的建立

滑移率模块系统的 Simulink 仿真模型是根据滑移率 S 的定义式建立的，定义式为

$$S = 1 - \frac{Rw}{v}, \tag{9}$$

其中，S 为滑移率（%）；v 为车身速度（m/s）；ω 为车轮速度（rad/s）；R 为车轮半径（m）。

建立起来的图形功能模块以车身速度 v 和车轮线速度 $R\omega$ 为输入，以滑移率 S 为输出，并将滑移率 S 送入轮胎模型子系统及控制器模型子系统进行仿真（如图 6 所示）。

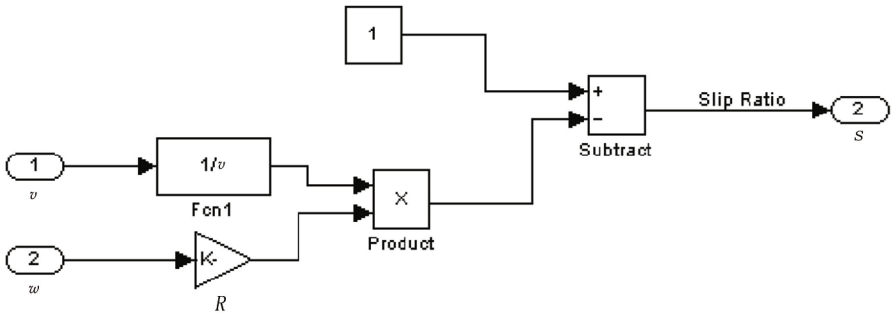


图 6 滑移率模块程序图

Fig. 6 Module of calculation slip rate

1.6 控制器模块的建立

比例积分微分（proportion integration differentiation，PID）控制是连续系统中技术成熟、应用最为广泛的一种控制方式。它最大的优点是不需要了解被控对象的数学模型，只要根据经验进行调节器参数的在线整定，即可获得满意的结果，并且容易实施，因而 PID 控制保持了长久的生命力[7]。

其连续时间控制律为

$$u = k_p\left(e + \frac{1}{T_i}\int_0^t e\mathrm{d}t + T_d\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}\right) + u_0, \tag{10}$$

其中，u 为控制量；u_0 为控制量初值；k_p 为比例系数；T_i 为积分时间常数；T_d 为微分时间常数；e 为控制误差。

将滑移率误差作为控制量，定义车轮滑移率误差为

$$e = -(S - S_0), \tag{11}$$

其中，S_0 为期望滑移率，S 为实际滑移率。

文章采用 PID 控制模式，以上述两式建立图形功能模块，输入为期望滑移率与实际滑移率之差，输出为控制信号（如图 7 所示）。

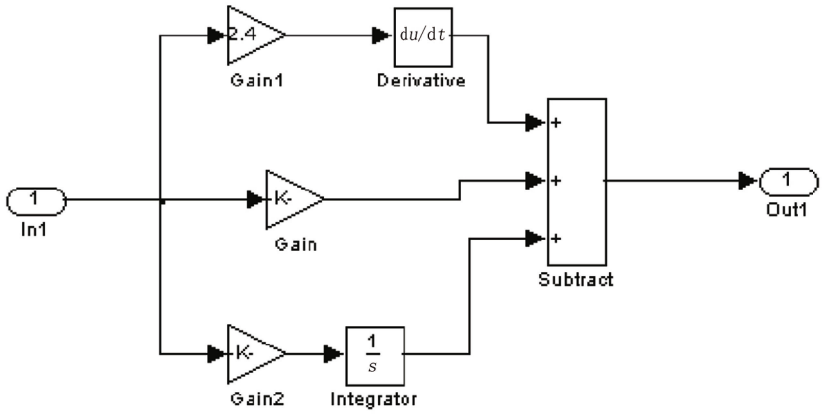


图 7　PID 控制器模块程序图

Fig. 7　Simulation model of PID controller

2　车辆 ABS 的 Matlab/Simulink 模型仿真及分析

以不带 ABS 的汽车模型和带有 ABS 的汽车模型在干燥混凝土路面情况下的制动为例进行仿真与分析[8]。

2.1　不带 ABS 仿真程序图

不带 ABS 仿真程序图如图 8～图 9 所示。

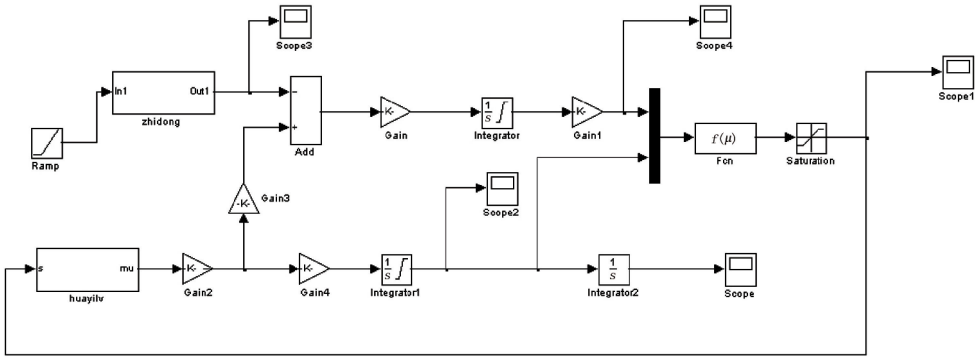


图 8　不带 ABS 车辆制动仿真程序图

Fig. 8　Simulation diagram of vehicle braking without ABS

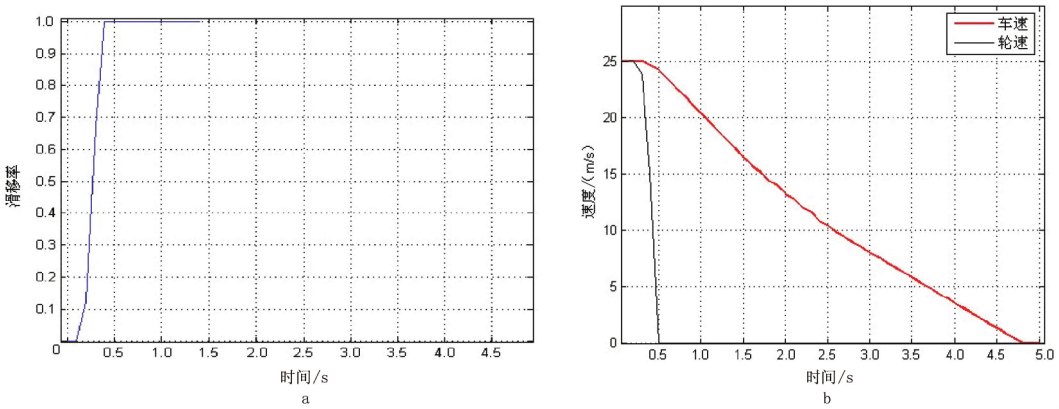


图 9 在干混凝土路面不带 ABS 的车辆制动仿真

Fig. 9 Simulation diagram of vehicle braking without ABS on the dry concrete road

a—滑移率；b—速度

a-Slip rate；b-Velocity

2.2 带有 ABS 仿真程序图

带有 ABS 仿真程序图如图 10～图 11 所示。

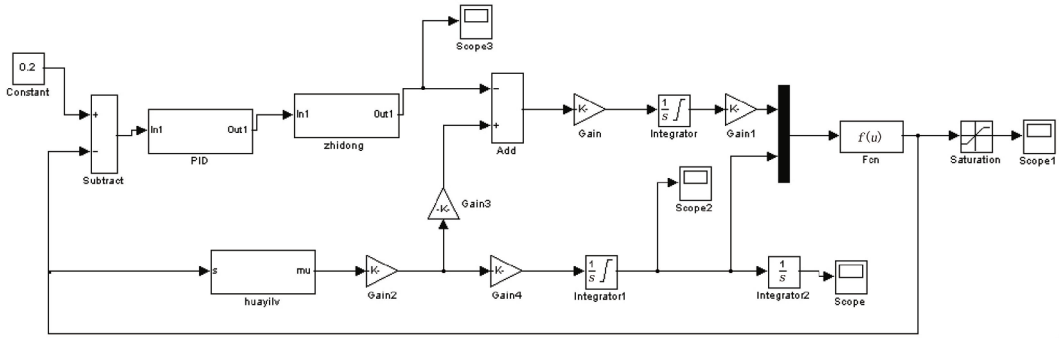


图 10 带有 ABS 车辆制动仿真程序图

Fig. 10 Simulation diagram of vehicle braking with ABS

2.3 仿真结果分析

从以上仿真结果中可以看出：

1）没装 ABS 的车辆在高速制动时容易造成车轮抱死，且路面最大附着系数越小，车轮抱死的时间越短，抱死时车身的速度越大，总的制动时间和制动距离都越长。在同一车速下，不同的附着系数产生的制动力不等。

2）在无 ABS 时轮速就很快下降为 0，即车轮抱死拖滑，这样对于汽车驾驶的安全性即轮胎的使用寿命都非常不利；而在以 PID 控制的 ABS 调节下，轮速在下降过程中呈现明显波动，说明 ABS 的压力调节器在起作用。PID 调节器使轮速相对平缓地降为 0. 也就是说，在车速下降的整个过程中，轮胎都没有抱死现象，有利于降低制动距离，提高轮胎寿命，同时保证制动过程中的方向稳定性，增强了汽车驾驶的安全性。

3）在没有装 ABS 的汽车上，汽车车轮的滑移率在接近 0.5 s 时迅速变为 1.0，即车轮抱死拖滑；而在以 PID 控制 ABS 的调节下，滑移率始终保持在 0.2 上下的小范围内波动，PID 调节使滑移率逐渐接近 0.2. 根据在高附着系数路面上附着系数与车轮滑移率的关系，车轮可以获得最大的附着系数。

4）制动时滑移率很快就达到最佳滑移率，除了前面一小段时间的超调外，均维持在最佳滑移率上，显然，PID 控制器可以较好地完成汽车防抱制动的要求，且其控制平滑稳定。

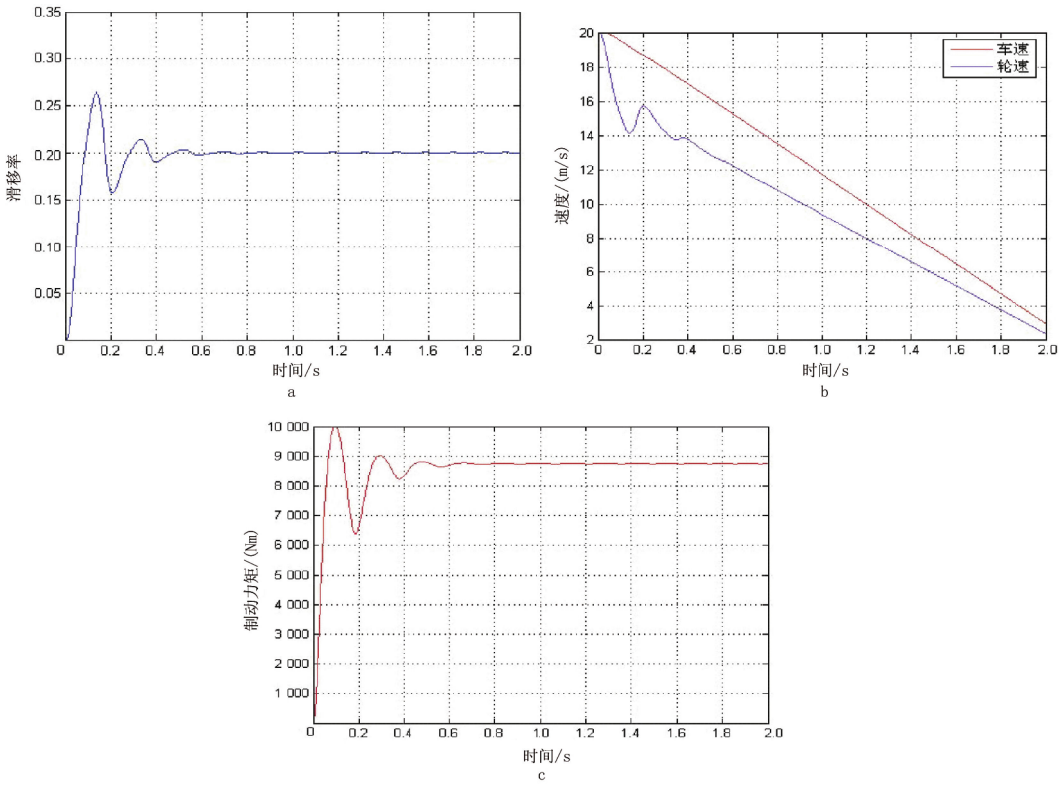


图 11　在干混凝土路面带有 ABS 的车辆制动仿真
Fig. 11　Simulation diagram of vehicle braking with ABS
a—滑移率；b—速度；c—制动力矩
a-Slip rate；b-Velocity；c-Brake torque

5）在无 ABS 时，迅速抱死，车轮的滑移率迅速增大为 1.0，制动状况恶化；而增加了 ABS 后，车轮没有发生抱死现象，滑移率控制在最佳滑移率附近，缩短了制动距离，并使制动状况得到了改善。

6）研究采用 Matlab/Simulink 仿真方法，分析了装有普通制动系统和装有 ABS 的汽车模型在制动过程中一些参数的动态变化规律，经过研究对比，证明仿真计算合理，合乎预期，得到了较为满意的结果[1]。

7）仿真系统可用于车轮制动性能的检验，特别是 ABS 控制算法和控制理论的检验。单轮系统是整车系统的基础，因此，为今后整车 ABS 的研究提供了较强的技术支持。

3　结论

文章是为开发基于计算机仿真的车辆 ABS 进行建模与检测技术的研究。而目前在提高制动性能的各项技术中，最有效且得到广泛应用的就是 ABS，因此开展这方面的研究工作不仅具有理论意义，而且具有实际的应用价值。

文章所述的汽车 ABS 性能评价的半实物仿真系统是在 Matlab/Simulink 环境中建立的。该单轮 ABS 仿真系统可用于对单个车轮制动性能的检验，特别是 ABS 控制算法和控制理论的检验。单轮系统是整车系统的基础，因此该系统的开发为今后整车 ABS 的研究提供了较强的技术支持。

但是由于条件限制，文章没有对双轮车辆模型、四轮车辆模型进行控制仿真研究，这将是本课题继续研究的一个重要方向。另外，对 ABS 控制算法进行半实物仿真或者实物仿真，进行实际系统的开发与设计，为现在迫切需要完备的 ABS 评价方法和检测设备提供研究成果是本课题更为重要的研究方向[9]。

[参考文献] (References)

[1] 马明星，仇屹珏. 基于 Matlab 的车辆制动过程仿真研究[J]. 成组技术与生产现代化，2004，21 (3)：11-14.
MA M X，QIU Y J. Simulation studies on vehicle brake process based on Matlab[J]. Group Technology & Production Modernization，2004，21(3)：11-14. (in Chinese)

[2] 余志生. 汽车理论[M]. 北京：机械工程出版社，2009.
YU Z S. Vehicle theory[M]. Beijing：China Machine Press，2009. (in Chinese)

[3] 陶喆，林财兴，何绪兰，等. 基于自适应滑移率的汽车防抱死系统研究及仿真[J]. 现代机械，2011，38 (1)：20-23.
TAO Z，LIN C X，HE X L，et al. Research and simulation of anti brake system based on adaptive slip rate[J]. Modern Machinery，2011，38(1)：20-23. (in Chinese)

[4] 赵建敏. 汽车防抱死制动系统的组成与控制原理[J]. 黑龙江科技信息，2010，14 (4)：10.
ZHAO J M. Components and control theory of automotive anti-lock braking system[J]. Heilongjiang Science and Technology Information，2010，14(4)：10. (in Chinese)

[5] 赵双，孙天健，康万新. 基于 Simulink/Stateflow 的汽车 ABS 混合建模与仿真[J]. 客车技术与研究，2006，28 (2)：23-25.
ZHAO S，SUN T J，KANG W X. Hybrid modeling and simulation of vehicles ABS based on Simulink/Stateflow[J]. Bus Technology and Research，2006，28(2)：23-25. (in Chinese)

[6] 李蕾. 基于整车的汽车 ABS 性能仿真检测研究[D]. 上海：上海师范大学，2010.
LI L. Auto ABS performance simulation test research based on vehicle[D]. Shanghai：Shanghai Normal University，2010. (in Chinese)

[7] 聂晋，周萍. 基于 PID 控制的 ABS 仿真研究[J]. 山东交通学院学报，2010，18 (4)：6-9.
NIE J，ZHOU P. Study on Simulation of ABS based on PID control theory[J]. Journal of Shandong Jiaotong University，2010，18(4)：6-9. (in Chinese)

[8] 葛郅汉. ABS 技术及其发展方向[J]. 公路与汽运，2010，26 (1)：19-21.
GE Z H. ABS technology and its development direction[J]. Highways & Automotive Applications，2010，26(1)：19-21. (in Chinese)

[9] CHOI S B. Anti-lock brake system with a continuous wheel slip control to maximize the braking performance and the ride quality[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology，2008，16(5)：996-1003.