

文章编号 :1000-582X(2007)11-0059-05

硬件在回路仿真平台的 ABS 测试方法

郑太雄

(重庆邮电大学 自动化学院 ,重庆 400065)

摘要 :为了缩短汽车防抱死制动控制系统的开发测试时间 ,提出了硬件在回路仿真平台的 ABS 测试方法 ,在研究车辆动力学模型的基础上 ,设计了基于 FPGA 的片上仿真器 ,结合片上仿真器 ,提出了电磁阀特性模型 ,制动系统模型和基于片上仿真器的仿真方法 ;基于片上仿真器 ,开发了具有自主知识产权的硬件在回路仿真测试平台 ,模拟汽车的运行情况 ,为电控单元(ECU)提供一个模拟的车辆运行的环境 ,减少实际装车实验的成本 ,企业试用表明该平台独立于车辆物理系统 ,适用于多种车型。在此平台上对 ABS 进行了仿真测试和控制参数匹配 ,试验证明 ,该仿真平台可缩短 ABS 的开发时间。

关键词 :防抱死制动系统 ;片上系统 ;硬件在回路仿真平台 ;ABS 测试

中图分类号 :TP391.9

文献标志码 :A

防抱死制动系统(ABS)是汽车上重要的主动安全系统 ,可以防止汽车在紧急制动的过程中发生转向失灵 ,侧滑等安全事故 ,并以较快的速度完成制动。然而对 ABS 的 ECU 控制算法的参数进行匹配是一件相当耗时耗资的工作。为了加快的开发进度 ,人们开发出多种半实物仿真试验台^[1-6] ,以模拟汽车运行状况。然而这些半实物仿真平台多是针对特定的车型开发 ,若车型发生变化 ,还要更换相应的物理设备 ,因此这些测试平台不具有通用性。为此 ,本项目应用 FPGA 技术 ,开发了基于 FPGA 的片上仿真器 ,通过对物理系统的建模 ,开发了基于片上仿真器的 ABS 仿真测试平台 ,以取代半实物试验台中的各种实物 ,旨在实车测试之前能在仿真测试平台上完成参数匹配 ,缩短参数匹配周期。

1 车辆模型

1.1 车辆模型

图 1 表示制动时车辆系统力学模型^[7]。

考虑纵向、横向和绕车辆惯性轴的转动 ,其动力学方程如下。

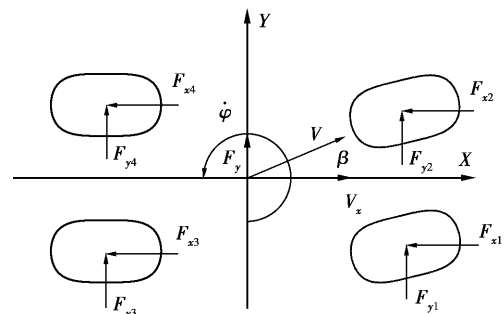


图 1 制动时车辆系统力学模型

$$M(\dot{v}_x - \dot{\varphi} \cdot v_y) = \sum_{i=1}^4 F_{xi}; \quad (1)$$

$$M(\dot{v}_y + \dot{\varphi} \cdot v_x) = \sum_{i=1}^4 F_{yi}; \quad (2)$$

$$I_z \cdot \dot{\varphi} = (F_{x1} + F_{x3} - F_{x2} - F_{x4}) \cdot \frac{c}{2} + a(F_{y1} + F_{y2}) - b(F_{y3} + F_{y4}); \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= M((b \cdot g - \dot{v}_x h)/2L + \dot{v}_y h/2c) \\ N_2 &= M((b \cdot g - \dot{v}_x h)/2L - \dot{v}_y h/2c) \\ N_3 &= M((a \cdot g + \dot{v}_x h)/2L + \dot{v}_y h/2c) \\ N_4 &= M((a \cdot g + \dot{v}_x h)/2L - \dot{v}_y h/2c) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

收稿日期 2007-06-12

基金项目 :重庆市教委科学技术研究项目资助(kj060507) ,重庆市科委科技攻关项目资助(cstc2006ab2026)

作者简介 :郑太雄(1974-) ,男 ,博士 ,主要从事汽车电子、多机器人协同控制等方面的研究 (E-mail) zhengt@ cqupt. edu. cn.

式中 M 是整车质量, v_x 是车辆纵向速度, v_y 是车辆横向速度, $\sum F_x, \sum F_y$ 是作用在车辆纵向力和横向力的和, φ 是车辆横摆角度, $\sum M_z$ 是作用在车辆横摆惯性轴上的力矩, I_z 是横摆转动惯量, c 是车辆轴距, a, b 是前轴和后轴到车辆质心的距离, L 是车辆轴距, N_1, N_2, N_3 和 N_4 分别是左前轮, 右前轮, 左后轮和右后轮对地面的法向反力。

1.2 制动系统压力模型

汽车在制动时随着电磁阀的开启, 制动液(气)迅速流入制动轮缸产生推力, 该推力推动活塞运动, 进而推动与活塞相连的刹车片运动, 刹车片在推力的作用下与车轮摩擦产生摩擦力, 摩擦力使车轮减速从而制动。由于电磁阀本身具有机械惯性, 所以轮缸中压力的变化不会随着电磁阀的开断立刻变化, 轮缸中的压力变化相对于电磁阀的开关有一定的延时, 这种延时导致 ABS 的控制不会立刻作用于制动系统。为此必须建立轮缸中的压力随电磁阀控制信号变化的模型, 以真实的反映制动系统的压力变化。对某气动 ABS 制动系统进行反复测试, 对实验数据进行处理得到电磁阀在加压和减压过程中制动系统的压力模型, 分别如式(5)和(6)所示。

$$P(t+1) = P(t) \exp\left(\frac{-T}{a}\right) + P_a X(t) \left[1 - \exp\left(\frac{-T}{a}\right)\right], \quad (5)$$

$$P(t+1) = \begin{cases} P(t) \exp\left(\frac{-T}{b}\right) + P_b X(t) \left[1 - \exp\left(\frac{-T}{b}\right)\right] & \text{if } P(t) \geq 2.27 \\ P(t) \exp\left(\frac{-T}{c}\right) + P_c X(t) \left[1 - \exp\left(\frac{-T}{c}\right)\right] & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $P(t)$ 和 $P(t+1)$ 分别是制动缸当前的压力值和下一时刻的压力值, 单位是 bar; $X(t)$ 是对电磁阀当前的控制信号, 其值是 1, 0, -1, 分别代表增压、保压和减压控制; P_a, P_b, P_c, μ, b, c 和 T 是常数。

在仿真的过程中, 制动轮缸的中压力可根据方程估算。

1.3 制动器模型

制动系统模型是制动轮缸中的压力与制动片作用在车轮上的制动力矩的关系, 可以用制动因子表示。在仿真的过程中, 当计算得到制动缸的压力后就可以根据制动器模型计算得到作用在车轮上的制动力矩。若制动因子为 α , 则作用在车轮上的制动力矩为

$$M_b = P(t) \alpha \quad (7)$$

1.4 轮胎地面模型

轮胎地面模型也就是轮胎与地面的附着系数随滑移率变化的规律。在此采用 Timothy^[8] 提出的轮胎地面模型, 见式(8)

$$\mu = \begin{cases} 0.9 \times [1.07 \times (1 - e^{-17.73s}) - 0.0026s] & \text{干路面} \\ 0.47 \times [1.07 \times (1 - e^{-77.3s}) - 0.006s] & \text{湿路面} \\ 0.17 \times [1.07 \times (1 - e^{-38s}) - 0.003s] & \text{冰路面} \end{cases} \quad (8)$$

式中 μ 为附着系数, s 为滑移率。

2 硬件在回路仿真平台

2.1 硬件在回路仿真平台结构

硬件在回路仿真平台由 3 部分构成, 分别是计算机, 基于 FPGA 的片上仿真系统和 ECU。其结构如图 2 所示。



图2 硬件在回路仿真平台结构

片上仿真系统通过 PCI 总线与计算机通讯, 车辆模型、电磁阀特性等模型和仿真算法驻留在片上仿真系统, 其工作过程如下: 电磁阀处于常开状态, 当汽车开始制动后, 随着电磁阀开通时间的增加, 制动轮缸的压力不断上升, 该压力作用在制动系统上, 制动系统将此压力转化为作用在车轮上的制动压力。由于车轮受到制动力的作用, 速度迅速下降, 仿真系统将此速度转化为轮速脉冲信号输入 ECU, ECU 根据输入的轮速信号, 按照控制算法中的控制策略将控制指令输出到片上仿真系统, 片上仿真系统上的电磁阀模型根据控制指令改变开关状态, 从而改变制动轮缸中的压力。此过程不断重复, 直到完成制动。片上仿真系统的硬件框图如图 3 所示。

片上仿真系统的工作原理如下: 利用一块光电耦合芯片将 ECU 输出的电压控制信号输入到仿真系统的输入接口, 并用 1, 0, -1 分别表示增压、保压和减压信号。仿真器按照一定的仿真周期读取输入接口的信号, 并将此信号作为驻留在仿真 FLASH 中的仿真程序的输入, 仿真程序根据前述的仿真算法进行仿真, 并将

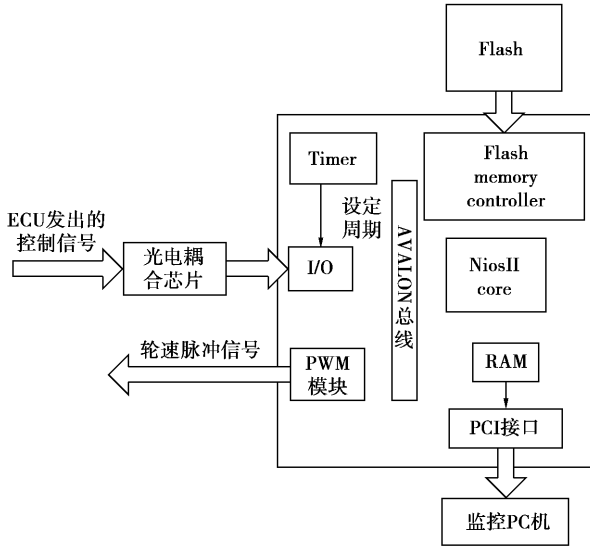


图 3 片上仿真系统的硬件框图

轮速信号和车速信号通过 PCI 总线发送给上位机，上位机将轮速信号和车速信号绘制在图形界面上供技术人员参考。同时片上仿真系统将车轮速度转化成轮速脉冲信号并由 PWM 模块发出，ECU 读取轮速脉冲信号，并发出控制信号，片上仿真系统不断重复此过程，直到完成制动。

2.2 基于片上仿真器的 ABS 仿真

若某时刻计算得到车轮的角速度是 $\omega(t)$ ，车速是 $v(t)$ ，则车轮的滑移率为：

$$s = (1 - \frac{\omega(t)r}{v(t)}) \times 100\% \quad (9)$$

将滑移率代入式(8)得到附着系数。

若此时车轮上的正压力为 N ，附着系数为 μ ，则车轮受到角减速度为：

$$\dot{\omega} = \frac{(M_b - N\mu r)}{J} \quad (10)$$

式中 r 和 J 分别是车轮的半径和转动惯量。

若仿真周期为 Δt ，则下一时刻车轮的角速度为：

$$\omega(t+1) = \omega(t) + \dot{\omega}\Delta t \quad (11)$$

为了能精确模拟汽车在制动过程中物理系统的变化，系统以 1 ms 作为片上仿真系统的仿真周期。

ABS 的 ECU 在控制过程中接收到的信号是由齿圈扫过轮速传感器产生的脉冲信号，而根据动力学方程计算得到的轮速是连续的数字信号。为了使 ECU 接收来自仿真系统产生的轮速，必须将轮速转换为脉冲信号，脉冲信号的频率由下式计算：

$$f = \frac{1\,000 \times v_w}{3\,600 \times 2\pi r \times n} \quad (12)$$

式中 f 是脉冲频率，单位是齿数/秒； v_w 是车轮的线速度，单位是 km/h； r 是车轮半径，单位是 m； n 是齿圈

齿数。

若某时刻 4 个车轮的正压力和附着系数已知，则车身受到的减速度为

$$\dot{v} = \sum_{i=1}^4 \frac{N_i \mu_i}{M} \quad (13)$$

其中 N_i 和 μ_i 分别是第 i 个车轮受到的正压力和附着系数。

则车身在下一时刻的速度为

$$v(t+1) = v(t) + \dot{v}\Delta t \quad (14)$$

在仿真时，片上仿真系统模拟真实的车辆，按照仿真周期设定的时间不断读取电磁阀输出的控制信号，然后按照仿真算法计算车轮的速度和车身的速度。考虑到电磁阀本身的惯性，ECU 发出的控制命令要经过一定时间的时延才能真正作用到制动系统，所以在仿真算法中用一个二维队列 D 来模拟 4 个电磁阀的延时，队列的每行表示一个电磁阀的延时，队列的每位表示控制命令。若增压命令的延时是 DelayA 毫秒，仿真周期是 t ，第 i 个电磁阀的控制命令是增压，则

$$D[i][\frac{DelayA}{t}] = 1 \quad (15)$$

仿真时，算法不断读取队列中处于开始位置的控制命令进行仿真，并将队列中的每一位用其后的值替代，实现电磁阀延时的仿真。仿真算法如图 4 所示。

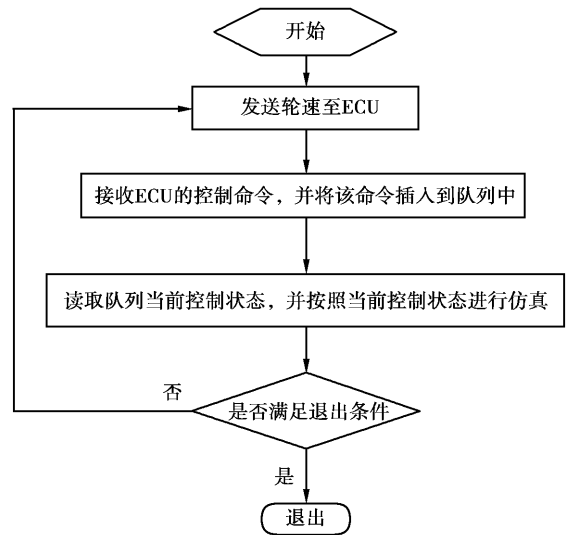
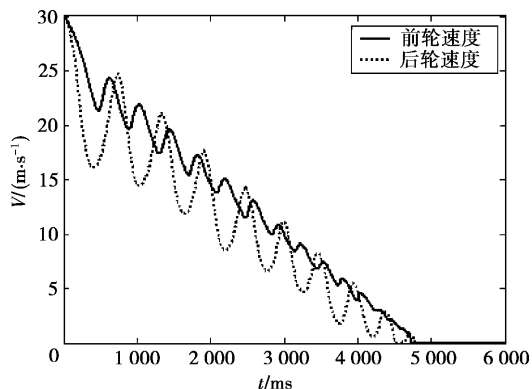


图 4 仿真算法流程

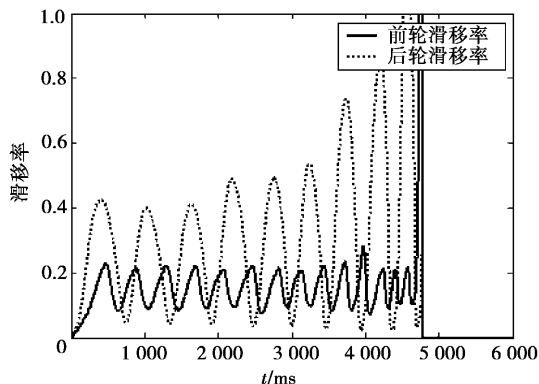
3 应用实例

针对某款汽车开发了 ECU，并对该 ECU 进行了仿真测试和参数匹配。图 5 是针对高附着系数路面仿真的轮速和滑移率变化曲线。

由图 5(a)可见，车轮在制动过程中没有发生抱死现象，但由 5(b)可见，后轮的滑移率波动较大，也就是

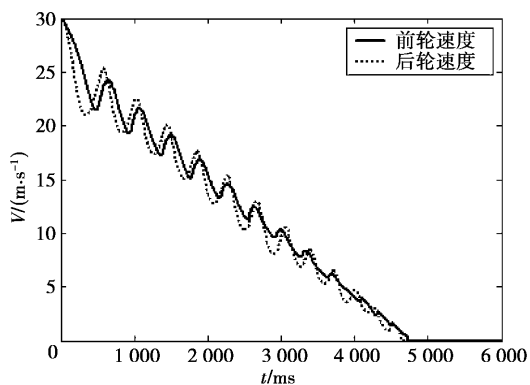


(a) 轮速变化曲线

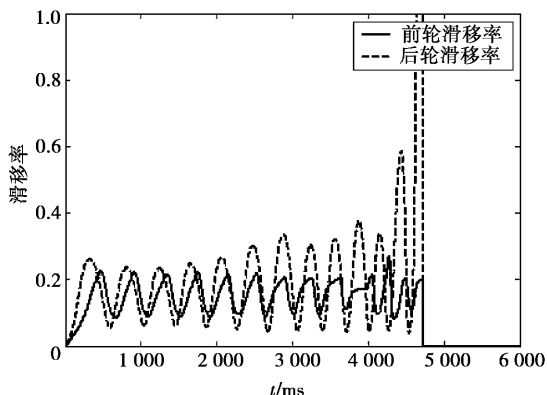


(b) 滑移率变化曲线

图5 修改参考滑移率门限前的仿真曲线



(a) 轮速变化曲线



(b) 滑移率变化曲线

图6 修改参考滑移率门限后的仿真曲线

说后轮的轮速波动剧烈,没有很好的在理论滑移率附近波动,图5(a)也反映了这一情况。虽然汽车在较短的时间内实现了安全制动,但效果不好。为此对照后轮轮速和滑移率变化曲线,在实验室对控制算法中后轮的控制参数进行修改,重新编译下载到ECU中,再次进行仿真测试。图6反映了修改控制参数后重新仿真的轮速和滑移率变化曲线。

对比图5和图6可见,修改控制参数后汽车能在要求的时间内安全制动,且修改参数后后轮的轮速比修改前的波动小,滑移率在理论滑移率附近小幅振荡,充分利用了地面提供的附着系数。

4 结论

开发了基于FPGA的硬件在回路仿真测试平台,该平台可实现ABS系统的硬件在回路仿真测试。利用该平台对ABS系统进行了仿真测试,仿真测试结果表明,在对ABS进行控制参数匹配时,可利用该仿真测试平台提供的工具对控制效果进行观察,从而在路试前就能寻求到比较好的控制参数,加快了开发进度。同时只需更改车辆模型,该平台可适用于各种车型的ABS参数匹配,具有较强的适应性。

参考文献:

- [1] 郭孔辉,丁海涛,刘灏. 汽车ABS混合仿真测试台的开发与研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(12): 1417-1421.
- [2] 王纪森,付卫强,余洋,等. 防抱制动系统自寻优控制的半物理仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 2841-2844.
- [3] 黄德中. 汽车防抱死制动系统测试装置研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 80-86.
- [4] 朱占胜,彭美春,曹华,等. 汽车ABS控制器模拟测试系统硬件接口设计与实现[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 144-147.
- [5] 郭旭,李以农,刘建房. ABS试验台测试系统设计[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2006, 29(7): 1-4.
- [6] 刘侃. ABS混合仿真系统中的软硬件接口的设计与实现[J]. 汽车电器, 2003, 18(2): 9-11.
- [7] 程军. 汽车防抱死制动系统的理论与实践[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1999: 18-19.
- [8] TIMOTHY W A, PANOS Y. Multi criteria optimization of anti-lock braking system control algorithms [M]. New York: The Gordon and Brach Publishing Group, 1996: 252.

Hardware in Loop ABS Test Simulation Platform

ZHENG Tai-xiong

(College of Automation , Chongqing University of Posts and Telecommunications , Chongqing 400065 , P R China)

Abstract :The hardware in loop test approach was proposed. The dynamic model of vehicle was studied ;the simulator on chip (SOC) based on FPGA was designed. The characteristic model of electromagnetic valve , the model of tire and the simulation technique based on SOC were put forward. Based on SOC , the hardware in loop simulation platform was developed to simulate the status of vehicle. It provided the electronic control unit with simulated environment , so as to reduce the cost of experiment. After tryout , it was shown that the platform was independent with the real system of vehicle , suitable for many kinds of vehicles. The ABS system was tested and the control parameters were calibrated on this platform. The experimental results show the platform can reduce ABS development time.

Key words :ABS ;simulator on chip ;hardware in loop simulation platform ;ABS test

(编辑 吕建斌)

~~~~~  
( 上接第 36 页 )

## Study on the Best Burden Structure for the Blast Furnace

JIA Bi<sup>1</sup> , BAI Chen-guang<sup>2</sup> , SHI Jin-liang<sup>1</sup> , Chang Jin<sup>3</sup> ,  
ZHANG Jia-xiang<sup>3</sup> , ZHANG Dong-shen<sup>3</sup>

( 1. School of Metallurgical Engineering , Chongqing University of Science and Technology , Chongqing 400050 , P R China 2. Human Resource Department , Chongqing University , Chongqing 400030 , China ;  
3. Shuicheng Iron and Steel Co. Ltd. , Shuicheng 553028 , Guizhou , P R China )

**Abstract** :By means of the method of Orthogonal test , the best burden structures were studied under the present condition of raw material , fuel and equipment for the blast furnace in the Shuicheng I&S Co , the further burden structure was optimized , and the metallurgical properties were tested. The results show that the present best burden structure for the BF in the Shuicheng I&S Co consist of 86% sinter whose basicity is 1.8 and 14% natural ore which is the mixture of 50% India ore and 50% Vietnam ore. This burden structure has good performance in indexes of softening , melting and dropping , the choice R<sub>I</sub>( reduction index ) and the proper basicity of slag , but its R<sub>D</sub>( low temperature reduction degradation index ) is not good. If the sinter with basicity being below 1.7 and the basicity of its slat being below 1.2 , the burden structure that has 90% sinter is completely practicable.

**Key words** :burden structure ; metallurgical property ; orthogonal test ; optimization

( 编辑 陈移峰 )