

# 基于代码生成的电控空气悬架系统电子控制单元\*

严天一<sup>1</sup> 刘欣强<sup>1</sup> 张鲁邹<sup>1</sup> 王玉林<sup>1</sup> S. B. Choi<sup>2</sup>

(1. 青岛大学机电工程学院, 青岛 266071; 2. 仁荷大学机械工程系, 仁川 402-751)

**摘要:** 为提高某型 SUV 车辆的行驶平顺性、通过性等, 对其进行空气悬架改装, 并设计了由最小系统、车速信号调理模块、电动气泵控制模块、组合电磁阀控制模块、车身高度检测模块、CAN 总线模块、车身加速度测量模块等组成的以 Freescale XDP512 为核心芯片的电控空气悬架系统电子控制单元, 利用 Real-Time Workshop (RTW) 代码生成技术将所制定电控空气悬架系统控制策略转化为 ANSI C 代码并下载至电子控制单元, 然后对安装电控空气悬架系统的试验车辆进行了车身高度与车速耦合试验、转向试验、急加速试验、急减速试验、平顺性试验, 结果表明所设计的电控空气悬架系统控制单元能够实现车速信号调理、车身高度与车速耦合、电动气泵控制及组合阀控制等功能。

**关键词:** 车辆 电子控制单元 电控空气悬架 自动代码生成

**中图分类号:** U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0014-06

## 引言

空气悬架系统作为现代车辆的重要总成之一, 可有效隔离地面传给车身的冲击与高频振动。典型空气悬架工作原理就是用机械或电动空气压缩机形成压缩空气, 并将已压缩的空气送到空气弹簧中, 以此来改变车辆系统动力学特性<sup>[1-4]</sup>。与钢板弹簧悬架相比, 空气悬架系统在一定程度上可提高车辆平顺性、道路友好性。在发达国家, 空气悬架系统在重型货车上的使用率已经超过 80%, 在高速客车和豪华城市客车上已 100% 采用, 部分轿车甚至已经安装了电子控制空气悬架系统 (ECAS)。国内学者利用模糊控制、模糊 PID、神经网络等智能控制方法开展电控空气悬架控制策略研究, 并进行了相关仿真和试验<sup>[5-15]</sup>。目前, ECAS 是由高度传感器、电子控制单元、组合电磁阀、车速传感器、气泵、空气弹簧、储气筒等部件组成的全新空气悬架系统<sup>[5-8]</sup>。高度传感器负责实时检测车身高度变化, 电控单元通过接收车速信号、车身高度信息、加速度信号等, 适时激发组合电磁阀工作, 实现对各个气囊的充、放气自动调节。

现代电控空气悬架系统功能日益复杂, 其更新速度越来越快, 因此要求电子控制单元开发周期尽量要短, 这使得传统程序开发模式已难以满足车辆电控空气悬架系统软件开发要求。本文提出利用

Simulink/Real-Time Workshop (RTW) 自动代码生成技术, 将电控空气悬架 Simulink 模型自动生成优化的、可移植的、智能化的 ANSI C 代码, 并开展相关实车试验。

## 1 试验车辆

为了以实车验证拟开发的电控空气悬架系统电子控制单元, 购置了一款某公司生产的 SUV 车辆 (图 1), 该车装备了 2.4 L、120 kW 多点喷射汽油发动机、6 挡手动变速器, 其驱动形式为发动机前置前驱, 前悬架为麦弗逊式独立悬架, 后悬架为双横臂式独立悬架。项目组利用霍尔式高度传感器、气泵、组合电磁阀、空气弹簧、储气筒等对该试验车辆进行了合理改装, 在前、后悬架和车身之间分别安装了 4 个霍尔式高度传感器, 在发动机舱左前方的底端安装了 1 台美国托马斯公司生产的电动气泵, 利用新开发的空气弹簧和减振器替换掉了原螺旋弹簧及其减振器。除此以外, 还安装了 1 个容积为 7 L 的储气筒及 1 个 6 通道的组合气阀。

## 2 电子控制单元硬件设计

为利用空气弹簧实现对车身姿态的实时控制, 以 Freescale 公司 XDP512 单片机为核心芯片, 设计一款新型电控空气悬架用电子控制单元 (图 2), 该控制单元由单片机最小系统、车速信号调理电路、组

收稿日期: 2014-03-20 修回日期: 2014-04-28

\* 国家自然科学基金资助项目 (50905090) 和山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目 (BS2010ZZ002)

作者简介: 严天一, 副教授, 博士, 主要从事车辆系统动力学及其控制策略研究, E-mail: yan\_7012@126.com



图1 改装后的试验车辆的前悬架、后悬架  
Fig.1 Modified front and rear suspensions of the experimental SUV

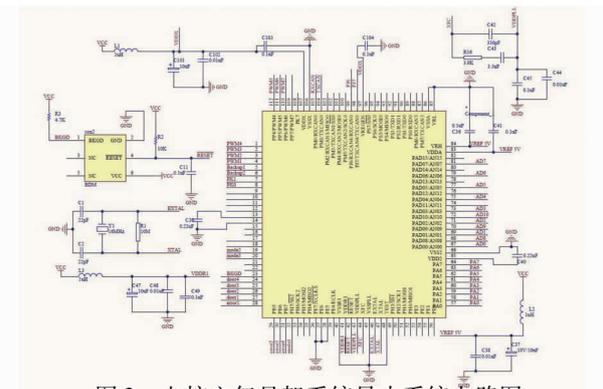


图3 电控空气悬架系统最小系统电路图  
Fig.3 Circuit of the minimum system of the ECAS controller system



图2 电控空气悬架用电子控制单元  
Fig.2 Electronic control unit for a ECAS

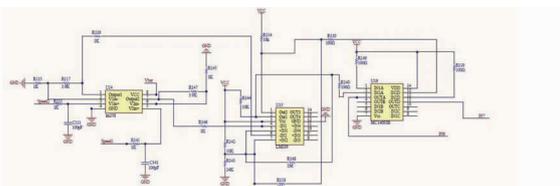


图4 霍尔式速度传感器调理电路  
Fig.4 Conditioning circuit of the Hall speed sensor

合气阀的控制电路、气泵控制模块、车身加速度检测电路等组成。

### 2.1 最小系统设计

电子控制单元以 Freescale 公司 16 位单片机 XDP512 为核心芯片,该芯片集成了 4 kB 的 RAM、512 kB 的 Flash 存储器、4 kB 的 EEPROM、16 位增强型定时器,3 个 SPI 接口、6 个 SCI 接口、2 个 IIC 接口、5 个 CAN 接口等,同时还有看门狗定时器及多达 16 通道的 10 bit 的模数转换模块。其最小系统如图 3 所示,其时钟输入采用的是石英振荡放大器,晶振频率为 16 MHz,输入引脚为 EXTAL,输出引脚为 XTAL,本文采用并联振荡电路。

### 2.2 霍尔式速度传感器调理电路

若要实现车身高度的速度耦合控制,电控空气悬架系统电子控制单元需实时拾取车速传感器的车速信号,但大多数车辆因工作在恶劣环境下,因此车速传感器输出信号通常含有大量干扰信号,针对试验车辆有 4 个霍尔式车速传感器输出随车速变化的方波信号,本文利用运算放大器、施密特触发器等设计了如图 4 所示速度调理电路。

### 2.3 组合气阀控制电路

试验车辆上所安装的组合电磁阀是国外某公司生产的六通道电磁阀,在注塑壳体内部共有 6 个电磁阀和 1 个压力传感器,其中 4 个电磁阀用于对前

后桥 4 个空气弹簧实施单独控制,剩余电磁阀分别连接储气筒和电动气泵。利用英飞凌公司的 BTS425 芯片实现了对各电磁阀的 PWM 控制。为实时、有效监测储气筒、空气弹簧内部的气压监测,先通过试验测得内置于组合阀压力传感器的输出特性(图 5)。

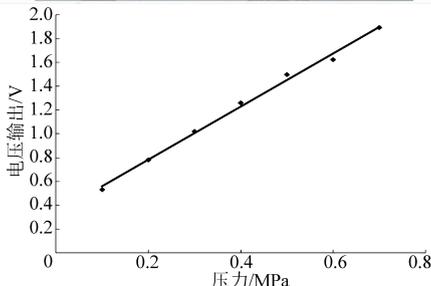


图5 组合阀压力传感器的输出特性  
Fig.5 Output characteristics of the pressure sensor of the combined valves

### 2.4 霍尔式高度传感器输出信号特性分析

通过示波器对霍尔式高度传感器的输出信号进行实测,得到如图 6 所示的变化规律,其中死区角度

$\alpha_0$  为  $2^\circ \sim 3^\circ$ , 传感器摆臂旋转一周, 输出电压信号由  $0.5 \sim 4.5 \text{ V}$  连续变化 4 次 (图 6)。

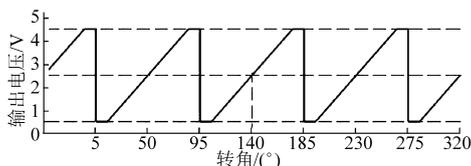


图 6 霍尔式高度传感器的输出信号特性曲线

Fig. 6 Output signal characteristics of the Hall height sensor

### 3 电控空气悬架控制策略

电子控制单元可通过手动模式、自动模式、维修

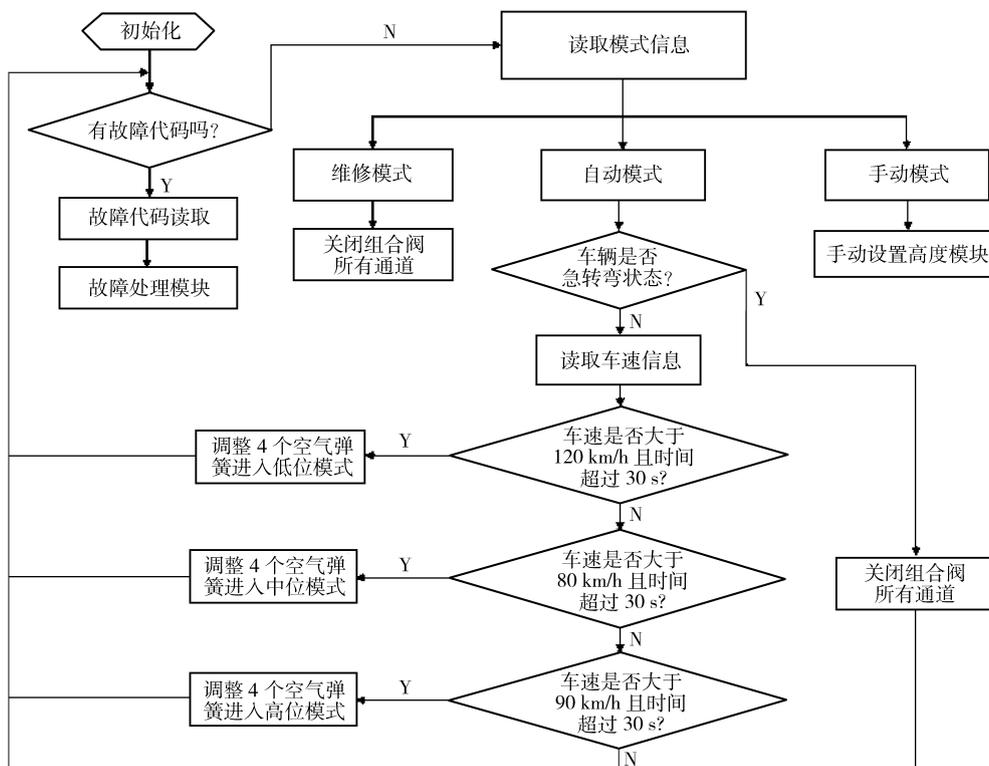


图 7 电控空气悬架控制策略

Fig. 7 Control strategy of an electronically controlled air suspension

### 4 实车试验

利用各种接插件、端子及线束将所开发的电控空气悬架系统电子控制单元与组合气阀、气泵、储气筒、高度传感器相互连接并安装于试验车辆后 (图 9), 开展了车速调理电路试验、组合气阀控制试验、转向试验、急加速试验及减速试验、平顺性试验等。

#### 4.1 车速调理试验

利用示波器的两个通道分别测取未经信号处理的速度信号和经过信号调理电路处理的车速信号, 试验结果如图 10 所示, 其中上面的波形为未处理的速度信号, 含有大量噪声信息, 下面的波形为经过调

模式对电控空气悬架系统进行动态控制。手动和自动模式又细分为高位模式、中位模式和低位模式; 维修模式可防止维修时电控空气悬架误动作。制定如图 7 所示的控制策略, 为提高编程效率, 在 Simulink 中建立空气弹簧高度调节的模糊控制模型, 模糊输入、输出变量: 高度差和电磁阀开度的隶属度函数均设定为高斯型 (图 8), 将求解器设定为定步长、离散型, 硬件设置选定为 Freescale HC(S)12, 系统目标文件设定为 ert.tlc 文件后, 利用自动代码生成模块 RTW 生成电控空气悬架系统控制策略核心程序, 并通过 BDM 将所生成 ANSI C 代码下载至上述控制单元, 各程序之间详细链接过程在此不再赘述。

理的车速信号。从图中易知, 车速调理电路能够有效地抑制车速信号中各种噪声, 有效改善单片机对车速信号识别精度。经过对试验数据的分析整理得到, 车速信号的脉冲频率与车速之间的关系为  $V_a = F_s/6$  (表 1), 其中,  $V_a$  为车速 (km/h)、 $F_s$  为 100 ms 内脉冲数。

#### 4.2 车身高度与车速耦合试验

项目组成员驾驶试验车辆从青岛大学宁夏路正门出发, 沿着东海路、海尔路、青银高速公路, 多次开展了车身高度与车速的耦合试验, 利用 Codewarrior 软件、BDM 下载器等实时采集了 4 处车身高度变化均值, 不考虑气囊充气导致  $3 \sim 9 \text{ s}$  的时间滞后, 表 2 所示悬架高度均值与车速耦合关系能够满足控

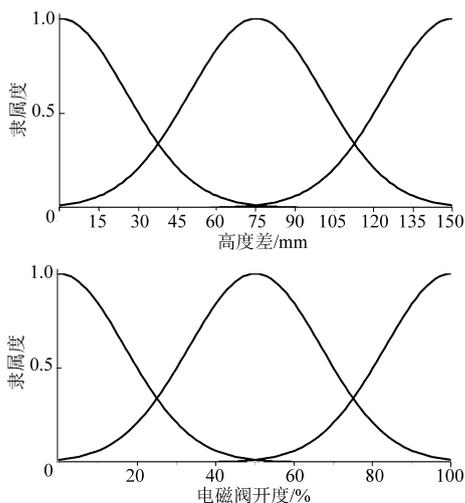


图8 悬架高度差、电磁阀开度隶属度函数

Fig. 8 Membership functions of suspension heights and the openness of solenoid valves

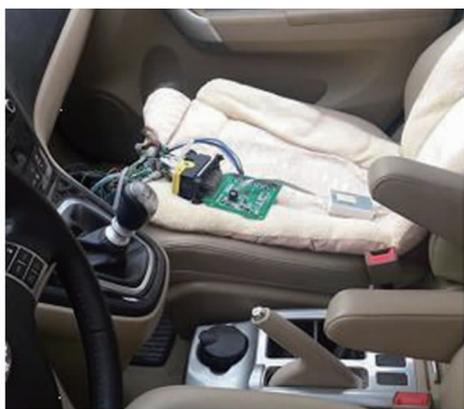


图9 加装新型电控空气悬架电子控制单元的试验车辆

Fig. 9 Modified experimental SUV with a new ECU of ECAS

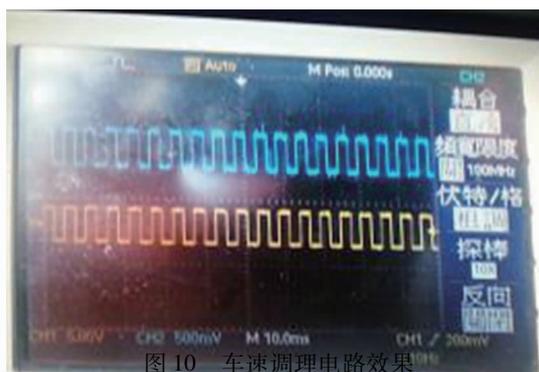


图10 车速调理电路效果

Fig. 10 Effect of the conditioning circuit of the speed signal

制策略要求。

### 4.3 转向、急加速及减速试验

为评价电子控制单元及其控制策略在试验车辆转向、急加速及急减速过程中的控制性能,试车员驾驶试验车辆在青岛市李沧区一汽解放青岛汽车厂车辆测试场地开展了从 20 ~ 60 km/h 的加速转弯试验

表1 车速与霍尔式车速传感器信号频率关系

Tab. 1 Relationship between the speed and the frequency of output signal of the Hall speed sensor

脉冲数	60	180	300	420	540	660
车速/(km·h <sup>-1</sup> )	10	30	50	70	90	110

表2 悬架高度均值与车速耦合关系

Tab. 2 Coupling relationship between the average suspension displacement and vehicle speed

车速/(km·h <sup>-1</sup> )	0 ~ 30	30 ~ 80	80 ~ 120	> 120
悬架高度/mm	138	111	78	49

和直行过程中的急加速与急减速试验。试验结果表明在转弯行驶时如果横向加速度大于 0.16 g,组合阀全部关闭;直线行驶时纵向加速度绝对值大于 0.13 g,组合阀内与气囊连接的所有通道处于关闭状态。

### 4.4 平顺性试验

参考 GB/T 4970—2009《汽车平顺性试验方法》,利用丹麦 B&K 公司生产的 4 个单向加速度传感器和 1 个平顺性座垫,对试验 SUV 车辆改装空气悬架前后,在 40 km/h、60 km/h 两种典型车速及长达 2.5 km 的 B 级路面上,开展了往复稳定车速下的随机输入平顺性试验,并分别拾取了驾驶员座椅上的平顺性座垫和 4 个加速度传感器的数据。表 3 给出了试验车辆在 40 km/h、60 km/h 时驾驶室地板局部的加速度均方根值及座椅处加速度的总加权均方根值。表 3 表明改装后的空气悬架车辆的平顺性有一定程度的提高。

表3 各测点垂直振动加速度均方根值

Tab. 3 RMS of the vertical acceleration of each measuring position

测点	40 km/h		60 km/h		m/s <sup>2</sup>
	改装前	改装后	改装前	改装后	
左前	0.392	0.383	0.542	0.518	
右前	0.411	0.391	0.581	0.563	
左后	0.423	0.405	0.594	0.571	
右后	0.435	0.412	0.601	0.596	
座椅	0.131	0.127	0.182	0.164	

## 5 结束语

利用空气弹簧、高度传感器、气泵、储气筒、组合气阀等对某型 SUV 车辆进行了空气悬架系统改装,然后利用自行设计的电控空气悬架系统电子控制单元及自动生成的悬架控制策略开展了 SUV 车辆的实车测试试验,试验结果表明所设计的电控空气悬架系统控制单元能够实现车速信号调理、车身高度与车速耦合、电动气泵控制及组合阀控制等功能。

## 参 考 文 献

- 1 杨启耀,周孔亢,张文娜,等. 半主动空气悬架 Fuzzy - PID 控制[J]. 农业机械学报,2008, 39(9):24 - 29.  
Yang Qiyao,Zhou Kongkang,Zhang Wenna, et al. Fuzzy - PID control on semi-active air suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008, 39(9):24 - 29. (in Chinese)
- 2 王辉,朱思洪. 半主动空气悬架神经网络的自适应控制 [J]. 农业机械学报,2006, 37(1):28 - 31.  
Wang Hui,Zhu Sihong. Neural network adaptive control for semi-active air suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006, 37(1):28 - 31. (in Chinese)
- 3 郑明军,林逸,陈潇凯. 汽车半主动空气悬架参数自调整模糊控制[J]. 噪声与振动控制,2007(3):86 - 88,115.
- 4 王辉,朱思洪. 半主动空气悬架神经网络的自适应控制[J]. 噪声与振动控制,2006(1):28 - 31.  
Wang Hui,Zhu Sihong. Neural network adaptive control for semi-active air suspension [J]. Noise and Vibration Control,2006, 37(1):28 - 31. (in Chinese)
- 5 王炳. 客车电控空气悬架控制系统研究[D]. 镇江:江苏大学,2009.  
Wang Bing. Research on bus electronically controlled air suspension systems[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- 6 彭桂雪. 客车用电子控制空气悬架系统研究[D]. 镇江:江苏大学,2010  
Peng Guixue. Research on electronically controlled air suspension systems for buses[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- 7 Giuseppe Quaglia, Massimo Sorli. Air suspension dimensionless analysis and design procedure [J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35(6): 443 - 475.
- 8 姜立标,王登峰,谢东,等. 电控空气悬架载荷平衡系统仿真[J]. 汽车工程, 2007, 29(3): 234 - 237.  
Jiang Libiao, Wang Dengfeng, Xie Dong, et al. A simulation on load leveling system for electronically controlled air suspension [J]. Automotive Engineering, 2007, 29(3): 234 - 237. (in Chinese)
- 9 汪若尘,陈龙,张孝良,等. 车辆半主动空气悬架系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2012, 43(4):6 - 9,136.  
Wang Ruochen, Chen Long, Zhang Xiaoliang, et al. Design and test of semi-active air suspension system of vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012, 43(4):6 - 9,136. (in Chinese)
- 10 杨伟. 基于 CAN 总线的汽车主动式空气悬架系统控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012  
Yang Wei. Research on vehicle active air suspension systems based on CAN BUS[D]. Hefei: HeFei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 11 张建军,杨伟,张本宏. 汽车电控空气悬架系统的控制策略研究[J]. 机械设计与制造,2012(11):130 - 132.  
Zhang Jianjun, Yang Wei, Zhang Benhong. Control strategy research of automotive electro-controlled air suspension system[J]. Machinery Design & Manufacture,2012(11):130 - 132. (in Chinese)
- 12 潘公宇,陈立付,聂秀伟,等. 空气主动悬架模糊控制仿真与实验研究[J]. 机械设计与制造,2011(1):198 - 200.  
Pan Gongyu, Chen Lifu, Nie Xiuwei, et al. Simulation and experiment study of pneumatic active suspension system with fuzzy controller[J]. Machinery Design & Manufacture,2011(1):198 - 200. (in Chinese)
- 13 黄俊明,周孔亢,徐兴,等. 电子控制空气悬架高度调节过程非线性模型[J]. 机械工程学报,2009,45(6):278 - 283.  
Huang Junming,Zhou Kongkang,Xu Xing, et al. Nonlinear model on leveling procedure of electronically controlled air suspension [J]. Journal Of Mechanical Engineering,2009,45(6):278 - 283. (in Chinese)
- 14 黄启科,麻友良,王保华. 汽车电控空气悬架发展与研究现状综述[J]. 湖北汽车工业学院学报,2013, 27(2):27 - 32.  
Huang Qike, Ma Youling, Wang Baohua. Review on development and research of electronically controlled air suspension[J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology, 2013, 27(2):27 - 32. (in Chinese)
- 15 汪若尘,施德华,陈兵. 半主动空气悬架建模与神经元自适应控制[J]. 兰州理工大学学报,2013,39(4):51 - 54.  
Wang Ruochen, Shi Dehua, Chen Bing. Modeling of semi-active air suspension and its simulation with neuron adaptive control [J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2013,39(4):51 - 54. (in Chinese)

## Electronic Control Unit of Electronically Controlled Air Suspension Systems Based on Code Generation

Yan Tianyi<sup>1</sup> Liu Xinqiang<sup>1</sup> Zhang Luzou<sup>1</sup> Wang Yulin<sup>1</sup> S. B. Choi<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China

2. Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402 - 751, Republic of Korea)

**Abstract:** To improve a SUV's ride quality and mobility, the SUV was modified using air suspension systems. An electronic control unit based on Freescale XDP512 microcontroller was designed including a minimum system, a speed signal conditioning module, an air pump control module, a combined valves control module, a body height measuring module and a CAN module, a body acceleration measuring module. The ANSI C code of the control strategy of the ECAS system was generated using Real-Time Workshop (RTW) code generation techniques, and then series of experiments of the car body coupling with speed, cornering, accelerating, decelerating, ride quality were conducted. The results of the experiments showed that the newly designed ECU could effectively finish the following functions: vehicle speed signal conditioning, the coupling of suspension height and vehicle speed, the control of an electrical air pump and a combination valves, etc.

**Key words:** Vehicle Electronic control unit Electronically controlled air suspension Automatic code generation

---

(上接第 43 页)

## Modeling and Experiment of Electronic Injector of High Pressure Common Rail Fuel Injection System

He Zhongbo Xue Guangming Li Dongwei Yang Zhaoshu

(Department of Vehicles and Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** The model of solenoid valve injector in high pressure common rail system is presented. The model considers the influences of flow limiting valve, T type pipe and the pressure loss caused by fuel flow. The forms and positions of the pressure loss were determined. In the model the fuel density and elastic modulus are only viewed as the functions of fuel pressure. The results obtained by Simulink software were compared with experimental results in order to assess the model. Results show that the simulation error of the model considering flow limit valve and T type pipe influences to the experimental results is less than 6%, while the results without these considerations have larger difference from the experimental results. The simulation difference between the model that views fuel density and elastic modulus as constants and the model that views both of them as the functions of pressure is small. The errors of the two models to the experimental results are less than 6%.

**Key words:** Engine High pressure common rail Electronic fuel injector Mathematical model