

基于模型的电控空气悬架系统控制策略与实车试验

严天一¹ 李聪聪¹ CHO X H² 孙富权¹ 陆金更¹ 戴作强¹

(1. 青岛大学机电工程学院, 青岛 266071; 2. TGM 汽车公司, 咸阳郡 50021)

摘要: 设计了以 Freescale XDT512 为核心芯片,且由最小系统、电源模块、驱动电路、速度处理模块、双向加速度模块、模拟量输入模块和通信模块等组成的电控空气悬架系统(ECAS)电子控制单元;利用基于模型的设计方法开发了电控空气悬架系统的控制策略模型,其主要由自动模式子模块、手动模式子模型和维修模式子模型等组成;在自动模式下,根据车速自动调整车身高度;在手动模式下,驾驶员可通过人机操控界面,自主地设定车身高度;通过维修模式,可禁止电控空气悬架工作,防止出现误动作。通过合理设计测试用例对所设计的控制模型实施结构性、功能性测试;经控制模型的定点化处理,并利用 RTW 代码生成技术将所设计的控制模型转换为应用层程序,并与底层驱动相互集成后,编译下载至所开发的 ECAS 电子控制单元;开展实车验证试验,试验结果表明所设计的控制策略能较好地满足设计要求。

关键词: 空气悬架系统; 电控; 控制策略; 试验

中图分类号: U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0385-05

Development of ECAS Control Strategy Based on Model-based Design and Its Real Car Experiments

YAN Tianyi¹ LI Congcong¹ CHO X H² SUN Fuquan¹ LU Jingeng¹ DAI Zuoqiang¹

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

2. TGM Motors, Hamyang 50021, Korea)

Abstract: To improve a SUV's ride quality and mobility, etc., an electronic control unit of electronically controlled air suspensions (ECAS) was designed by using a Freescale XDT512 micro-controller, which consisted of a minimum system, a power source module, a driving module, a speed signal processing module, a double acceleration module, an analog signal processing module, a communication module and so on. The control strategy model of an ECAS system was designed by using the model-based design method, which included an auto-mode sub_model, a manual-model sub_model and a repair-mode sub_model. The height of the car can be automatically adjusted according to the speed in auto-mode, and a driver can freely set the height of the car by using a human-machine interface in manual-mode. In repair-mode, the functions of the ECAS system were disabled to prevent any unexpected action. The structural test and functional test were conducted after a set of test cases were properly designed. When fixed-point treatment was conducted, the control model was converted into an application program by using RTW technologies, and then it was integrated with low-level driven programs, the final integrated program was downloaded into the electronic control unit of an ECAS. Then vehicle experiments were carried out, the results of experiments showed that the proposed control strategy fulfilled the design requirements.

Key words: air suspension systems; electronic control; control strategy; experiments

引言

汽车悬架系统主要由弹性元件、减振器和导向

机构组成。它的作用是传递作用在车轮与车架之间的力和力矩,缓冲由不平路面传给车架或车身的冲击力,并衰减由此引起的振动,提高汽车行驶平顺

性。电控空气悬架系统(ECAS)是一种先进的底盘控制系统,其主要由高度传感器、电子控制单元、压力传感器、组合电磁阀、车速传感器、电动气泵、空气弹簧、储气筒等部件组成。高度传感器负责实时检测车身高度变化,电控单元通过接受车速信号、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^[1-15]。

江洪等^[16-17]为提高汽车平顺性和操纵稳定性,通过遗传算法的优化实现弹簧刚度与减振器阻尼的匹配,根据匹配结果最终确定阻尼的控制模式和控制策略,并开展了相关仿真和试验研究;同时在考虑空气弹簧非线性情况下,建立双质量非线性动力学模型,以提高平顺性为目标,以控制动挠度与动载荷为约束条件,采用遗传算法优化,分析路面状况、车速、簧上质量对阻尼值优化的影响,设计阻尼的优化策略。徐兴等^[18]设计了一种基于电感式传感器的车身高度跟踪电路,传感器中的电感与跟踪电路由单片机共同控制,实现对传感器电感的充放电,单片机计算不同电感系数下的时间常数,间接获得实时的客车车身高度。并采用温度补偿电路和低温漂特性元件,适应客车工作环境温度的变化。

随着先进电控空气悬架系统的功能日益多样化,并且要求响应速度迅速,其核心控制策略变得日趋复杂,因此要求电子控制单元的核心控制策略开发周期尽量要短,并且代码品质优异^[3]。这使得基于传统基于手动编程的控制策略开发模式已难以满足现代车辆电控空气悬架系统软件开发要求。本文提出由需求分析、控制模型开发及验证、定点化处理、自动代码生成及验证等构成的基于模型的电控悬架系统控制策略开发方法,并通过相关实车试验进行验证。

1 需求分析

某公司需要开发一种乘用车用电控空气悬架系统(图 1),要求所开发的 ECAS 系统具有 3 种模式:

- ① 自动模式:此模式要求悬架高度 3 个速度范围内与车速信号相互关联,并根据车速自动调节悬架高度。
- ② 手动模式:驾驶员可自主设定悬架高度。
- ③ 维修模式:在该模式下电控单元不对悬架高度进行控制。为开发控制策略,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、人机交互系统等对该试验车辆进行了合理改装并构建了试验平台。

2 电子控制单元及控制策略模型

首先,利用飞思卡尔 XDT512 核心芯片设计包

括单片机最小系统、电源模块、驱动电路、速度处理模块、两向加速度模块、模拟量输入模块和通信模块的电控空气悬架系统电子控制单元(图 2)。



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

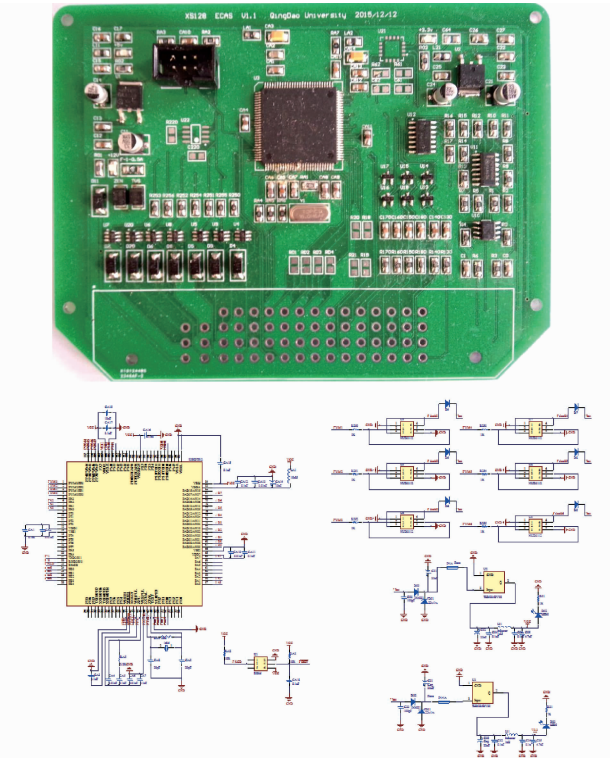


图 2 电控空气悬架控制器及其主要原理图
Fig. 2 Control unit of an electronically controlled air suspension and its main circuit

为克服传统手动编程方式开发周期长、效率低、代码一致性差等技术缺点,本文利用先进的、基于模型的嵌入式软件开发模式和自动代码生成技术开发电控空气悬架系统电子控制系统的软件系统。利用 Matlab/Simulink 和 Stateflow 软件设计如图 3 右半部分所示的电控空气悬架系统控制策略模型,该控制策略模型主要由自动模式子模块、手动模式子模型和维修模式子模型等组成。

2.1 自动模式子模块

根据需求分析,自动模式子模块的实质是悬架高度与车速的耦合控制,故电控空气悬架系统需能够拾取经过信号调理后的车速信号,并能够接受驾驶员所设定的模式信息。利用 Stateflow 中提供的状

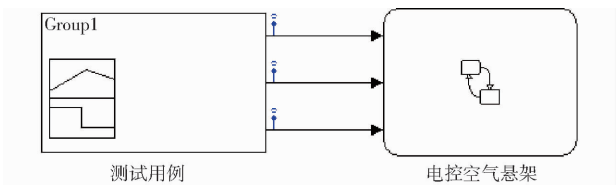


图 3 电控空气悬架系统控制模型

Fig. 3 Control model of ECAS system

态、转移、节点组件构建可实时监测车速和模式设定参数的新型电控空气悬架系统控制模型的自动模式子模型,在车速 $u_a \leq 60$ km/h 时,悬架处于高位模式;在车速 $60 \text{ km/h} < u_a \leq 90 \text{ km/h}$ 时,悬架处于中位模式;在车速 $u_a > 90 \text{ km/h}$ 时,悬架处于低位模式(图 4)。

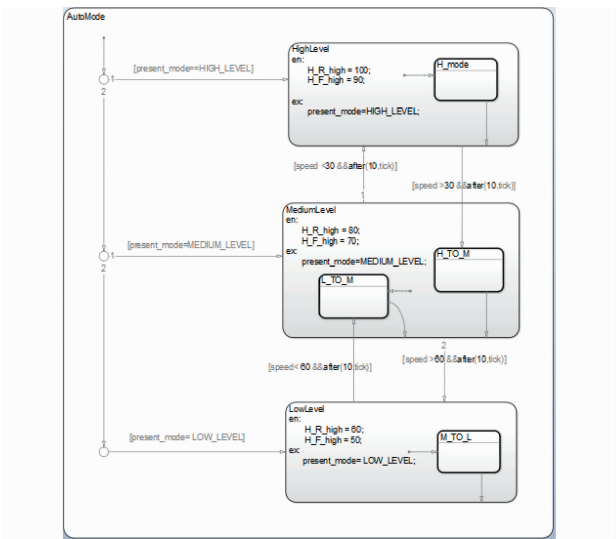


图 4 电控空气悬架系统自动模式子模块

Fig. 4 Automatic mode sub-model of ECAS system

2.2 手动模式子模型

客户需求中提出控制策略应具有手动模式功能,即驾驶员在不受车速的影响下,可完全自主设定悬架高度:高位模式、中位模式、低位模式。高位模式可将悬架高度设定为较高状态;中位模式和低位模式可将悬架高度设定中等和较低的高度(图 5)。

2.3 维修模式子模型

车辆在维修保养时可能被提升,如果控制策略设计不合理可导致电动气泵异常工作,导致电池馈电,同时严重影响维修保养操作安全,为此在控制策略模型中增设维修保养模式,当电控空气悬架系统处于此模式时,组合电磁阀中控制各个空气弹簧和所有通道处于关闭,电动气泵亦处于禁止工作状态(图 6)。

3 测试用例及模型验证

为验证上述控制策略模型,分别开展了结构性测试和功能性测试。其中,结构性模型测试借助

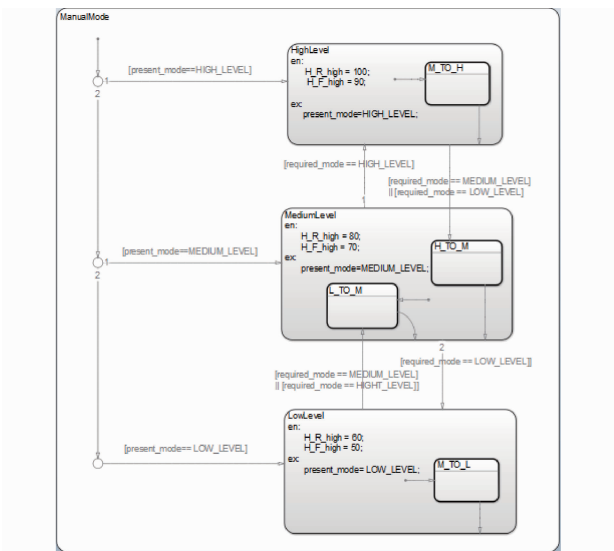


图 5 电控空气悬架系统手动模式子模型

Fig. 5 Manual mode sub-model of ECAS system

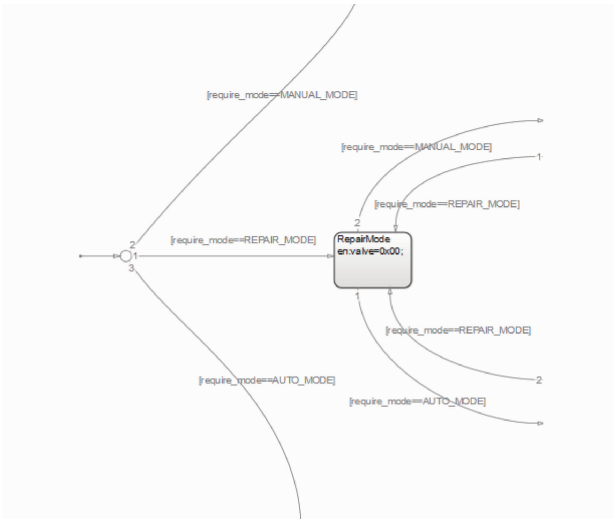


图 6 电控空气悬架系统维修模式子模型

Fig. 6 Repair mode sub-model of ECAS system

Simulink Design Verifier 自动生成测试用例,来检查模型的逻辑设计及分支结构开展结构型测试,并得到如图 7 所示的覆盖度分析报告。然后为进一步验证控制策略模型,编制相关测试用例,即制定的一组测试输入、执行条件以及预期结果,开展功能型测试,以便验证所开发的控制策略是否满足客户功能需求,功能性测试测试结果符合预期设计要求。为开展控制模型功能性验证,开发如表 1 所示的测试用例集合。

3.1 定点化及自动代码生成

经过定点化处理流程,并配置上述应用层控制策略模型为采用 Matlab/Real-time Workshop Embedded Coder 所默认的规则以及代码格式,通过点击 Real-time Workshop 中的 Generate Code 选项生成全部应用层代码。为生成完整的电控空气悬架的控制代码,需将上述自动生成的应用层代码

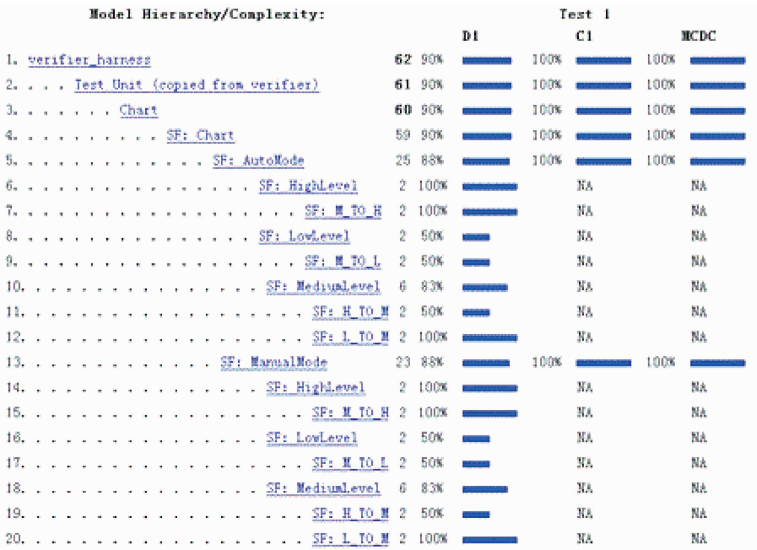


图 7 测试用例的覆盖度分析

Fig.7 Coverage analysis of test cases

与底层驱动代码相互集成。集成后嵌入式代码通过 BDM 下载器下载至电控空气悬架系统电子控制单元。

表 1 控制策略模型的测试用例

Tab.1 Test case group of control strategy model			
用例编号	测试输入	执行条件	预期结果
TC1	$u_a \leq 60 \text{ km/h}$	Mode = 1	Auto-mode = High-mode
TC2	$60 \text{ km/h} < u_a \leq 90 \text{ km/h}$	Mode = 1	Auto-mode = Medium-mode
TC3	$90 \text{ km/h} \leq u_a$	Mode = 1	Auto-mode = Low-mode
TC4	M-mode = 0	Mode = 2	Manual-mode = Low-mode
TC5	M-mode = 1	Mode = 2	Manual-mode = Medium-mode
TC6	M-mode = 2	Mode = 2	Manual-mode = High-mode

3.2 试车功能试验

在完成主要参数标定工作后,参考 GB/T 4970—2009《汽车平顺性试验方法》,利用丹麦 B&K 公司生产的四支单向加速度传感器和 1 个平顺性座垫,对试验 SUV 车辆在改装空气悬架前后,在 40、80、120 km/h 3 种典型车速及 5 km 的 B 级路面上,进行了往复稳定车速下的随机输入平顺性试验,并分别记录 1 个平顺性座垫和 4 支加速度传感器的数据。表 2 给出了试验车辆驾驶室底板局部的加速度均方根及座椅处加速度的总加权均方根。通

表 2 各测点垂直振动加速度均方根
Tab.2 Root mean square (RMS) of vertical acceleration of each measuring position m/s²

测点	40 km/h		80 km/h		120 km/h	
	改前	改后	改前	改后	改前	改后
左前	0.395	0.381	0.562	0.532	0.586	0.549
右前	0.403	0.395	0.594	0.579	0.606	0.588
左后	0.434	0.401	0.614	0.596	0.623	0.589
右后	0.435	0.428	0.621	0.618	0.634	0.622
座椅	0.141	0.124	0.195	0.186	0.199	0.194

过加权振级 L_{aw} 分析可得,在车速分别为 40 km/h、80 km/h 时,普通悬架和空气悬架性能相差不大;在车速为 120 km/h 时,普通悬架有些测点的 L_{aw} 大于 116,但空气悬架的 L_{aw} 均处在 100 ~ 116 之间。

4 结束语

利用空气弹簧、高度传感器、电动气泵、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;利用自行设计的电控空气悬架系统电子控制单元,开发了基于模型的电控空气悬架控制策略,在上述基础上开展实车测试试验,试验结果表明电控空气悬架系统电子控制单元及其控制策略在高速行驶时可提升车辆平顺性。

参 考 文 献

1 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 Youliang, 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)

2 贝绍轶,陈龙. 基于遗传算法的汽车半主动悬架模糊控制器设计[J]. 农业机械学报,2006,37(9):9-12.
BEI Shaoyi, CHEN Long. Design of semi-active automobile suspension fuzzy controller based on genetic algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9):9-12. (in Chinese)

3 严天一,刘欣强,张鲁邹,等. 基于代码生成的电控空气悬架系统电子控制单元[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(9):14-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140903&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.003.

- YAN Tianyi, LIU Xinqiang, ZHANG Luzou, et al. Electronic control unit of electronically-controlled air suspensions based on code generation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 14–19. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 GIUSEPPE Quaglia, MASSIMO Sorli. Air suspension dimensionless analysis and design procedure[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35(6): 443–475.
- 6 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)
- 7 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/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 6–9, 136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120402&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.002.
WANG Ruochen, CHEN Long, ZHANG Xiaoliang, et al. Design and test of semi-active air suspension system of vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 6–9, 136. (in Chinese)
- 8 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 uspension system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(11): 130–132. (in Chinese)
- 9 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)
- 10 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]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 278–283. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 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)
- 13 王炳. 客车电控空气悬架控制系统的研究[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)
- 14 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)
- 15 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)
- 16 江洪, 李坤, 周文涛, 等. ECAS 系统控制模式及控制策略[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 224–231.
JIANG Hong, LI Kun, ZHOU Wentao, et al. Control mode and control strategy in ECAS systems[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 224–231. (in Chinese)
- 17 江洪, 李仲兴, 周文涛, 等. 基于遗传算法的 ECAS 系统中三级阻尼匹配优化设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 279–283.
JIANG Hong, LI Zhongxing, ZHOU Wentao, et al. Optimum match design of tri-grade adjustable damper in ECAS system based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 279–283. (in Chinese)
- 18 徐兴, 陈照章, 全力, 等. ECAS 客车车身高度的实时跟踪[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 136–141.
XU Xing, CHEN Zhaozhang, QUAN Li, et al. Real-time tracking of ride height for bus with electronically controlled air suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 136–141. (in Chinese)
- 19 陈月霞, 陈龙, 徐兴, 等. 随机干扰下电控空气悬架整车车身高度控制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 309–315. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151242&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.042.
CHEN Yuexia, CHEN Long, XU Xing, et al. Vehicle height control of electronic-controlled air suspension under random disturbance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 309–315. (in Chinese)
- 20 汪少华, 窦辉, 孙晓强, 等. 电控空气悬架车高调节与整车姿态控制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 335–342, 356. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151045&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.045.
WANG Shaohua, DOU Hui, SUN Xiaoqiang, et al. Vehicle height adjustment and attitude control of electronically controlled air suspension[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 335–342, 356. (in Chinese)