

汽车电子控制系统半实物仿真平台开发

连 静^{1,2}, 李琳辉^{1,2}, 周雅夫^{*1,2}, 沈晓勇^{1,2}, 常 城^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 提出了一种汽车电子控制系统半实物仿真解决方案, 以捷达 1.6AT 轿车为对象, 采用半实物仿真技术通过硬件接口电路将实际车辆与模型环境有机结合, 设计开发了汽车电控系统半实物仿真平台. 所设计的平台在精确采集车辆传感器信号的同时能够实现车辆与半实物仿真模型间的实时数据交换; 通过平台显示系统可以直观地观察车辆电控系统的工作过程及控制原理; 并可根据需要合理地改变仿真模型的参数, 对不同车型和不同使用工况进行仿真. 该平台不仅解决了数学仿真对现实条件过于简化、建模难度大的问题, 同时也克服了实物试验费用高、周期长的弊端, 可将其应用于汽车电子控制系统的开发、调试、检测和教学试验等.

关键词: 半实物仿真系统; 制动防抱死系统; 自动变速系统; 发动机电子控制

中图分类号: U461 **文献标志码:** A

0 引言

半实物仿真是通过计算机接口将实物嵌入到仿真环节进行试验的技术, 它具有实物试验的准确性及仿真试验的高效性, 可广泛应用于产品设计及试验等环节^[1]. 采用半实物仿真技术进行汽车电子控制系统开发具有安全、可控、开发速度快、成本低、不受物理环境限制的特点^[2,3]. 因此, 本文基于该技术进行汽车电子半实物仿真系统平台设计, 给出一种低成本、简单可靠的汽车电子半实物仿真解决方案.

1 系统平台设计

1.1 平台总体设计

所设计的汽车电子半实物仿真系统平台总体结构如图 1 所示. 平台主要由整车电脑与线束接口电路板、平台硬件系统和仿真模型 3 部分组成.

整车电脑与线束接口电路板主要实现将传感器信号和执行器驱动信号的采集、模拟与测量转移到接口电路板上进行的功能. 采用捷达车专用线束与接插件, 设计了整车电脑与线束接口电路

板, 将信号的采集、模拟和测量等过程转移到接口电路板上进行, 从而保证了对原车电路的无破坏性, 并且为设计开发环节和后续试验环节带来了极大的方便.

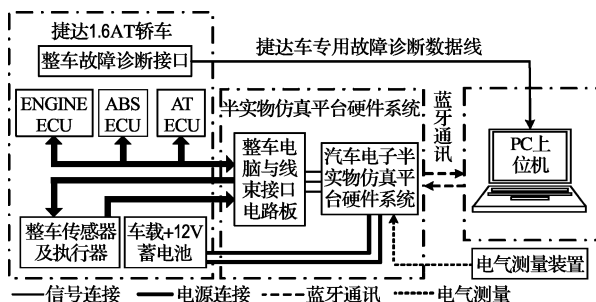


图 1 汽车电子半实物仿真平台总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of automotive electronic semi-physical simulation platform

平台硬件系统主要功能有(1)数据采集: 实时精确地采集汽车各传感器的信号; (2)信号模拟: 按照模型运算结果, 产生电控系统传感器和执行器的模拟信号; (3)模型实现: 根据仿真模型的控制思想编写语言代码置入平台硬件系统, 实现半

实物仿真;(4)蓝牙无线通讯:实现模型与硬件之间数据的无线传输^[4]。

1.2 平台硬件系统设计

所设计的平台硬件系统结构如图2所示,其主要由信号采集模块、信号模拟模块、系统主电路、蓝牙无线通讯电路、LCD液晶显示电路和键盘输入电路等几大部分组成。信号采集模块具有7路信号采集通道,实时采集汽车传感器的信号;信号模拟模块具有5路信号模拟通道,模拟传感器信号和执行器驱动信号;平台硬件系统有蓝牙无线通讯和RS232串口通讯2路通讯通道和LCD液晶显示、键盘输入功能,能够实现良好的人机交互。

平台硬件系统采用LPC2119处理器作为主控芯片,该芯片处理速度快,片内资源丰富,适合控制应用^[5,6]。试验时平台硬件系统由车载+12V蓄电池供电,避免因使用交流220V市电系统带来的干扰。车载电路地与硬件系统地共地,简化了硬件设计。平台硬件系统通过蓝牙无线通讯技术,在完成与PC机仿真模型数据交换的同时实现了与计算机的电气隔离,增强了系统的灵活性及抗干扰能力。用电气测量装置可以在平台硬件上对各种信号进行测量,方便调试与研究。

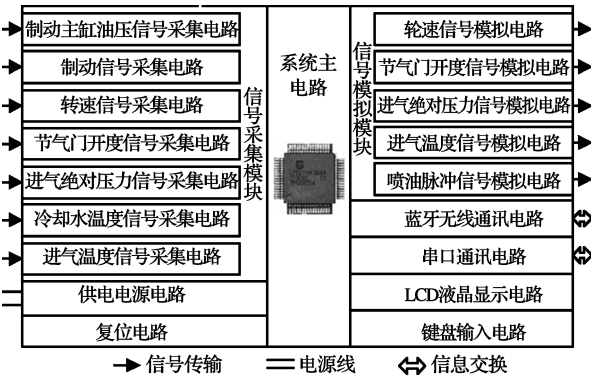


图2 汽车电子半实物仿真平台硬件系统结构示意图

Fig.2 Hardware system structure map of automotive electronic semi-physical simulation platform

2 系统模型

在Matlab/Simulink^[7,8]建模仿真环境下,利用Matlab/Simulink提供的串口操作函数,使用C语言编写仿真模型能够直接调用的C-Mex S函数串口通讯模块,建立半实物仿真模型。

2.1 ABS(anti-locked braking system)半实物仿真模型

平台硬件系统将制动压力信号通过串口通讯模块传输至模型进行运算,便可求得该制动过程中的制动距离,并可通过示波器模块对数据变化过程进行观察。图3为所搭建的ABS^[9]半实物仿真模型的顶层结构图。

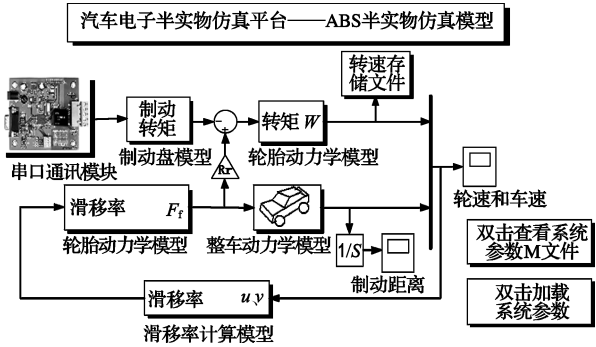


图3 ABS半实物仿真试验模型
Fig.3 ABS semi-physical simulation test model

2.2 自动变速器半实物仿真模型

自动变速器半实物仿真模型根据从车上采集的节气门开度和发动机转速信号,遵循模型制定的控制规律进行换挡控制,并通过显示界面再现车辆当前的运行状态和换挡情况。图4为所构建的自动变速器半实物仿真试验模型顶层结构图。在该模型中用户可通过修改模型参数及控制方法,对比修改前后参数的变化过程。

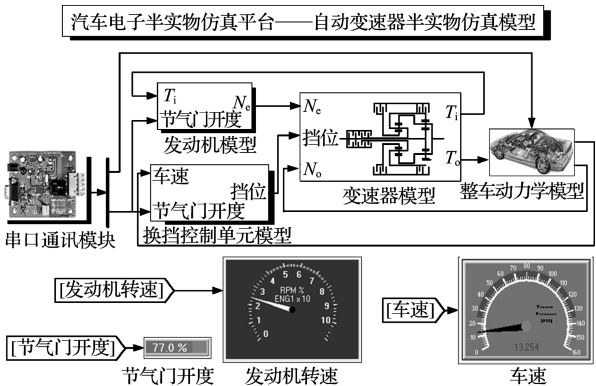


图4 自动变速器半实物仿真试验模型
Fig.4 AT semi-physical simulation test model

2.3 发动机半实物仿真模型

发动机半实物仿真模型从平台硬件系统接收制动信号、怠速信号、加减速信号及发动机转速、进

气温度、节气门开度、进气绝对压力等信号,通过串口通信模块传输到发动机模型进行计算,求得当前工况下点火提前角及喷油时间,并在模型中开发显示界面,直观地显示计算结果和当前工况.图 5 为所构建的发动机半实物仿真试验模型顶层结构图.

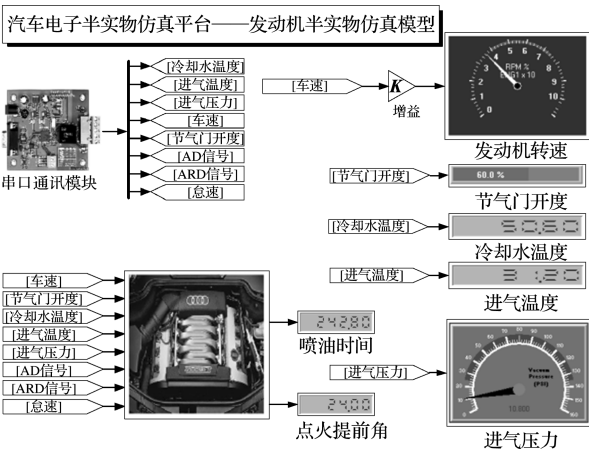


图 5 发动机半实物仿真试验模型
Fig. 5 Engine semi-physical simulation test model

2.4 仿真试验平台

在实时硬件和仿真模型的基础上,搭建了如图 6 所示的仿真试验平台.

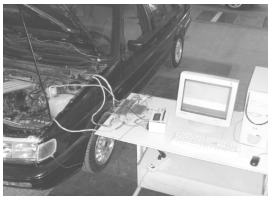


图 6 试验平台系统实物图
Fig. 6 Picture of the real test platform

3 试验结果

为验证所开发系统的可行性及有效性,在所搭建的半实物仿真平台上开展了 ABS 特性试验、自动变速系统试验、发动机特性试验.

3.1 ABS 特性试验

3.1.1 ABS 性能评价指标 单独用一个指标很难判别 ABS 的性能,只有综合几个指标才能对 ABS 做出较合理的评价.本系统根据 ECE R13^[10] 法规的要求以及半实物仿真的特点,提出对半实物仿真下 ABS 性能进行评价的 5 个统计指标.它们是滑移率均值 $\bar{s}$ 、滑移率均方差 σ_s^2 、稳定系数 s_w 、制动压力均值 $\bar{p}$ 、制动压力均方差 σ_p^2 .

各个指标的数学计算公式为

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i \tag{1}$$

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2 \tag{2}$$

$$s_w = \frac{n_1}{n} \tag{3}$$

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \tag{4}$$

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \tag{5}$$

式中: n 为仿真过程中在指定时间段内的采样个数; n_1 为在指定时间段内车轮处于稳定区域的采样个数; s_i 为各采样点滑移率; p_i 为各采样点制动压力. $\bar{s}$ 与峰值滑移率 s_c 越接近,且 σ_s^2 越小,则制动效率越高;反之, σ_s^2 越大,则滑移率变化较大,即速度波动较大,控制性能较差. $\bar{p}$ 越大,则耗能越大; σ_p^2 越大,则意味着控制的压力波动大,控制效果不好. s_w 越大,则表明车轮较多地处于轮胎特性曲线的稳定区域,此时车轮稳定性较好;反之,如果其值较小,则稳定性不高.

3.1.2 ABS 试验结果及分析 本文以干燥混凝土路面以及结冰路面两种不同路况为例,对捷达 1.6AT 轿车 ABS 系统的性能检测结果进行评价.干燥混凝土路况下试验曲线如图 7~10 所示,其中峰值附着系数 $\mu_h = 0.7$,抱死时附着系数 $\mu_g = 0.6$,初始车速 $v_0 = 70$ km/h.

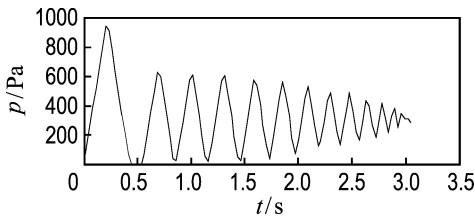


图 7 干燥混凝土路况下制动压力曲线
Fig. 7 Braking pressure curve on dry concrete roads

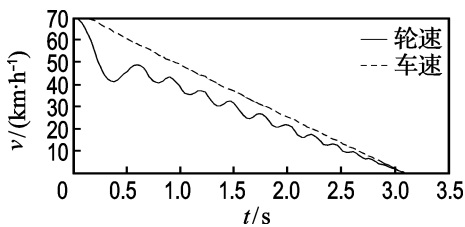


图 8 干燥混凝土路况下速度曲线
Fig. 8 Speed curve on dry concrete roads

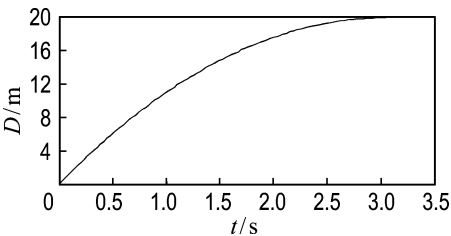


图9 干燥混凝土路况下制动距离曲线
Fig. 9 Braking distance curve on dry concrete roads

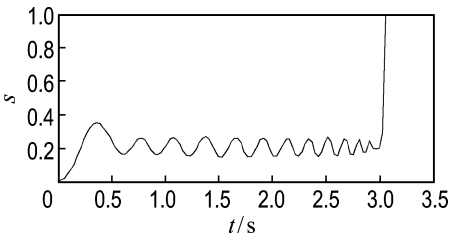


图10 干燥混凝土路况下滑移率曲线
Fig. 10 Slip ratio curve on dry concrete roads

结冰路况下试验曲线如图11~14所示,其中峰值附着系数 $\mu_{th}=0.1$,抱死时附着系数 $\mu_g=0.07$,初始车速 $v_0=50\text{ km/h}$.

分别对比图7和11、图8和12、图9和13、图10和14,可以看出干燥混凝土路况下,从初速度 70 km/h 减速到0仅需 3 s ,制动距离 19.50 m ,滑移率保持在 0.2 附近;结冰路况下,初速度 50 km/h 减速到0需 15 s ,制动距离 37.40 m ,滑移率保持在 0.1 附近,而且,结冰路况下制动压力变换频率明显大于干燥混凝土路况下制动压力变换频率.试验结果表明,该车制动过程中ABS成功动作,满足制动性能要求,验证了仿真模型的正确性和硬件系统的准确性.下面根据所给出的几项指标具体评价汽车的制动性能.性能数据如表1所示.

由表1数据可知,仿真制动距离与理论制动距离基本一致;滑移率在均值附近波动,制动比较平稳;稳定系数较为理想,制动效率较好.结果表明,本系统不仅能够评价ABS在常规路面环境下的性

能,而且能够评价其在极端路面环境下的性能.

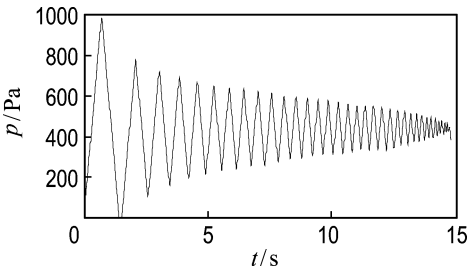


图11 结冰路况制动压力曲线
Fig. 11 Braking pressure curve on icy roads

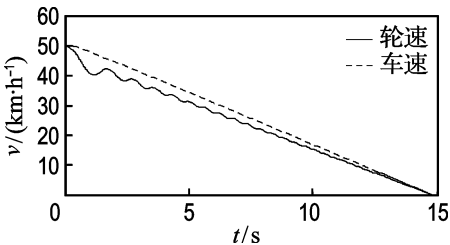


图12 结冰路况速度曲线
Fig. 12 Speed curve on icy roads

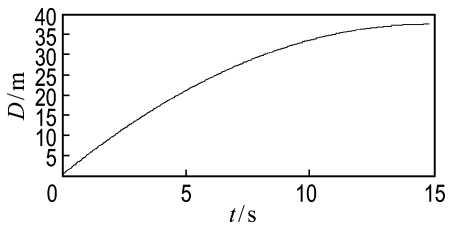


图13 结冰路况制动距离曲线
Fig. 13 Braking distance curve on icy roads

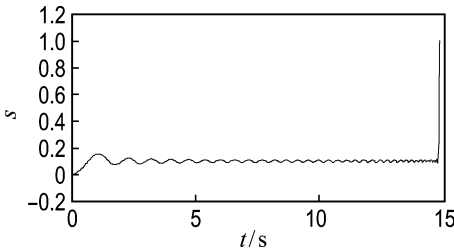


图14 结冰路况滑移率曲线
Fig. 14 Slip ratio curve on icy roads

表1 干燥混凝土和结冰路况下的性能数据

Tab. 1 The performance data on dry concrete roads and icy roads

路况	理论制动距离/m	仿真制动距离/m	$\bar{p}/\text{kPa}$	σ_p^2	s_w	$\bar{s}$	σ_s^2
干燥混凝土路况	19.87	19.50	0.46	1.56	0.57	0.21	0.01
结冰路况	36.10	37.40	0.55	1.47	0.56	0.10	0.02

3.2 自动变速系统试验

如图 15 所示, G 为挡位, $0\sim 4\text{ s}$ 时间段, 变速器保持 1 挡, 节气门开度 α 逐渐增大, 发动机转速 ω 和车速 v 也随之增大; 4 s 时, 满足换挡条件, 加到 2 挡, 换挡瞬间发动机转速略有下降; $4\sim 10\text{ s}$, 节气门开度继续增大, 发动机转速、车速随之增大; 10 s 时, 再次满足换挡条件, 加到 3 挡, 换挡瞬间发动机转速有明显减小; $10\sim 12\text{ s}$ 时间段, 节气门开度继续增大, 发动机转速和车速继续增大; 12 s 时, 突然关闭节气门, 发动机转速和车速迅速减小; $12\sim 22\text{ s}$ 时间段, 节气门开度逐渐增大, 发动机转速和车速继续增大; $22\sim 27\text{ s}$ 时间段, 虽然节气门开度逐渐减小, 但仍是较大值, 发动机转速和车速仍然增大, 只是增大速度变慢; 27 s 时, 再次满足换挡条件, 加到 4 挡, 换挡瞬间发动机转速明显迅速减小; $27\sim 50\text{ s}$ 时间段, 节气门开度继续减小, 发动机转速和车速也开始逐渐减小. 从以上分析可以看出, 升挡时由于发动机负荷的突变, 发动机转速会有所减小; 发动机转速和车速基本随节气门开度的增大而增大, 试验结果与理论分析相符.

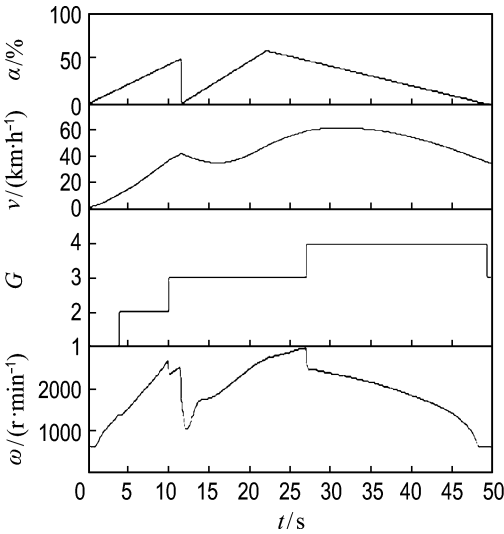


图 15 自动变速系统试验结果曲线

Fig. 15 Result curves of automatic shift system test

3.3 发动机特性试验

3.3.1 发动机点火提前角特性试验 该试验在进气温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冷却水温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、发动机负荷不变的条件下, 测试发动机转速对点火提前角 φ 的

影响, 试验曲线如图 16 所示. 由测试结果可知, 当发动机怠速运转时, 点火提前角为 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$; 当发动机中低速运转时, 点火提前角随发动机转速升高而增大; 当发动机转速升高到一定值时, 点火提前角维持在 40° 左右, 不再随转速升高而增大.

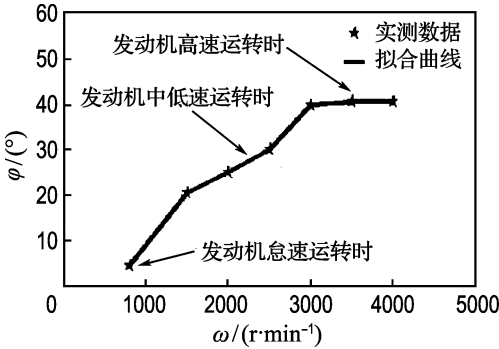


图 16 发动机点火提前角特性试验结果曲线

Fig. 16 Experiment result curves of the engine spark advance angle characteristics

3.3.2 发动机喷油特性试验 该试验在冷却水温度和进气温度不变的环境下, 通过改变节气门开度及进气绝对压力 p_i , 测得不同的喷油时间 t_i , 来研究喷油量与发动机转速和负荷之间的关系, 测试结果如图 17 所示. 由图可知, 在发动机转速不变的情况下, 喷油时间随负荷增加而增大, 以满足外界负荷需求; 在负荷不变的情况下, 喷油时间随发动机转速增加而增大, 以满足发动机功率需求.

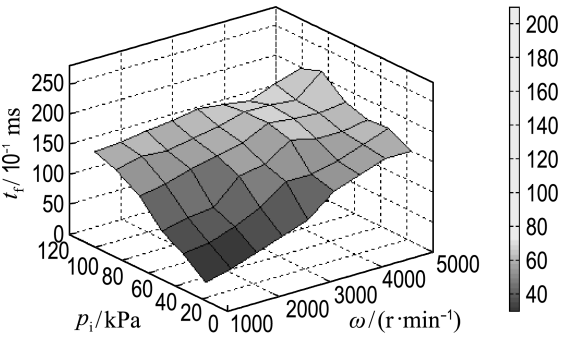


图 17 喷油特性试验结果

Fig. 17 Experiment results of the fuel injection characteristics

3.3.3 进气温度对喷油特性影响试验 该试验在冷却水温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不变的条件下, 研究进气温度

θ_i 对喷油时间的影响. 试验中分别测得了发动机在 800、2 500、4 000 r/min 等 8 个发动机转速下, 进气温度在 20、40、60、80、100 ℃ 时的喷油时间, 测试结果如图 18 所示. 由图可知, 喷油量修正系数 δ_θ 随转速升高略有增加(变化较小), 随进气温度升高逐渐降低. 结果显示喷油量修正系数对进气温度的变化较为敏感. 理论上随着进气温度的升高, 进气密度将降低, 进气质量流量则降低, 为避免混合气过浓及油耗过高, 应减少喷油量. 因此, 试验结果与理论分析相一致.

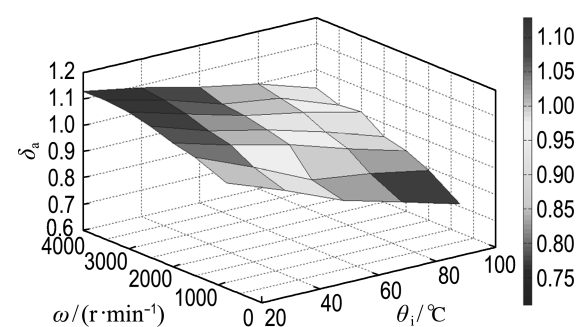


图 18 进气温度对喷油特性影响试验结果
Fig. 18 Experiment results of intake temperature effect on fuel injection characteristics

3.3.4 冷却水温度对喷油特性影响试验 该试验通过测量特定条件下冷却水温的修正曲线来研究冷却水温对喷油量的影响. 试验选定在发动机转速 2 000 r/min、负荷不变的测试条件下, 模拟冷却水温度, 测量不同温度点下的喷油时间, 研究冷却水温对喷油时间的影响, 测试结果如图 19 所示, 喷油时间随冷却水温升高而降低, δ_θ 为喷油

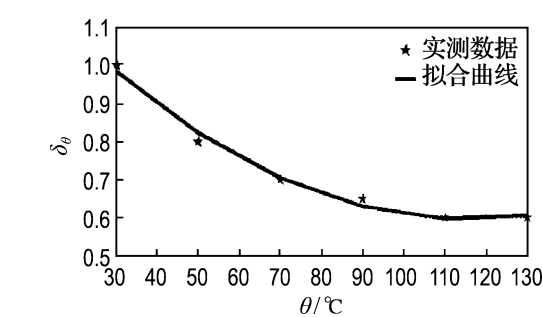


图 19 冷却水温度对喷油特性影响试验结果
Fig. 19 Experiment results of cooling water temperature effect on fuel injection characteristics

时间的水温修正系数. 从理论上分析, 随着冷却水温度 θ 的升高, 适当降低喷油时间将增加空燃比, 降低混合气的浓度, 避免了发动机进一步升温, 能适当改善发动机的工作状态. 由此可见, 试验结果与理论分析是一致的.

4 结 论

传统汽车电子控制系统设计费用高、开发周期长. 半实物仿真技术将实际车辆通过硬件接口电路嵌入至模型环境, 实现了实车与虚拟环境的有机结合, 在缩短开发周期的同时节省了开发成本. 因此, 本文设计和开发了汽车电子半实物仿真系统平台, 并通过试验验证了其可靠性及有效性. 该平台在汽车电子控制系统的开发、调试、检测和教学试验等方面具有广泛的适用性及广阔的应用前景, 目前已成功应用于本科生实验教学, 并取得了良好的效果.

参考文献:

[1] LIANG G, GONG W B, LIU H J, *et al.* A semi-physical simulation system for DBF transmitter array on LEO satellite [J]. **Progress in Electromagnetics Research**, 2009, **97**:197-215

[2] GIM G, CHOI Y, KIM S. A semi-physical tire model for a vehicle dynamics analysis of handling and braking [J]. **Vehicle System Dynamics**, 2007, **45**(1): 169-190

[3] ZHAO Yang, TIAN Hao, WANG Qiu-sheng. Analysis of dynamometry scheme for semi-physical simulation platform of space docking mechanism [J]. **Advances in Engineering Software**, 2007, **38**(10):710-716

[4] GUO Feng, XIAO Qi-min, XIAO Qi-li. Bluetooth channel quality simulation, estimation and adaptive packet selection strategy [J]. **WSEAS Transactions on Information Science and Applications**, 2009, **6**(1):84-94

[5] Philips Semiconductors. LPC2119 product data [DB/OL]. [2010-01-12]. http://www.21icsearch.com/s_LPC2119.html?stype=pdf&t1=&keyword=

LPC2119139-147

[6] 周立功. ARM 微控制器基础与实战 [M]. 2 版. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005

[7] 王正林, 王胜开, 陈国顺, 等. MATLAB/Simulink 与控制系统仿真 [M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2008

[8] CALVO J A, BOADA M J, DÍAZ V, *et al.* SIMPERF: SIMULINK based educational software for vehicle's performance estimation [J]. **Computer Applications in Engineering Education**, 2009, **17**(2):

[9] YAZICIOGLU Y, UNLUSOY Y S. A fuzzy logic controlled anti-lock braking system (ABS) for improved braking performance and directional stability [J]. **International Journal of Vehicle Design**, 2008, **48**(3-4):299-315

[10] 欧洲经济委员会. ECE R13 汽车标准法规 [S/OL]. [2010-01-12]. <http://www.docin.com/p-41608849.html#docTitle>

Development of semi-physical simulation platform for automotive electronic control system

LIAN Jing^{1,2}, LI Lin-hui^{1,2}, ZHOU Ya-fu^{*1,2}, SHEN Xiao-yong^{1,2}, CHANG Cheng^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2.School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The automotive electronic control system's semi-physical simulation solution based on the Jetta 1.6AT car is proposed, and its semi-physical simulation platform is designed and developed combining the actual automotive with the model environment organically using hardware interface circuit by means of the semi-physical simulation. The platform designed can realize real-time data exchange between vehicles and hardware-in-the-loop simulation model as well as accurately capture vehicle sensor signals. The vehicle electronic control system's work process and control principle can be observed visually through the platform display system. And according to the requirements, different models and different operating conditions are simulated by reasonably changing the parameters of simulation model. This platform not only solves the problem of real conditions simplification and modeling difficulty of mathematical simulation, but also overcomes high cost and long cycle of the physical test, and can be applied to the development, debugging, testing and teaching experiments of automotive electronic control systems.

Key words: semi-physical simulation system; anti-locked braking system; automatic shift system; engine electronic control