

文章编号: 1000-582X(2012)03-008-06

插电式混合动力汽车硬件在环测试

叶明¹, 舒红², 刘永刚²

(1. 重庆理工大学汽车零部件制造与检测技术教育部重点实验室, 重庆 400054;

2. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 分析插电式混合动力系统的结构特点, 建立发动机数值模型、电机电池联合工作数值模型、自动离合器模型和整车动力学模型。分析系统输入输出信号的类型及特征, 搭建基于 MATLAB/xPC 的插电式混合动力客车硬件在环测试系统。以纯电动和纯发动机工况切换为例, 将驾驶员操作油门变化的实际数据作为测试的输入条件, 对插电式混合动力客车的控制逻辑进行了硬件在环测试。测试结果显示自动离合器在油门变化剧烈时会出现频繁分离结合的现象。通过对测试数据和控制逻辑的分析, 发现故障原因并进行了控制逻辑修正。采用修正后的控制逻辑在道路测试中取得良好的效果。

关键词: 插电式混合动力; 电动汽车; 硬件在环; 控制; 测试案例

中图分类号: U463.2

文献标志码: A

Hardware in the loop test for plug-in hybrid electric vehicle

YE Ming¹, SHU Hong², LIU Yong-gang²

(1. Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing, 400054, P. R. China;

2. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Mathematical modes of engine, cooperation of motor and batteries, automatic clutch and vehicle are built with analysis of configuration of plug-in hybrid electric vehicle (PHEV). Specifications of data input and output and signal characters are defined. Hardware in the loop (HIL) system based on MATLAB/xPC for PHEV is built up. The motor/engine drive shift control logic test of PHEV is carried with inputting real acceleration pedal data. Testing results show that automatic clutch acts abnormally. Bugs in control logic are found out. Road test results with revised control logic are very good.

Key words: plug-in hybrid system; electric vehicle; hardware in the loop; control; test case

插电式混合动力汽车作为国家重点扶持的新能源车辆, 越来越受到关注^[1-4]。轿车和客车企业都在发展自己的插电式混合动力车型^[5-6]。2008 年 11 月通用汽车公司发布首款量产的 VOLT 串联插电式混合动力轿车, 该车动力传动系统由 2 个电机、3 个

离合器和 1 个行星齿轮装置构成。通过结合不同的离合器, 实现驱动模式的切换和工作区域的优化。福特公司的翼虎插电式混合动力汽车, 采用 2 个电机, 一个用于驱动, 另一个电机与变速系统集成在一起, 在需要的时候进行发电、启动发动机和调速。沃

收稿日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074062); 重庆市教委资助项目(KJ110811)

作者简介: 叶明(1976-), 男, 副研究员, 重庆大学博士, 主要研究方向为车辆动力传动系统综合控制, (E-mail)cqyeming@cqu.edu.cn。

尔沃将在 2012 年推出插电式柴电混合动力汽车。牵引电机安装在后桥,用于驱动后轮,前轮由发动机驱动。这样,前驱系统可保留原来的动力传动方式,只是后桥增加了电机驱动。日本丰田在 2010 年北京车展上展出了以第 3 代 PRIUS 为原型的外插电式混合动力概念车。其动力传动系统基本与原型车相同,采用丰田特有的电子无级变速系统。另外,本田、日产、奔驰和宝马等公司都相继在开展插电式混合动力车辆的研制。国内奇瑞也将于近期推出插电式和换电式两款电动车。

插电式混合动力客车动力耦合系统复杂,具有纯电动、纯发动机和发动机/电动机混合驱动等工况,其各工作模式之间需要准确平顺地进行切换,并且还要综合考虑发动机、电机和电池的性能,进行协调统一控制。整车控制器功能繁多,逻辑复杂^[7]。因此,需要对控制器的功能逻辑的控制策略进行充分的测试,以减小开发后期的风险。传统道路测试方法费用高、周期长、试验危险性大,对一些特殊工况下的故障测试困难(如高速行驶时,自动离合器失效)。这些特殊的边界条件下往往是最容易出现故障的工况,且造成的后果非常严重,所以只有道路试验完全不能满足测试要求。

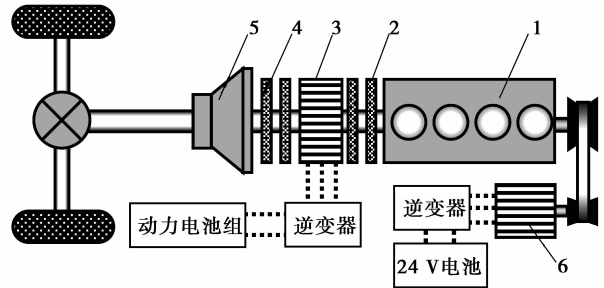
硬件在环系统(Hardware In the Loop, HIL)的出现,为混合动力汽车控制系统的测试提供全新的手段。它通过搭建测试模型,模拟整车控制器运行的虚拟工作环境。通过变化各种不同的输入条件,观察控制器的输出,检测功能逻辑正确性和控制策略的合理性。德尔福公司搭建了包含发动机、变速器模型的车辆动力传动 HIL 系统,对量产的控制器软件进行测试,大大提高了测试的精确性和效率^[8]。重庆大学陈然等^[9]搭建了基于 xPC 的 AMT 硬件在环测试系统,降低了系统成本。但插电式混合动力汽车中采用 xPC 技术搭建硬件在环测试系统,对控制逻辑进行测试分析的研究鲜有报道。

笔者通过搭建硬件在环测试系统,模拟插电式混合动力客车整车控制器运行的环境,对其控制逻辑进行测试,检查合理性,并针对问题提出改进策略,为硬件在环系统在插电式混合动力客车上的应用提供理论和试验基础。

1 插电式混合动力系统结构型式

图 1 为所研究的插电式混合动力系统。该系统具备 2 个离合器。在发动机和电动机之间的离合器为自动离合器,通过整车控制器对其自动控制,实现发动机和电机能量的合并与分离。电机与变速器之

间为一手动离合器,它由驾驶员操纵,实现起步和换挡等功能。手动变速器通过传动轴将驱动力传递到车轮。发动机启动仍然采用传统的启动电机,由 24 V 车载电池供电。



1. 发动机;2. 自动离合器;3. 电动机;
4. 手动离合器;5. 手动变速器;6. 启动电机

图 1 插电式混合动力公交车动力传动系统

2 硬件在环系统搭建

2.1 系统架构

基于 MATLAB/xPC 建立的插电式混合动力客车控制器(Hybrid Control Unit, HCU)硬件在环测试系统^[10]如图 2 所示。

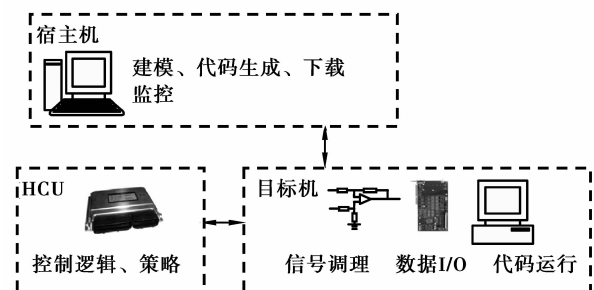


图 2 硬件在环系统构成

测试系统包括 3 个部分:宿主机、目标计算机(下位模型机)和 HCU。宿主机运行 Matlab/Simulink,利用 MATLAB 提供的各种功能强大的函数和工具箱建立整车动力学模型。采用 Real Time Workshop 生成 xPC 实时代码(又称为 xPC 目标),并下载到目标机上,宿主机可通过以太网与目标机进行数据交换,并运行监控程序对系统模型实时监控。目标机上运行宿主机生成的 xPC 实时代码,并通过与之相连的数据采集卡,将数字信号转换为模拟电压、频率等信号,通过调理电路放大转化,使其成为与 HCU 匹配的电信号并输送给 HCU,同时 HCU 发送来的控制信号通过调理电路转化为与数据采集卡匹配的电信号。

2.2 系统模型

硬件在环系统中,模型是核心。通过建立不同的模型,可模拟不同整车控制器的运行环境。为了对插电式混合动力客车进行硬件在环测试,根据系统的结构,需要建立包括发动机、自动离合器、电动机、手动离合器、传动系统和整车的动力学模型。

由于发动机燃烧机理非常复杂,通过动力学方程很难描述,通常根据测试数据通过插值的方式,建立发动机数值模型(图 3)。

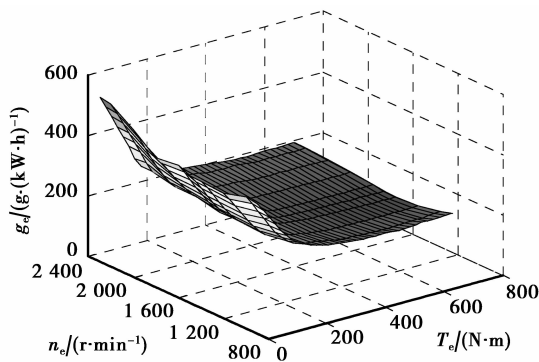


图 3 发动机数值模型

电动机采用永磁交流同步电动机,其建模可以通过电磁场方程和数值建模两种方式。通过电磁方程建模,可以准确地模拟出电动机的动态特性,但需要准确的电磁特性参数^[11]。而有些特性参数作为技术机密,厂家一般不予公开。并且,电机的工作特性,在很大程度上受到电池充放电特性的影响。根据电机和电池的测试数据建立电机、电池联合工作数值模型(图 4)。由于本研究的硬件在环测试主要针对其控制逻辑的正确性和控制策略的合理性进行检查,对车辆本身的动力学性能不做精确的定量测试,因此,采用数值建模的方式能满足测试的需要。

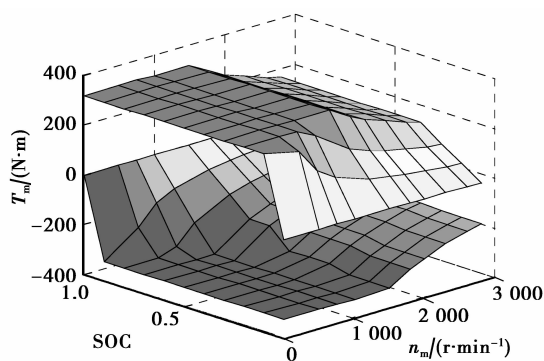


图 4 电机电池联合工作数值模型

由于自动离合器是采用气动的方式驱动,对其结合过程不做控制,因此将自动离合器简化为一个通断的开关,来模拟传动系统的结合与断开。

手动离合器根据其扭矩与行程的关系,拟合扭矩传递特性。

传动系统和整车根据速比和车辆动力学方程,建立车辆行驶动力学模型。

2.3 系统输入/输出

目标机的混合动力系统核心数据^[12]输入/输出(Input/Output,I/O)如图 5 所示。

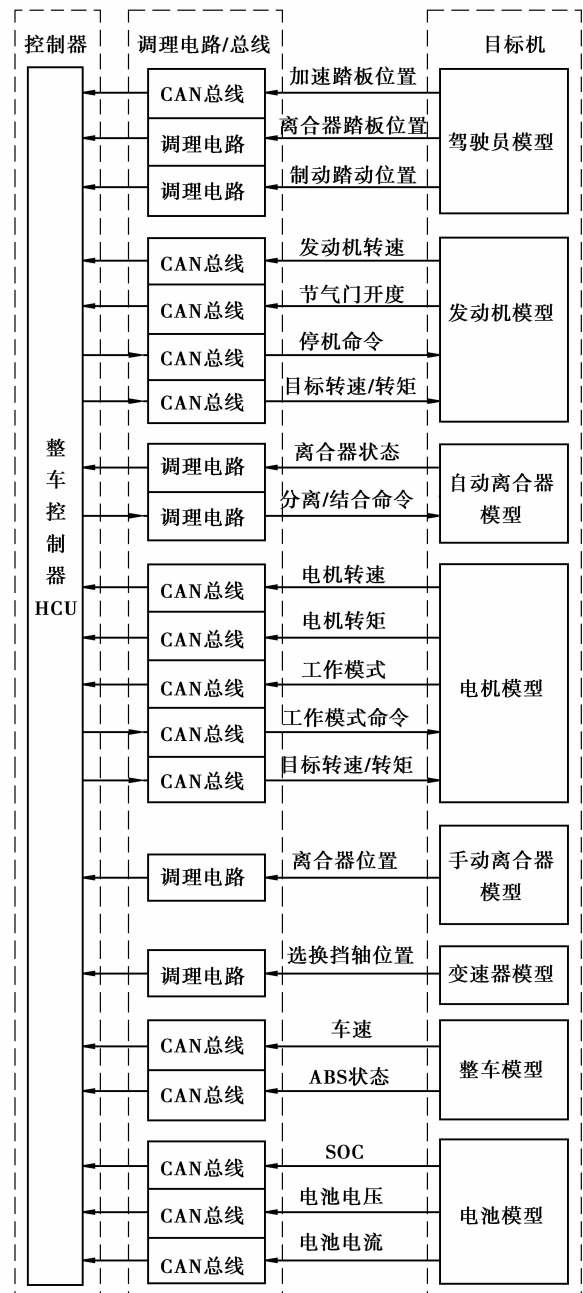


图 5 数据输入输出

系统整体模型运行在目标机中。其中,驾驶员模型模拟加速踏板位置、离合器踏板位置和制动踏板位置信号。按照 HCU 在实车上信号的类型,加速踏板位置为遵循 J1939 协议的控制器局域网(Contoller Area Network,CAN)总线信号^[13-14],离合器踏板位置和制动踏板位置为模拟信号,经过调理电路转换,输入 HCU。发动机模型根据车辆运行状态,计算出发动机转速和节气门开度,并通过 CAN 总线送入 HCU,HCU 根据控制策略,通过 CAN 总线向发动机模型发出目标转矩/转速和停机命令。自动离合器模型根据当前离合器的分离/结合状态输出数字信号,经调理后,输入 HCU。HCU 根据控制策略,向离合器发出分离/结合的数字指令,经调理后输入自动离合器模型。电机模型将当前的电机转速、转矩和工作模式通过 CAN 总线发送给 HCU,HCU 根据控制策略,将电机目标工作模式和转速/转矩通过 CAN 总线发送给电机模型。手动离合器模型将当前手动离合器的位置发送给 HCU,整车模型将计算出的车速以及 ABS 状态发送给 HCU,电池模型将计算得到的电池荷电状态(State of Charge,SOC)、电池电压和电池电流发送给 HCU。

3 测试工况

控制器测试大致可分为白盒测试和黑盒测试。黑盒测试适用于分析控制器简单功能,对功能逻辑的修正有限^[15]。本研究是针对已知控制逻辑进行测试,因此采用白盒测试方法^[16]。插电式混合动力系统工况众多,控制逻辑复杂,笔者选取纯电动模式和纯发动机驱动模式之间的切换作为测试工况,说明测试案例的设计。

纯电动工况和纯发动机工况之间的逻辑切换关系如图 6 所示。车辆在纯电动驱动模式下,检测到驾驶员需求扭矩大于设定阈值,并且发动机已经关闭足够的时间,则进入发动机驱动模式的切换过程。在该过程中,先启动发动机,然后将发动机的控制模式设为转速控制,电动机的控制模式和工作模式分别设为扭矩控制和电动,接着对发动机进行转速控制,其目标转速为自动离合器从动盘转速。当自动离合器主/从动盘转速差低于设定的阈值,则结合离合器,关闭电动机,发动机控制模式设为扭矩控制,响应控制策略计算出的目标扭矩。这样便完成工作模式的切换,进入纯发动机工作模式。

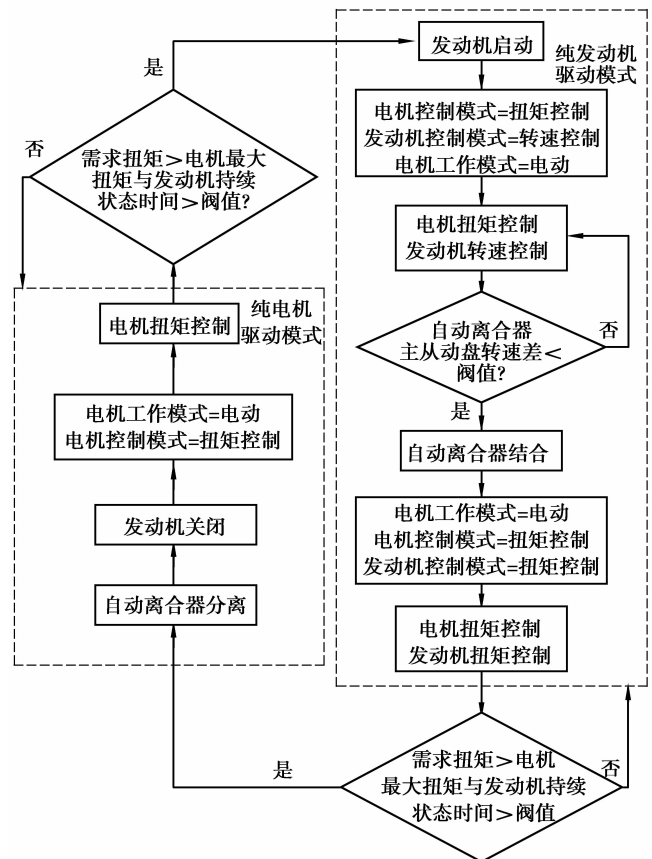


图 6 工况切换控制逻辑

在纯发动机驱动模式下,检测到驾驶员需求扭矩小于设定阈值,并且发动机已经开启足够的时间,则进入纯电动工作模式的切换过程。在该过程中,先分离自动离合器,然后关闭发动机,将电机的控制模式和工作模式分别设为扭矩控制和电动,接着对电机进行扭矩控制,响应控制策略计算得到的目标扭矩。这样便完成工作模式的切换,进入纯电动工作模式。

从控制逻辑中可以看出,工况模式切换需要判断的参数主要有需求扭矩、发动机持续状态时间(关闭和运行的时间)以及自动离合器主/从动盘转速。其中除需求扭矩外,其余参数均为车辆运行状态参数,为被动变化参数。根据控制策略^[17],需求扭矩 T_{req} 的计算式为

$$T_{req} = \frac{\beta P_s}{n_{ti}}, \quad (1)$$

式中: β 为加速踏板位置; P_s 为动力源在当前转速下可输出的最大功率,kW; n_{ti} 为变速器输入轴转速,r/min。

由此看来,需求扭矩主要由外部输入参数即油门开度决定。因此,在本测试案例中,选择油门开度为模型外部输入参数。

4 测试分析

混合动力传动控制系统中,各个功能之间的切换是受到连续变量变化影响的。这就使得在测试时,不能按照以状态迁移为主的控制逻辑的测试方法,将连续量离散成单个的值作为测试条件。而是应当将连续量的变化特征(如变化频率)作为输入条件^[18]。因此,采集驾驶员操作油门变化的实际数据,作为测试的输入条件。其测试结果如图 7 所示。

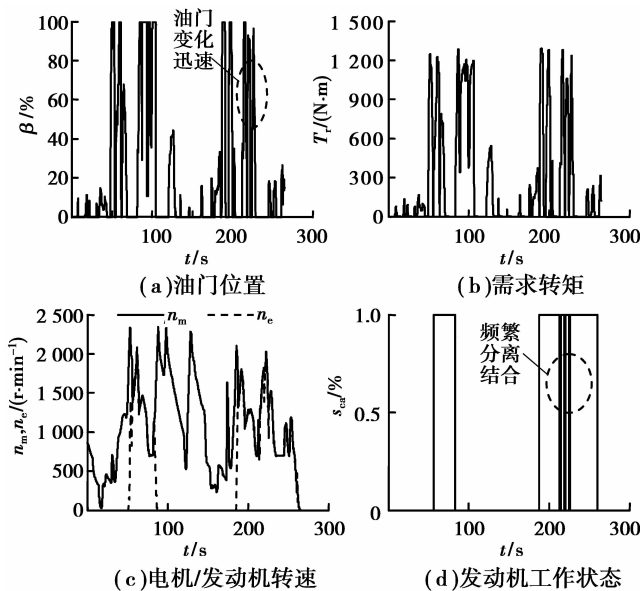


图 7 硬件在环测试结果

从测试结果中可以看出,随着油门开度的变化,需求扭矩发生变化,当需求扭矩超过阈值时,发动机启动,进入纯发动机驱动工况。当需求扭矩小于阈值,则进入纯电动驱动模式。由于加入了发动机开停机的时间限制,因此,发动机没有出现频繁的起停现象。测试结果却出现了与实车测试类似的自动离合器频繁分离结合的情况,而发动机的工作状态并没有发生变化(图 7(d)),此时油门位置变化非常剧烈(图 7(a))。通过仔细分析工况切换逻辑发现,当需求扭矩和发动机工作时间均满足要求时,车辆便从纯发动机切换到纯电机驱动工况。进入纯电机驱动工况需要分离离合器,然后关闭发动机。由于惯性的原因,使发动机完全停机需要 2~3 s。在这期间,如果需求扭矩大于阈值,而发动机没有完全停机,其状态仍处于工作状态,车辆会切换回纯发动机

工况。在纯发动机工况中,自动离合器需要重新结合,此时,需求扭矩再次小于阈值,而发动机处于工作的状态并没有发生变化,则车辆又将再次进入纯电机驱动工况,分离自动离合器。由此看来,造成自动离合器频繁分离结合的原因是驾驶员需求扭矩变化迅速,而发动机状态变化所需时间较长,这使得系统在发动机状态没有完成变化的条件下,便满足了切换条件,频繁响应需求扭矩的变化,造成自动离合器频繁分离结合。

根据分析,修改后的控制逻辑如图 8 所示。在图 8 中,加入了从纯发动机工作模式退出的时间延时判断条件。如果自动离合器处于分离状态,需求扭矩和发动机状态持续时间满足要求,则立即进入纯电动驱动模式。如果自动离合器处于结合状态,即使需求扭矩和发动机状态持续时间满足要求,还需要做延时判断,如果在延时过程中,检测到需求扭矩又大于阈值,则返回纯发动机驱动工况。这样就避免了需求扭矩变化过于迅速造成自动离合器分离结合过于频繁,同时又不会产生对扭矩需求响应过慢,造成动力不足的情况。

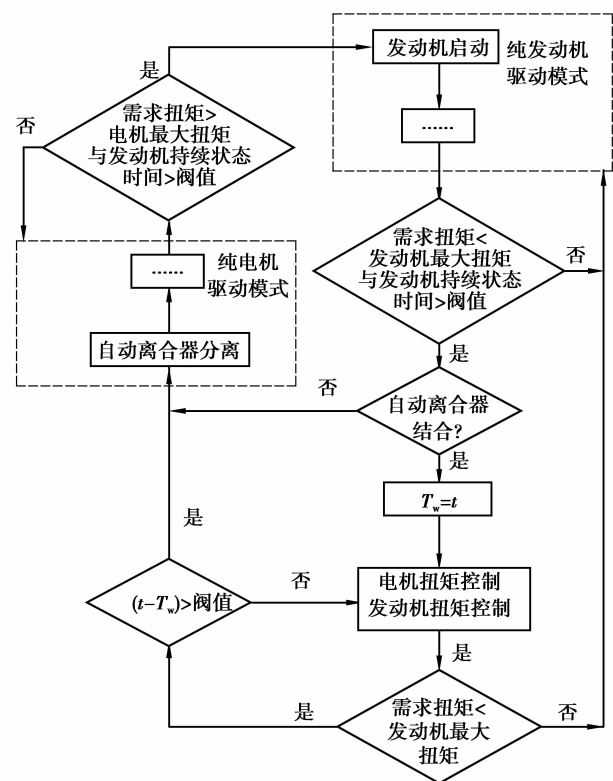


图 8 修正后的控制逻辑

在控制逻辑修正后的实车试验中(见图 9),没有出现离合器频繁分离结合的情况,说明了该硬件在环系统和控制逻辑的有效性。

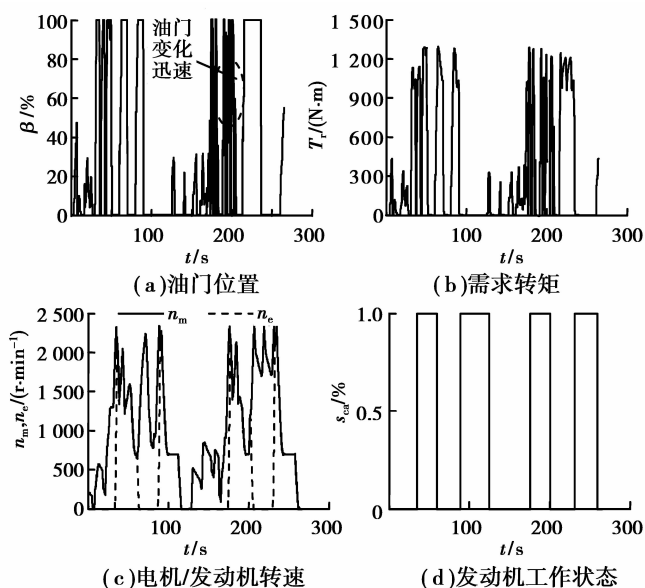


图9 实车试验结果

5 结 语

1) 根据插电式混合动力系统结构特点,建立系统主要部件的测试数学模型,分析了系统输入/输出信号的类型和特点,确定了硬件在环系统的数据端口,搭建了基于 MATLAB/xPC 的硬件在环测试系统。

2) 选取纯电动模式和纯发动机驱动模式之间的切换作为测试工况,并在硬件在环系统进行测试。通过测试结果和控制逻辑的分析,发现了出现问题的原因,并对控制逻辑进行修正。实车测试证明了本硬件在环系统的有效性。

3) 从理论建模、系统搭建、测试分析以及实车验证等方面系统阐述了硬件在环测试方法,为混合动力系统控制策略的测试及控制系统开发提供了有益的理论 and 试验参考。

参考文献:

- [1] 陈清泉,孙立清. 电动汽车的现状和发展趋势[J]. 科技导报,2005,23(4):24-28.
CHEN QING-QUAN, SUN LI-QING. Present status and future trends of electric vehicles[J]. Science & Technology Review, 2005, 23(4): 24-28.
- [2] 赵勇强. 车用替代燃料发展状况与前景[J]. 中国能源, 2009, 31(4): 33-36, 23.
ZHAO YONG-QIANG. Alternative fuel for road transport: current status and prospects [J]. Energy of China, 2009, 31(4): 33-36, 23.
- [3] XIAO J T. On the impacting of China's automobile industry by the implementation of low-carbon economy [C] // Proceedings of the 2010 International Conference on Internet Technology and Applications, August 20-22, 2010, Wuhan, China. [S. l.]: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [4] SIKES K, GROSS T, LIN Z, et al. Plug-in hybrid electric vehicle market introduction study: final report [R]. Washington, DC, USA: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2010.
- [5] TATE E D, HARPSTER M O, SAVAGIAN P J. The electrification of the automobile: from conventional hybrid, to plug-in hybrids, to extended-range electric vehicles [C] // Proceedings of the 2008 SAE World Congress & Exhibition, April 14-22, 2008, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International, 2008: 2008-01-0458.
- [6] BRADLEY T, FRANK A. Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1): 115-128.
- [7] 王印东. 双离合式混合动力传动系统模式切换品质仿真研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [8] ZHENG Q, CHUNG W, DEFORE K, et al. A hardware-in-the-loop test bench for production transmission controls software quality validation [C] // Proceedings of the 2007 SAE World Congress & Exhibition, April 16-19, 2007, Detroit, Michigan, USA. [S. l.]: SAE International, 2007: 2007-01-0502.
- [9] 陈然, 孙冬野, 秦大同, 等. 自动变速器控制系统硬件在环仿真实验台开发 [J]. 现代科学仪器, 2009(6): 23-26.
CHEN RAN, SUN DONG-YE, QIN DA-TONG, et al. Development of hardware-in-the-loop test bench for automatic transmission control system [J]. Modern Scientific Instruments, 2009(6): 23-26.
- [10] 苗立东, 邹广德, 石沛林, 等. 基于 xPC 的汽车测控系统的开发 [J]. 汽车工程, 2008, 30(3): 235-239.
MIAO LI-DONG, ZOU GUANG-DE, SHI PEI-LIN, et al. Development of automotive measure and control system based on xPC toolbox [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(3): 235-239.
- [11] 王丽, 吴忠. 基于 Matlab/Simulink 的永磁交流电动机仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 272-276.
WANG LI, WU ZHONG. Simulation study on permanent-magnet AC motors based on Matlab/Simulink [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(1): 272-276.
- [12] 杨亚联, 曹紫薇. 混合动力车辆远程采集监控系统的研发 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24(4): 1-7.
YANG YA-LIAN, CAO ZI-WEI. Research on remote data supervisory system of hybrid-electric vehicles [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2010, 24(4): 1-7.

- [6] GOLNABI H, ASADPOUR A. Design and application of industrial machine vision systems [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23 (6): 630-637.
- [7] THOMAS G H. Overview of nondestructive evaluation technologies[J]. *Nondestructive Evaluation of Aging Bridges and Highways*, 1995, 2456:5-9.
- [8] 张洪涛,段发阶,丁克勤,等. 带钢表面缺陷视觉检测系统关键技术研究[J]. *计量学报*, 2007, 28(3):215-219. ZHANG HONG-TAO, DUAN FA-JIE, DING KE-QIN, et al. Development of key technology on surface defects detection system for steel strip [J]. *ACTA Metrologica Sinica*, 2007, 28(3):215-219.
- [9] 宋海鹰,彭小奇,刘征,等. 基于非接触式温度测量中的高温熔体识别方法[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2005, 36(3):426-428. SONG HAI-YING, PENG XIAO-QI, LIU ZHENG, et al. Recognition method in contactless temperature measurement of high temperature melts [J]. *Journal of Central South University of Technology: Science and Technology*, 2005, 36(3):426-428.
- [10] 王敏,程京,张帆. 一种改进的自适应中值滤波算法[J]. *微计算机信息*, 2010, 26(10):109-110. WANG MIN, CHENG JING, ZHANG FAN. An improved method of adaptive median filter [J]. *Microcomputer Information*, 2010, 26(10):109-110.
- [11] 彭小奇,孙元,王一丁. 基于高温辐射体颜色信息的目标图像识别方法[J]. *中国图像图形学报*, 2008, 13(2):238-241. PENG XIAO-QI, SUN YUAN, WANG YI-DING. An object image recognition method based on the color information of a high temperature radiator [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(2):238-241.
- [12] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,译. MATLAB版. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [13] PRATIHAR S, BHOWMICK P. A thinning-free algorithm for straight edge detection in a gray-scale image [C] // *Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Pattern Recognition*, February 4-6, 2009, Calcutta, India. [S. l.]: IEEE Press, 2009:341-344.
- [14] MA W Y, MANJUNATH B S. EdgeFlow: a technique for boundary detection and image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(8):1375-1388.
- [15] ROHRMUS D. Invariant texture features for web defect detection and classification [J]. *Proceedings on Machine Vision Systems for Inspection and Metrology*, 1999, 3836 (8):144-155.

(编辑 张 苹)

~~~~~

(上接第13页)

- [13] 李芳,张俊智,王丽芳,等. 电动汽车动力总成系统控制器局域网(CAN)总线通信协议[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(5):102-107. LI FANG, ZHANG JUN-ZHI, WANG LI-FANG, et al. Controller area network protocol for powertrain system of electric vehicles [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(5):102-107.
- [14] 冉振亚,周智庆,李越,等. 电动汽车 CAN 总线驱动控制系统设计[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(6):603-609. RAN ZHEN-YA, ZHOU ZHI-QING, LI YUE, et al. A controller area network-based electric vehicle drive system design [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(6):603-609.
- [15] JORG S, THOMAS Z. Automotive software engineering: principles, processes, methods, and tools [M]. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2005:325-380.
- [16] CONARD M. A systematic approach to testing automotive control software [J]. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2005, 111(1):13-26.
- [17] 舒红,蒋勇,高银平. 中度混合动力汽车模型预测控制策略[J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(1):36-41. SHU HONG, JIANG YONG, GAO YIN-PING. Model predictive control strategy of a medium hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(1):36-41.
- [18] 高峰,张强,周晶洁,等. 车身控制器功能逻辑测试技术的研究[J]. *汽车工程*, 2009, 31(10):966-970. GAO FENG, ZHANG QIANG, ZHOU JING-JIE, et al. A study on the function logics test techniques for body control module [J]. *Automotive Engineering*, 2009, 31(10):966-970.

(编辑 张 苹)