

6-4-2020

Development of Hybrid Electric Vehicle Hardware-in-the-loop Testing System

Bin Yan

1. School of Mechanical Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ;

Ting Yan

1. School of Mechanical Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ;

Yang Lin

1. School of Mechanical Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ;

Chen Liang

2. Shanghai 01 Power Technology Co. Ltd, Shanghai 200240, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Development of Hybrid Electric Vehicle Hardware-in-the-loop Testing System

Abstract

Abstract: Control system has significant influence on Hybrid Electric Vehicles (HEV) acceleration performance, drivability and reliability. In order to ensure system reliability and safety, an elaborate test was done for different performance indexes in the process of system development. Though software-based test has some advantage in testing process and flexibility, it is only able to achieve logical verification on basic function of control strategy. Besides, it does not take into account of the effect of controller hardware, and has some limitation in real-time testing. Instead, hardware-in-the-loop (HIL) can overcome these shortages, can test systematically for controller. *HEV test environment was built for hybrid control unit (HCU) based on RT-LAB platform. Matlab-in-the-loop (MIL) test and HIL test was carried out respectively. The test results show HIL has realistically reflect control effect of HCU.*

Keywords

HIL, HEV, testing system, RT-LAB

Authors

Bin Yan, Ting Yan, Yang Lin, Chen Liang, and Zhou Wei

Recommended Citation

Yan Bin, Yan Ting, Yang Lin, Chen Liang, Zhou Wei. Development of Hybrid Electric Vehicle Hardware-in-the-loop Testing System[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1237-1243.

混合动力车辆硬件在环测试系统研究

闫斌¹, 鄢挺¹, 杨林¹, 陈亮², 周维¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海凌翼动力科技有限公司, 上海 200240)

摘要: 控制系统对混合动力车辆的加速性、驾驶性、可靠性等有很大的影响。在整个研发过程中, 为了保证系统的可靠性和安全性等多种性能指标需要进行全面地测试。基于软件的测试虽然操作简单, 灵活性好, 但是只能对控制策略的基本功能进行逻辑验证, 没有对实际控制器硬件对控制的影响的方面考虑, 且在控制器实时测试方面还存在欠缺。基于硬件在环的方法可以克服这一缺点, 能够系统全面地对控制器进行测试。基于 RT-LAB 的平台, 针对混合动力控制器建立了测试环境, 分别通过软件在环和硬件在环的测试结果进行比较, 有效显示出硬件在环测试能够更真实地反应控制效果。

关键词: 硬件在环; 混合动力车辆; 测试系统; RT-LAB

中图分类号: U467.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 06-1237-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201706011

Development of Hybrid Electric Vehicle Hardware-in-the-loop Testing System

Yan Bin¹, Yan Ting¹, Yang Lin¹, Chen Liang², Zhou Wei¹

(1. School of Mechanical Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai 01 Power Technology Co. Ltd, Shanghai 200240, China)

Abstract: Control system has significant influence on Hybrid Electric Vehicles (HEV) acceleration performance, drivability and reliability. In order to ensure system reliability and safety, an elaborate test was done for different performance indexes in the process of system development. Though software-based test has some advantage in testing process and flexibility, it is only able to achieve logical verification on basic function of control strategy. Besides, it does not take into account of the effect of controller hardware, and has some limitation in real-time testing. Instead, hardware-in-the-loop (HIL) can overcome these shortages, can test systematically for controller. HEV test environment was built for hybrid control unit (HCU) based on RT-LAB platform. Matlab-in-the-loop (MIL) test and HIL test was carried out respectively. The test results show HIL has realistically reflect control effect of HCU.

Keywords: HIL; HEV; testing system; RT-LAB

引言

混合动力车辆的动力系统由多个子系统组成,

每个子系统都由对应的控制器(ECU)控制, 使整个系统的复杂性增加^[1-2], 如图 1 所示。靠工程经验难以全面地完成系统的控制系统的检验, 设计一套测试系统是完成系统测试的关键。而且混合动力车辆中电机, 发动机和电池的安全运行要求非常高。硬件在环(HIL)模拟测试在车辆的研发过程中是非常重要的步骤, 直接针对目标 ECU 的控制指令模拟系统的响应特性, 来确保车辆子系统的控制在安



收稿日期: 2015-07-14 修回日期: 2015-10-01;
基金项目: 国家自然科学基金(51275291), 上海汽车工业科技发展基金会项目(1502);
作者简介: 闫斌(1983-), 男, 安徽, 博士, 研究方向为新能源汽车控制; 鄢挺(1989-), 男, 江西, 博士, 研究方向为新能源汽车控制; 杨林(1969-), 男, 四川, 博士, 教授, 博导, 研究方向为汽车电子研究。

<http://www.china-simulation.com>

• 1237 •

本文基于 RT-LAB 平台设计的硬件在环平台，具有实时性好，计算速度高的优点。针对配套的混合动力车辆构建对应的模型，并将模型进行资源分配，在多个核中分布式运行保证系统实时性的运行效果。分别对软件在环和硬件在环的运行结果进行对比并进行分析，结果显示：硬件在环能够更加真实地模拟车辆的控制效果。

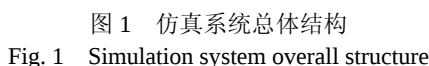


图2 混合动力车辆控制结构

Fig. 2 Hybrid electric vehicle control structure

1.2 混合动力车辆系统建模

仿真机运行对应的数学模型来模拟实际车辆的运行状态。在执行测试过程中建立的模型又受精度和运行时间的限制^[5-6]。简单的模型主要由查表和逻辑函数组成,在仿真设计中需要较少的运行时间,开发时间,相关数据也较少。包含纵向动力学的扭矩分配函数,能量解析,各个部件之间的相互作用和简单的故障诊断。虽然这种模型能够使模型的正常运行,但是模型的精度有限。而高精度的模型由于需要耗费大量的计算资源,很难保证仿真机的实时运行,一般使用离线的仿真,如高压系统解析使用 SimPowerSystems 工具和高精度发动机模拟包如 GT-POWER。因此在建模中要对模型计算时间与仿真精度进行折中。

为了便于软件在环和硬件在环的结果对比,车载控制器中的控制策略是直接通过代码转换成 C 代码的,因此离线仿真中车辆总控制器 HCU 的控制策略与下载到车载控制器中的控制策略完全相同,同时软件的车辆模型与 HIL 系统中的模型也完全一样。具体模型如下

1) 驾驶员模型

驾驶员模型将参考的速度轨迹作为外部的输入,本文采用 PI 控制器作为虚拟的驾驶员跟随参考车辆的运行轨迹。基于 PI 控制器,在设置点驾驶员模型的扭矩输出为 T'_{dem} ,设置点的整车需求扭矩由混合动力系统来提供,整车需求的扭矩受动力系统输出扭矩限制:

$$T_{dem} = \min\{T'_{dem}, T_{dem,max}(\omega)\} \quad (1)$$

式中: $T_{dem,max}(\omega)$ 为在当前电机转速 ω 情况下,动力链可以传输的最大扭矩。动力链的动力响应以 $T_{dem,max}(\omega)$ 为最大的边界值。

2) 发动机模型

发动机是混合动力车辆的主要动力源,决定着整个动力系统是否能正常运行。发动机模型采用查表法,简化的平均值模型,基于试验的中的转速、扭矩、燃油消耗率和排放等数据,建立起查表来实现。

混合动力车辆的发动机和常规车辆的发动机不同,发动机控制器并不与油门相连,而是由 HCU 进行控制。为了使发动机方便地在动力链的控制中。改进的 ECU 控制器具有扭矩,转速和油门的控制模式。发动机控制器的输入的变量为,油门需求,转速需求,扭矩需求和控制模式,还有相关的状态参数,如发动机转速,温度等。主要输出为指令发动机的喷油量,发动机的实际输出扭矩,尾气排放等。

扭矩控制设计的目的是为了使发动机与电机的输出扭矩控制能够实现更好的耦合。ECU 收到扭矩需求百分比作为发动机动力需求输入。ECU 通过一个稳态的查表将这个百分比转化成实际的扭矩需求。再者,ECU 计算的扭矩需根据传动控制系统和怠速控制器来进行修改。

发动机需求扭矩($T_{ice,req}$)通过扭矩需求的百分比($T_{ice,per}$)函数来进行计算,发动机转速(w_{ice}),另一个从怠速控制而得到的结果($T_{ice,idle}$),和传动系统指令控制扭矩($T_{ice,tr}$)。

$$T_{ICE,req} = f_{ice,trq}(w_{ice}, T_{ice,per}) + T_{ice,idle} + T_{ice,tr} \quad (2)$$

式中: $f_{ice,trq}$ 是二维查表,用于 ECU 转化扭矩百分比到实际扭矩需求。怠速控制器通过 PI 控制器和一个反馈补偿发动机阻力来进行模拟。发动机摩擦扭矩在模型中是基于发动机实验数据设计的发动机转速的二次方函数。

$$T_{ice,fr} = b_{ice,2}w_{ice}^2 + b_{ice,1}w_{ice} + b_{ice,0} \quad (3)$$

式中: $b_{ice,i}$ 是发动机的摩擦系数。所有附件负载也集中到发动机的摩擦。

3) 电机模型

电机主要用于执行电能和机械能之间的转换,模型也作为一个有需求扭矩和速度函数的电功率准静态查表。和发动机不同的是,电机的运行能力与电池的状态相关,因此在电机的模型中需要考虑到电池的状态。当电池 SOC 较低时,由于电量不足,不能够支持电机扭矩的输出。

此外,针对电机的运行特性,电机的正常运行受多个因素的影响的交集,

a) 电机特性限制,可以从厂家规格参数得到。

b) 模型中考虑到逆变器和绕组温度问题, 在温度高于一定值是电机输出扭矩清零。

c) 电机的高压和低压限制, 考虑到电容和逆变器的电压工作区间问题, 当电压超出边界时, 需要进行扭矩限制。

d) 电流的限制影响, 过高的电流也会对电机元器件进行损坏, 因此电机模型中也要对电机的电流进行考虑。

4) 电池模型

电池模型对车辆的驾驶性有直接的影响, 主要是因为电池的 SOC(这里是控制策略的一个回馈信号) 影响执行器的功率分配。使用简化的零阶电池用于估计电池的 SOC, 并模拟电池的实时运行特性。

电池使用 Th'evenin 等价电路模型进行模拟, 忽略了电化学的动态。电池提供的功率为 P_{batt} , 可以表示为

$$P_{batt} = P_{dm} \cdot \begin{cases} \frac{1}{\eta(w_{dm}, T_{dm})} & T_k \geq 0 \\ \eta(w_{dm}, T_{dm}) & T_k < 0 \end{cases} \quad (4)$$

使用电池提供的功率 P_{batt} , 估计电池的开路电压(V_{oc}), 电池的内阻(Z_{batt}), 电池电流和电压可以计算为:

$$I_{batt} = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4Z_{batt}P_{batt}}}{2Z_{batt}} \quad (5)$$

$$V_{batt} = V_{oc} - Z_{batt}I_{batt} \quad (6)$$

电池内阻和开路电压模拟为电池 SOC 的函数, 这些函数根据电池电量的信号改变。使用电池的电流和估计初始的开路电压, 电池 SOC(S_{batt}) 可以通过电流积分:

$$S_{batt}(t) = S_{batt}(V_{oc}(0)) + \frac{1}{C_{batt}} \int_0^t I_{batt} dt \quad (7)$$

式中: C_{batt} 为电池的能量容量。

5) 车辆模型

车辆模型主要包括动力传动系统以外的部分, 与状态参数速度、加速度、坡度、变速箱的扭矩和产生的角速度、角加速度相互作用。这些物理量的关系与车辆的载重、空气动力特性、车轮特性和后桥传动比相关。在车轮需求的牵引力 F_t 可以表示为

$$F_t = m_v \cdot \dot{v}(t) + \frac{1}{2} \rho_a A_f c_d v^2(t) + (c_{r,1}v + c_{r,0}) \cdot m_v g \cos(\gamma) + m_v g \sin(\gamma) \quad (8)$$

式中: m_v 是车辆的质量; ρ_a 为空气密度; A_f 是车辆的迎风面积; c_d 是空气阻力系数; $c_{r,1}$ 和 $c_{r,0}$ 是滚动阻力系数; g 代表重力加速度。

6) 变速箱模型

变速箱输出的需求扭矩和转速可以通过牵引力和速度来进行计算。

$$T_{WH} = \begin{cases} r_{WH} F_t + J_{WH} \frac{\dot{v}}{r_{WH}} + T_{WH,loss} & \text{if } v > 0 \\ 0 & \text{if } v = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: r_{WH} 为有效车轮半径; J_{WH} 为车辆的惯量; $T_{WH,loss}$ 为一个恒定的损失扭矩。

2 实时硬件在环系统设计

在硬件在环系统中, 仿真器直接连接到真实的控制器。仿真器内部的软件 RT-LAB 基于 simulink 的 RTW 软件工具包将车辆模型生成实时代码。实时系统包括模型实时解算、电接口输入输出控制、被测对象数据实时交互等功能。在离线的模拟中, 系统模拟可以使用一分钟来模拟实际系统一个小时的运行情况。但在实时的模拟中, 模拟时间与实际的时间严格同步, 每一个模拟时间步的计算必须与真实时间相对应。

实时系统的任务执行时间是实时代码在实时系统运行的瞬态。时间步为 t_n 和 t_{n+1} 。完整的步长需要实时模拟从 t_n 开始到 t_{n+1} 结束的整个过程, 整个过程由计算时间、信号采样与输出时间和间歇时间三部分组成。任务执行时间是模型的计算时间, 从 simulink 获得的实时代码通过有效的系统求解方程来获得下一个时间步的系统状态运行的时间。信号采样和输出的时间是指在系统计算之间的瞬时, 这个瞬时反映在实时节点或者实时系统的 I/O 接口。这个主要考虑到 A/D 和 D/A 的转换延时。间歇时间是指到下一个时间步的处理器空闲时间。离线与实时仿真不同步主要因为离线模拟中不存在间歇时间。

超限时进行的时间编码在实时系统内的执行时间会超过所选择的实时仿真步长。如果超过容忍的限制, 这种模拟就只能归类为软件实时仿真。这种超出范围的情况可以通过增加仿真步长来进行消除, 这样就会使混合动力车辆模型运行的精度变小。

为了保证复杂模型运行时, 仿真机模拟的实时性, 实时系统可以根据模型的复杂程度分成一个或者多个节点。模型分成整车动力传动系统模型和它的子系统模型。仿真机中多个节点的并行计算能够确保复杂模型的实时运行而不会超出计算负载。

整个系统的模拟如图 3 所示, 系统由两个实时系统(Real-time system, RTS)组成, 分别命名为 RTS1 和 RTS2。在混合动力车辆的实时仿真中, RTS1 模拟发动机、电机、变速箱等主要零部件, RTS2 来运行混合动力车辆动力学及其它模型(如车辆附件等)。

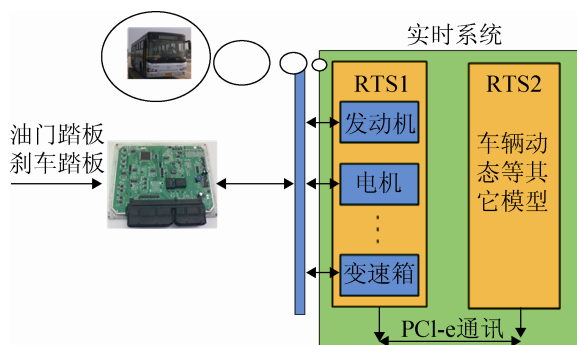


图 3 实时系统的应用

Fig. 3 Application of real-time system

实时仿真机硬件组成如图 4 所示, 包括一个 HILBOX 工控机, 和内部的通讯板卡。控制模型中生成代码下载到 RTS 实时运行。在 RTS 上安装 LINUX 来确保实时控制器实时任务。RTS 通过 CAN 或 I/O 来连接到实时控制器, 硬件上 PCI 板卡来实现, I/O 板有 10ns 的分辨率确保系统能够输出足够精度的信号。由于控制模型较复杂需要较大的计算量, RTS 只运行整个模型的一部分, 两个实时系统之间的通过 PCI-e 高速板卡连接, 每一个实时系统通过局部网络(LAN)线从上位机下载实时代码。

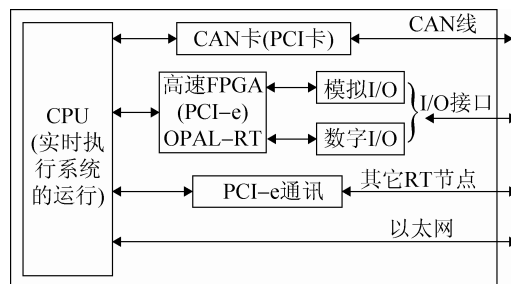


图 4 硬件布置示意图

Fig. 4 Hardware layout diagram

3 仿真结果

3.1 硬件配置

为了满足仿真的计算速度和实时行星, 仿真机采用 OP5600 作为实时目标机, 内置 Intel i7 六核处理器, 主频 3.46GHz, 1 个 FPGA 板, 以太网接口; CPU 内置 REDHAT LINUX 实时操作系统和 I/O 卡驱动。

针对 HCU 的接口, 使用模拟输出板卡 OP5330、模拟输入板卡 OP5340、数字输出板卡 OP5354、数字输入板卡 OP5353 各一块。

3.2 软件模型

混合动力车辆的 simulink 模型如图 5 所示, 模型的基本数据采用 12 m 客车的元件的配置数据。

发动机峰值功率为 135 kW, 电机峰值功率为 100 kW, 电池容量为 40 Ah, 标称电压为 324 V。

3.3 运行结果

用中国典型公交循环来对模型进行模拟, HIL 仿真中步长设置为 1ms。模型运行结果如图 6 所示, 红色为基于 Matlab 平台的软件在环(MIL)运行结果, 蓝色为硬件在环(HIL)的运行结果。仿真中基于驾驶员模型对参考的运行轨迹进行跟随, 给控制器发控制指令, 对整个动力传动系统进行控制。从仿真结果可以看出离线和在线模拟中车速、SOC 轨迹和燃油消耗有比较相近的运行轨迹。结果说明两种不同模式的仿真下, 全局的运行比较接近, 电池和燃油的消耗轨迹也非常接近, 这说明使用相同的能量管理算法能够对系统有相近的控制结果。

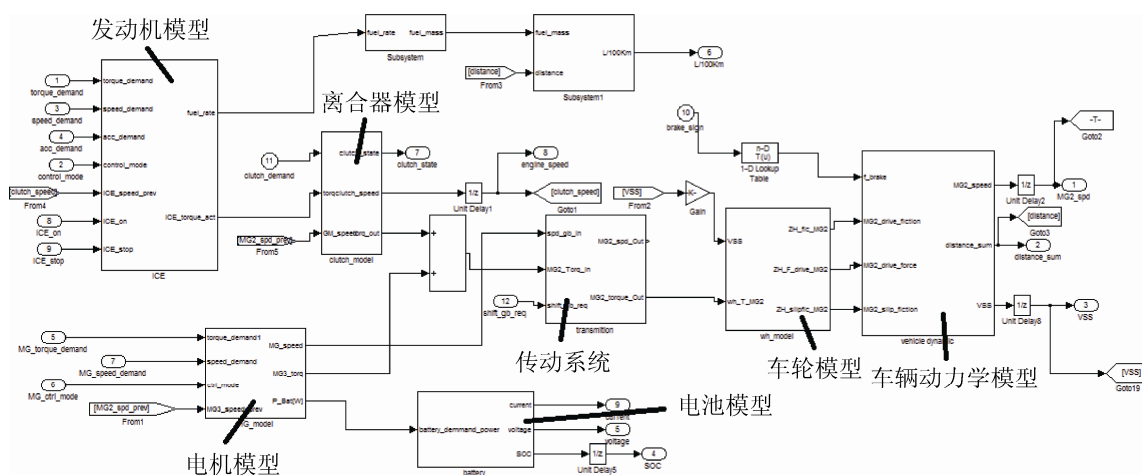


图5 整车 simulink 模型
Fig. 5 Vehicle model in Simulink

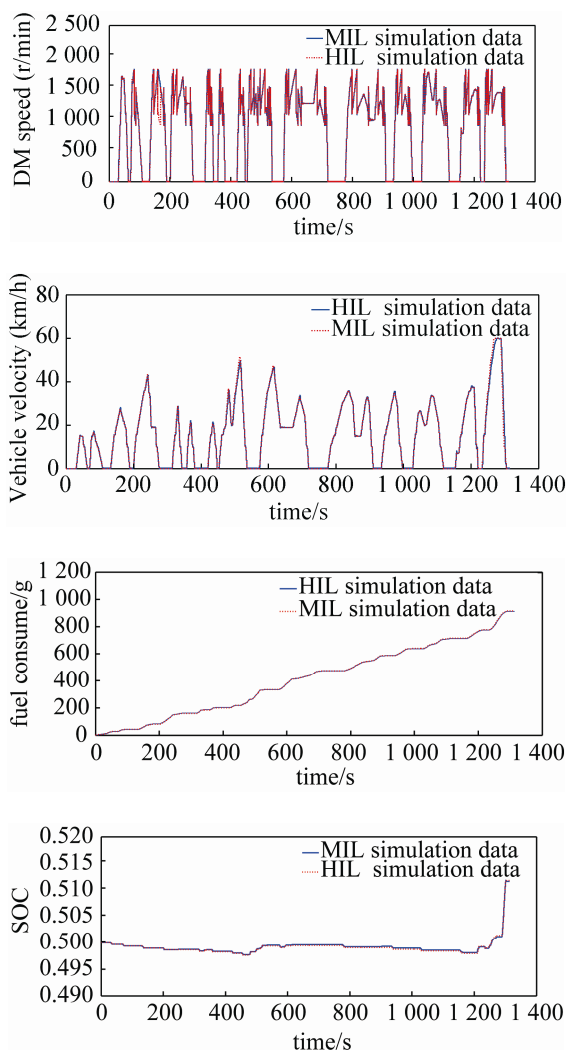


图6 离线计算与硬件在环仿真结果比较
Fig. 6 Simulation results comparison of MIL and HIL

但是, 在一些瞬态的运行特性, 离线和在线仿真结果有所不同。以离合器结合过程中转速的运行轨迹为例, 如图7所示, 在两种仿真情况下就出现了较大的差异。在离线仿真情况下, 通过离合器行程的闭环控制, 离合器结合造成的转速波动较小, 只有 20 r/min 的幅值。但是在硬件在环仿真中, 通过闭环控制却出现了较大的转速振荡, 出现 220 r/min 的转速剧烈上升, 随后产生由于扭矩冲击而导致的转速振动。

瞬态的转速变化主要是由于扭矩冲击产生, 在电机驱动向混合驱动过程中, 发动机输出扭矩要与整个动力输出扭矩耦合, 整个过程需要控制离合器行程和电机的扭矩。而离合器的控制需要与电机和发动机扭矩输出进行协调, 控制器在离线仿真中与模型的通讯是理想的控制步长, 因此可以进行稳定的闭环控制。如图8所示, 在主传动轴上根据离合器的结合过程对电机和发动机的扭矩协调, 扭矩的上升是平缓的, 使纯电机驱动到混合驱动实现无缝连接。在硬件在环的仿真中, 基于相同的策略却由于通讯周期的影响, 使闭环控制系统不稳定, 如图9所示, 在离合器结合过程中产生的扭矩的冲击, 主要由于离合器结合过程中, 通过闭环的控制会产生时间延迟, 就会导致离合器的运行估计扭矩与实际扭矩不一致。

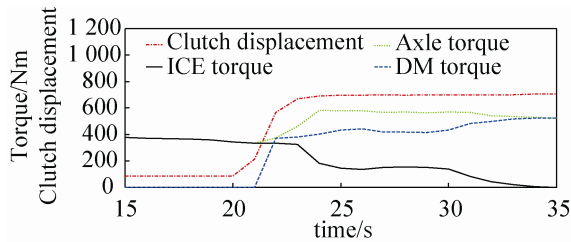


图 7 发动机和电机扭矩耦合情况下仿真结果

Fig. 7 Simulation result of torque coupling situation between engine and motor

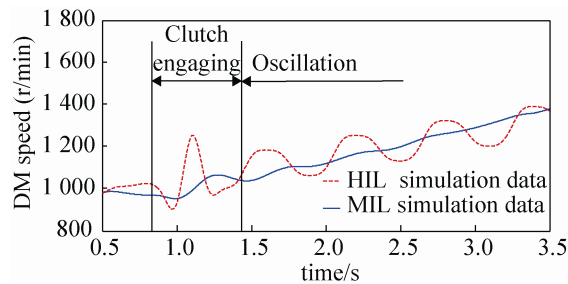


图 8 离线仿真运行结果

Fig. 8 MIL simulate results

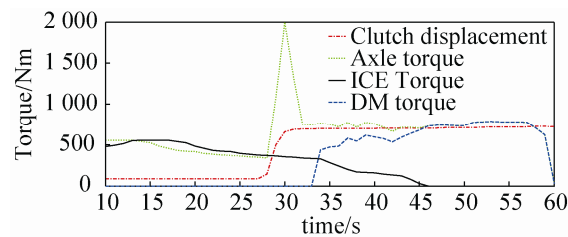


图 9 HIL 仿真运行结果

Fig. 9 HIL simulate results

根据以上的仿真结果,使用硬件在环和离线仿真存在的差异主要归因于以下几个方面:

1) A/D 和 D/A 转换: 在 MIL 的控制中, 没对系统进行 A/D 和 D/A 转换处理, 因此由于延迟造成仿真结果的应用。在执行 HIL 仿真中, 单片机和仿真机要对传感器的电压信号与单片机中的数字信号进行转换, 进而消耗时间。尤其是在做信号采样时, 会由于信号的瞬态波动造成数字的不稳定, 需要进行滤波处理。滤波次数直接将通过 I/O 或 CAN 采样的信号延迟 3 个采样周期。

2) I/O 延迟: 当模型离线运行时, 没有信号转换, 因此在 MIL 的仿真中控制器的运行周期与模型的仿真周期相同, 因此在保证模型有较高仿真精

度的前提下, 系统的运行周期仅为 1 ms。而 HIL 系统中, 控制器的采样和输出指令通过 4 ms 实现, 与 MIL 仿真周期 1 ms 的结果不同。

3) CAN 通讯延迟: 在控制器中动力系统的 CAN 通讯一般为 10 ms 或者 20 ms, 而且从一个节点传送到另一个节点接收之间的时间是不同的, 这些在 HIL 测试中的通讯延迟是存在的。但是在 MIL 测试, 只能作为信号进行传输。

因此在 MIL 和 HIL 两种控制中, 虽然采用相同的控制策略, 但是由于 HIL 系统中存在采样和指令的延迟, 会直接影响车辆的运行效果。如图 5 所示, 虽然车辆在稳态运行时, MIL 和 HIL 只存在较小的差异, 但是车辆在瞬态变化的情况下, 尤其是扭矩耦合过程, 由于多个控制信号进行协调控制, 存在通讯的延迟, 会导致反馈信号与根据反馈信号发出来的指令信号会相差最多 40 倍的时间控制偏差, 这种偏差会使瞬态系统的控制响应与预期的不同步。如图 7 和图 8 中分别显示了 MIL 和 HIL 侧重中离合器的结合过程, MIL 测试由于不存在硬件的延迟达到较好的控制结果。但是 HIL 测试中采样的闭环控制由于时间的延迟而使扭矩传递不平顺, 导致车辆发生振动。采用硬件在环的测试是软件和硬件的综合测试, 因此更能反应出控制器的实际的控制效果。

4 结论

本文构建一个硬件在环仿真平台, 根据并联式混合动力系统构建了软件 simulink 模型。模型针对中国典型城市公交循环驾驶轨迹分别进行 MIL 和 HIL 运行。结果表明: 车速运行轨迹, 电机运行轨迹及 SOC 和燃油消耗变化是合理的, 构建的模型可以用于控制器的 MIL 和 HIL 测试。同时两种运行方式存在细微的差异, 主要归因于 HIL 测试中模拟 I/O 信号和 CAN 线信号在数据传递过程中会造成延迟, 说明硬件在环对控制器的测试环境与实际运行的更加接近。

(下转第 1252 页)