

混联式混合动力车多能源动力控制系统的开发*

周 磊 罗禹贡 杨殿阁 李克强 连小珉
(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 提出一种混联式混合动力车的控制系统,它在结构上有以下特点:双电动机方案、动力在自动变速箱后端耦合、基于 CAN 网络的整车控制系统。在能量管理策略方面采用基于最优动力系统效率的优化 ICE 曲线控制策略,用“九点定义法”确定驱动需求转矩,在自动变速换挡过程中的采用动力协调控制策略,并在制动能量回收控制中考虑了滑行制动和强制制动两种控制模式。在此基础上开发多能源动力控制系统,并进行硬件在环仿真测试和实车匹配调试。实车测试结果表明,该多能源动力总成控制器能有效地实现对多能源动力的控制,使车辆的经济性和动力性都有很大提高。

关键词: 混联式混合动力车 多能源动力控制系统 控制策略 换挡协调控制

中图分类号: U469.72

0 前言

由于石油资源的日益匮乏以及环境的渐渐恶化,汽车工业界把更多的精力投入到电动汽车的开发中。在电池的一些关键技术尚未得到突破、电动汽车的动力性和续航里程还有待提高的情况下,混合动力汽车将传统汽车与电动汽车的优势相结合,近年来有了很大的发展,已有商品化成功的车型出现。

作为混合动力汽车的关键技术之一,多能源动力总成控制系统担负着信号采集、驾驶员意图识别、能量分配和控制命令输出等重要功能,是整车控制策略实现的核心部件,其性能优劣直接影响着车辆的经济性和动力性。一般根据驾驶员操作和车辆状态等信息,决定合适的车辆工作模式(纯电动驱动、发动机驱动或混合驱动等),再在该模式下对系统各部件进行功率分配。国外著名汽车生产商如福特、丰田、本田和日产等公司已开发出应用于量产车型的控制策略^[1-5]。国内汽车生产企业与高等院校合作,针对各自不同结构的混合动力车开发了控制系统,但均未定型投产^[6-13]。

本文所研究的混联式混合动力汽车具有动力在变速箱后端耦合的特殊结构,本文介绍了该车多能源动力控制系统的软硬件开发,提出了确定需求转矩的“九点定义法”,介绍了可靠有效的并联式制动能量回收系统,并在换挡过程中引入不同动力间的协调控制以提高车辆的动力性和舒适性。测试结果表明,该多能源动力控制系统能有效地实现对多能源动力的控制,使车辆经济性与动力性达到了较好的统一。

1 混合动力车整车结构

本文所研究的混合动力车的动力系统结构如图 1 所示。

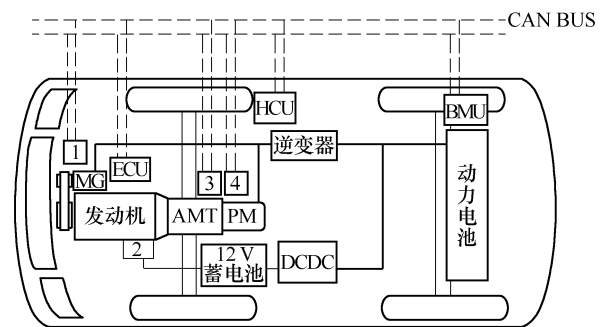


图 1 混合动力车的动力系统结构

1. MG 控制器 2. 12V 起动电动机 3. AMT 控制器 4. PM 控制器

车辆的动力系统包括直列四缸电喷发动机、永磁同步驱动电动机(PM)、永磁同步发电/起动电动机(MG)及镍氢动力电池,传动系统主要包括四挡自动变速箱(AMT)及主减速器。PM 通过主减速器直接驱动车辆,并可在制动时作为发电电动机把车辆的动能转化为电能储存在动力电池中。MG 通过皮带传动与发动机相连作为其起动电动机,也可在电池电量低时作为发电电动机把发动机产生的机械能转化为电能。

车辆的控制系统包括多能源动力总成控制器(HCU)、发动机控制器(ECU)、电池管理单元(BMU)、AMT 控制器、PM 控制器及 MG 控制器,它们通过 CAN 总线进行通信。

动力在变速箱输出轴耦合是该混联式混合动力车的一大特点,驱动时发动机的动力经变速箱后

* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 2005AA501323)。20060620 收到初稿, 20061106 收到修改稿

与 PM 的动力耦合，再经主减速器传递至驱动桥。其好处是在换挡过程中动力不会中断，在制动能量回收时减少了传动系上的效率损失，但该结构也对电动机的性能提出了更高的要求。

该混动式混合动力车还保留了传统车上的 12 V 起动机，以保证动力电池电量过低时发动机能正常启动。

2 能量管理策略

2.1 需求转矩的确定

由于发动机的输出转矩经过变速箱才与 PM 的输出转矩耦合，因此提及需求转矩时，须明确是发动机输出端的需求转矩还是 PM 输出端的需求转矩，以 $T_{r,e}$ 和 $T_{r,m}$ 分别表示时有以下关系

$$T_{r,e} i_g = T_{r,m} \quad (1)$$

式中 i_g ——当前挡位的传动比

首先根据表 1 确定驾驶员的加速/减速意图。然后根驱动需求转矩定义曲面确定 $T_{r,m}$ ，如图 2 所示。

表 1 驾驶员驱动与制动意图的确定

踏板状态	车速高	车速低
只踩油门踏板	加速	加速
只踩制动踏板	减速	减速
两个踏板都未踩	减速	加速
两相踏板同时踩下	作为特殊情况处理，本文中不予讨论	

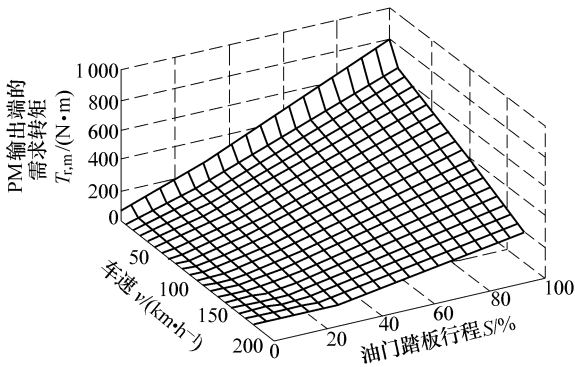


图 2 驱动需求转矩定义曲面

图 2 中的驱动需求转矩定义曲面是由“九点定义法”得到的，即确定九个关键点的需求转矩值。该九个点的选取代表了车辆的蠕行、大加速和最高车速等工况，主要根据驾驶员感觉进行调节，如表 2 所示。表 2 中 T_s 为车辆缓慢起步时需求转矩， T_{emax} 为发动机能发出的最大转矩， i_1 、 i_4 分别为 AMT 的一挡和四挡传动比， T_{m0} 、 T_{m175} 分别为车速在 0 和 175 km/h 时 PM 的转矩极限， K 为动力性调整因子， C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 是平顺性调整因子。

表 2 特殊点上需求转矩的确定

车速 $v/(km \cdot h^{-1})$	油门踏板行程 $S/\%$		
	0	30	100
0	T_s	C_2	$K(T_{emax} i_1 + T_{m0})$
10	0	C_3	C_4
175	C_1	0	$K(T_{emax} i_4 + T_{m175})$

2.2 动力部件工作区的划分

确定了驾驶员的需求功率后，需要将其合理分配给各个动力部件。分配的原则之一是使各部件高效运行，因此需要对它们的工作区进行划分。

(1) 电动机的高效工作线。以 PM 额定转矩线为基础，根据 PM 效率图定义了一条 PM 的高效工作线，用于确定发动机和 PM 的工作范围，记为 $T_{m,e}$ ，如图 3 所示。

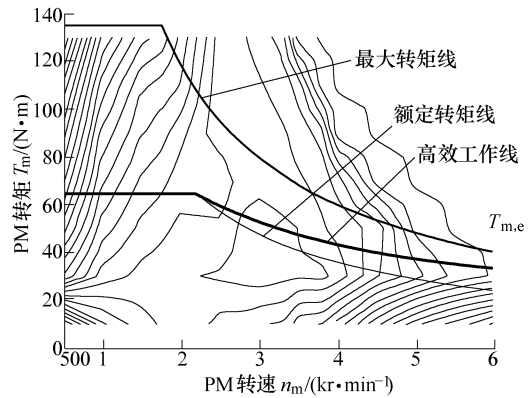


图 3 PM 的高效工作线

(2) 发动机经济工作区的划分。为了使发动机工作在燃油经济性较好的区域，避开低速、小负荷等燃油经济性差的工况，本文把发动机的燃油消耗率图划分成三个区域，如图 4。曲线 $T_{e,u}$ 与 $T_{e,d}$ 之间是发动机的经济工作区，是发动机的目标工作区域， $T_{e,d}$ 以下为低负荷区， $T_{e,u}$ 以上为助力区。由于发动机的输出动力在变速箱后端与 PM 耦合，因此在确定发动机与 PM 的工作状态时还须考虑到 AMT 的当前挡位。为了便于比较，在不同挡位 N

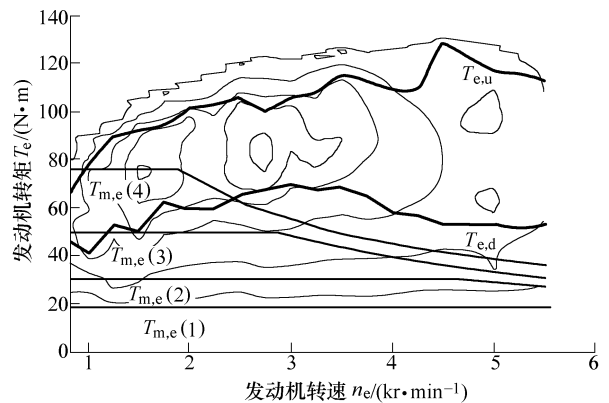


图 4 PM 与发动机的工作区域优化

下把 PM 的高效工作线向发动机端折算，得到图 4 中的曲线 $T_{m,e}(N)$, $N = 1, 2, 3, 4$ 。

(3) 电池高效工作区的确定。根据电池的充放电效率曲线，本文把电池工作区分成四部分：禁止工作区、低电量区、高效工作区和高电量区，如图 5。电池荷电状态(State of charge, SOC)值 $S_{cmin} \sim 1$ 是电池正常工作的区域，SOC 在 S_{cmin} 以下表示电池电量严重不足，继续放电会影响电池寿命，应及时对电池充电^[14]。各工作区充放电要求如表 3 所示。

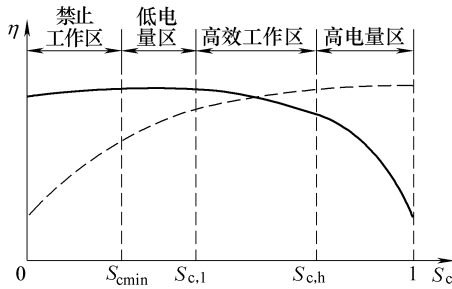


图 5 电池工作区划分

--- 放电效率曲线 — 充电效率曲线

表 3 电池工作区充放电要求

工作区	SOC 范围	充放电要求
禁止工作区	$[0, S_{cmin}]$	不可放电
低电量区	$(S_{cmin}, S_{c,l}]$	可放电，应该充电
高效工作区	$(S_{c,l}, S_{c,h})$	理想工作区
高电量区	$(S_{c,h}, 1]$	不可充电

2.3 驱动工作模式的确定

确定驱动工作模式是整车控制策略的核心之一，目的是根据车辆当前状态（车速、实际挡位、电池电量等）将驾驶员的需求转矩合理地分配给发动机和 PM，同时使电池工作在高效工作区，整车达到较好的经济性和动力性。根据发动机、PM 和 MG 的工作状态，本文定义了车辆驱动的若干模式，具体如表 4 所示。

表 4 车辆驱动模式表

主模式	副模式	发动机状态	PM 状态	MG 状态
电动机驱动	纯电动	不工作	驱动	不工作
电动机驱动	串联驱动	怠速	驱动	发电
发动机驱动	纯发动机驱动	驱动	不工作	不工作
发动机驱动	发动机驱动并发电	驱动	不工作	发电
混合驱动	—	驱动	驱动	不工作

当驾驶员需求转矩较小时，车辆工作在电动机驱动模式下，发动机不直接参与驱动。随着驾驶员需求转矩的增加，车辆的动力改由发动机单独提供，此时发动机的输出转矩包含驱动转矩和发电转矩两部分，用公式表示为

$$T_e = T_{r,e} + i_{m,e} |T_g| \quad (2)$$

式中 T_e —— 发动机输出转矩命令

$T_{r,e}$ —— 发动机输出转矩中用于满足驾驶员驱动需求的部分

$i_{m,e}$ —— MG 与发动机的转速比

T_g —— MG 转矩命令

T_g 表达式为

$$T_g = -W_{SOC} \min(T_{g,r}, (T_{e,d} - T_{r,e}) / i_{m,e}) \quad (3)$$

式中 $T_{g,r}$ —— MG 额定发电转矩

W_{SOC} —— 充电许可系数

充电许可系数曲线如图 6 所示。

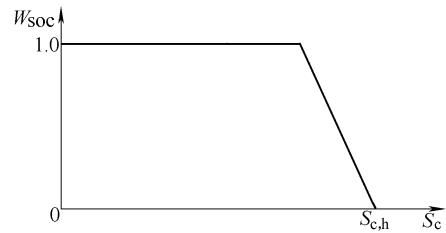


图 6 充电许可系数曲线

当电池 SOC 在 S_{cmin} 以下时，无论 $T_{r,e}$ 多少 PM 均不允许参与驱动，发动机带动 MG 及时为电池充电。表 5 进一步详细描述了各驱动模式下转矩管理策略，其中 T_e 、 T_m 、 T_g 分别表示对发动机、PM 和 MG 的转矩命令， T_{emax} 、 T_{mmax} 分别表示发动机和 PM 当前能够发出的最大转矩。

表 5 各驱动模式下的转矩管理策略

	纯电动	串联驱动
条件	$T_{r,e} < T_{m,e}(N)$ 且 $S_c \geq S_{c,l}$	$T_{r,e} < T_{m,e}(N)$ 且 $S_{cmin} \leq S_c < S_{c,l}$
T_e	0	$i_{g,e} W_{SOC} T_{g,r}$
T_m	$T_{r,m}$	$T_{r,m}$
T_g	0	$-W_{SOC} T_{g,r}$
	发动机驱动	
条件	$T_{e,d} \leq T_{r,e} < T_{e,u}$ 且 $T_{r,e} \geq T_{m,e}(N)$ 且 $S_c \geq S_{c,l}$	
T_e	$T_{r,e}$	
T_m	0	
T_g	0	
	发动机驱动并发电	混合驱动
条件	$T_{m,e}(N) \leq T_{r,e} < T_{e,d}$ 且 $S_c < S_{c,l}$ 或 $S_c < S_{cmin}$	$T_{r,e} \geq T_{e,u}$
T_e	$T_{e,d}$	$\min(T_{emax}, T_{r,e} - T_m / i_g)$
T_m	0	$\min(T_{mmax}, (T_{r,e} - T_{e,u}) / i_g)$
T_g	$-W_{SOC} \min(T_{g,r}, (T_{e,d} - T_{r,e}) / i_{g,e})$	0

2.4 并联式制动能量回收系统

这种并联式制动能量回收混合动力汽车采用了并联式制动能量回收系统，即在保留原车液压制动系统的基础上增加电动机能量回馈的功能。这种并联式制动能量回收系统结构与控制策略简单，同时在典型城市工况下能进行有效的制动能量回收^[3]。车辆受到的制动力包括原液压系统产生的摩擦制动

力和 PM 产生的再生制动力，如图 7 所示。前轮受到的制动力为

$$F_{Xf} = \frac{T_{h,f} + T_m i_r}{r_w} \quad (4)$$

式中 T_m —— PM 发出的制动力矩
 $T_{h,f}$ —— 液力制动系统对前轮的摩擦力矩
 i_r —— 主减速器传动比
 r_w —— 车轮半径

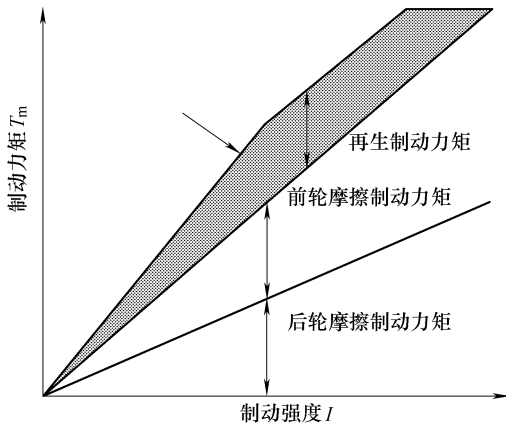


图 7 并联式制动系统的制动力矩分配

制动能量回收系统的控制应达到以下要求：满足制动系统工作要求(如制动距离、前轮先抱死等)，提高能量回馈在制动中的比例，不对 ABS 工作产生干扰，驾驶员具有良好的驾乘感等。

图 8 显示了摩擦制动力矩与再生制动力矩随制动踏板位置变化的关系。制动踏板开度在 0%~10% 时，驾驶员表达了制动意图，但由于空行程和液力制动系统的迟滞特性，此段并没有摩擦力矩产生。此时 PM 提供了再生制动力矩，弥补了原有系统的不足，满足了驾驶员的制动需求，并且将制动能量全部回收，提高了整车的经济性。随着制动踏板开度的增加，再生制动力矩由 T_0 以一定斜率开始增长，直到达到 PM 能提供的最大制动转矩 T_{mmax} 。 T_0 是为了模拟传统车上驾驶员同时松开油门踏板和制动踏板时发动机的反拖作用，使驾驶员有良好的驾驶感，其产生的减速度应不大于 $0.1g^{[14]}$ 。在制动强度很大时再生制动停止，以免干扰 ABS 正常工作。

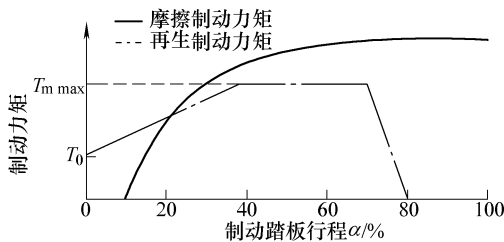


图 8 摩擦制动力矩与再生制动力矩随制动踏板位置的变化曲线

3 换挡过程中的动力协调控制

在传统轿车上，发动机是唯一的动力源，动力经变速箱及主减速器传递到驱动桥。车辆换挡过程中，变速箱的挡位会短时间处在空挡，动力不可避免地发生中断。本文所研究的混合动力汽车的特殊结构恰可解决该问题：由于 PM 的输出轴与主减速器刚性联接，AMT 处于任何挡位驱动桥都可从 PM 得到驱动力矩，从而保证动力不会中断。

图 9 为换挡过程协调控制示意图，在 t_1 时刻，AMT 发出开始换挡的信号，发动机开始减小其输出转矩，不足的动力由 PM 补充。发动机的动力完全中断后，车辆暂时由 PM 单独驱动。在 t_2 时刻 AMT 挂入了新的挡位，发动机逐渐替换 PM 驱动车辆。

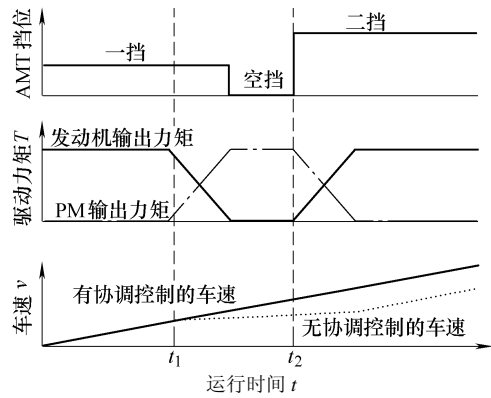


图 9 换挡过程协调控制示意图

由于发动机的响应时间较长，为保证 PM 能补足换挡过程中的驾驶员需求转矩，引入发动机的实际输出转矩为反馈量，换挡过程协调控制框图如图 10。

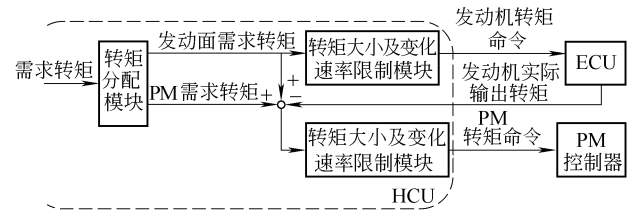


图 10 换挡过程协调控制框图

换挡过程中的协调控制步骤如下所述。

(1) AMT 发出换挡信号，发动机卸转矩，离合器分离。

(2) 发动机卸载时，PM 提供驱动转矩以保证驾驶员需求转矩能够满足，其大小为

$$T_m = (T_{r,e} - T_{e,a}) i_{gl} \quad (5)$$

式中 $T_{r,e}$ —— 发动机端的需求转矩
 $T_{e,a}$ —— 换挡过程中发动机实际输出的转矩
 i_{gl} —— 原挡位的传动比

(3) 离合器分离，发动机到驱动轴的动力完全中断，所有的驱动力由PM单独提供。

$$T_m = T_{r,e} i_{g1} = T_{r,m} \quad (6)$$

(4) AMT 摘挡，挂入新挡。

(5) 离合器重新接合，发动机加载，同时PM开始卸载。PM转矩为

$$T_m = (T_{r,e} - T_{e,a}) i_{g2} \quad (7)$$

式中 i_{g2} ——目标挡位的传动比

(6) 当发动机的实际输出转矩与需求转矩之差小于设定范围时，换挡协调控制过程结束。

在换挡过程中加入了不同动力的协调控制，充分利用PM与主减速器刚性联接的优势，使换挡过程中动力不会中断，既能提高车辆的动力性，又能改善驾驶舒适性。

4 控制器设计

4.1 控制器硬件设计

多能源动力总成控制器采用模块化的控制系统设计，由数字量信号输入输出电路、AD 采样电路、CAN 接口电路、BDM 调试接口、串行接口电路和电源及保护电路组成，其硬件系统框图如图 11 所示。

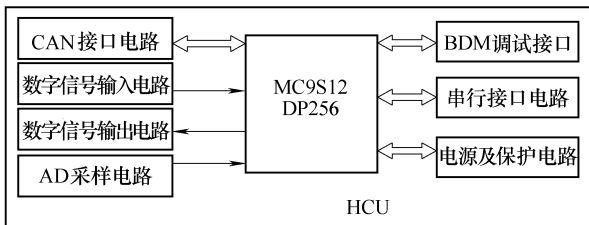


图 11 多能源动力总成控制器硬件系统框图

控制器所采用的 MC9S12 微处理器是 Motorola 公司专门为汽车电子开发的产品，具有运算速度快和内部资源与接口丰富的特点，适合实现整车复杂的控制策略和算法。数字信号输入输出模块采用了光电隔离的设计以保护单片机。CAN 通信模块符合 CAN 2.0B 技术规范，采用了光电隔离、电源隔离等多项抗干扰设计；BDM 调试模块用于实时对控制程序进行调试、修改；串口通信模块用于对控制系统的诊断和标定；电源模块进行了二级滤波的冗余设计，保证控制器在车载 12 V 系统供电情况下正常工作，并具短路保护功能。

4.2 控制器软件设计

控制器软件主要由两部份组成：输入信号的处理模块与控制策略运算模块。前者的作用是把采集

到的数字量、模拟量及接收到的 CAN 信息进行标定、滤波等处理，转化为程序中直接用到的输入量。后者是整个软件系统的核心，负责控制策略的实施，工作流程如图 12 所示。

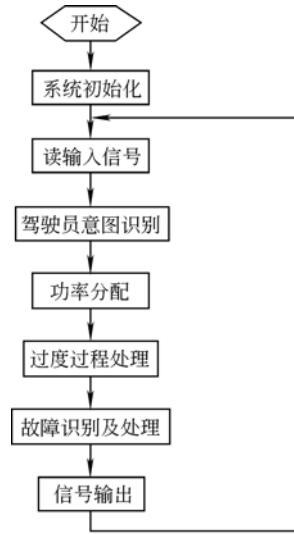


图 12 软件系统工作流程图

(1) 控制策略模块首先识别驾驶员的意图，包括两部分：① 确定车辆的工作模式，如驻车、驱动和制动等。② 确定驾驶员的需求转矩。对驾驶员意图的识别主要根据钥匙位置、挡位、油门踏板行程和制动踏板行程等信息。

(2) 确认驾驶员的意图后，控制策略模块对各部件进行功率分配，使其协调工作高效地满足驾驶员的要求。受控部件主要包括发动机、PM、MG 以及传统 12 V 起动电动机等。

(3) 由于混合动力车工作时会出现频繁的动力切换，对动力切换时的功率分配，需要进行专门的处理以保证车辆的平顺性。

(4) 如果 HCU 接收到来自部件的异常信号，如电动机过速、过温、电池电压过高或过低等，HCU 需要对相关部件功率进行限制，同时尽量不影响其他无故障部件的正常运行。

5 硬件在环仿真试验

硬件在环仿真试验中，车辆、发动机、PM、MG、AMT 以及电池等模型被下载到 dSPACE 公司生产的 AutoBox 中实时运行，钥匙位置、油门踏板位置、制动踏板位置和挡位等驾驶员操作信息由试验台采得直接传送给 HCU。仿真过程中 CAN 上的数据用 CANoe 监测实时监测并且可以回放。试验结构图如图 13 所示。

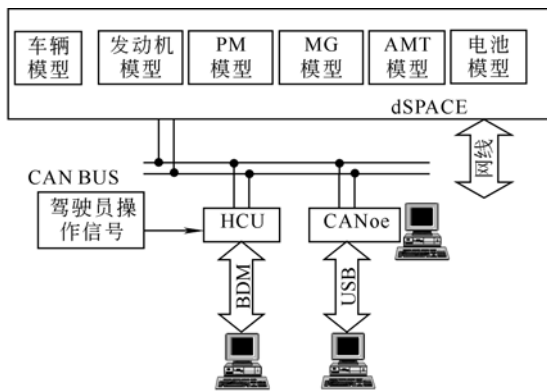


图 13 硬件在环仿真试验结构图

图 14 是包含起步、加速、匀速和减速等工况的硬件在环仿真试验结果。驾驶员松开制动踏板起步, 车辆由 PM 单独驱动, 同时 MG 起动机。随着油门踏板位置迅速增大, 多能源动力总成控制器判断出驾驶员有较大加速需求, 控制车辆进入发动机驱动模式。在换挡时 PM 提供驱动转矩避免动力的中断。在匀速段, 需求转矩较小, 发动机停止工作以降低油耗和排放, 车辆由 PM 单独驱动。在滑行减速时, 驾驶员没有踩制动踏板, 液力制动系统不参与制动, PM 以恒转矩回收车辆的机械能。当驾驶员踩下制动踏板有较大的减速需求时, PM 也增大了制动力矩。当车速较低无很大的能量可回收时, PM 不参与制动, 制动完全由液力制动系统来完成。

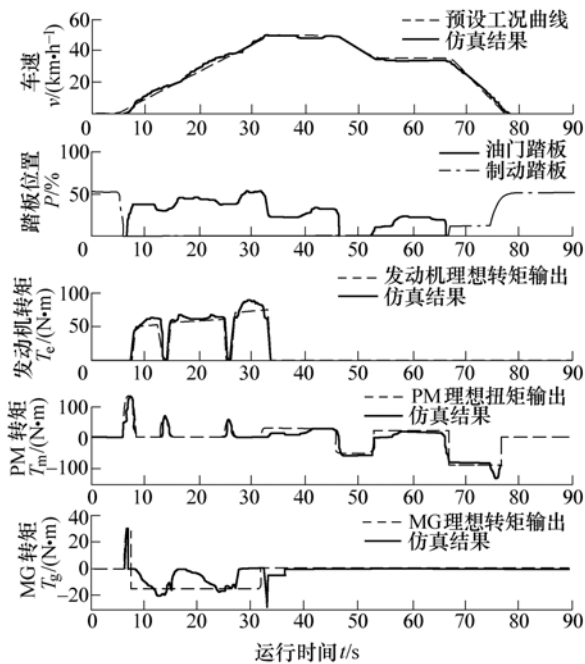


图 14 硬件在环仿真试验结果与理想输出的比较

通过硬件在环仿真试验, 多能源动力总成控制器的性能得到初步验证。

6 实车测试

经过硬件在环仿真试验后, 多能源动力总成控制器被装上实车进行标定、调试和匹配, 并最终进行了油耗、排放和动力性能测试, 测试结果如表 6 所示。

表 6 实车测试结果

参数项目	原型车	混合动力车
ECE_EUDC 油耗 $Q/(L \cdot 100 \text{ km}^{-1})$	10	6.5
排放情况	欧 II	优于欧 II
0~100 km/h 加速时间 t/s	13.5	<13

从测试结果可知, 在多能源动力总成控制器的控制下, 车辆在 ECE_EUDC 工况下的百公里油耗相对原型车下降了 35%, 百公里加速时间由原来的 13.5 s 缩短到 13 s 以内, 排放也得到了改善。

7 结论

(1) 所提出的混联式混合动力车多能源动力控制系统实现了对车辆的有效、可靠控制, 对其开发是成功的。

(2) 在多能源动力总成控制器控制下, 整车油耗降低了 35%, 排放指标优于欧 II 排放要求, 百公里加速时间提高到了 13 s 以内, 证明了控制器的有效性。

参 考 文 献

- [1] SCHNEIDER E D. The role of an electric machine controller in a hybrid powertrain-functional, physical, and expertise issues for component and system suppliers[C]// IEEE International Electric Machines and Drives Conference, June 17-20, 2001, Cambridge, Massachusetts, 2001: 170-172.
- [2] NAGASAKA A. Development of the hybrid/battery ECU for the toyota hybrid system[G]//SAE Paper 981122, 1998.
- [3] PHILLIPS A M. Vehicle system controller design for a hybrid electric vehicle[C]//IEEE International Conference on Control Applications, September 25-27, 2000, Anchorage, Alaska, 2000: 297-302.
- [4] MATSUO I. The nissan hybrid vehicle[G]//SAE Paper 2000-01-1568, 2000.
- [5] DUOBA M. Characterization and comparison of two hybrid electric vehicle (HEVs)—honda insight and toyota prius[G]//SAE Paper 2001-01-1335, 2001.

- [6] 罗禹贡, 杨殿阁, 金达锋, 等. 轻度混合动力电动汽车多能源动力总成控制器的开发[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 98-102.
- [7] 甘海云, 张俊智, 卢青春. 轿车混合动力总成控制系统的开发与试验研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(8): 95-99.
- [8] 李建秋, 田光宇, 卢青春, 等. 利用 V 型开发模式研制燃料电池混合动力客车的整车控制器[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 34-40.
- [9] 程莺, 罗禹贡, 李克强, 等. 前向式混合动力系统模型中控制器建模与仿真[J]. 汽车技术, 2005(4): 17-21.
- [10] 潘凯, 张俊智, 甘海云, 等. 基于 MPC555 的混合动力电动汽车整车控制器硬件系统设计[J]. 汽车工程, 2005, 27(1): 20-23.
- [11] 王伟华, 王庆年, 金启前. 混合动力客车多能源动力总成控制器研制与试验[J]. 汽车工程, 2004, 26(2): 115-118.
- [12] 赵宏伟, 陈鹏, 刘大有, 等. 混合动力汽车多能源动力总成嵌入式系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2003, 33(3): 35-37.
- [13] 陈洁平, 王耀南, 徐华, 等. 基于 DSP 的混合动力汽车能源总成控制系统[J]. 控制工程, 2003, 10(6): 37-39.
- [14] CIKANEK S R. Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle[C]//IEEE Proceedings of the American Control Conference, May 8-10, 2002, Anchorage, Alaska, 2002: 3 129-3 134.
- [15] 童毅. 并联式混合动力系统动态协调控制问题的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

DEVELOPMENT OF HYBRID POWERTRAIN CONTROL SYSTEM FOR PARALLEL-SERIES HYBRID ELECTRIC VEHICLE

ZHOU Lei LUO Yugong YANG Diange

LI Keqiang LIAN Xiaomin

(State Key Laboratory of Automotive Safety and
Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The powertrain of the parallel-series hybrid electric vehicle(PSHEV) is discussed for its features of dual-motor structure in which powers from the engine and the tractive motor are coupled at the output shaft of the transmission instead of the input shaft. Control strategies based on ICE optimal operating schedule are utilized to improve the powertrain efficiency and reduce fuel consumption. To identify the power demand of the driver, a new "nine-point-definition method" is proposed. Special attention is given to the combination control of different power sources during gear shifting. Regenerative braking is divided into the braking mode and the coasting mode and different control methods are applied for each mode. A hybrid powertrain controller (HCU) based on CAN network is developed to implement these strategies, which is proved to be able to work efficiently and stably by hardware-in-loop experiment and on-board test. Test results show that under the coordination of HCU the vehicle achieves 35% reduction in fuel consumption and improvement in acceleration performance.

Key words: Parallel-series hybrid electric vehicle

Hybrid powertrain controller

Control strategy

Gear shift combination control

作者简介: 周磊, 男, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为混合动力电动汽车控制。

E-mail: lei-zhou04@mails.tsinghua.edu.cn