

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.001

# 基于V模式的机电复合传动能量管理控制系统设计\*

张为<sup>1</sup> 王伟达<sup>2</sup> 车坚志<sup>3</sup> 张夕珂<sup>1</sup> 靳瑾<sup>1</sup>

(1. 交通运输部科学研究院, 北京 100029; 2. 北京理工大学车辆传动国家重点实验室, 北京 100081;  
3. 内蒙古第一机械(集团)有限公司科研所, 包头 014030)

**【摘要】** 利用V模式开发方法进行了能量管理控制系统的设计与验证, 实现了方案设计与仿真、快速控制原型、硬件在环仿真、道路试验标定与验证等各开发环节。研究表明, 设计的机电复合传动功率耦合方案、控制方案和控制策略正确可行, 开发的能量管理控制系统完成了系统的能量管理和综合控制功能, 性能良好。应用V模式开发方法使设计与验证工作简单易行, 提高了研发效率, 具有较大的优越性。

**关键词:** 机电复合传动 能量管理控制系统 V模式 道路试验

**中图分类号:** U463.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)10-0001-07

## Energy Management Control System Design for Electro-mechanical Transmission Based on V-mode

Zhang Wei<sup>1</sup> Wang Weida<sup>2</sup> Che Jianzhi<sup>3</sup> Zhang Xike<sup>1</sup> Jin Jin<sup>1</sup>

(1. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China

2. National Key Lab of Vehicular Transmission, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

3. Research Institute, Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014030, China)

### Abstract

The energy management control system of electro-mechanical transmission (EMT) system was designed and verified based on V-mode development. It realized the power management and integrative control by running the control strategy and driving the actuators. The control system was verified and validated by the road test. The results indicate that the design scheme of power-split and control system and control strategy are correct and feasible. The developed control system can realize the function of power management and integrative control. The design and validation work is easier to implement by using the V-mode method and the research and development efficiency is improved.

**Key words** Electro-mechanical transmission, Energy management control system, V-mode, Road test

### 引言

近十多年来, 纯电动汽车(EV)、混合动力汽车(HEV)和燃料电池汽车(FCEV)成为研究的热点。由于电池技术的限制, 纯电动汽车续航里程短, 在价格和使用性能方面短时间内都难满足人们的要求; 燃料电池电动汽车前景虽好, 但还存在技术和成本

问题。所以, 以成熟技术为基础开发的油电混合动力汽车得到日益广泛的研究与应用<sup>[1]</sup>。

机电复合传动系统属于混联式混合动力系统, 由功率耦合机构、发动机、电动机、发电机、动力电池组和能量管理控制系统等组成, 主要部件结构复杂、价格昂贵。能量管理控制系统的能量管理策略及对各部件的控制是实现机电复合传动系统良好性能的

收稿日期: 2012-05-08 修回日期: 2012-05-24

\* 国家自然科学基金资助项目(51005017)

作者简介: 张为, 助理研究员, 主要从事车辆动力学及其控制技术研究, E-mail: aaweizai@163.com

通讯作者: 王伟达, 讲师, 主要从事车辆动力学、车辆传动及其控制研究, E-mail: wangwd0430@163.com

关键,在系统开发过程中对控制系统进行实车测试周期长、成本高,且具有极高的风险,易造成部件的损坏。在不进行实车试验的情况下,全面、充分地在实车测试综合控制系统性能是机电复合传动系统开发中的重要课题。

近年来,硬件在环仿真(hardware-in-the-loop simulation,简称HILS)技术在机电复合传动系统测试中得到广泛应用。吉林大学等开发了用于混合动力系统的HILS系统并对混合动力总成控制器进行了测试<sup>[2-6]</sup>。HILS系统一般由实时硬件、系统模型和信号调理电路等组成,可完成混合动力系统不同工况的动态模拟与分析。本文基于dSPACE实时仿真系统研究机电复合传动能量管理控制系统V模式设计方法,进行功率分流方案分析、综合控制策略设计与控制器开发、试验。

## 1 方案设计与控制策略仿真

### 1.1 功率耦合方案

对于机电复合传动系统,功率耦合一般通过行星齿轮机构完成<sup>[7]</sup>。行星机构有太阳轮、齿圈和行星架3个自由端,对应机电复合传动系统的发动机、电动机和发电机3个功率元件,有多种连接方式。本文的机电复合传动系统功率耦合方案如图1所示。

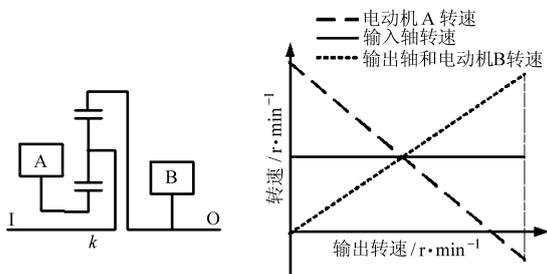


图1 机电复合传动系统功率耦合方案

Fig. 1 Power coupling scheme of EMT system

图1功率耦合方案中,发动机连接行星架,发电机(电动机A)连接太阳轮,为了反拖发动机启动的需要,发电机具有电动功能。牵引电动机(电动机B)并联在输出轴上与齿圈连接。

该行星机构各构件满足

$$\omega_g + k\omega_m = (1+k)\omega_e \quad (1)$$

式中  $\omega_g$ 、 $\omega_m$ 、 $\omega_e$ ——太阳轮(发电机)、齿圈(电动机)和行星架(发动机)的角速度

$k$ ——行星排特性参数齿圈与太阳轮齿数比

忽略行星轮的惯性,行星齿轮各构件内部作用力满足

$$T_g : T_m : T_e = 1 : k : (1+k) \quad (2)$$

式中  $T_g$ 、 $T_m$ 、 $T_e$ ——太阳轮(发电机)、齿圈(电动机)和行星架(发动机)的转矩

为了便于分析功率分流耦合机构的分流特性和效率特性,定义  $i = \omega_e / \omega_m$  为功率耦合机构的传动比; $\lambda = k / (1+k)$  为功率耦合机构的临界传动比。当  $i = \lambda$  时太阳轮转速为零,为纯机械工况。当功率耦合机构处于平衡状态时,发电机的转速、转矩为

$$n_g = k \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{i} \right) n_e \quad (3)$$

$$T_g = -\frac{\lambda}{k} T_e \quad (4)$$

牵引电动机的转速、转矩为

$$n_m = \frac{1}{i} n_e \quad (5)$$

$$T_m = \frac{\eta_g}{\eta_m} (i - \lambda) T_e \quad (6)$$

功率分流耦合机构输出转速、转矩为

$$n_o = \frac{1}{i} n_e \quad (7)$$

$$T_o = \lambda T_e + \frac{\eta_g}{\eta_m} (i - \lambda) T_e \quad (8)$$

由2个电动机的转速转矩分析可知,当  $i > \lambda$  时,  $n_g > 0$ ,  $T_g < 0$ , 发电/电动机处于发电工况;  $n_m > 0$ ,  $T_m > 0$ , 牵引电动机处于电动工况。当  $i < \lambda$  时,  $n_g < 0$ ,  $T_g < 0$ , 发电/电动机处于电动工况;  $n_m > 0$ ,  $T_m < 0$ , 牵引电动机处于发电工况。当  $i = \lambda$  时,2个电动机都不工作。

当  $i > \lambda$  时,发动机的功率通过行星排分流,然后在输出轴上进行汇流;当  $i < \lambda$  时,发动机的功率通过输出轴分流,然后在行星排上进行汇流;当  $i = \lambda$  时,发动机的功率直接传到输出轴。

功率耦合机构中电功率流所占发动机功率的比例为

$$\phi_{el} = \begin{cases} \frac{|T_g \omega_g|}{T_e \omega_e} = 1 - \frac{\lambda}{i} & (i \geq \lambda) \\ \frac{|T_m \omega_m|}{T_e \omega_e} = \frac{\lambda}{i} - 1 & (i < \lambda) \end{cases} \quad (9)$$

能量管理策略就是在功率分流方案基础上根据整车驱动需求和部件实时状态进行各部件功率的合理分配。机电复合传动是2自由度系统,根据式(1)~(8)功率分流特性和约束关系,在确定2个输入量的情况下,即可确定各部件状态。本文研究控制策略中,先行确定发动机转速和电池组需求功率。研究的机电复合传动系统和车型参数如表1所示。

### 1.2 机电复合传动车辆模型

系统数字模型是HILS平台最重要的软件组成

表 1 机电复合传动系统和车型参数

Tab.1 Parameters of EMT system and vehicle

参数	数值
车辆质量 $m/\text{kg}$	21 000
轮胎滚动半径 $r_d/\text{m}$	0.59
发动机额定功率 $P_e/\text{kW}$	300
发动机最高转速 $n_{e\_max}/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	2 100
发电机额定功率 $P_{g\_N}/\text{kW}$	150
电动机额定功率 $P_{m\_N}/\text{kW}$	165
电动机额定转矩 $T_{m\_N}/\text{N}\cdot\text{m}$	450
电池容量 $\text{A}\cdot\text{h}$	100
1 挡传动比 $i_1$	8.054
2 挡传动比 $i_{II}$	2.971
3 挡传动比 $i_{III}$	1
后传动传动比 $i_r$	9.052

部分。模型直接关系到 HILS 的精度、可信度与平台运行效率。机电复合传动系统模型主要由发动机模型、发电机模型、电动机模型、电池组模型、功率耦合机构模型、车辆运动模型、辅助系统用电模型等组成。系统模型结构如图 2 所示。

### 1.3 控制策略及仿真

由于机电复合传动系统包括多个控制子系统，各子系统协调配合工作，才能实现机电复合传动系统功能与经济性、动力性等指标。实现多能源的能量管理与各子系统控制，在工作模式切换与换挡过程中控制各相关部件协调工作是能量管理控制系统的主要任务。

以燃油经济性为主要优化目标的机电复合传动系统能量管理策略实现步骤为：计算车辆驱动功率需求，计算发动机需求功率，根据发动机最优工作曲

线确定发动机工作点，根据发动机工作点确定发电机与电动机工作点，发送各部件相关工作指令。

基于发动机最优工作区域的机电复合传动控制策略需要首先确定发动机需求功率。发动机是整车驱动能量的最终来源，所以驱动需求功率、电池功率、辅助系统需求功率最终都需要由发动机功率提供，发动机需求功率为

$$P_{e\_N} = P_{D\_N} + P_{B\_N} + P_{Aux\_N} \quad (10)$$

式中  $P_{D\_N}$ ——驱动需求功率

$P_{B\_N}$ ——电池需求功率

$P_{Aux\_N}$ ——辅助系统功率

辅助系统功率主要包括润滑与冷却系统功率、整车电控装置用电功率等，由辅助系统功率需求的设计功率估计得到。

根据发动机燃油经济性确定的最优工作区域如图 3 所示<sup>[8]</sup>。

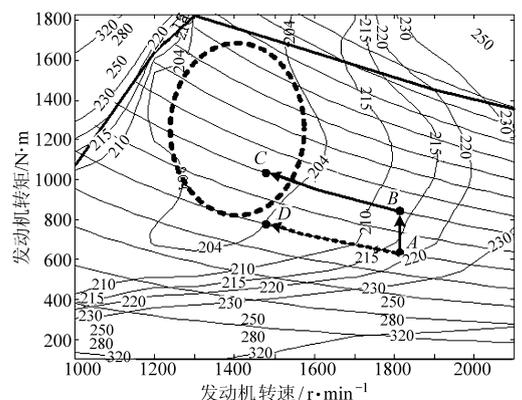


图 3 发动机最优工作区域

Fig.3 Optimal operating area of engine

机电复合传动系统需要满足电功率平衡约束，控制电池电量和功率在合理范围内，是实现电功率平衡的前提。根据电池 SOC 电量平衡要求，电池需

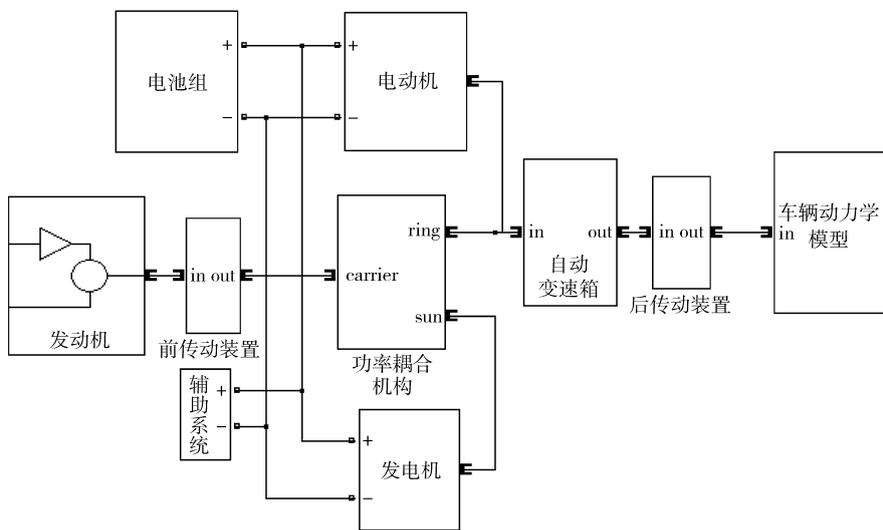


图 2 系统模型结构图

Fig.2 Structure of system model

求功率为

$$P_{B\_N} = \alpha U (SOC_0 - SOC_t) \quad (11)$$

式中  $SOC_t$ ——电池实时 SOC 值

$SOC_0$ ——电池目标 SOC 值

$U$ ——电池组电压

$\alpha$ ——电池功率系数

电池功率为正,表示电池具有充电功率需求;为负,表示电池具有放电功率需求<sup>[9-10]</sup>。

离线仿真结果如图 4 所示。

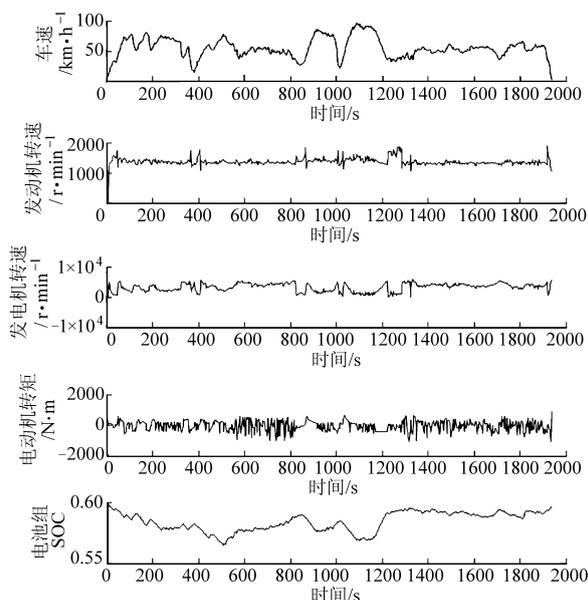


图 4 某循环工况离线仿真结果

Fig. 4 Off-line simulation results of a certain driving cycle

## 2 快速控制原型

### 2.1 台架原型介绍

快速控制原型(RCP)环节中,移除离线仿真模型中的被控对象模型,利用 dSPACE 软硬件平台可方便地将 Stateflow 环境下建立的控制器模型接入实际车辆或台架系统,无需将控制逻辑编为软件代码和开发控制器硬件即可进行实车或台架试验。RCP 系统构成如图 5 所示。

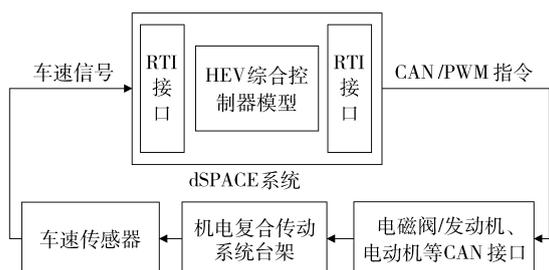


图 5 RCP 系统结构图

Fig. 5 Structure of RCP system

搭建包括机电复合传动系统主要部件的台架试验装置,通过在机电复合传动系统发动机输出端和

变速器输出端安装转速/转矩传感器,可测试系统传动效率和换挡品质,这在实车试验时是无法做到的。台架试验装置如图 6 所示,其中液粘测功机模拟车辆负载,输出端转速转矩传感器测量机电复合传动系统输出转矩。



图 6 机电复合传动系统台架试验装置图

Fig. 6 Bench test system for EMT

### 2.2 快速控制原型测试

通过台架系统可进行的机电复合传动试验有:换挡性能试验、最高车速试验、驾驶工况试验、传动效率试验、倒车试验和停车充电工况试验等。换挡性能试验结果如图 7 所示。系统工作模式编号:0 代表停车模式;2 代表纯电动模式;3 代表发动机启动模式;4 代表混合驱动模式;9 代表制动模式。

换挡性能测试工况的车速、发动机转速、发电机转速和转矩、电动机转速和转矩、系统控制模式与挡位如图 7 所示。此过程中,机电复合传动系统在能量管理控制系统协调控制下,顺序升至最高挡;车速降低后,又顺序降至最低挡;当车速接近零时,切换为空挡,实现了挡位切换功能。换挡过程发动机、发电机和电动机协调配合,转速调节到特定工作点后,操作元件接合完成换挡。

## 3 硬件在环仿真

### 3.1 硬件在环仿真系统组成

在完成能量管理控制系统软硬件开发后,通过硬件在环仿真(HILS)可方便、全面地将控制器和对象系统模型联调测试。研究的机电复合传动 HILS 平台由实时仿真系统 dSPACE、系统数字模型、信号调理电路、监控界面、驾驶员操作装置(加速踏板、制动踏板、换挡手柄)等组成。平台结构如图 8 所示。

### 3.2 硬件在环仿真测试

在设计机电复合传动 HILS 平台上对开发的整车能量管理控制系统 ECU 进行了典型工况的在线测试。测试的典型工况包括:全油门加速性能、驾驶循环工况、某极限工况(反复急加速急减速)。驾驶循环工况一般用来对控制策略进行标定,在实车试验中很难实施,所以在 HILS 阶段进行循环工况测试对于标定和验证控制系统参数具有重要意义。某重型车辆驾驶循环测试结果如图 9 所示。

### 3.3 仿真结果分析

通过 HILS 平台,在实验室内快速、低成本、低

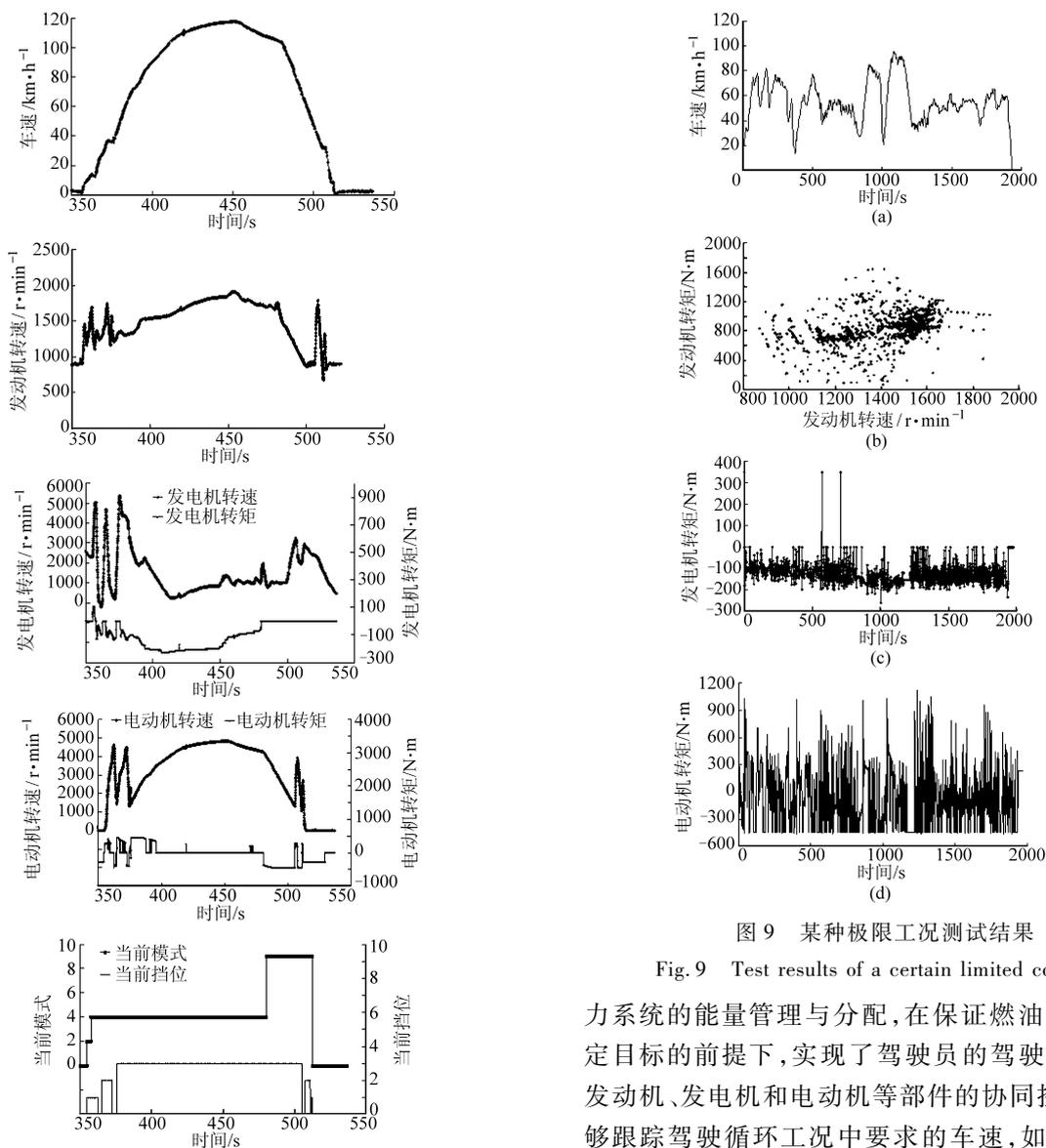


图 9 某种极限工况测试结果

Fig. 9 Test results of a certain limited condition

力系统的能量管理与分配,在保证燃油经济性和特定目标的前提下,实现了驾驶员的驾驶需求。通过发动机、发电机和电动机等部件的协同控制,车速能够跟踪驾驶循环工况中要求的车速,如图 9a 所示。发动机工作点集中分布于 1 200 ~ 1 600 r/min 的高效工作区,实现了混合动力能量管理策略保证动力性前提下提高燃油经济性的基本功能,如图 9b 所示。油耗模型表明,当车辆总质量为 21 t 时,在混合动力模式下工作百公里等效油耗为 88.9 L,在单独发动机驱动模式下工作百公里等效油耗为 63.1 L。

由于发电机兼具发动机启动功能,所以图 9c 中若干正转矩点为发动机启动时发电机的输出转矩;其他情况下发电机主要工作状态为发电,稳定的发电转矩在 100 ~ 150 N·m 之间。

电动机主要工况为正常驱动、急加速助力和制动能量回收。除少数工况超过电动机 450 N·m 的额定转矩外,其他驱动工况电动机主要工作在额定状态内。电动机转矩小于零时为制动能量回收工况,电动机工作在发电状态,电动机最大制动力矩为 450 N·m,不足以满足制动需求时由机械制动力矩进行补充。电动机工作情况如图 9d 所示。

图 7 换挡性能试验结果曲线  
Fig. 7 Test results of gear-shift performance

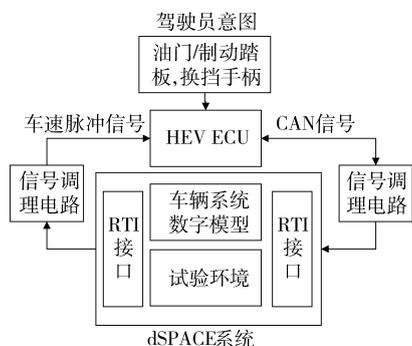


图 8 机电复合传动 HILS 平台结构图  
Fig. 8 Structure of HILS platform for EMT

风险地完成了对机电复合传动各种典型工况的控制性能测试。某驾驶循环工况的 HILS 结果表明,开发的机电复合传动系统能量管理控制系统可通过对功率部件的控制实现车辆的驱动与制动。

从图 9 可知,所研究的控制策略实现了混合动

## 4 实车道路试验

由于仿真模型不能完全代替实际车辆,所以一般情况下控制参数需要经过实车试验进行最后的标定与匹配。而且,实车试验是检验 ECU 控制效果的最终标准。ECU 经过了试验验证才能最终完成开发。实车试验过程中,控制策略和 ECU 软硬件已基本定型,主要对各控制参数做最后标定,并最终验证控制效果。

### 4.1 试验项目及场地

将在 HILS 平台上完成调试和修改的能量管理控制系统 ECU 和机电复合传动装置等安装在某重型车辆上进行了道路试验。试验场地为某工厂试车场和某城市路况。完成的试验项目包括:加速试验、最高车速试验、倒车试验、静音行驶试验、爬 22°坡试验、燃油经济性试验和城市道路驾驶工况试验等。

### 4.2 道路试验结果

加速和最高车速、爬 22°坡、城市驾驶工况试验结果如图 10~12 所示。

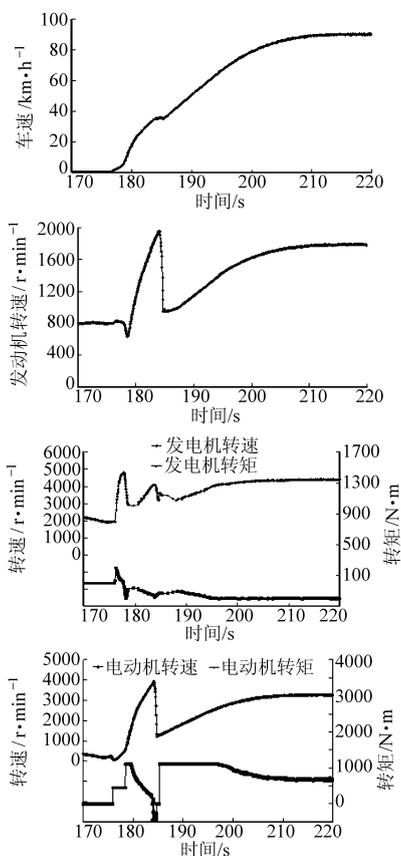


图 10 加速和最高车速试验结果曲线

Fig. 10 Road test results of acceleration and the highest speed

通过最高车速和爬坡试验,验证了开发的机电复合传动系统满足车速、加速度和爬坡坡度等动力性指标要求。能量管理控制系统响应迅速,工作正常,协调各部件完成了动力传递与输出。

在城市驾驶工况中,加速踏板开度反复变化,根

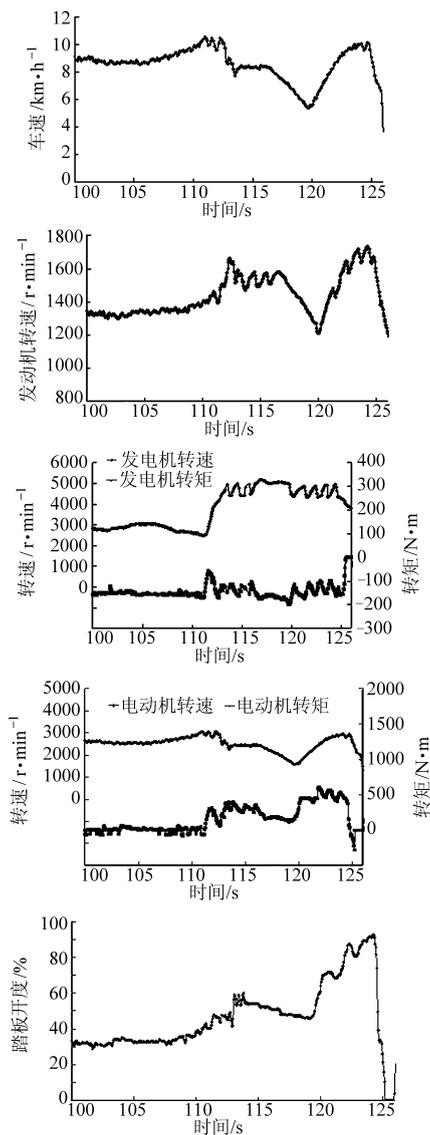


图 11 爬 22°坡试验曲线

Fig. 11 Road test results of climbing ramp with 22°

据加速踏板反映的驾驶员意图,机电复合传动系统驱动车辆行驶在不同的车速。根据整车能量和输出转速要求,一般在 900~1 800 r/min 范围内,在输出转速不很高或不很低时,发动机工作在 1 200~1 500 r/min 的最佳燃油经济性区域,达到了节油的目的,实现了机电复合传动能量管理策略保证动力性前提下提高燃油经济性的基本功能。

## 5 V 模式测试结果分析

通过方案分析离线仿真(图 4),制定了基本的综合控制策略,能量管理控制系统基本控制功能得以实现,控制算法得到初步验证。对比实车道路试验结果还可看出,各部件工作状态和车速的离线仿真结果和实车试验相差较大,说明离线仿真与实车情况差异较为显著。数字模型和离线仿真只能近似地反映基本性质和大致趋势。

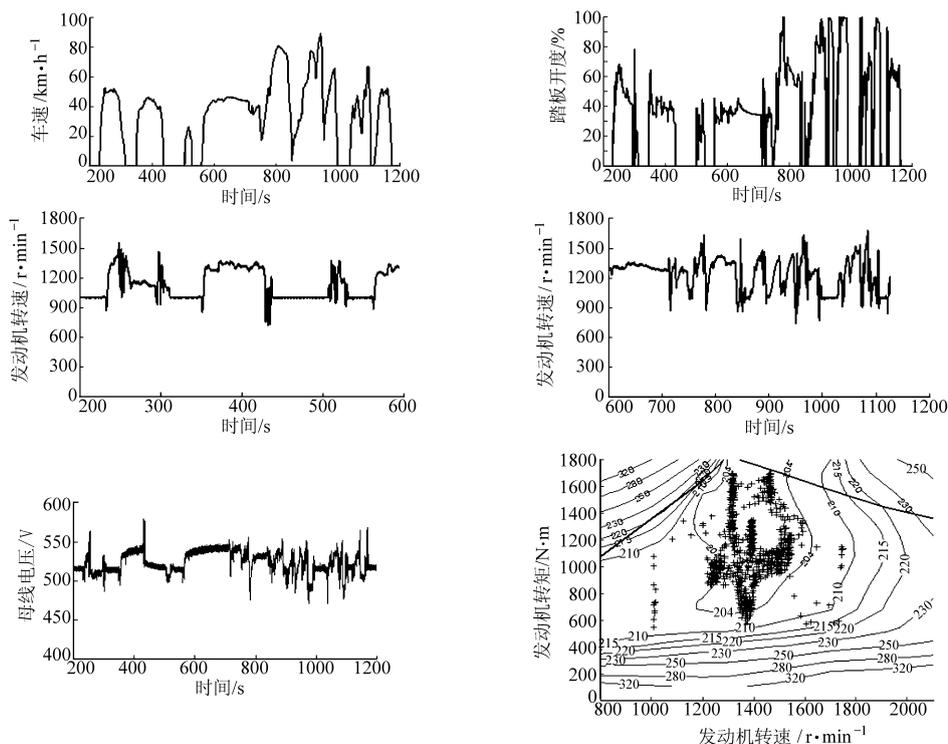


图 12 城市驾驶工况试验曲线

Fig. 12 Road test results of urban driving condition

由图 7 所示的快速控制原型试验结果可知,经过实车调整控制逻辑和参数,能量管理控制系统控制功能得以实现,由于控制对象的真实性,针对被控对象的响应时间等真实特性,控制逻辑得到进一步完善,控制参数标定值也更为准确。在不开发 ECU、不编写代码的情况下,算法得以在线运行和针对实际被控对象进行测试,充分验证了算法的可行性。

由图 9 所示的硬件在环仿真结果可知,通过运行在 dSPACE 中的车辆系统模型和试验条件模型,对设计、开发的 ECU 进行了程序验证和修改。在室内即可快速、方便地设定不同工况对 ECU 进行全面测试。一些极端驾驶工况或危险工况也可通过设定试验环境进行在线测试,而无需担心部件损坏或危险发生。

由图 10~12 所示的实车试验结果可知,经过实车匹配与验证,能量管理控制系统设计最终完成。实车道路试验验证了“V 流程”其他环节测试结果。同时,由于实际车辆系统和试验工况更为复杂多变,快速控制原型和硬件在环仿真不能替代实车试验。

通过最后的道路试验标定与验证,能量管理控制系统参数和性能才得以最终确认。

## 6 结论

(1) 各种测试结果表明设计的机电复合传动功率耦合方案、控制方案和控制策略正确可行;设计的能量管理控制系统 ECU 实现了机电复合传动综合控制功能。在能量管理控制系统协调下,发动机、发电机、电动机、行星耦合机构和变速器等工作在合理状态,实现了机电复合传动系统相关要求与性能指标。

(2) 基于 dSPACE 的 HILS 平台可以在更为接近实际工况的情况下在台架上测试开发 ECU,而且能够在实验室里快速、方便的在不同设定工况甚至是实际中很难获得或十分危险的工况下对 ECU 进行试验。缩短了开发周期、节约了试验费用、降低了开发风险。

(3) 应用“V 流程”开发车辆电子控制系统所需时间短,高效省力。可大大降低开发风险、缩短开发周期、减少实车试验量、节约开发成本。

## 参 考 文 献

- 1 陈全世,朱家琏,田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- 2 安颖,宋传学,高帅,等. 金属带式无级变速器硬件在环仿真系统[J]. 农业机械学报,2011,42(11):27~31.  
An Ying, Song Chuanxue, Gao Shuai, et al. Hardware-in-the-loop simulation system for belt type continuously variable transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 27~31. (in Chinese)

1 547 ~ 1 552.

Yu Jinpeng, Chen Bing, Yu Haisheng, et al. Adaptive fuzzy backstepping position tracking control for permanent magnet synchronous motor[J]. Control and Decision, 2010, 25(10): 1 547 ~ 1 552. (in Chinese)

- 6 Guo Yajun, Long Huo. Self organizing fuzzy sliding mode controller for the position control of a permanent magnet synchronous motor drive[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2011, 2(2): 109 ~ 118.
- 7 张细政, 王耀南, 袁小芳. 永磁同步电机自适应模糊滑模变结构控制[J]. 中国机械工程, 2010, 21(2): 206 ~ 212.  
Zhang Xizheng, Wang Yaonan, Yuan Xiaofang. Adaptive fuzzy sliding-mode control for PM synchronous motor[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(2): 206 ~ 212. (in Chinese)
- 8 蒋城峰. 基于双模糊控制的永磁同步电机直接转矩控制系统[D]. 长沙: 中南大学, 2008.  
Jiang Chengfeng. Direct torque control based on double fuzzy for PMSM [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- 9 肖石伟. 基于自适应模糊的永磁同步电机直接转矩控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
Xiao Shiwei. Direct torque control based on adaptive fuzzy for PMSM [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)
- 10 Han Ho Choi, Jin-Woo Jung. Takagi-Sugeno fuzzy speed controller design for a permanent magnet synchronous motor [J]. Mechatronics, 2011, 21(8): 1 317 ~ 1 328.
- 11 Astrom K J, Hagglund T. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PI control [J]. Journal of Process Control, 2002, 4(4): 364 ~ 380.
- 12 杨玉巍. 基于 DSP 的无刷直流电机模糊控制系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
Yang Yuwei. Fuzzy control system based on DSP for brushless DC motor [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University, 2006. (in Chinese)
- 13 叶建军. 基于模糊控制的永磁同步电机矢量控制系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.  
Ye Junjun. Vector control system based on fuzzy for PMSM [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)

(上接第 7 页)

- 3 胡建军, 赵玉省, 秦大同. 基于 CAN 通信的混合动力系统硬件在环仿真实验[J]. 中国机械工程, 2008, 19(3): 300 ~ 304.  
Hu Jianjun, Zhao Yusheng, Qin Datong. Hardware-in-loop simulation of HEV system based on CAN[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(3): 300 ~ 304. (in Chinese)
- 4 张承宁, 吴静波, 邹渊, 等. 履带式混合动力车辆控制策略硬件在环仿真[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(9): 790 ~ 794.  
Zhang Chengning, Wu Jingbo, Zou Yuan, et al. Hardware-in-the-loop simulation on control strategy in hybrid electric transmission tracked vehicle[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(9): 790 ~ 794. (in Chinese)
- 5 李国岫, 张欣, 宋建锋. 并联式混合动力电动汽车动力总成控制器硬件在环仿真[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 108 ~ 112.  
Li Guoxiu, Zhang Xin, Song Jianfeng. Hardware in loop simulation for powertrain controller of parallel hybrid electric vehicle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 108 ~ 112. (in Chinese)
- 6 李宏才, 闫清东, 王伟达 等. 双模式机电复合传动方案设计与特性对比[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 31 ~ 36.  
Li Hongcai, Yan Qingdong, Wang Weida, et al. Design and contrast studies of dual-mode mechanical-electronic transmission scheme[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 31 ~ 36. (in Chinese)
- 7 秦大同, 游国平, 胡建军. 新型功率分流式混合动力传动系统工作模式分析与参数设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 184 ~ 191.  
Qin Datong, You Guoping, Hu Jianjun. Operation mode analysis and parameters design of a novel power split hybrid transmission system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 184 ~ 191. (in Chinese)
- 8 Xiong Weiwei, Yin Chengliang, Zhang Jianwu, et al. Series-parallel hybrid control strategy design and optimization using real-valued genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(6): 862 ~ 868.
- 9 Liu J M, Peng H. Modeling and control of a power-split hybrid vehicle [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(6): 1 242 ~ 1 251.
- 10 Lin C C, Jeon S, Peng H, et al. Driving pattern recognition for control of hybrid electric trucks [J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42(1 ~ 2): 41 ~ 58.