

燃料电池混合动力系统动态耦合特性分析与建模研究^①

赵玉兰^② 负海涛^③ 郝魁 刘尊年

(青岛理工大学汽车与交通学院 青岛 266033)

摘要 详细阐述了燃料电池混合动力汽车(FCHV)混合动力系统的动态耦合特性分析与建模的过程。首先,基于理论分析,结合主要部件台架试验及原型车转鼓试验的相关试验数据,建立了主要部件的动态仿真模型;然后,基于部件模型构建了燃料电池混合动力系统的整体动态耦合特性模型;最后,以典型循环工况作为模型输入进行动态仿真。仿真数据与原型车转鼓试验数据的对比分析表明,所建立的燃料电池混合动力系统动态耦合特性模型具有很好的动态仿真效果,能够满足控制系统设计过程中的动态仿真需要,为后续开展基于模型的燃料电池混合动力汽车控制系统设计研究提供了必要基础。

关键词 燃料电池汽车,混合动力,动态模型,仿真

0 引言

近十年来,国内外对新能源汽车的研究热潮逐渐增强,这其中包括混合动力汽车(hybrid electric vehicles, HEVs)、纯电动汽车(electric vehicles, EVs)以及燃料电池汽车(fuel cell vehicles, FCVs)。质子交换膜燃料电池以可产自再生能源的氢气作为燃料,被认为是未来车载动力源的优选方案之一。

由于燃料电池本身所具有的特性,作为车载动力源时存在一些问题,比如响应速度慢、冷启动困难、制动能量不能被回收等。因此,动力蓄电池作为辅助动力源被普遍应用在燃料电池汽车动力系统中,作为燃料电池混合动力汽车(fuel cell hybrid power vehicle, FCHV)的动力系统。目前,世界各大汽车公司都已开发了自己的燃料电池样车,如通用的“Sequel”、丰田的“FCHV”、大众的“Hypower”等,国内的上汽、东风汽车等近年来也积极开展燃料电池样车开发工作^[1]。然而,由于样车研发的主要目的是技术验证和示范,并非为推向市场的产品,因此在传统内燃机汽车设计领域普遍采用的基于模型的控制系统设计方法还很少被应用于燃料电池汽车的研究过程中。

近年来,国内外一些学术研究机构在新能源汽车的仿真建模领域进行了积极的研究工作,开发了很多相关的仿真工具和软件。这些仿真模型和仿真工具主要是采用一些面向对象的图形化的系统仿真软件开发,譬如 MatrixX、EASY5、Matlab/Simulink 等图形化开发环境,尤其以基于 Matlab/simulink 开发环境的研究和应用最为广泛,譬如美国国家可再生能源实验室(NREL)开发的 ADVISOR^[2],意大利比萨大学和意大利国家能源与环境局联合开发的 Hy-Sim^[3],法国国家交通与安全研究院开发的 VEH-LIB^[4]等。其中最具代表性的是由美国国家可再生能源实验室推出的 ADVISOR。上述这些仿真软件的仿真对象主要是针对混合动力汽车和纯电动汽车,只有 ADVISOR 能够进行燃料电池汽车的仿真,但其仿真的目的主要是动力系统参数匹配验证。贺建军等人在燃料电池动态建模方面开展了卓有成效的研究工作,采用理论分析结合试验的建模方法建立了燃料电池动态模型,并利用所建立的模型研究了燃料电池发动机的控制问题,取得了较高的仿真精度^[5]。到目前为止,很少有文献详细介绍燃料电池混合动力系统动态特性建模的过程。此外,基于模型的系统开发流程在燃料电池汽车控制系统设计中还未得到应用。本论文针对所研究的燃料电池原

① 国家自然科学基金(51205215)和中国博士后科学基金(2013M540488)资助项目。

② 女,1974 年生,硕士,讲师;研究方向:新能源汽车动力控制技术,车辆电子控制技术;E-mail:lan0531@126.com

③ 通讯作者,E-mail:yunht@163.com

(收稿日期:2013-10-22)

型样车,基于理论分析,结合台架试验和实车转鼓试验的相关试验数据,详细阐述了其动态建模以及模型验证的过程,研究结果将会为今后开展基于模型的燃料电池汽车控制系统开发奠定理论和设计基础。

1 FCHV 原型车及其测试

1.1 FCHV 原型车

所研究的 FCHV 原型车采用燃料电池加动力蓄电池的多能源混合结构。其动力系统的拓扑结构如图 1 所示。

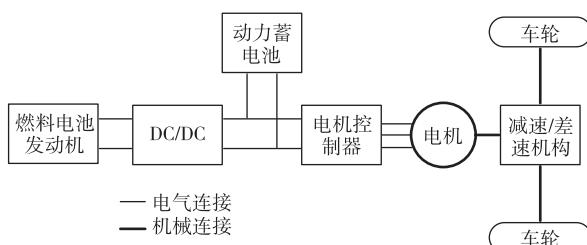


图 1 FCHV 原型车动力系统拓扑结构示意图

所研究的 FCHV 原型车匹配参数及动力性指标见表 1。其中电驱动系统的额定功率为 24kW,其峰值功率可达 65kW,蓄电池采用锂离子动力电池,其容量为 20Ah,燃料电池采用质子交换膜类型,其输出功率为 40kW。车辆在充满氢气的情况下,续驶里程为 230km,最高时速为 122km/h,百公里加速时间为 21s。原型车在转鼓试验台上经过了典型循环工况测试、动力性测试、经济性测试等方面的严格测试。同时,在测试过程中,采用专用的数据采集设备收集了各主要部件及车辆运行状态的相关试验数据,为后期动态仿真建模提供必要的数据支持。

表 1 FCHV 原型车匹配参数及动力性指标

车型平台桑塔纳 3000	整备质量 1460kg
锂蓄电池容量	20Ah
燃料电池功率	40kW
电机(稳态值/峰值)	24/65kW
续驶里程	230km
百公里加速时间	21s
最高车速	122km/h

1.2 原型车测试

(1) 主要部件性能验证测试

所研究的 FCHV 原型车的主要部件都是经过专门设计开发的,在动力系统集成之前,首先在专用的试验台上进行了性能验证测试。图 2 示例性地给出了电驱动系统的测试台架实景及相关实验装置。

(2) 动力系统联合测试

部件性能验证测试为动力系统集成创造了前提条件,为更好地对系统集成的性能进行测试,在动力系统装车之前,还需要在专门建立的动力系统联合测试平台上进行集成测试,所建立的联合测试平台如图 3 所示,其结构原理如图 4 所示。动力系统联合测试主要对系统功能、CAN 总线通讯、控制逻辑等方面进行验证和完善。



图 2 动力系统主要部件测试平台



图 3 动力系统联合测试平台

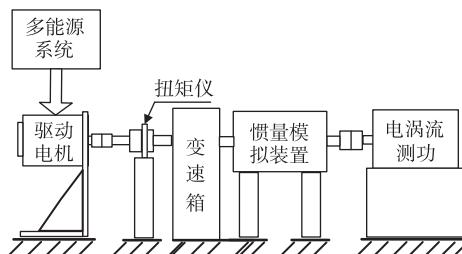


图 4 动力系统联合测试平台结构原理图

(3) 实车转鼓试验

完成地面联合测试之后,将燃料电池混合动力系统安装到整车平台上,最终形成的 FCHV 原型样车如图 5 所示。然后在德国申克公司的底盘测功机



图 5 FCHV 原型样车

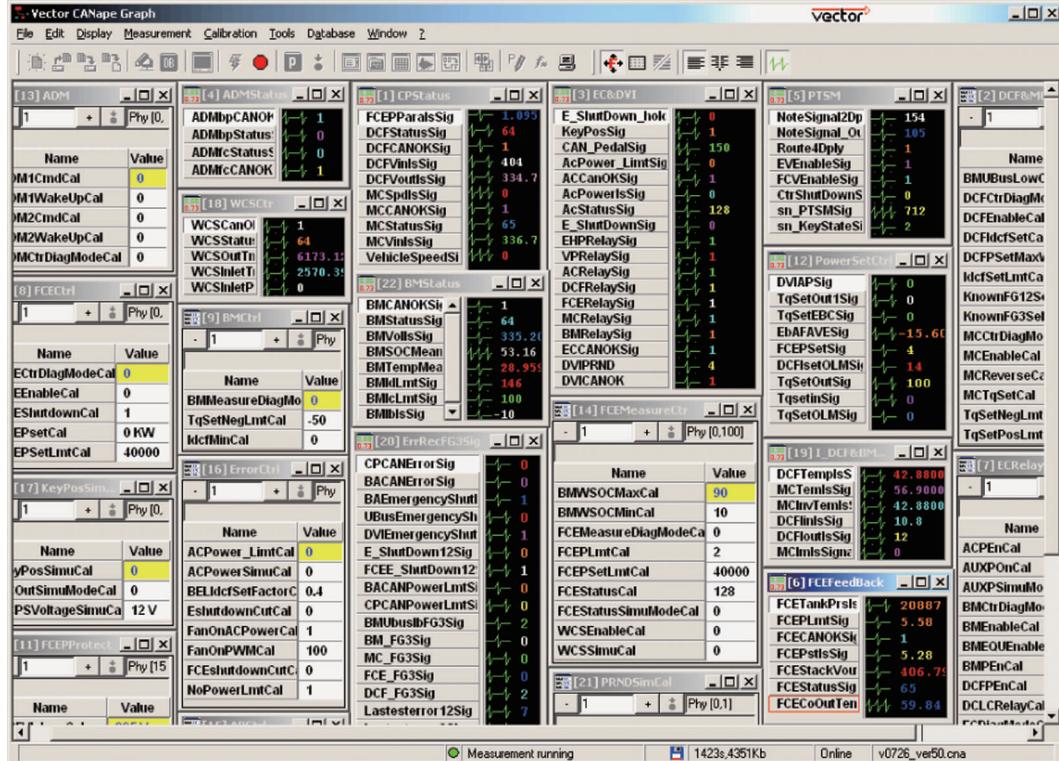


图 6 转鼓试验中 CANape 变量监视及参数标定界面

2 动力系统建模

基于前述测试装置取得的动力系统各部件相关试验数据,对动力系统各部件进行动态仿真建模。由于动态仿真建模的目的是上层控制设计,因此在各部件动态仿真建模过程中,忽略了一些与各部件分布控制相关,但与动力系统上层控制关系较小的

上进行实车转鼓试验,试验项目包括整车动力性测试、经济性测试以及循环工况耐久性测试等。试验循环工况包括:中国城市快速循环工况(FAST)、美国城市循环工况(UDDS)、欧洲组合工况(ECE-EUDC)。

1.3 基于 CAN 通讯的数据采集装置

FCHV 原型车采用 CAN 总线通讯网络,各部件分控制器通过 CAN 总线上传各自的相关状态信息数据,实现数据共享。整车控制器基于飞思卡尔 PowerPC 系列单片机开发,试验研究中采用德国 Vector 公司的 CAN 总线开发工具 CANape,能够实现 CAN 总线数据的监测、数据记录、控制参数实时标定等功能。图 6 所示为试验过程中 CANape 的变量监视及参数标定窗口界面。

状态变量,重点关注各部件与上层控制关系密切的输入输出特性及效率特性。

2.1 燃料电池模型

原型车动力系统所采用的燃料电池堆为中压型质子交换膜燃料电池。空压机和供氢管路的压力变化大约有 100ms 的时间常数,这一数值要显著小于车辆纵向动力学关注的时间范围。因此,虽然对于燃料电池堆的控制,这些动态参数不能被忽略,但如

果建模的目的是动力系统的上层控制设计,那么忽略这些状态变量是合理的。燃料电池堆的另外一个动态变量是堆温度,而堆温度与堆湿度通常一起进行考虑并加以控制,同样,从动力系统上层控制的角度考虑,在进行动态仿真建模和分析过程中,假定堆温度和堆湿度在燃料电池堆的控制系统中已经被冷却系统稳定控制,这样就可以忽略堆温度和堆湿度对燃料电池输出的影响。在上述前提下,可以建立适度简化的燃料电池动态仿真模型。

(1) 极化曲线模型

极化曲线即燃料电池堆电压和堆电流的关系曲线,是反映燃料电池输出特性的重要指标。根据文献[5],燃料电池的堆电压是燃料电池堆电流、堆温度,各反应物的压力、堆湿度等参量的一个函数。由

于燃料电池发动机在相对低的压力变化幅度内($\pm 2\text{bar}$)工作,并进行闭环稳压调节,因此堆电压在阴极(空气)或阳极(氢气)的压力变化范围内没有显著的差异。另外,由于堆的温度和湿度在燃料电池堆的控制系统中已经被冷却系统稳定闭环调节,综上,可以采用下面的函数关系式近似表示燃料电池堆的输入输出特性:

$$V_{\text{stack}} = f(I, T_{\text{stack}}, P_{\text{H}_2}, P_{\text{air}} \dots) \approx f(I) \quad (1)$$

式中, V_{stack} 为堆电压, I 为堆电流, T_{stack} 为堆温度, P_{H_2} 为阳极(氢气)压力, P_{air} 为阴极(空气)压力。

图 7 所示为 ECE-EUDC 工况下实车转鼓试验中燃料电池堆输出电流和电压的数据曲线。图 8 中的“+”数据点是反映燃料电池堆极化关系的数据点。

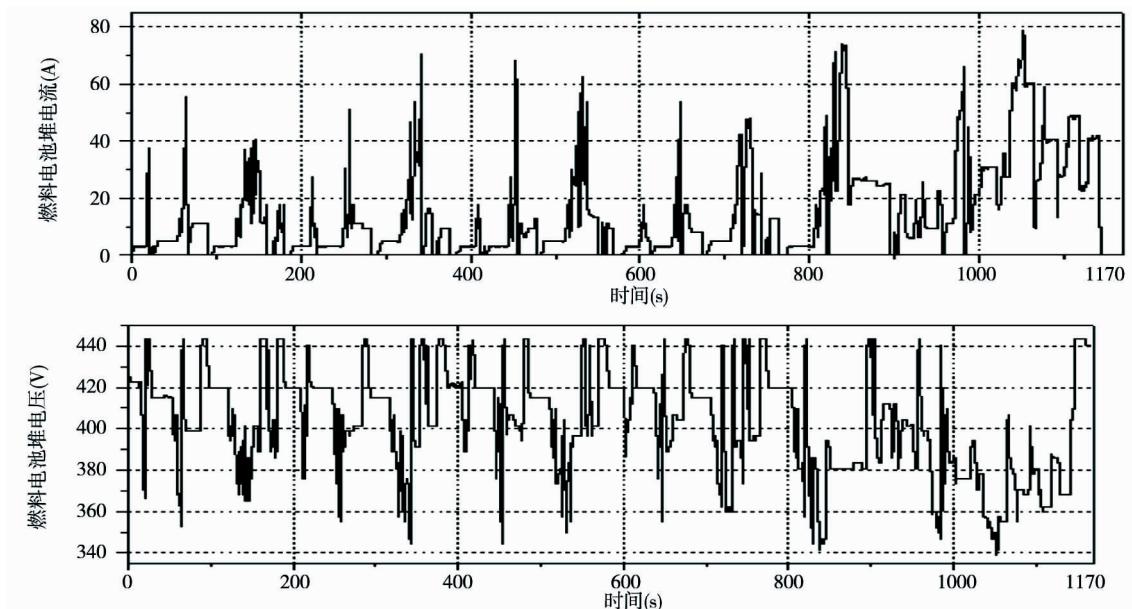


图 7 燃料电池堆电流和堆电压试验数据(ECE-EUDC 工况)

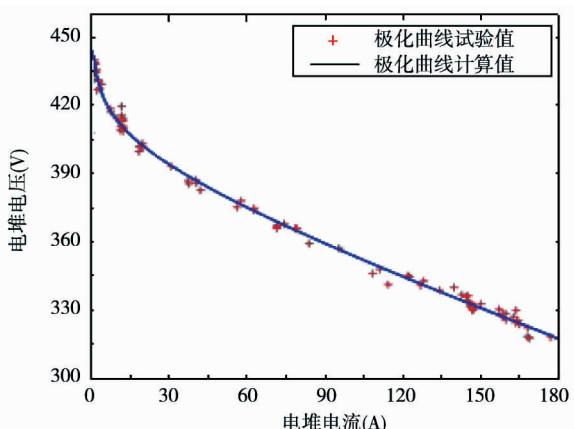


图 8 燃料电池堆极化曲线拟合图

根据数据点所形成的轮廓,采用式

$$V_{\text{stack}} = V_0 - c \times \log(I) - R \times I \quad (2)$$

对燃料电池的极化关系进行曲线拟合。式中, V_0 为堆电压基准值, c 、 R 为拟合参数。经过拟合的曲线如图 8 中实线所示,对比可以看出拟合曲线与试验值吻合度很高,说明所采用的经验公式适当,所拟合的曲线能够很好的反映燃料电池的极化关系。

(2) 堆功率模型

堆功率是堆电流和堆电压的乘积,因此可以由极化曲线函数计算得到:

$$P_{\text{stack}}(I) = V_{\text{stack}} \times I / 1000 \quad (3)$$

(3) 附属功率模型

附属设备的功率消耗是燃料电池发动机维持基本工作的必要消耗。图 9 所示为 ECE-EUDC 工况下实车转鼓试验中取得的燃料电池发动机附属功率的数据曲线。图 10 中的“+”数据点是反映燃料电池附属功率与堆电流关系的数据点,根据数据点所形成的轮廓,采用式

$$P_{\text{aux}}(I) = a \times \tan((I - 100) \times \frac{\pi}{100} \times e^{\frac{(I-100)^2}{w}}) + b \quad (4)$$

对该关系进行曲线拟合。式中, P_{aux} 为附属功率,单位为 kW; a 、 b 、 w 为拟合参数。经过拟合的曲线如图 10 中实线所示,对比可以看出,拟合曲线与试验值吻合度很高,说明所采用的经验公式适当,所拟合的曲线能够很好的反映燃料电池附属功率与堆电流的关系。

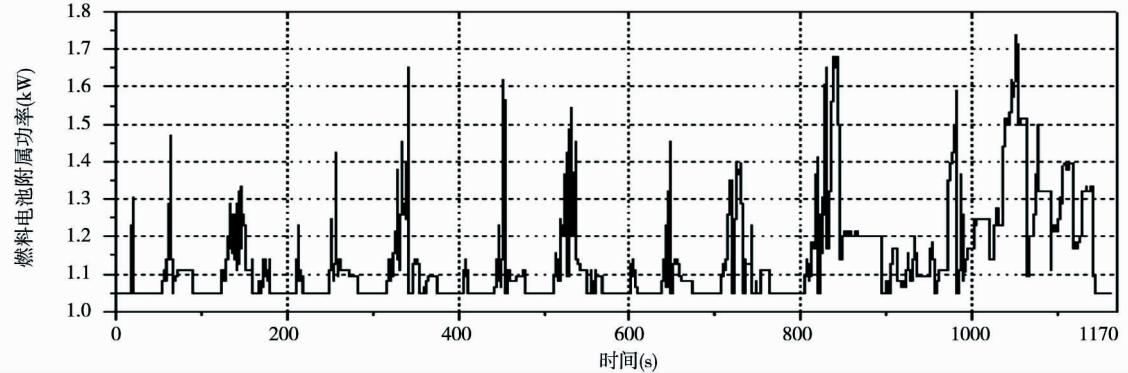


图 9 燃料电池附属功率试验数据(ECE-EUDC 工况)

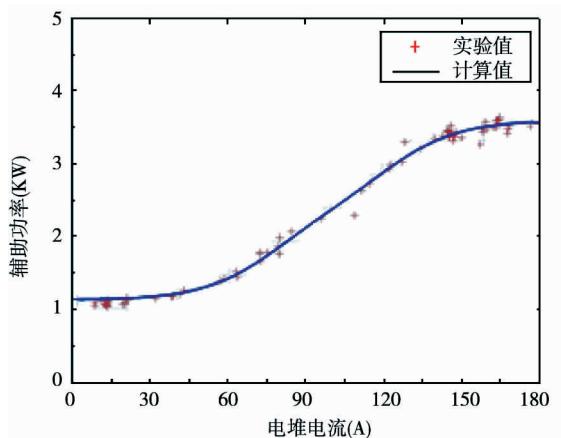


图 10 燃料电池附属功率与堆电流拟合曲线图

(4) 氢耗率模型

氢耗率是计算燃料电池工作效率的必要数据。图 11 所示为 ECE-EUDC 工况下实车转鼓试验中取得的燃料电池发动机氢耗率的数据曲线。图 12 中的“+”数据点是试验取得的燃料电池氢耗率与堆电流关系的数据点,根据数据点所形成的轮廓,采用式

$$H2_{\text{flow}}(I) = k \times I + d \quad (5)$$

进行拟合。式中, $H2_{\text{flow}}$ 为单位时间的氢耗量, k 、 d 为拟合参数。经过拟合的曲线如图 12 中实线所示,对比可以看出,拟合曲线与试验值吻合度很高,说明所采用的经验公式能够很好的反映燃料电池氢耗率与堆电流的关系。

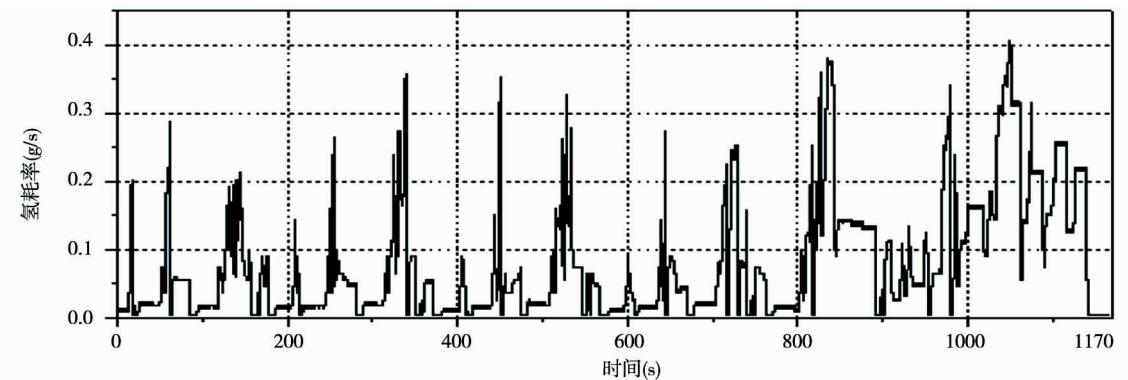


图 11 燃料电池氢耗率试验数据(ECE-EUDC 工况)

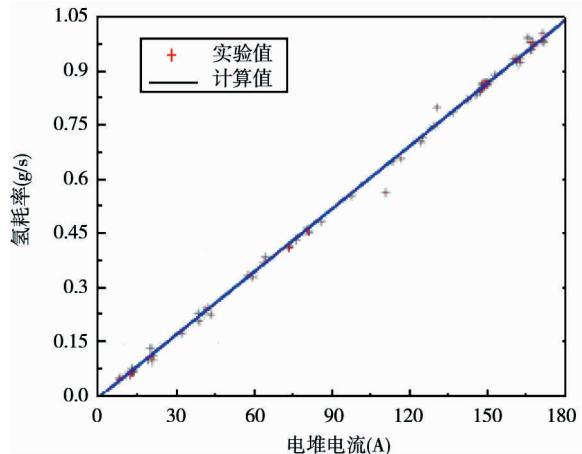


图 12 氢耗率与堆电流拟合曲线图

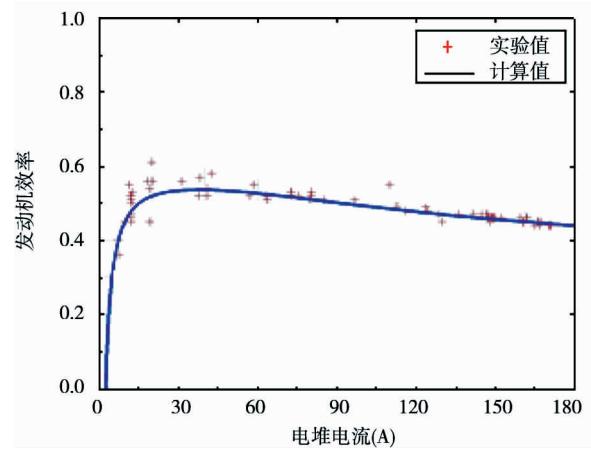


图 13 燃料电池效率与堆电流之间的关系曲线

(5) 效率模型

由燃料电池堆功率、附属功率以及氢耗率可得出燃料电池效率与堆电流的关系函数：

$$\eta_{fce}(I) = \left[\frac{P_{stack}(I) - P_{aux}(I)}{(H_2 \text{flow}(I) \times LHV)} \right] \times 3600 \quad (6)$$

式中： η_{fce} 为燃料电池效率； $LHV = 120000 \text{ kJ/kg}$ ，为氢气热值。图 13 为燃料电池发动机效率的计算值与试验值的对比。可以看出计算值与试验值基本吻合。

2.2 DC/DC 模型

(1) DC/DC 输入输出模型

根据文献[6]，DC/DC 输入输出关系可以用一个二阶动态系统来近似表述。由于 DC/DC 仅仅是一个电功率的转换器件，其动态响应速度要远远快于燃料电池。虽然在动力系统控制中 DC/DC 的响应速度被降低以起到保护燃料电池的目的，其动态响应时间仍显著小于车辆纵向动力学关注的时间范

围，因此在动态仿真建模中，将其视为一个功率损耗部件，其效率是输出功率的函数。

图 14 是 FAST 工况下实车转鼓试验中取得的 DC/DC 输出功率及 DC/DC 效率数据曲线图。其中 DC/DC 效率是由 DC/DC 输入功率和输出功率计算得到的。采用经验公式

$$\eta_{dc/dc} = m + nP_{fce} - fP_{fce}^2 + gP_{fce}^3 \quad (7)$$

对 DC/DC 效率与燃料电池输出功率的关系进行拟合。式中， $\eta_{dc/dc}$ 为 DC/DC 效率， P_{fce} 为 DC/DC 输出功率， m, n, f, g 为拟合参数。拟合后的曲线如图 15 所示。

2.3 电驱动系统模型

(1) 输入输出模型

在动力系统控制中，电驱动系统采用转矩闭环控制，其输入指令为转矩设定 Tq_{set} ，输出为电机实际转矩 Tq_{ls} 。台架试验的数据显示电驱动系统的响应速度较快，同时输入和输出有良好的线性关系，可以

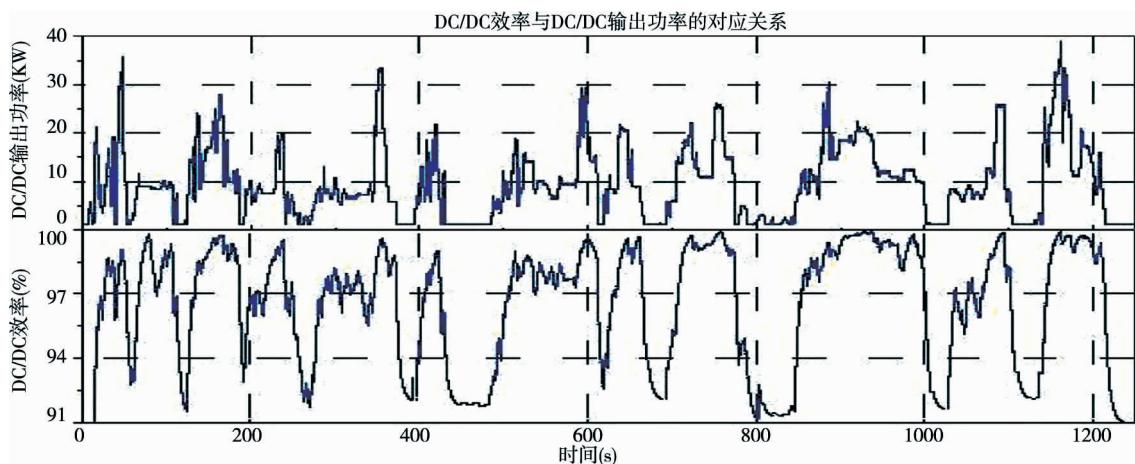


图 14 DC/DC 输出功率和效率的试验数据

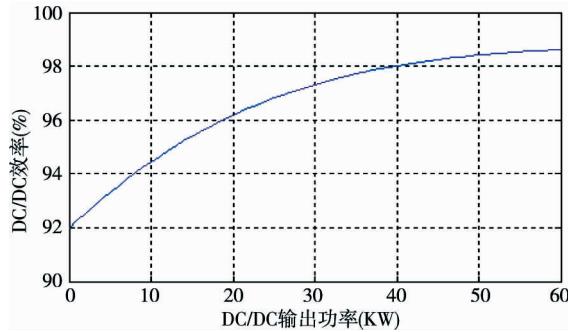


图 15 DC/DC 效率同输出功率关系曲线拟合图

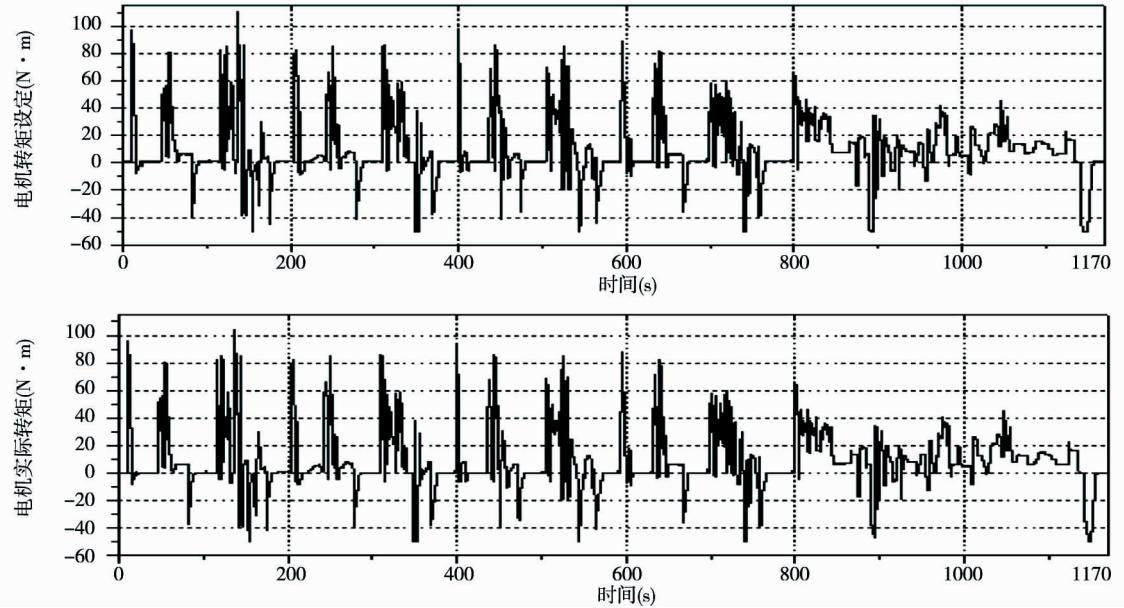


图 16 电机转矩设定和实际转矩试验数据(ECE-EUDC 工况)

(2) 电驱动系统效率模型

动力系统中的电驱动系统采用一个峰值功率为 65kW 的永磁同步电动机, 电机驱动器采用变频矢量控制方法。电驱动系统的效率模型是一个由电机转矩和电机转速共同影响的三维查询表格, 其三维对应关系数据由供应商随电驱动系统一起提供, 并且经过了图 2 所示的车用电机测试平台的试验验证。图 17 为动力系统所采用的电驱动系统的效率特性场。

(3) 电机电流模型

根据物理关系, 电机电流模型可由下式表述:

$$I_m = \frac{Tq_{ls} \times 1000 \times u_r \times i_g}{120 \times \pi \times r \times 9.55 \times U_{bus} \times \eta_m} \quad (9)$$

式中: u_r 为实际车速; U_{bus} 为母线电压; η_m 为电驱动系统的效率, 由图 17 所示的三维查询表格获得; i_g 为传动比, r 为车轮半径。

用一阶环节近似表示其输入输出关系, 用传递函数描述如下:

$$G_{K_{mc}}(s) = \frac{Tq_{ls}(s)}{Tq_{Set}(s)} = \frac{K_{mc}}{T_{mc}s + 1} \quad (8)$$

其中 K_{mc} 和 T_{mc} 是比例常数和时间常数。

图 16 是 ECE-EUDC 工况下实车转鼓试验中采集的电机转矩设定和电机实际转矩的数据曲线, 以此为样本数据对式(8)进行参数辨识即可得到其中的比例常数和时间常数。

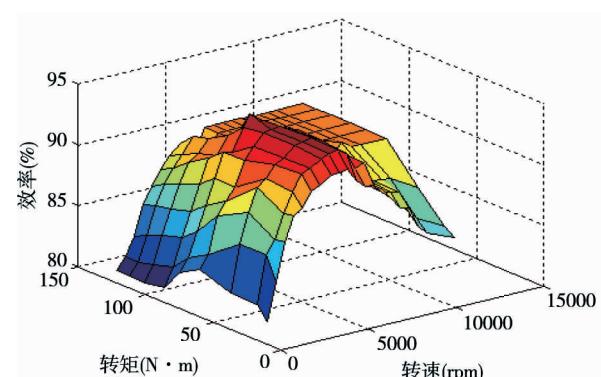


图 17 电驱动系统效率特性场

2.4 动力蓄电池模型

动力系统采用一个容量为 20Ah 的锂离子动力蓄电池, 由于锂离子蓄电池具有非线性和时变特性, 建立其精确的动态仿真模型在实际应用中是非常困难的。一般采用等效电路模型进行模拟, 其中最

简化的是一阶 RC 模型,模型简单,但仿真精度较低,不能模拟蓄电池充放电过程中的动态缓变过程。美国能源部发起的 FreedomCar 计划推荐了二阶线性化等效电路模型。文献[7]基于 FreedomCar 模型提出了如图 18 所示的三阶等效电路模型,并通过脉冲放电实验证明 FreedomCar 模型的仿真精度远高于一阶 RC 模型,而三阶等效电路模型的仿真精度又高于 FreedomCar 模型。因此本研究中动力蓄电池采用图 18 所示的三阶等效电路模型,关键是要验证此模型对于实车运行工况的适用性。

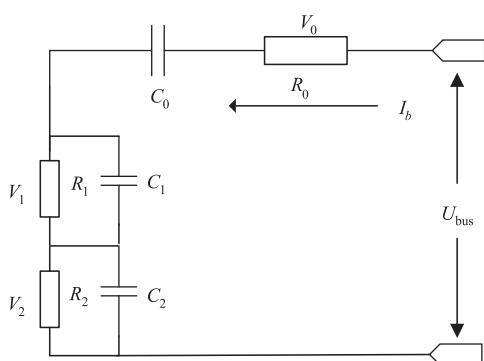


图 18 蓄电池三阶等效电路模型

根据上述等效电路模型,可以得到动力蓄电池动态模型的状态空间表达式:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/R_1 C_1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/R_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} -1/C_0 \\ -1/C_1 \\ -1/C_2 \end{bmatrix} [I_b] \end{cases} \quad (10)$$

$$[V_{bus}] = [1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + [-R_0] [I_b]$$

式中: I_b 为蓄电池电流,取放电时为正,充电时为负; C_0, C_1, C_2 分别为等效电容 C_0, C_1, C_2 的等效电容值; R_0, R_1, R_2 分别为等效内阻 R_0, R_1, R_2 的等效电阻值; V_0, V_1, V_2 分别为等效电容 C_0, C_1, C_2 两端电压; U_{bus} 为蓄电池输出电压(即母线电压)。

为使模型更好地适用于实车运行工况,以 ECE-EUDC 工况下实车转鼓试验取得的蓄电池电流和蓄电池电压为样本数据对蓄电池模型进行参数辨识,样本数据如图 19 所示。

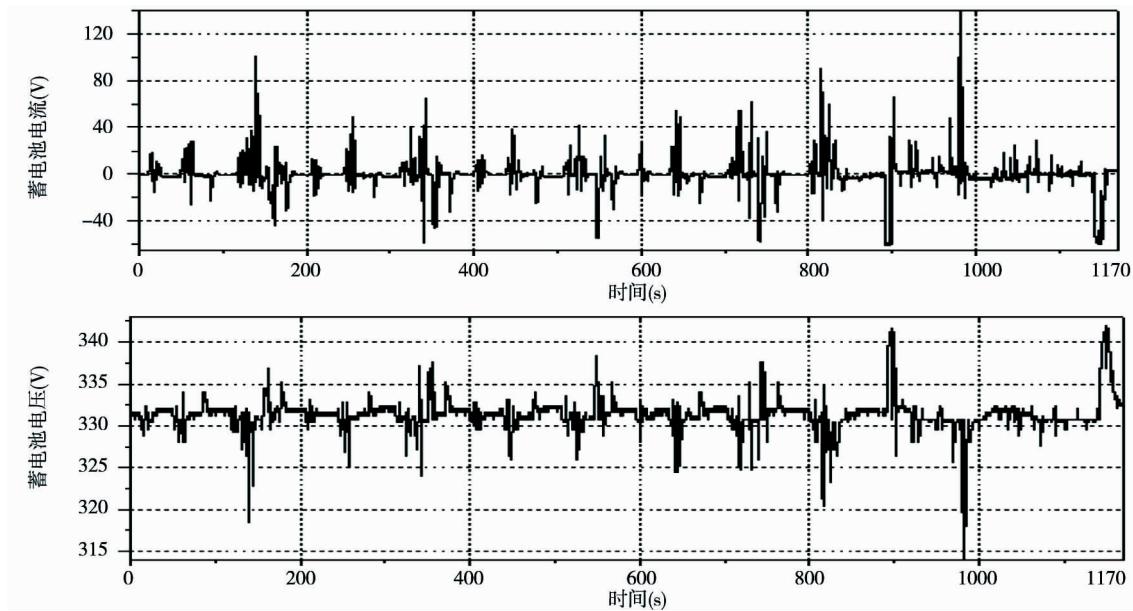


图 19 蓄电池电流和电压的试验数据(ECE-EUDC 工况)

另外,根据蓄电池开路电压定义,电池在卸除负载后静置一段时间直至电池达到平衡状态时的电压为电池的开路电压(open circuit voltage, OCV)。对于图 18 所示的蓄电池三阶等效电路模型,等效电容 C_0 两端的电压 V_0 即代表了蓄电池的开路电压。根

据文献[7]可知,锂离子动力蓄电池 SOC 和 OCV 之间有很好的一一对应关系,尤其在车用动力蓄电池的正常荷电工作区间内(10%~90%),而且这种对应关系随电池使用时间的长短变化不明显。因此可以用等效 OCV 查表获得蓄电池 SOC 值。

2.5 驾驶员及车辆模型

(1) 驾驶员模型

驾驶员模型采用目前在汽车仿真中普遍采用的 PID 控制器来模拟驾驶员动作,如图 20 所示。模型输入为期望车速 u_{exp} (来自仿真循环工况)和实际车速 u_{real} (来自车辆模型),根据期望车速和实际车速的误差 Δu 实时调节踏板操作,因此输出为加速踏板(DAP)和制动踏板的行程 BAP(归一化为 0~100 的数值)。

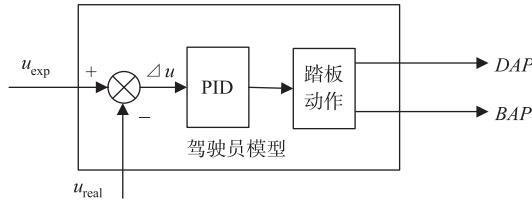


图 20 驾驶员模型输入输出

(2) 车辆纵向动力学模型

动力系统控制仿真分析关心的主要问题是车辆动力性和经济性,因此车辆动力学模型只涉及到纵向动力学模型,即车辆的驱动和制动。

3 模型动态仿真分析与验证

前述分析详细阐述了燃料电池混合动力汽车各子系统的动态仿真建模过程,子系统模型包括:驾驶员、车辆、燃料电池、蓄电池、DC/DC、电驱动系统。基于各子系统模型,在 Matlab/simulink 平台上开发了燃料电池混合动力汽车的整体动态仿真模型 FCHV-SIM,该模型在 Matlab/simulink 中的最上层结构如图 21 所示。

尽管每个子系统在单独建模过程中已经进行了部分验证分析,但为了验证模型 FCHV-SIM 的整体

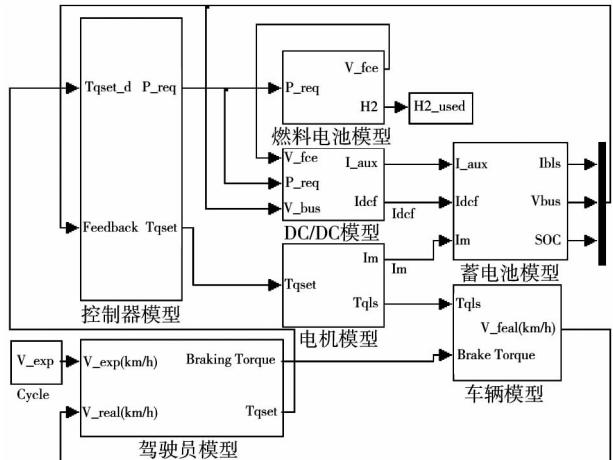


图 21 FCHV-SIM 模型

动态仿真效果,研究中以 UDDS 循环工况期望车速作为模型 FCHV-SIM 的输入,记录动态仿真过程的相关数据,然后与实车转鼓试验采集的对应数据进行对比分析,以此进行模型验证,仿真的初始条件与实车转鼓实验相同,蓄电池 SOC 初始值都为 66%。图 22~图 29 是 UDDS 循环工况动态仿真结果与转鼓试验对应数据的对比情况。其中图 26~图 29 是循环工况 150s 到 330s 的展开对比情况。通过对比分析可以看出:

(1) 仿真曲线和试验数据曲线具有很好的重合性。其中蓄电池模型与其它子系统模型相比,仿真与试验数据的差异稍大,这可能是由蓄电池工作温度的变化以及电池的时变性导致的。

(2) 从图 26~图 29 中展开的数据对比图可以看出,仿真曲线和试验数据曲线具有很好的动态一致性,说明模型仿真能够很好地反映系统实际特性的动态变化趋势。

(3) 图 29 是主要部件电流关系仿真与试验数据对比,可以看出,模型仿真能够很好地反映动力系

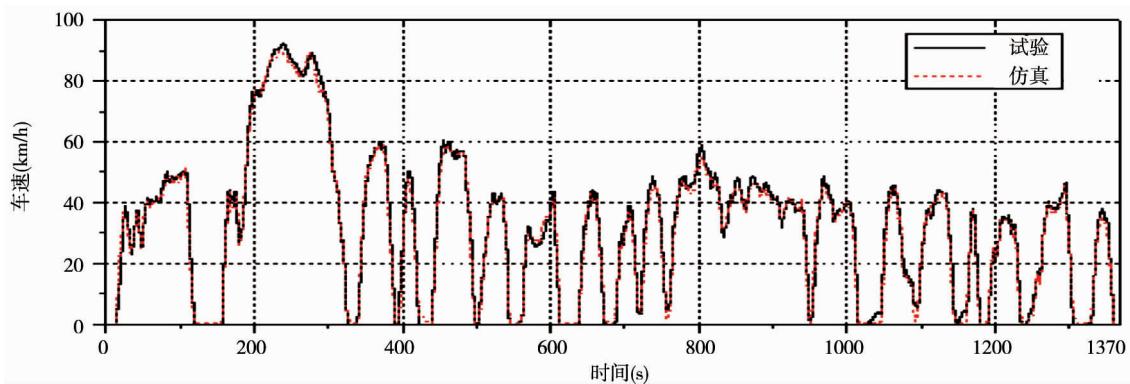


图 22 车速仿真与试验数据对比

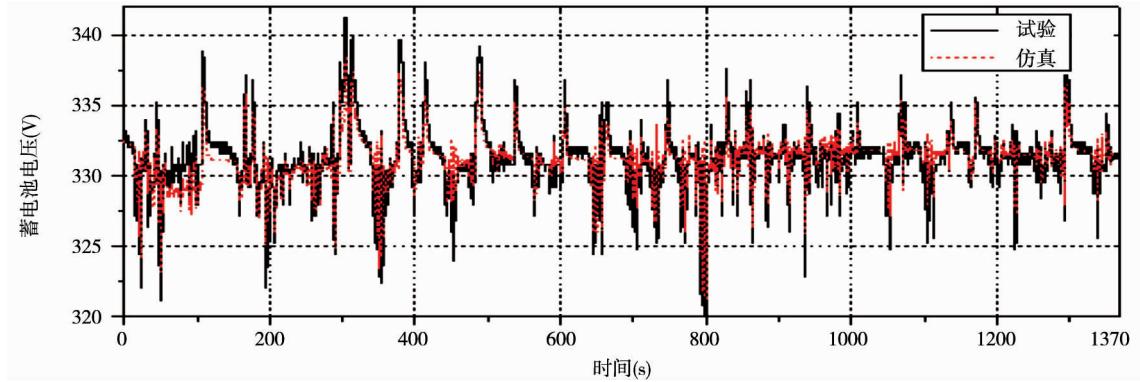


图 23 蓄电池电压仿真与试验数据对比

统中主要功率部件电流关系的动态变化趋势,能够用于动力系统功率平衡控制策略的仿真分析研究。

上述模型验证结果表明,所建立的模型 FCHV-SIM 具有适当的动态仿真效果,能够满足燃料电池混合动力汽车控制系统设计过程中的动态仿真需要。

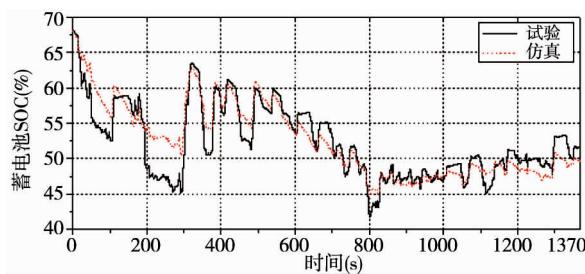


图 24 蓄电池 SOC 仿真与试验数据对比

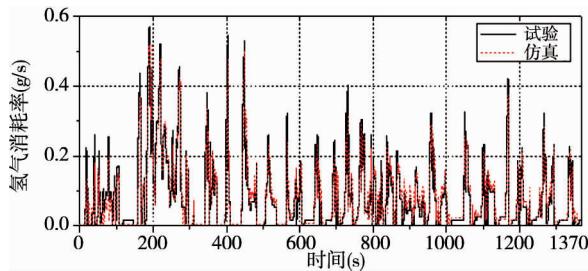


图 25 燃料电池氢耗率仿真与试验数据对比

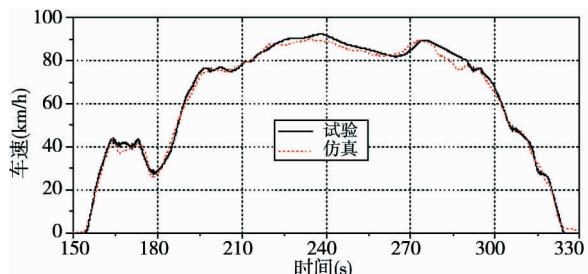


图 26 车速仿真与试验数据对比(展开)

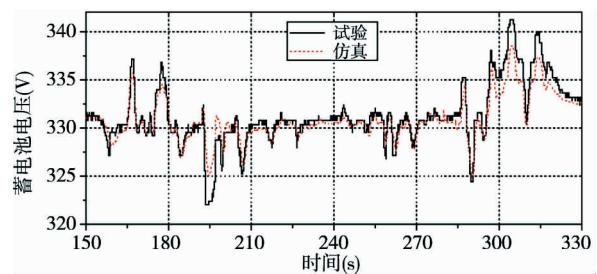


图 27 蓄电池电压仿真与试验数据对比(展开)

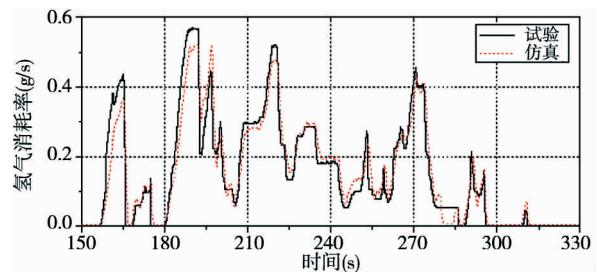


图 28 燃料电池氢耗率仿真与试验数据对比(展开)

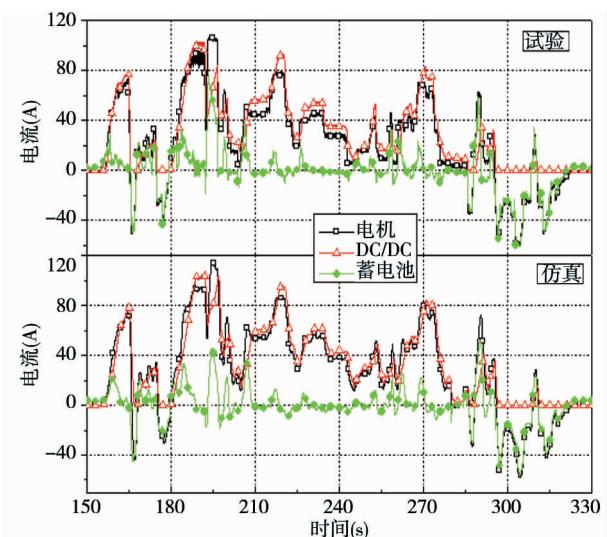


图 29 主要部件电流关系仿真与试验数据对比(展开)

4 结 论

燃料电池混合动力汽车(FCHV)的动力系统是一个复杂耦合动态系统,其动态仿真建模是设计开发过程中的关键问题之一。本研究针对动力系统上层控制设计的需要,采用适当的简化和抽象,结合主要部件台架试验和原型车转鼓试验的相关试验数据,首先建立能够反映各部件输入输出特性及效率特性的动态仿真模型,然后通过集成构建原型车整车的动态仿真模型。模型验证表明,所建立的燃料电池混合动力汽车仿真模型具有很好的动态仿真效果,能够满足控制系统设计的需要,证明所采用的系统动态建模方法有效,为后续开展基于模型的燃料电池混合动力汽车控制系统设计研究提供了必要基础。同时,对于类似多能源混合动力系统的动态仿真建模具有很好的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 陈清泉.电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车的发展前景.汽车安全与节能学报,2011,2(1):12-24
- [2] Markel T,Brooker A,Hendricks T,et al. ADVISOR:a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. *Journal of Power Sources*,2002,110(2):255-266
- [3] Bolognesi P,Conte F V,Bianco G L,et al. Hy-Sim;a modular simulator for hybrid electric vehicles. Proceedings of the 18th International Electric Vehicle Symposium, Berlin,Germany,2001
- [4] Trigui R,Badin F,Jeanneret B,et al. Hybrid light duty vehicles evaluation program. Proceedings of the 19th International Electric Vehicle Symposium, Busan, Korea, 2002. 888-899
- [5] 贺建军,孙超.质子交换膜燃料电池的建模与仿真分析.中南大学学报(自然科学版),2010,4(2):565-571
- [6] 孙军,廖兵该,杨林等.燃料电池轿车DC/DC变换器仿真控制及其故障诊断试验台的开发.汽车工程,2005,27(2):133-135
- [7] 魏学哲.燃料电池轿车锂离子动力蓄电池管理系统研究:[博士学位论文].上海:同济大学汽车学院.2005

Study on the dynamic coupling property analysis and modeling of fuel cell hybrid power systems

Zhao Yulan,Yun Haitao,Hao Kui,Liu Zunnian

(School of Automobile and Traffic,Qingdao Technological University,Qingdao 266033)

Abstract

The procedure for analyzing the dynamic coupling property of a fuel cell hybrid power vehicle(FCHV)s' hybrid power system and modeling the system was implemented in this study and presented in detail. The dynamic simulation model for the main components of the FCHV power system was built based on the theoretical analysis and the lab testing and field testing results of the FCHV prototype. Then, a dynamic coupling property model of the feul cell hybrid power system was established based on the simulation model for main components. Finally, a fuel cell hybrid vehicle simulation model(FCHV-SIM) was developed based on the components model. The model validation results confirm that the constructed dynamic simulation model is reasonably accurate and appropriate for the model-based control development.

Key words:fuel cell vehicle,hybrid power,dynamic model,simulation