

# 并联式混合动力汽车的建模和仿真

高爱云<sup>1</sup> 付主木<sup>2</sup>

(1 河南科技大学 车辆与动力工程学院, 洛阳 471003) (2 东南大学 自动控制系, 南京 210096)

## Modeling and simulation of parallel hybrid electric vehicle

GAO Ai-yun<sup>1</sup>, FU Zhu-mu<sup>2</sup>

(1 He'nan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China) (2 Southeast University, Nanjing 210096, China)

**【摘要】**描述了并联式混合动力汽车(PHEV)仿真模型的建模思想,利用 ADVISOR 软件,建立了 PHEV 的仿真模型,并以 SP-PHEV 2000 为例,对所建模型进行了仿真。结果表明,所建立的模型和提出的仿真方法是合理有效的。

**关键词:**混合动力汽车;建模和仿真

**【Abstract】** Modeling idea of parallel hybrid electric vehicle is described. Using ADVISOR simulation software, model of parallel hybrid electric vehicle is established. The model is simulated on SP-PHEV 2000. The result shows that the model and simulation method are reasonable and feasible.

**Key words:** Hybrid electric vehicle; Modeling and simulation

中图分类号:V46, TP391.9 文献标识码:A

## 1 前言

并联式混合动力汽车(PHEV)部件中存在较多非线性环节,且各部件之间相互作用复杂。判断不同设计方案间优劣情况和测试各种控制策略实际效果的方法通常有三种:建立汽车原型、做大量试验和采用仿真技术,其中前两种耗时较大,且需要大量的人力、物力和财力<sup>[1]</sup>。而采用仿真技术不仅便于灵活地调整设计方案,优化设计参数,而且可以降低研究费用,缩短开发周期。

## 2 仿真模型的建模思想

### 2.1 仿真模型的主要功能

并联式混合动力汽车结构简图如图1所示。由图1可知, PHEV 的驱动系统由发动机、牵引电机以及电池等众多关键部件组成,且其控制策略也有多种形式。为了在设计初期就对整车性能有可靠的把握,对整车进行建模和仿真研究是非常必要的。仿真模型主要实现的功能,如图1所示。

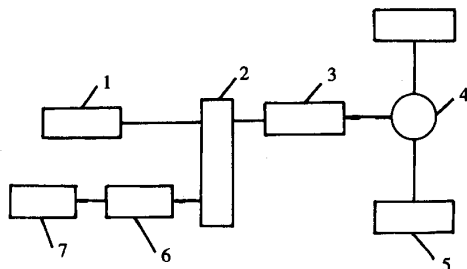


图1 并联式混合动力汽车结构简图

1. 发动机 2. 扭矩合成器 3. 变速器 4. 主减速器 5. 驱动轮  
6. 电动机/控制器 7. 蓄电池组

(1) 预测 PHEV 在不同循环工况下的动力性、燃油经济性以及排放特性;

(2) 观察功率在发动机、电动机和电池组之间的分配情况;

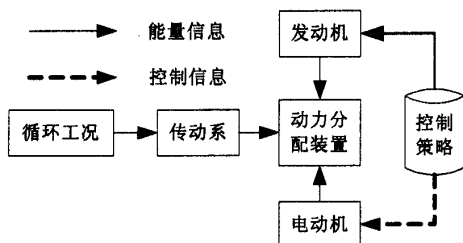
(3) 评价不同的设计方案和控制策略或控制方法的优劣;

(4) 分析汽车是否能够满足各种循环工况的功率要求。

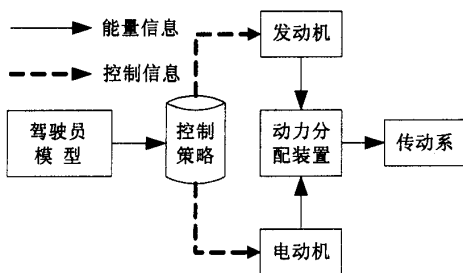
### 2.2 仿真模型的建模思想

对于 PHEV 动力系统的仿真(图2)模型基本采用模块化的思想,各系统子模块间通过一定的总体构造关系进行联系与计算,这样便于模型的建立与修改。汽车仿真模型的总体构造方法有反向建模、正向建模和混合建模三种<sup>[2]</sup>。反向仿真模型从满足循环工况要求出发,计算动力系统各部件必须提供的转矩、转速和功率等,仿真信息沿整车阻力模型、车轮模型、传动系统模型最终到达动力总成模型。反向建模与仿真不考虑驾驶员的意图以及动力系统(尤其是离合器和变速器)的动态过程,计算步长较大,且计算速度快。正向仿真模型中,系统输入为加速踏板信号和制动踏板信号,计算路线是将两个踏板信号转换成整车行驶的转矩或功率需求,在整车控制模块中根据控制策略提出的对各总成的转矩需求,动力总成模型根据该转矩需求及其能够提供的转矩限制向传动系统输出转矩,经过车轮模型最终到达整车阻力模型,输出车速。

采用混合仿真方法,利用在 Matlab 和 Simulink 软件环境下开发的电动汽车仿真软件 ADVISOR,分别建立汽车动力学模型、发动机模型、电动机模型、蓄电池模型和传动系模型,通过分析各部件总成,修改相应各总成参数,最后在 Simulink 中仿真运行。



(a) 反向仿真方法



(b) 正向仿真方法

图 2 PHEV 仿真方法

### 3 仿真模型的建立

PHEV 动力总成系统模型包括动力系统模型、控制器模型、机械传动及汽车动力学模型三部分。动力系统模型又包括发动机模型、电动机模型和蓄电池模型,机械传动模型包括扭矩耦合器模型、变速器模型和主传动模型。

#### 3.1 发动机模型

发动机是 PHEV 的主要动力源,建立发动机的模型主要是对发动机各个工况下的动力性、经济性和排放(主要是 HC、CO 和 NOx)性能指标进行预测。发动机模型主要包括扭矩计算模型、转速计算模型和燃油消耗模型。

将发动机转速和扭矩参数的实验数据制作成图表(存入计算机 ROM 中),利用“查表-插值”的方法可以得到发动机的扭矩计算模型、转速计算模型。将发动机看作转速和扭矩的二元函数,用曲面拟合法可以获得发动机的万有特性模型。

##### 3.1.1 发动机扭矩计算模型

发动机可提供的扭矩:

$$T_{fc,avail} = T_{fc,all} - T_{acc} - T_{fc,i} \quad (1)$$

$$= \max[T_{fc,cl}, \min(T_{fc,req,all}, T_{fc,max})] - \frac{P_{acc}}{\omega_{fc}} - J_{fc} \cdot \epsilon_{fc}$$

式中:  $T_{fc,avail}$  为发动机可提供的扭矩;  $T_{fc,all}$  为发动机产生的总扭矩;  $T_{acc}$  为附件扭矩;  $T_{fc,i}$  为发动机转动惯量引起的惯性扭矩;  $T_{fc,cl}$  为节气门关闭时发动机阻力矩;  $T_{fc,req,all}$  为需要发动机产生的总扭矩;  $T_{fc,max}$  为发动机最大扭矩。需要发动机产生的总扭矩:

$$T_{fc,req,all} = T_{fc,req} + T_{acc} + T_{fc,i} \quad (2)$$

$$= T_{fc,req} + \frac{P_{acc}}{\omega_{fc}} + J_{fc} \cdot \epsilon_{fc}$$

式中:  $T_{fc,req}$  为需要发动机输出至传动系的扭矩; 其它同式(1)

万方数据

#### 3.1.2 发动机转速计算模型

$$\omega_{fc,avail} = \begin{cases} \min(\omega_{fc,req}, \omega_{fc,max}) \\ \max[\omega_{fc,idle}, (\omega_{fc,prev} + \frac{T_{fc,cl} - T_{acc}}{J_{fc}} \cdot \Delta t)] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\omega_{fc,idle}$  为发动机怠速转速;  $\omega_{fc,prev}$  为前一时间步发动机转速;  $\Delta t$  为仿真时间步长; 其它同式(1)和式(2)。

#### 3.1.3 发动机的万有特性模型

$$g_e = \sum_{j=0}^s \sum_{i=0}^j A [\frac{1}{2}(j+1)(j+2) - j - 1 + i] \cdot T_e^i \cdot n_e^{j-1} \quad (4)$$

式中:  $g_e$  为发动机燃油消耗率(g/kwh);  $n_e$  为发动机转速;  $T_e$  为发动机有效扭矩;  $A$  为模型中各项系数;  $s$  为模型的阶数。

#### 3.2 电动机模型

电动机模型主要指电动机动力学(机械特性)模型,没有涉及电动机的电磁学模型和控制器模型,这是由整车仿真的特点和需求决定的。因而电动机模型只需考虑其输入、输出量,而不必考虑其内部工作机制,即假定电动机控制器/逆变器总能按需求控制电机以实现指定的输入量和输出量间的关系。

电动机的模型选用 ADVISOR 内部模型,通过修改相应的参数变量而建立。主要用到的数学模型为

$$P_{mei} = f(T_{mei}, \omega_{mei}) \quad (5)$$

$$T_{mei} = \min[f(\omega_{me,max}), (T_{me,r} + J_{me} \frac{d\omega_{me}}{dt})] \quad (6)$$

式中:  $P_{me}$  为电动机功率;  $T_{me}$  为电动机扭矩;  $\omega_{me}$  为电动机转速;  $J_{me}$  为电动机转动惯量。

#### 3.3 蓄电池模型

蓄电池作为电动汽车的电力能源储存装置,为电动汽车的驱动提供动力支持;同时,在减速/制动过程中回收能量,从而实现减少能量消耗的目的。蓄电池的建模方法经历了原始的铅酸电池模型、内阻模型,以及 2001 年开发的包含了蓄电池的瞬态效应的电阻电容(RC)模型。目前,较为广泛采用的建模方法是内阻模型(RINT)法,这种方法就是将电池等效为一个电压源和一个电阻(电池的内阻)串联而成的开环电路模型,其模型的建立主要采用经验公式与具体电池性能数据相结合的方法。这种模型的优点就在于建模方式简单,且存在一定的通用性,因而在 ADVISOR 中也主要采用了此种模型。电池内阻模型的结构如图 3 所示:

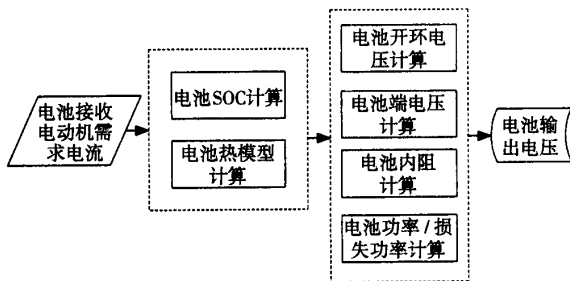


图 3 电池内阻模型的结构简图

#### 3.4 汽车动力学模型

汽车动力学模型建立在车轮力平衡基础之上,同时必须在仿真计算的各个时间段内给出功率的平衡式,由汽车动力学方

程和功率平衡方程构成。

$$F_t = F_f + F_i + F_a + F_j$$

或

$$\frac{(T_e + T_m) i_g i_0 \eta_T}{r} = mgf \cos \alpha + mg \sin \alpha + \frac{C_D A v^2}{21.15} + \delta m \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

式中： $F_t$ 为驱动力， $F_f$ 为滚动阻力， $F_i$ 为坡道阻力， $F_a$ 为迎风阻力， $F_j$ 为加速阻力， $T_e$ 为发动机扭矩， $T_m$ 为电动机扭矩， $i_g$ 为传动系传动比， $i_0$ 为主减速器传动比， $\eta_T$ 为传动系效率， $r$ 为滚动半径， $m$ 为整车质量， $f$ 为滚动阻力系数， $\alpha$ 为坡度角， $C_D$ 为风阻系数， $A$ 为迎风面积， $v$ 为车速， $\delta$ 为惯性质量换算系数。

对于并联混合动力汽车而言，电动机与发动机的功率之和与车辆行驶阻力功率的平衡式为：

$$P_e + P_m = \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{mgfv}{3600} + \frac{mgiv}{3600} + \frac{C_D A v^3}{76140} + \frac{\delta m v}{3600} \frac{dv}{dt} \right) \quad (8)$$

式中： $P_e$ 为发动机功率， $P_m$ 为电动机功率。

3.5 传动系模型

在传动系统中，扭矩耦合器、机械变速器、主传动等均为齿轮啮合传动，因此可以将它们看作是旋转的刚体。传动系的主要模型见图 4、图 5 和图 6 所示。

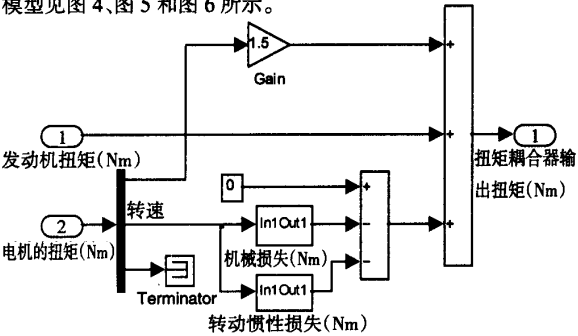


图 4 扭矩耦合器模型

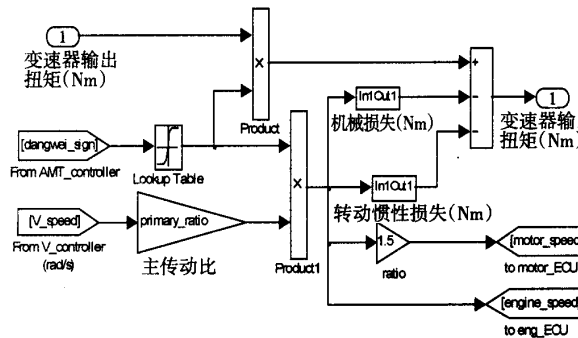


图 5 变速器模型

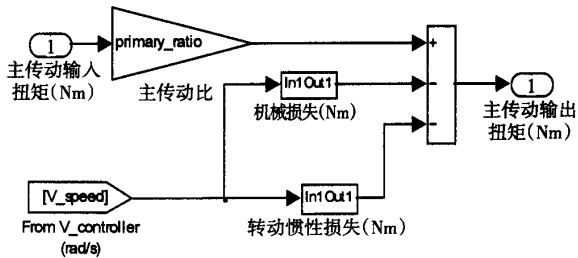


图 6 主传动模型

4 仿真分析

4.1 仿真参数

本文以 SP-PHEV 2000 为例，对上述所建模型进行仿真。SP-PHEV 2000 电动汽车的整车参数：整备质量为 1756kg，整车总质量 2081kg，空气阻力系数  $C_D=0.31$ ，迎风面积  $A=2m^2$ ，车轮滚动半径  $r_r=0.283m$ ，传动系机械效率  $\eta_T=0.9$ ，滚动阻力系数  $f=0.015$ 。传动系参数见表 1。

表 1 SP-HEV2000 传动系参数表

项目	设计参数	设计值
发动机	最大功率 $P_{max}/kw$	20
	额定功率 $P_r/kw$	26
电动机	最大功率 $P_{max}/kw$	32
	额定转速 $n_r/km \cdot h^{-1}$	2200
	最大转速 $n_{max}/r \cdot min^{-1}$	10000
传动装置	变速器传动比 $i_t$	1.286
	主减速器速比 $i_0$	5.33
	扭矩合成装置速比 $i_m$	2

4.2 仿真分析

表 2 SP-HEV 2000 仿真结果与试验结果对比表

项 目	仿真结果	试验结果
最高车速 $/km \cdot h^{-1}$	167.2	166.3
最大爬坡度(汽车速度为 20km/h 时)/%	20	20.2
0 ~ 100km/h 加速时间 (发动机单独驱动)/s	17	17.5
0 ~ 100km/h 加速时间 (电动机 40%助力)/s	16.5	16.8
百公里油耗 $/L$	6.1	6.2

选用 UDSS 循环工况，设置蓄电池系统 SOC 的初始值为 0.7,对 SP-PHEV 2000 电动汽车进行仿真。其仿真结果与试验结果见表 2。从表 2 可以看出，仿真结果与试验结果非常接近。通过上述分析对比，说明所建仿真模型可用于实际控制系统的开发。

5 结论

- (1)利用 ADVISOR 软件，采用混合仿真方法，综合了反向汽车仿真和正向汽车仿真方法的优点。
- (2)采用试验数据和经验公式相结合的方法建立了并联式混合动力汽车各部件的仿真模型。
- (3)对所建立模型进行了仿真研究。结果表明，仿真结果与实测数据比较接近，从而表明所建立的模型和所提出的仿真方法是合理有效的，为并联式混合动力汽车整车的动力性、经济性和排放性能等提供了仿真平台。

参考文献

1 王庆年,刘志茹,王伟华,曾小华.混合动力汽车正向建模与仿真[J].汽车工程,2005,27(4):392-398.  
2 张翔.电动汽车建模与仿真的研究.[博士学位论文].合肥工业大学,2004.