文章编号：1006－544X（2007）04－0579－05

混合动力电动客车驱动系统控制策略及仿真

吴彤峰[1]，郑　毅[2]，韩继龙[2]，范健文[1]

（1. 广西工学院 汽车工程系，广西 柳州　545006；2. 广西大学 机械工程学院，南宁　530004）

摘　要：为改善公交客车的燃油经济性与车辆尾气排放，提出了一种并联式混合动力公交客车驱动系统方案及工作模式，针对两种运行工况，在满足车辆动力要求并保证发动机最高燃油效率的前提下，以实现蓄电池充放平衡为目标设计了该驱动系统的控制策略，应用以 MATLAB 为平台的 ADVISOR 2002 软件建立该驱动系统的仿真模型. 仿真结果表明，其在动力性能、燃油经济性和排放指标三方面均优于传统内燃机动力客车，每百千米的节油率在 2 种典型循环中分别达到 45.6% 和 33.5%. 仿真模型和控制策略能满足混合动力公交客车驱动系统设计要求.

关键词：混合动力电动客车；驱动系统；控制策略；建模仿真

中图分类号：U469.72　　**文献标志码：**A

并联式混合动力电动汽车（parallel hybrid electric vehicle，PHEV）驱动系统由发动机、牵引电机、发电机以及电池等关键部件组成，通过一定的控制策略使内燃机动力源和电力动力源协调，实现最佳能量分配、协调驱动系统各部件工作状态是满足动力要求的前提下提高 PHEV 经济性、改善车辆尾气排放的关键. PHEV 的发动机和电动机在不同的路面、行驶工况时，既可以共同驱动又可以单独驱动，因此在功率分配上比传统车辆具有更大的灵活性. 为提高整车性能的可靠性，对驱动系统进行建模和仿真研究是非常必要的.

1　驱动控制系统组成及工作模式

PHEV 混合动力驱动系统有很多类型. 但无论它的类型及其衍生结构如何变化，从系统本质分析，它都属于多能源动力系统的范畴. 由于 PHEV 混合动力驱动系统由机械动力源与电动力源组成. 所以要实现二者相互协调工作，就需要有良好的能量管理策略，对两动力源的工作状况和动力输出（功率、转矩）进行控制.

1.1　驱动控制系统的组成

建立一种新型的并联混合动力驱动系统，其并联式转速偶合布置方案如图 1 所示. 采用图 2 所示两自由度的行星齿轮机构作变速器[1]. 这种驱动系统不仅具有并联混合动力系统的特点，而且具有串联混合动力系统发动机能工作于最小油耗区的优点.

1.2　驱动系统的工作模式

车辆在市区正常行驶时，电动机提供车辆所需的主要动力，发动机工作于最小油耗状态，并通过两自由度的行星齿轮机构合成动力；当节气门全开时，发动机和电动机同时提供车辆所需动力；车辆制动或减速时，电机工作于发电机模式，

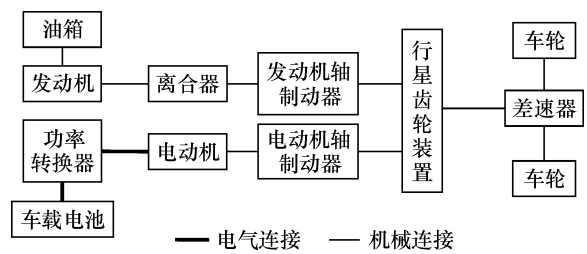


图 1　混合动力客车驱动系统

Fig. 1　Hybrid electric bus driving system

收稿日期：2007－04－10

基金项目：广西自然科学基金资助项目（桂科自 0481010）

作者简介：吴彤峰（1944－），男，教授，汽车专业，E-mail：wootf820@163.com.

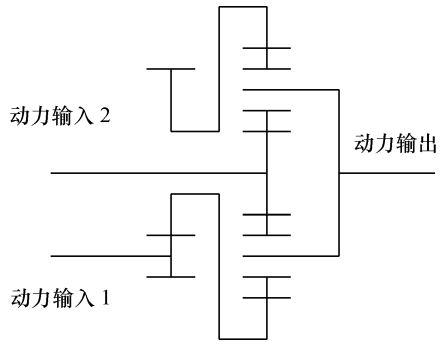


图 2 行星齿轮装置原理
Fig. 2 Planetary gearing key diagram

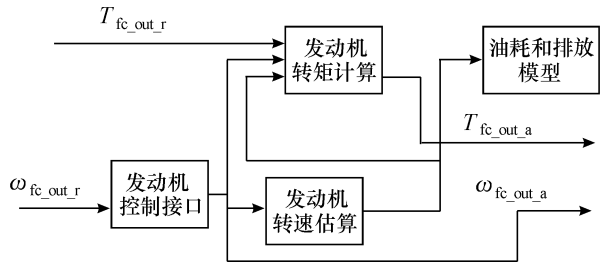


图 3 发动机模型结构
Fig. 3 Fuel converting model structure chart

通过功率转换器给车载电池充电. 车辆在市郊行驶时，只有发动机工作，电动机关闭，行星齿轮机构的齿圈被锁死，这时行星齿轮机构的自由度减少到 1 个.

2 驱动系统关键部件仿真模型

ADVISOR 采用后向和正向相结合的混合建模方法[2]，以后向建模为主，即设定驱动循环以评价整车性能，同时附加了一些简单的正向建模计算，保证仿真结果的合理性. 在仿真过程中，需要遵循以下两个假设[3]：

1）传动系统中任何部件从与其直接连接的上游获得的能量等于它所需要的能量. 如驱动车轮需要电机提供 30 kW 的功率，那么从电池所获得的功率就是 30 kW，蓄电池不会给电机提供大于 30 kW 的功率.

2）无论是在正向或后向，同一部件的效率相同.

2.1 发动机建模

仿真软件 ADVISOR 中采用的是发动机实测模型，即建模时通过对已知的发动机进行实测，建立发动机各输出、输入参数的数据库，利用查表或实验拟合模拟发动机的工作特性. 图 3 给出了发动机模型结构：$T_{fc_out_r}$ 为发动机期望转矩，$\omega_{fc_out_r}$ 为发动机期望转速，$T_{fc_out_a}$ 为发动机可提供转矩，$\omega_{fc_out_a}$ 为发动机可提供转速. 发动机模型需要的输入参数有：发动机质量、转动惯量、发动机最大转矩特性、发动机油耗、排放.

其中发动机可提供的输出转矩计算如下[4]：

$$T_{fc_out_a} = T_{fc_a} - T_{acc} - J_{fc}\frac{d\omega_{fc}}{dt}. \quad (1)$$

$$T_{acc} = P_{acc}/\omega_{fc}. \quad (2)$$

式中：T_{fc_a} 为发动机产生的总转矩，T_{acc} 为附加阻转矩，P_{acc} 为附加功率，J_{fc} 为发动机的转动惯量. 发动机产生的总转矩[4]

$$T_{fc_a} = \max(T_{cf_th}, \min(T_{fc_out_r}, T_{fc_max})). \quad (3)$$

式中：T_{cf_th} 为发动机节气门关闭时的转矩，T_{fc_max} 为发动机可提供最大转矩. 则发动机总期望转矩

$$T_{fc_r} = T_{fc_out_r} + T_{acc} + J_{fc}\frac{d\omega_{fc}}{dt}. \quad (4)$$

发动机输出转速

$$\omega_{fc_out_a} = \begin{cases} \min(\omega_{fc_out_r}, \omega_{fc_max}); \\ \omega_{fc_spin}. \end{cases} \quad (5)$$

式中：ω_{fc_max} 为发动机最大转速，ω_{fc_spin} 为离合器分离时发动机转速，

$$\omega_{fc_spin} = \max(\omega_{fc_idle}, \omega_{th_cls}). \quad (6)$$

式中：ω_{fc_idle} 为发动机怠速，ω_{th_cls} 为节气门关闭时发动机转速.

2.2 电动机模型

电机建模的基础是电压、转矩、功率平衡方程式和运行特性方程，在建模过程中还要考虑电机转矩、转速等性能限制及电机内的热交换. 在 ADVISOR 平台上通过数据文件定义了电机各种运行状态下的转速、转矩、功率的 map 图，以及电机的最大电压、最大电流、质量、电机平均热容量、冷却气体吹过电机的最大面积等基本参数. 图 4 给出了电机模型结构.

采用后向建模和正向建模相结合的方式建立电机模型. 后向建模需要电机提供转矩 $T_{mc_out_r}$ 和转速 $\omega_{mc_out_r}$，经过转速和转矩限制处理后通过查二维数据表求出电机的输入功率和功率转矩特性，在经过电机的电流限制和控制逻辑模块处理后，

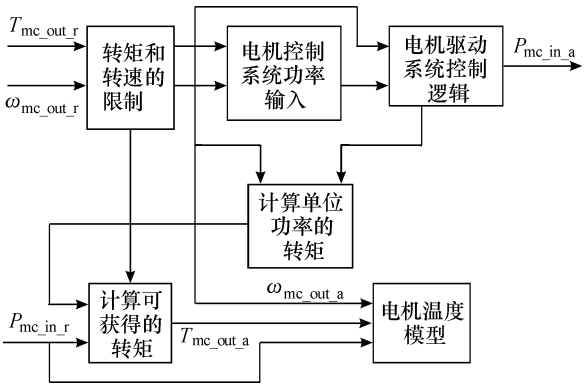


图 4　电机模型结构

Fig. 4　Motor model structure chart

图中：$P_{mc_out_r}$—电机期望转矩；$\omega_{mc_out_r}$—电机期望转速；$P_{mc_in_r}$—电机期望输入功率；$T_{mc_out_a}$—电机输出转矩；$\omega_{mc_out_a}$—电机输出转速；$P_{mc_in_a}$—电机可获得的输入功率

得到电机期望输入功率 $P_{mc_in_r}$. 在正向模型计算中，根据电机实际输入功率 $P_{mc_in_a}$，在考虑电机热交换影响的前提下计算电机的输出转矩 $T_{mc_out_a}$ 和电机的输出转速 $\omega_{mc_out_a}$.

2.3　铅酸蓄电池建模

蓄电池建模方法最常见的是内阻模型、阻容模型、电化学原理模型等. 本文采用内阻模型(图5). 它包括1个电压源（开路电压 *OVC*）和1个内阻(*R*),其参数随蓄电池荷电状态(*SOC* 值)、温度(*T*) 和电流方向(即放电或充电) 而变化,所需参数通过容量测试、开路电压测试和内阻测试获得. *SOC* 值根据安时累计得到,当电流 $I>0$(放电)时,用 $I\mathrm{d}t$ 计算;当电流 $I<0$(充电) 时,用 $I\eta_C\mathrm{d}t$ 计算(其中 η_C 为库仑效率). 同时采用一个简单的集总参数法传热模型,以确定一定散热条件下的电池温度. 蓄电池模型 es_m 文件中输入的基本数据包括蓄电池单元放电和充电时其内阻随温度和 *SOC* 值的变化、蓄电池单元开路电压随温度和 *SOC* 值的变化、蓄电池充电时的库仑效率随温度的变化、蓄电池单元最高和最低电压限值、蓄电池单元的质量和数量，以及与蓄电池组计算有关的参数.

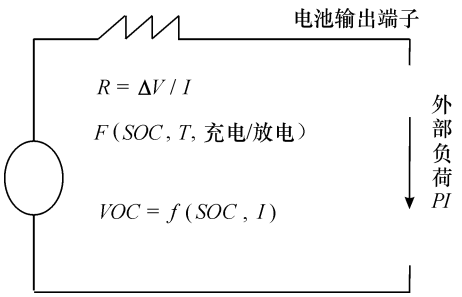


图 5　电池内阻模型

Fig. 5　Internal resistance of battery

3　驱动系统模糊控制策略

在不降低整车性能的情况下，实现整车的最佳燃油经济性与排放并兼顾整车的成本是并联混合动力汽车控制策略的设计方向. 设计中依据车辆使用要求以及驱动系统的工作模式，采用模糊逻辑控制策略. 模糊逻辑控制策略不需要精确的数学模型. 它可以很方便地处理“若需求转矩较低且 *SOC* 较低，则发动机单独驱动，并给电池充电”之类无法用精确参数表达的控制规则，并可以实现各组件间的优化、协调，以达到最优的燃油消耗和排放.

设计模糊逻辑控制策略的出发点为：在保证发动机最高燃油效率的前提下，实现蓄电池充放电平衡. 模糊逻辑控制由输入参数按照一定的法则生成多种模糊控制规则；模糊控制器的输入参数为道路总的需求转矩与经优化的发动机目标转矩的差值 ΔT 和电池的 *SOC*，输出参数为系数 k，总的控制模块如图 6 所示. 其中发动机目标扭矩 T_{arg}是根据发动机的万有特性曲线，将一定转速条件下发动机最小比油耗点插值连接成的曲线，即以比油耗最小为目标函数，用 M 文件编程实现. 在不同转速下发动机的转矩范围不一样，因此以需求转矩和目标转矩的差值 ΔT 作为输入参数，同时控制发动机工作范围. 通过模糊逻辑控制器(FLC) 控制后，得到发动机应承担的实际转矩 $T_{ice}=k\times T_{arg}$，电动机的转矩由需求转矩与发动机承担转矩的差值得到.

4　仿真结果分析

根据上述驱动系统设计混合动力客车样车，相关参数见表 1.

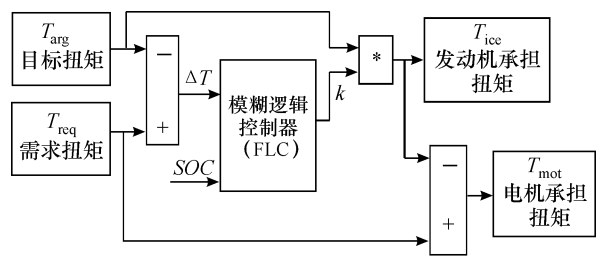


图 6　模糊逻辑控制策略

Fig. 6　Control strategy by fuzzy-logic

表 1 混合动力客车参数

Table 1 Hybrid electric bus parameter

发动机功率	电动机功率	电池最大容量	整车装备质量	风阻系数	迎风面积
119kW/4200 r·min^{-1}	75kW/8000 r·min^{-1}	55 Ah	9600 kg	0.75	7.1 m^2

利用 ADVISOR 2002 对上述建立的车辆模型进行仿真分析，主要包括车辆的燃油消耗、废气排放、发动机和电机的动力性能. 为了评估整车的动力性能和对控制策略进行仿真分析，仿真过程用 CYC_EUDC_LOW 和 UKBUS 循环来模拟汽车在城郊和城市道路工况[5]，工况循环的技术特性参数见表 2，仿真结果见表 3 与图 7.

表 2 循环技术特性参数

Table 2 Characteristic parameters of circulation technology

循环	总时间/s	总路程/km	最大车速/(km·h^{-1})	平均车速/(km·h^{-1})	停车次数
CYC_EUDC_LOW	1 224	10.59	90	31.11	13
UKBUS	3 288	12.13	41.96	13.27	79

1）从图 7 的仿真结果可以看出，在城郊循环(CYC_EUDC_LOW)过程中，车辆加速时间长，蓄电池 *SOC* 持续下降，但是在车辆每个行驶循环的减速阶段，电机实际输出转矩为负，电机工作在发电机模式，为电池充电，使电池 *SOC* 提高，蓄电池电量充放基本平衡（*SOC* 在 0.66～0.7）. 波动幅度低于 4.3%，在允许范围内[1].

2）由表 3 可知在两种典型循环中，使用模糊优化控制策略可以大大的提高燃油经济性，使系统总效率提高. 因为城市循环中需频繁的起步、停车，故对于城市循环的作用尤为明显. 仿真表明每百千米的节油率可分别达到 45.6% 和 33.5%.

3）由表 3 可知，车辆尾气排放指标也得到很大改善. 在城市工况条件下，混合动力配置时 CO、HC、NO_x 这 3 种尾气排放率比传统内燃动力

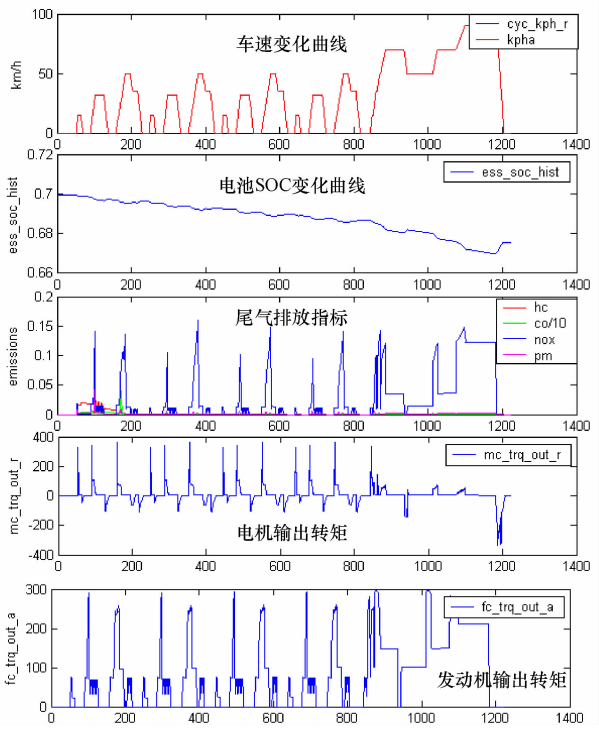


图 7 CYC_EUDC_LOW 循环下车辆仿真

Fig. 7 Simulation result of vehicle in CYC_EUDC_LOW circulation

配置时分别降低 73.1%、90.1%、33.8%，而在市郊公路上，这 3 种尾气排放率分别降低 78.3%、90.8%、32.9%.

5 结 论

在分析传统公交客车驱动系统的基础上，以 ADVISOR 2002 为平台，经过二次开发建立混合动力城市客车驱动系统的仿真模型，进行驱动控制策略仿真研究，仿真结果表明：

（1）本文构建的电动客车驱动系统在动力性能、燃油经济性和排放指标 3 方面均优于传统动力客车，体现了混合动力的优越性，满足车辆行驶的性能要求.

表 3 车辆性能仿真结果

Table 3 Simulation result of vehicle

循环模式		动力性			排放指标			经济性
		最高车速/(km·h^{-1})	0～60 km·h^{-1} 加速时间/s	16 km·h^{-1} 最大爬坡度/(°)	CO/(g·km^{-1})	HC/(g·km^{-1})	NO_x/(g·km^{-1})	油耗/(L·(100km)$^{-1}$)
CYC_EUDC_LOW	混合	112.8	10.5	22.2	0.823	0.145	3.117	22.8
	内燃	88.1	21.2	11.6	3.786	1.573	4.643 4	41.9
UKBUS	混合	112.8	10.5	22.2	1.068	0.194	3.961	36.7
	内燃	88.1	21.2	11.6	3.972	1.965	5.989	55.2

（2）并联混合动力汽车控制的关键是发动机和电动机转矩（或功率）的合理分配，本文采用了一种兼顾发动机燃油经济性和电池 *SOC* 平衡的模糊逻辑控制策略，结果显示采用该策略较为合理.

参考文献：

[1] 陈清泉，孙逢春，祝嘉光. 现代电动汽车技术［M］. 北京：北京理工大学出版社，2002.

[2] 邓亚东，易兴初，苏楚奇，等. 混合动力电动客车驱动系统控制策略及仿真［J］. 武汉理工大学学报，2005，27（6）：70－72.

[3] 赵涛. 一种新型混合动力汽车的动力系统设计、仿真及电机驱动系统的研究［D］. 合肥：合肥工业大学，2005.

[4] 陈清泉，孙逢春. 混合电动车辆基础［M］. 北京：北京理工大学出版社，2002.

[5] 钱立军，白修山，金德全. 并联混合动力汽车动力总成参数仿真分析［J］. 合肥工业大学学报：自然科学版，2005，28（3）：242－245.

Control Strategy and Simulation of Driving System for Hybrid Electric Bus

WU Tong-feng[1], ZHENG Yi[2], HAN Ji-long[2], FAN Jian-wen[1]

(1. *Department of Automobile Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou* 545006, *China*;
2. *College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning* 530004, *China*)

Abstract: For economy and bus exhausting, a driving system project and working patterns for parallel hybrid electric bus are proposed. In order to meet the motive force requirement of vehicle and ensure the high efficiency of the engine, with equilibrium of charging and discharging of the battery as the goal, the control strategy for the driving-system is designed under two driving cycles. The simulation model of the driving system which is based on the software ADVISOR 2002 by virtue of MATLAB is tested. The result of simulation shows that the hybrid electric bus is better than the conventional bus in power consumption, efficiency of the engine and discharge index. Fuel saving ratio in 2 typic circulations reaches 45.6% and 33.5% respectively. Artificial model and control strategy can meet the design requirement of driving system for the hybrid electric bus.

Key words: hybrid electric bus; driving-system; control strategy; simulation