文章编号: 1000-8608(2007)04-0515-06

并联混合动力城市客车控制策略研究

辛世界*[1], 隆武强[1], 范立云[1], 周雅夫[1], 李 俊[2]

(1.大连理工大学 动力工程系, 辽宁 大连 116024;
2.中国第一汽车集团公司技术中心, 吉林 长春 130011)

摘要: 针对以解放牌城市客车为原型车的并联混合动力系统的能量管理和动力控制建立了动态仿真模型,仿真分析了并联电力助动控制策略、自适应控制策略和模糊逻辑控制策略各自的特点. 结果表明,不同控制策略的决策方式和优化目标不同,从而导致车辆的动力性、燃料经济性和排放性有较大的差别. 由于车辆的动力性、燃料经济性和排放性是相互制约的指标,控制策略要综合考虑对这三者的要求,选择合适的折中方案. 另外,控制策略的性能还与车辆工况有关,好的控制策略应该能根据车辆行驶条件的变化调整其决策方式,使其具有路线适应能力.

关键词: 混合动力城市客车; 混合电动车; 控制策略; 能量管理; 仿真
中图分类号: U469.72 文献标识码: A

0 引 言

从近期和中期来看,混合电动车(HEV)是传统车辆的最佳替代车辆,其比传统车辆清洁高效,且能够提供与传统车辆相同的动力性和更长的续驶里程[1]. HEV包含两种或两种以上动力源. 为了协调各动力源提供的动力,保证车辆的动力性、燃料经济性和排放性,需要合适的控制策略对动力系各传动部件进行优化管理. HEV的管理和控制包括:动力分配、能量管理、排放控制、部件的热管理、再生制动控制等. HEV的整车性能不仅与动力系各传动部件有关,还与控制策略有密切的关系. 控制策略对HEV的动力性、燃料经济性、排放性等起着相当重要的作用. 本文针对以解放牌城市客车为原型车的并联混合动力系统的控制策略进行仿真研究,通过对3种控制策略(并联电力助动控制策略、自适应控制策略、模糊逻辑控制策略)进行比较分析,确定适合并联混合动力城市客车的最佳控制策略.

1 并联混合动力城市客车动力传动系统

HEV动力传动系统结构有串联、并联和混联3种[2-3]. 本课题选择了如图1所示的双轴并联结构作为解放牌城市客车的动力传动系统. 该动力传动系统由电控柴油发动机、普通干式电控离合器、机械式自动变速器、镍氢蓄电池组、交流感应式异步电机、动力合成装置、主减速器、车轮等组成. 动力合成装置是由一对固定速比的常啮合齿轮构成,它向车轮传递柴油机和电机的转矩和速度.

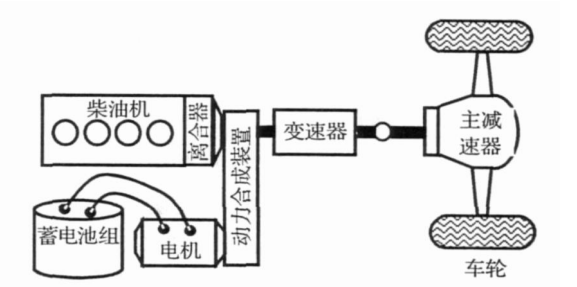

图1 双轴并联HEV动力传动系统方框图

Fig. 1 Block diagram of powertrain for parallel-configured double shaft HEV

2 仿真模型

解放牌混合动力城市客车整车仿真模型的顶层图如图2所示,是在MATLAB®/Simulink®环境中建立的.

收稿日期: 2006-04-11; 修回日期: 2007-05-13.
基金项目: 国家"八六三"高科技计划资助项目(2001AA501513).
作者简介: 辛世界*(1963-),男,教授, E-mail: shijie_xin@sohu.com.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

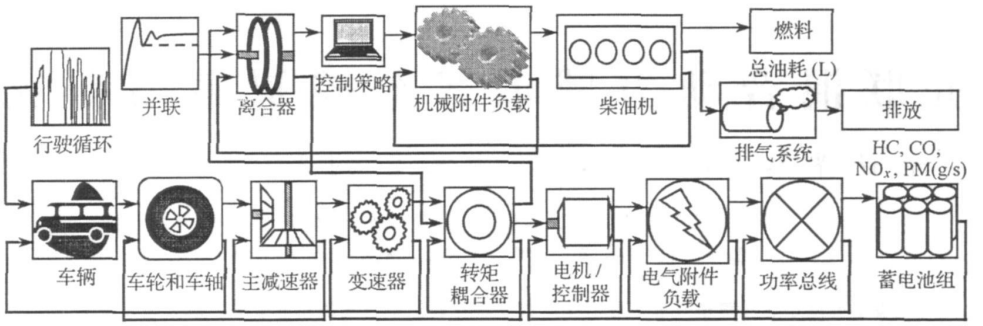

图 2 解放牌混合动力城市客车仿真模型方框图

Fig. 2 Block diagram of simulation model for Jiefang hybrid city bus

2.1 发动机模型

发动机模型包括惯性效应、性能界限、附件负载以及温度对燃料消耗、发动机排放和催化剂效率的瞬态影响. 发动机转速范围、转矩范围、外特性、油耗率和污染物(CO、HC、NO_x、PM)排放量等以实测的数据表示. 其中油耗率和污染物排放量用二维表格表示,按发动机的转速和转矩索引.

2.2 电机/控制器模型

电机/控制器模型包括电机和控制器中的损耗效应、转子惯量以及电机转矩. 该模块将转矩和转速要求转换为电功率要求,并且将实际的功率输入转换成转矩和转速输出. 功率损耗按二维查询表格处理,表格按着转子转速和输出转矩索引. 电机最大转矩使用一个一维查询表格,该表格按转子转速索引. 电机控制模块保证电流不超过控制器的最大电流,且保证当电机不需要时关闭.

2.3 蓄电池模型

蓄电池经历着与热有关的电化学过程,其电化学特性是具有变参数的非线性函数,使得它难以建模. 因此,蓄电池电化学性能的动态模型要适当地简化处理. 本文采用的是 RC蓄电池模型,其等效电路图如图 3所示. 其中 C_b 是体电容,容量非常大,表示蓄电池有足够的容量以化学方式存储电荷; C_c 是表面电容,容量很小,主要是代表螺旋缠绕电池的表面效应; R_t 是接线端电阻; R_e 是末端电阻; R_c 是电容器电阻.

该模型的控制状态方程如下:

$$\begin{pmatrix} \dot{V}_{C_b} \\ \dot{V}_{C_c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\dfrac{1}{C_b(R_e+R_c)} & \dfrac{1}{C_b(R_e+R_c)} \\ \dfrac{1}{C_c(R_e+R_c)} & -\dfrac{1}{C_c(R_e+R_c)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_{C_b} \\ V_{C_c} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\dfrac{R_c}{C_b(R_e+R_c)} \\ -\dfrac{R_e}{C_c(R_e+R_c)} \end{pmatrix} I_s;$$

$$V_0 = \begin{pmatrix} \dfrac{R_c}{R_e+R_c} & \dfrac{R_e}{R_e+R_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{C_b} \\ V_{C_c} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -R_t & -\dfrac{R_cR_e}{R_e+R_c} \end{pmatrix} I_s \tag{1}$$

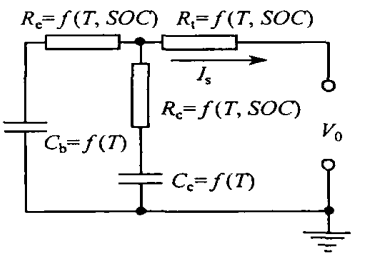

图 3 RC蓄电池模型

Fig. 3 RC battery model

3 混合动力系统控制策略

对 2个动力源(内燃机和电机)的优化控制,决定了在保证车辆动力性的前提下车辆的燃料消耗、排放量和电量维持的能力[4]. 决策方式和侧重点不同,导致不同控制策略下 HEV的性能也不相同. 本文采用 3种控制策略对解放牌混合动力城市客车进行控制,通过仿真研究,分析比较各种控制策略的特点. 这 3种控制策略分别是: (1)并联电力助动控制策略; (2)自适应控制策略; (3)模糊逻辑控制策略.

3.1 并联电力助动控制策略(PEACS)

PEACS(parallel electric assist control strategy)是一种基线控制策略,它以发动机最大转矩线和最小转矩线作为两条控制基准线. 这种

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基线控制策略以发动机作为主动力源,以电机作为辅助动力源,并维持蓄电池里的电量. PEACS的目标是最小化发动机的能耗量,不考虑排放,不考虑电机和蓄电池效率的影响. PEACS可以按下述各种方法使用电机:

(1) 在一定的最小车速下,且 *SOC* 高于下限值时,电机可以用于提供全部驱动转矩,发动机关闭,车辆作为纯电动车工作. 参见图 4(a)中的"纯电动转速".

(2) 如果需要的转矩大于发动机在工作速度下所能产生的最大转矩,则电机用于提供辅助转矩.

(3) 当发动机在给定的转速下,按需要的发动机转矩运行效率低下,且 *SOC* 高于下限值,则关闭发动机,用电机产生需要的转矩. 参见图 4(a) 中的"关闭转矩线".

(4) 当蓄电池 *SOC* 低于下限值时,发动机将产生额外的充电转矩提供给电机对蓄电池充电,参见图 4(b) 中的情形 1. 此时如果所需转矩较低,则发动机工作在最小转矩线上,参见图 4(b) 中的情形 2.

(5) 通过再生制动,电机给蓄电池充电.

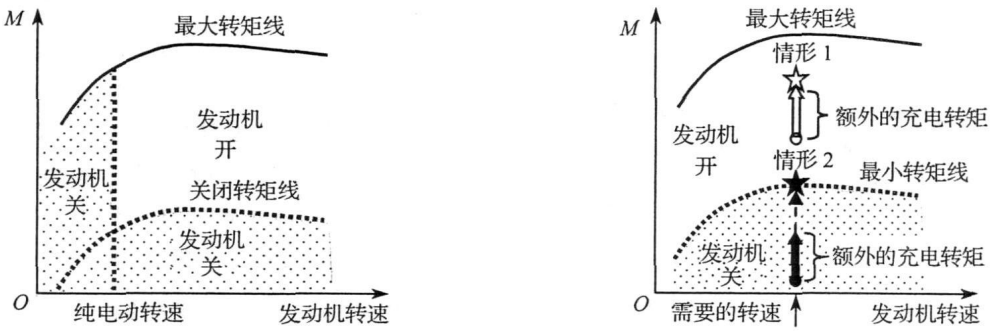

图 4　并联电力助动控制策略

Fig. 4　Parallel electric assist control strategy

3.2　自适应控制策略 (**ACS**)

ACS (adaptive control strategy)是一种实时最优控制策略,在每个时间步都要优化电机和发动机之间的转矩分配. ACS的目标是既最优化能耗又最优化排放,优化准则由需要的燃料经济性和排放目标确定[5].

在有效工作转矩的范围内, ACS通过对按时间平均的燃料经济性和排放性进行加权,规格化 5个竞争的度量指标(能耗, HC、CO、NO_x和 PM 排放量),以确定整体影响函数,最后通过最小化影响函数确定车辆的瞬时油耗和排放量.

3.3　模糊逻辑控制策略 (**FLCS**)

FLCS (fuzzy logic control strategy) 是一种即时的智能控制策略,它是基于在当前瞬时车速时的内燃机参数. FLCS有两种工作模式,一种是燃料消耗模式,另一种是效率模式,分别以效率和油耗作为目标,以排放作为约束.

3.3.1　燃料消耗模式 (FUM, fuel use mode)　这是一种限制内燃机瞬时燃料消耗的模式,保证了燃料消耗不超过某个特定值. 这种模式不是基于发动机的效率,它主要是将燃料消耗限制到一个特定值.

3.3.2　效率模式 (EM, efficiency mode)　这种模式使内燃机运行在它的最大效率区附近. 在这种模式中,内燃机的工作点被设置在对应的发动机转速下效率最大的转矩区附近. 为了满足总的传动系转矩需求和防止蓄电池组不必要的充电或放电,必须平抑负载.

效率模式有它的优点也有它的缺点. 优点是总可以使发动机运行在峰值效率区附近,缺点是最大峰值效率点靠近高转矩区. 这样,发动机发出的转矩可能比驾驶循环所需的转矩要大,从而导致如下问题: (1) 较高的燃料消耗; (2) 需要平抑负载,导致电机大量地再生充电,从而可能导致 *SOC* 不断提高.

4　仿真结果分析

表 1给出了被仿真的客车及其动力系主要部件的参数. 控制策略的主要控制参数如表 2所示,这些控制参数是根据各部件的特性和优化结果确定的.

仿真要满足如下条件:

(1) 提供足够的转矩以便尽量跟踪行驶循环的速度–时间轨迹;

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(2)维持蓄电池中的电量在下限之上;

(3) 提供令人满意的燃料经济性、动力性和排放性.

表 1 客车及其动力系主要部件的参数

Tab. 1 Parameters of the bus and its major powertrain components

部件	参量	参数
客车	最大总质量 /kg	13 980
	迎风面积 /m^2	6.25
	空气阻力系数	0.7
发动机	型号	CA6110ZL柴油机
	最大转矩 /(N·m)	650(1400 r·min^{-1})
	最大功率 /kW	132(2300 r·min^{-1})
	最高转速 /(r·min^{-1})	2 300
电机	类型	三相交流异步感应电机
	额定功率 /kW	60
	额定转矩 /(N·m)	380
	最高转速 /(r·min^{-1})	5 000
	基速 /(r·min^{-1})	1 500
蓄电池	类型	镍氢电池
	C/3容量 /(A·h)	80
	单节额定电压 /V	12
	总额定电压 /V	300
变速器	类型	五挡自动机械变速器

表 2 控制策略的控制参数

Tab. 2 The control parameters of control strategies

参量	指标	参数
发动机关闭转矩分数		0.3
发动机最小转矩分数		0.5
纯电动车速阈值 /(m·s^{-1})	下限	5
	上限	5
发动机怠速转速 /(r·min^{-1})		700
怠速时发动机状态		关闭
发动机充电转矩 /(N·m)		180
蓄电池 *SOC*限定值	下限	0.5
	上限	0.7
蓄电池 *SOC*初始值		0.7
加速时间、爬坡度测试蓄电池 *SOC*初始值		0.6
模糊控制策略燃料模式油耗极限 /(g·s^{-1})		5.3
自适应控制策略目标权重系数	能耗	1
	排放	1
车辆启动条件		冷启动

表 3是在几种不同行驶循环上的仿真结果. 其中 CBD是用于客车的中心商业区测试循环; IUS是印度城市行驶循环的一个实例,代表频繁起停、最高车速较低的行驶工况; WVU是西弗吉尼亚大学提供的城市行驶循环,代表重型车典型的城市行驶工况; MANH是曼哈顿市客车行驶循环,是根据搜集的纽约州几个大城市的高速运输管理局客车路线上混合电动和常规客车的数据,经统计处理得到.

分析表 3和其他有关的仿真结果可以得出如下结论:

(1) FLCS的两种模式(FLCS-FUM 和 FLCS-EM)与 PEACS相比, FLCS-FUM的燃料经济性最高(4个循环上的平均油耗比 PEACS低 8.5%,比 FLCS-EM 低 28.4%), NO_x 排放最低(4个循环上的平均 NO_x 排放比 PEACS降低 22.0%,比 FLCS-EM低 35.2%),但动力性最差. 这是因为 FLCS-FUM限制发动机的瞬时油耗不能高于限定值,使发动机发出的转矩受到限制,因而限制了车辆的动力性. 由于该发动机输出转矩越低,其 NO_x 排放越低,使用 FLCS-FUM的 NO_x 排放也较低,但发动机输出转矩较低,需要使用蓄电池和电机 /控制器提供更多的辅助转矩,蓄电池的 *SOC*下降最多. 因为发动机工作在较低转矩区,所以发动机效率较低,但因为更多地使用了蓄电池和电机 /控制器提供辅助转矩,且蓄电池和电机 /控制器的综合效率远高于发动机的效率,使得总系统能量效率最高,所以使用 FLCS-FUM的燃料经济性最高.

(2)使用 FLCS-EM的燃料经济性最差, NO_x 排放最高,但动力性优于 FLCS-FUM. 这是因为 FLCS-EM试图使发动机工作在最高效率区,使得发动机发出的转矩较高,可能高于行驶循环所需的转矩,额外的转矩用于给蓄电池充电. 虽然 FLCS-EM使发动机的工作效率较高,但因为使用蓄电池的能量较少,而发动机的效率远低于蓄电池和电机 /控制器的综合效率,使得总系统能量效率反而最低,导致燃料消耗增加,燃料经济性最差. 特别是在 CBD循环上,不但没有净消耗蓄电池能量,反而使蓄电池能量增加,在循环结束时蓄电池的 *SOC*高于初始值,使得在此循环上的油耗远高于其他控制策略. 这些都是因为 FLCS-EM只考虑发动机的效率,没有考虑蓄电池和电机 /控制器的效率影响. 为了避免这种现象, FLCS-EM通常用于较小的发动机,因为较小的发动机其峰值转矩区可能对应行驶循环的平均转矩需求.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　仿真结果

Tab. 3　Simulation results

燃料经济性、动力性、排放性			PEACS	ACS	FLCS-EM	FLCS-FUM
油耗 /(L/100 km) (SOC_0 = 0.7)	CBD		27.2	25.8	40.2	23.8
	IUS		21.4	19.9	23.8	20.8
	WVU		23.5	18.6	30.8	21.3
	MANH		32.5	24.6	38.9	29.8
加速时间 /s (SOC_0 = 0.6)	0~18 km/h		2.0	2.4	2.0	2.3
	0~30 km/h		4.3	5.3	4.3	5.1
	0~60 km/h		14.6	20.0	14.6	18.6
最大加速度 /($m \cdot s^{-2}$)			3.9	3.3	3.6	3.5
爬坡度(16.1 km/h)/%			25.6	23.3	25.6	18.9
最高车速 /($km \cdot h^{-1}$)			81.7	88.9	81.9	81.9
排放 /($g \cdot km^{-1}$)	CBD	NO_x	4.096	2.226	4.600	2.684
		PM	0.119	0.126	0.129	0.131
	IUS	NO_x	3.545	3.079	4.351	3.165
		PM	0.042	0.038	0.037	0.044
	WVU	NO_x	2.763	2.611	3.808	2.375
		PM	0.096	0.065	0.092	0.098
	MANH	NO_x	3.951	3.578	4.511	2.967
		PM	0.135	0.082	0.132	0.141

(3) PEACS试图使发动机能耗量减到最小，但由于不考虑排放，排放较高. PEACS不像FLCS-FUM那样限制燃料消耗量，所以其动力性较好，优于 FLCS-FUM和 ACS，与 FLCS-EM相近. 与 FLCS一样的是，PEACS也不考虑运行期间电机和蓄电池效率的影响，所以总系统能量效率也较低(只高于 FLCS-EM)，使得燃料经济性较差(只高于 FLCS-EM).

(4) ACS在选择发动机工作点时，既考虑了燃料经济性又考虑了排放，同时也考虑了蓄电池和电机效率的影响，所以燃料经济性、排放性都较好. 其 4个循环上的平均油耗比 PEACS减少 15.0%，比 FLCS-EM 减少 33.5%，比 FLCS-FUM 减少 7.1%. 平均 NO_x 排放比 PEACS低 19.9%，比 FLCS-EM低 33.4%，比 FLCS-FUM 高 2.7%. 但动力性较差，其加速性能比其他几种控制策略都差，爬坡能力只强于 FLCS-FUM. 另外，ACS决策所花费的时间要远高于其他几种控制策略，这意味着控制系统硬件要有高得多的运算速度，将导致硬件成本大幅提高.

(5) 各种控制策略在不同的行驶循环上表现出的差别有很大不同. 比如在 MANH行驶循环上，ACS的燃料经济性远高于其他几种控制策略(油耗比 PEACS减少 24.3%，比 FLCS-EM减少 36.8%，比 FLCS-FUM减少 17.4%). 而在 IUS循环上，ACS的燃料经济性与其他几种控制策略的差别比 MANH循环上的差别小得多(油耗比 PEACS减少 7.0%，比 FLCS-EM减少 16.4%，比 FLCS-FUM 减少 4.3%). 这说明，控制策略性能的好坏，不仅取决于控制策略本身的决策方式，还与车辆行驶状态有关. 因此，控制策略要能够根据车辆工况的变化来改变决策方式.

5　结　语

混合动力城市客车被认为是今天的道路车辆应用电力牵引最有希望的领域之一. 本文针对并联混合动力城市客车，采用不同的控制策略进行仿真研究. 结果表明，不同控制策略的决策方式和侧重点不同，导致不同的车辆动力性、燃料经济性和排放性. 由于动力性、燃料经济性和排放性通常是相互制约的参数，在这些参数中存在着一个折中问题. 也就是说，一个最佳的解决方案总是折中的方案. 控制策略要综合考虑车辆的动力

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

性、燃料经济性和排放法规的要求,另外还要考虑车辆的行驶工况.

将来的工作可能包括将其他车辆参数引入优化准则中,诸如蓄电池电量状态等. 也可能加进智能算法,该算法根据车辆未来路线的信息修改现有的控制策略. 目前的车辆导航系统可以精确地确定车辆的当前位置,并可以预测未来路线上的交通状况. 这些信息可以用在控制策略中旨在最优化整个旅程的性能,使得客车具有路线适应的能力[6].

参考文献:

[1] SCHOUTEN A N J, SALMAN B M A, KHEIR A N A. Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic [J]. **Control Eng Pract**, 2003, **11**(2): 171–177

[2] LONG W Q, MORITA K, IWAI N. Analysis of HEV components efficiency on fuel economy [C]// **Society of Automotive Engineers SAE 2000 Transactions**. Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, INC, 2000: 1668–1676

[3] CHAU K T, WONG Y S. Overview of power management in hybrid electric vehicles [J]. **Energy Conversion and Manage**, 2002, **43**(15): 1953–1968

[4] RAJAGOPALAN A, WASHINGTON G, RIZZONI G, *et al*. Development of fuzzy logic and neural network control and advanced emission modeling for parallel hybrid vehicles [R]. Columbus: CAR in the Ohio–State University, 2001

[5] JOHNSON V H, WIPKE K B, RAUSEN D J. HEV control strategy for real–time optimization of fuel economy and emissions [C]// **Society of Automotive Engineers SAE 2000 Transactions**. Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, INC, 2000: 1677–1681

[6] ANDERSSON J, AXELSSON R, JACOBSON B. Route adaptation of control strategies for a hybrid city bus [J]. **J SAE Rev**, 1999, **20**(4): 531–536

Research on control strategies of a parallel hybrid city bus

XIN Shi-jie*[1], LONG Wu-qiang[1], FAN Li-yun[1], ZHOU Ya-fu[1], LI Jun[2]

(1.Dept. of Power Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;
2.R&D Cent., China FAW Group Corp., Changchun 130011, China)

Abstract The dynamic simulation models are created for the energy management and power control of a prototype of a Jiefang parallel hybrid city bus. The characteristics of parallel electric–assist control strategy, adaptive control strategy and fuzzy logic control strategy are analyzed using simulation. Simulation results show that the control strategies result in the high differences of the drivability, fuel economy and emissions of the vehicle due to their different decision–making and different optimization objectives. The control strategy should synthetically take into consideration the drivability, fuel economy and emission standard for the vehicle to choose an appropriate trade–off solution, since they are mutually restrictive metrics. The performance of a control strategy is also associated with the operational condition of vehicle, so a good control strategy should adjust its decision–making method according to the driving condition of vehicle to be capable of route adaptation.

Key words hybrid city bus; hybrid electric vehicle; control strategy; energy management; simulation

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net