

文章编号:1000-582X(2012)07-013-06

混联式混合动力客车发动机优化控制策略

林歆悠,孙冬野,尹燕莉,郝允志

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:以提高发动机工作效率为目标,根据一款新型混联式混合动力客车的结构特点,划分发动机的工作区域,采用一种功率均衡的控制策略,以电池功率为控制变量对发动机的工作点进行优化,并且引入了电池荷电状态 PI 控制函数。基于 Matlab/simulink 平台建立前向整车仿真模型,通过仿真结果表明:其燃油经济性与基于等效燃油最小控制策略相比提高 6.74%,同时电池 SOC 能够控制在预定的范围内运行。

关键词:混合动力客车;控制策略;柴油发动机;燃油经济性;系统效率

中图分类号:U462.3

文献标志码:A

Development of control strategy for a series-parallel hybrid electric bus based engine efficiency optimization

LIN Xinyou, SUN Dongye, YIN Yanli, HAO Yunzhi

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To improve efficiency of engines, according to the characters of a novel series-parallel hybrid electric bus (SPHEB) to define the operation area of ice, a kind of power balancing control strategy is adopted and the battery power is used as a variable to optimize the efficiency of fuel converter, and the PI control is implemented to control the SOC balance. To validate the proposed strategy's effectiveness and reasonableness, a forward model is built based on simulink and the simulation results demonstrate that the proposed strategy can successfully improve the efficiency of fuel economy up to 6.74% compared with that of equivalent fuel minimum control strategy, while the battery SOC is also limited in the desired range.

Key words: hybrid electric bus; control strategy; diesel engines; fuel economy; system efficiency

混合动力客车之所以相对传统客车节油,主要一点是混合动力客车可以利用蓄电池的缓冲器作用对发动机工作点进行主动调节,使其运行于高效区域或最佳效率曲线上,而决定混合动力城市客车发动机是否能够工作在高效区域内的关键技术为系统驱动管理和控制策略。目前基于以改善发动机工作效率的方法可以概括为 3 种^[1]:发动机最佳工作点控制策略、发动机最佳工作效率曲线控制策略和发

动机最佳工作区域控制策略。关于上述控制策略的研究,Ahn 等^[2]基于一款行星齿轮结构的混合动力系统,采用多目标优化分析方法推翻传统意见上的发动机最佳工作线而重新在发动机的工作空间定义了可用于混合动力能量管理实时控制策略的最佳工作线。王庆年等^[3]将发动机最佳工作效率曲线定义和电机最佳工作效率曲线定义为广义最佳工作效率曲线并制定了广义最佳工作效率曲线控制策略。王

收稿日期:2012-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075410)

作者简介:林歆悠(1981-),男,重庆大学博士研究生,主要研究方向为车辆动力传动及其综合控制。

孙冬野(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)dysun@cqu.edu.cn。

锋等^[4]基于系统各动力部件的能量转换效率对发动机进行稳态优化进而基于一款并联混合动力汽车进行最优转矩控制策略的应用^[5]。为了提升系统优化的可靠性,则是建立目标优化函数引入了优化算法,如动态规划^[6],遗传算法^[7]以及模拟退火^[8]等对发动机工作点进行优化,使经济性获得了很大的改善。

上述中大部分研究工作都是针对并联式混合动力汽车,很少有对混联式混合动力汽车在控制策略上工作的开展,如文献[9]对一款混联式混合动力客车设计了能量管理模糊控制策略,虽然对燃油经济性具有一定的改善,但是其忽略了电池荷电状态的管理。提高发动机的工作效率是提高燃油经济性的主要途径,调节发动机运行于最佳曲线上,即发动机工作点的优化问题,其关键点主要是如何与相对应电池工作点协调运行。针对该问题,以一款混联式混合动力客车为研究对象,采用一种考虑电池充放电效率(包括电机效率)的功率均衡控制策略对发动机工作点进行优化,并且引入了电池荷电状态的 PI 控制以使其在预设范围内保持平衡。

1 新型混联式混合动力系统模型

1.1 新型混联式动力系统介绍

研究的新型混联式混合动力系统的结构^[10]如图 1 所示,该混联式混合动力系统最主要的特点是:当自动离合器处于分离状态,动力系统成为串联结构,发动机的运行状态和车辆行驶工况无直接关系,此时只有主驱动电机直接向车辆提供驱动力;当自动离合器处于接合状态时,动力系统又可为并联结构,即发动机和两电机同轴通过驱动半轴连接到主减速器,此时发动机可和主驱动电机共同为车辆提供转矩,亦可单独驱动。另外由于该系统取消了变速器,处于并联结构时,发动机的转速与车辆行驶车速对应成比例。

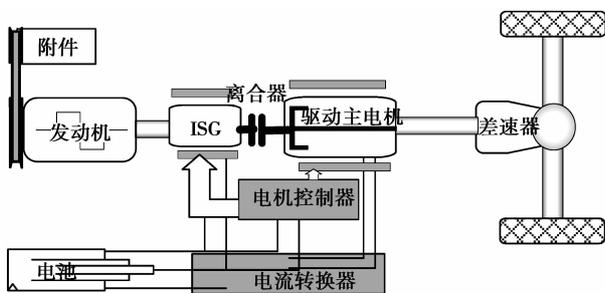


图 1 新型混联式混合动力系统

1.2 新型混联式动力系统建模

基于本文的研究方法,只考虑行驶工况的功率流在电池和发动机之间进行分配。为更清晰体现行

驶需求功率与各动力源的关系,对系统结构进行简化,结果如图 2,其中 $P_f(t)$ 为燃油发出的功率, $P_a(t)$ 为串联模式发动机与发电机组成的 APU 发出的功率, $P_e(t)$ 为并联模式发动机直接驱动车辆运行的功率, $P_b(t)$ 为电池发出或接收的功率,最后 $P_r(t)$ 为行驶循环工况中的需求功率。这里 $P_r(t)$ 是根据在给定已知典型循环工况的前提下,车辆在每一时刻 t 的车速 $v(t)$ 是已知量,由车辆动力学方程^[11]计算得出, t 时刻驱动整车运行的需求功率 $P_r(t)$ 为

$$P_r(t) = \omega(t)T_d(t) = v(t)F_d(t), \quad (1)$$

其中: $F_d(t) = M_v g [f_r \cos(\alpha(t)) + \sin(\alpha(t))] + \frac{C_d A v(t)^2}{21.15} + \delta M_v \dot{v}(t)$ 。

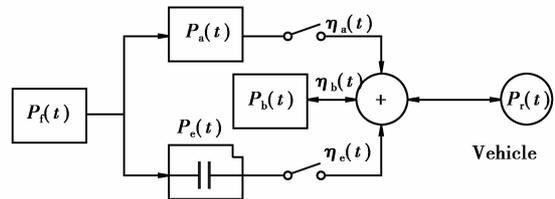


图 2 新型混联式简化功率模型

根据该混合动力系统的结构特点,分别串联和并联两种模式对动力系统进行数学模型的建立:

1) 当车辆运行处于串联模式时,发动机和车轮没有任何的机械联接,可控制发动机工作在最佳工作点,通过 ISG 电机传递功率给电池充电或直接给主电机驱动车辆,则在该运行工况下的动力系统表达式为

$$\left. \begin{aligned} P_a(t) &= -P_g(t) + P_{aux}, \\ \omega_e(t) &= \omega_o(P_e(t)), \\ P_m(t) &= P_r(v(t)). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: P_g 、 P_{aux} 、 P_m 分别为发电机发电功率、机械附件消耗功率及电机驱动功率; ω_e 、 ω_o 分别为发动机转速与最佳转速。

2) 如果车辆运行于并联模式,发动机可直接提供转矩和主电机一起驱动车辆,故动力系统可表示为

$$\left. \begin{aligned} T_e(t) &= T_r(t) + T_{aux} - T_m(t) - T_g(t), \\ \omega_e(t) &= \omega_g(t) = \omega_m(t) = i_0 \omega_w(t). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: T_r 同样为驱动车辆运行的需求转矩; T_e 、 T_a 、 T_m 、 T_g 分别为并联模式时的发动机转矩、机械附件转矩、电机驱动转矩、发电机转矩; ω_g 、 ω_m 、 ω_w 分别为发电机转速、电机转速、车轮转速; i_0 为主减速比。

但是为统一表达式将式(2)、(3)进行简化如下:

$$\left. \begin{aligned} P_r(t) &= P_a(t) + P_b(t), \\ P_r(t) &= P_e(t) + P_m(t) + P_g(t) = P_e(t) + P_b(t). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2 发动机优化控制策略

以能量管理的角度出发,将发动机工作点控制在高效区域内或最佳效率曲线上,则其控制目标可表述为

$$f = \max(\eta_e) \quad (5)$$

根据所研究的混联式混合动力系统结构可知,发动机以两不同能量的形式对车辆进行驱动,由式(4)可知,无论是采用电能或直接机械能驱动都统一表达成功率的形式,其功率和效率的关系如图 3 所示,控制目标具体实现将由以下内容展开论述。

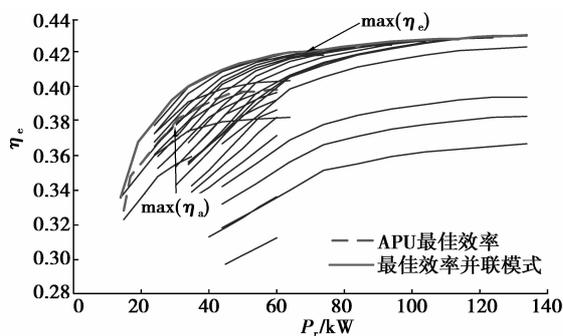


图 3 柴油发动机功率效率图

2.1 发动机运行区域划分

为方便表述并实现控制目标,人为设定发动机的运行区域。根据柴油机特性,以怠速和最小最优转矩为发闭发动机的临界线,如图 4 所示,以 S 表示发动机的状态,即关闭停止供油时为 0,供油运行时为 1,其具体表达式为

$$S = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega < 900, 0 \leq T < T_{\min_opt}; \\ 1, & 900 \leq \omega, T_{\min_opt} \leq T. \end{cases} \quad (6)$$

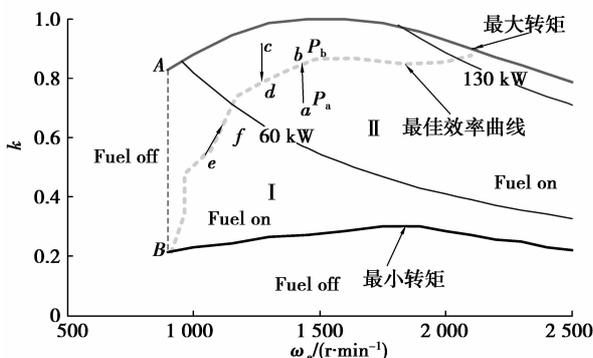


图 4 柴油发动机特性图

由于存在着串联模式和并联模式以及在串联模式中 ISG 运行功率的限制,所以发动机和 ISG 电机

组成的 APU 系统的运行区域就设定在 I 区内,即恒功率线 60 kW 和最小转矩曲线所构成的区间;对于并联模式,理论上可以运行在 I、II 两个区间,但是为了更好地提高发动机工作效率,这里将发动机的并联模式设定在 II 区内,即恒功率线 60、130 kW 以及最大转矩曲线所构成的区域,如图 4 所示。

2.2 发动机优化控制策略

根据式(4)可知,可利用电池作为能量系统的缓冲器,即控制电池的工作状态对发动机工作点进行调节,借鉴文献[12]的控制方法,以运行于并联模式时为例,假设 a 点为发动机单独驱动时长 t_1 所输出的功率 P_a ,由发动机效率图 4 可知,此时发动机没有运行于最佳效率曲线,通过控制 ISG 电机将发动机的工作点带到最佳效率曲线上,即 b 点,发动机以 t_2 的时长输出功率为 P_b ,此时为保持功率平衡,将多余的功率给电池充电,经过 t_2 后关闭发动机,在剩余的时间 $t_1 - t_2$ 内电池必须发出功率 P_a 以满足驱动功率的需求(如图 5 所示),根据功率均衡原则可得

$$(P_b - P_a)t_2 = \frac{P_a}{\eta_d \eta_c} (t_1 - t_2) \quad (7)$$

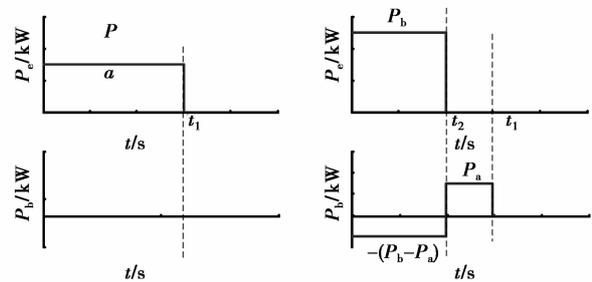


图 5 功率均衡示意图

由于利用电池的缓冲器作用以提高燃油的使用效率,因此混合驱动模式的能量损失应该少于发动机单独驱动模式,据此可得

$$P_b t_2 \left(\frac{1}{\eta_b} - 1 \right) + (P_a t_1 - P_a t_2) \left(\frac{1}{\eta_d \eta_c} - 1 \right) \leq P_a t_1 \left(\frac{1}{\eta_a} - 1 \right) \quad (8)$$

由式(10)可得, t_2 和 t_1 的关系

$$t_2 = \frac{P_a t_1}{\eta_d \eta_c P_b + (1 - \eta_d \eta_c) P_a} \quad (9)$$

联合式(8)和(9)可得

$$\eta_a \leq \frac{\eta_b}{P_b} (P_a + (P_b - P_a) \eta_{dis} \eta_{chg}) \quad (10)$$

根据式(10)可知,通过控制电池的工作状态可

以实现提高发动机效率及系统效率。据此,将以此思想为基础制定功率均衡整车控制策略。

2.3 整车功率均衡控制策略的制定

2.3.1 模式切换规则确定

对于该混动式混合动力系统,存在着串联和并联两种运行模式,从其结构可以很清楚得知控制离合器的状态就可实现串联和并联两种运行模式的转换,由于该系统的特殊性,取消变速器发动机转速与车速直接成固定比例关系,考虑到结构本身存在的物理限制^[13],即发动机低速时的高燃油消耗,所以串联与并联之间转换的基本前提是确保发动机工作在最佳效率区域内,如发动机特性图 4 所示,当发动机转速大于 1 000 r/min 时,发动机则可以很容易控制在高效区域内,则选择转速为 1 000 r/min 作为串联和并联之间转换的临界条件,也是控制离合器状态的基本前提条件,其中 900~1 000 r/min 为离合器预接合过程,由此可得离合器的基本控制信号如图 6 所示,其表达式为

$$K = \begin{cases} 0, \omega_{sw} \leq 900 \text{ r/min}; \\ \frac{\omega_{sw} - 900}{100}, 900 < \omega_{sw} < 1\,000 \text{ r/min}; \\ 1, 1\,000 \leq \omega_{sw}. \end{cases} \quad (11)$$

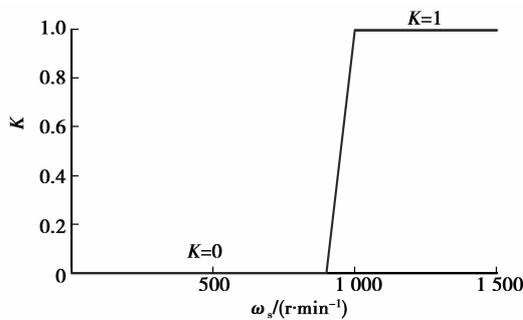


图 6 离合器控制信号

2.3.2 功率均衡规则制定

当 $K=0$ 时,系统运行于串联模式,此时驱动电机作为主要驱动力,其驱动功率用于满足行驶需求,可表示为

$$P_r(t) = P_m(t) = P_b(t) + P_a(t). \quad (12)$$

由式(12)可知,此时的运行模式有:

- 1) $P_a(t)=0, P_b(t)>0$, 此时电机单独驱动;
- 2) $P_a(t)>0, P_b(t)<0$, 此时 APU 驱动并给电池充电;
- 3) $P_a(t)>0, P_b(t)>0$, 此时 APU 与电机联合驱动。

当 $K=1$ 时,系统运行于并联模式,此时驱动电机和发动机均可作为驱动力,故满足系统的功率平衡方程为

$$P_r(t) = P_m(t) + P_e(t) = P_b(t) + P_e(t). \quad (13)$$

由式(13)可知,此时的运行模式有:

- 1) $P_e(t)>0, P_b(t)=0$, 此时为发动机单独驱动;
- 2) $P_e(t)>0, P_b(t)<0$, 此时为发动机驱动并给电池充电,亦行车充电模式。
- 3) $P_e(t)>0, P_b(t)>0$, 此时为发动机和电机联合驱动或电机助力模式。

2.3.3 电池 SOC 控制

单纯的功率均衡控制策略并不能很好地维持电池荷电状态的平衡^[14],为此引入电池荷电状态的 PI 控制,采用 P 和 I 惩罚系数对电池荷电状态的波动范围进行控制,如图 7 所示。PI 控制的表达式为

$$f_p(\text{SOC}(t)) = 1 - S_b(t)^n, n = 2k + 1, k \in N, \quad (14)$$

$$f_i(\text{SOC}(t)) = \begin{cases} 1 - a \cdot D_{\text{SOC}}(t)^3, D_{\text{SOC}}(t) \geq 0; \\ 1 - b \cdot D_{\text{SOC}}(t)^3 + c \cdot D_{\text{SOC}}(t)^4, D_{\text{SOC}}(t) < 0. \end{cases} \quad (15)$$

式中: $S_b(t) = \frac{\text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{ave}}}{\text{SOC}_{\text{ave}}}$, $-1 \leq S_{\text{batt}}(t) \leq 1$;

$D_{\text{SOC}}(t) = \text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{ave}}$; a, b, c 均为拟合系数。

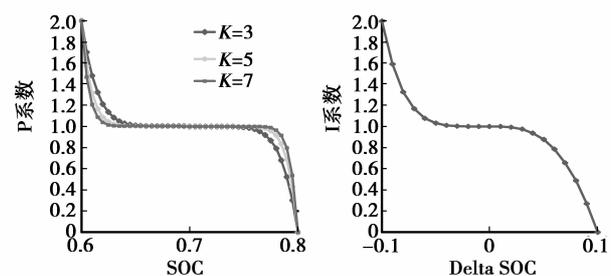


图 7 PI 惩罚函数

2.3.4 控制策略实现与示例

基于上述分析可知,实现发动机优化控制策略可等价于在电池的工作范围寻求一个最佳的电池功率使得发动机工作在最佳效率曲线上或高效区域内,设定电池功率为变量^[15],则目标方程可表达为

$$J = \max(\eta_{\text{ice}}(P_{\text{req}}(t) - u)), u = P_{\text{batt}}, \quad P_{\text{batt_min}} \leq P_{\text{batt}} \leq P_{\text{batt_max}}. \quad (16)$$

采用串联模式时, P_{batt} 取负值、零、正数 3 种情

况进行说明,如图 8 所示,具体数值见表 1。

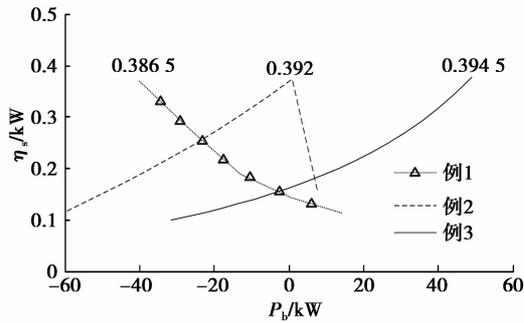


图 8 电池功率与发动机效率的关系

表 1 优化控制策略示例

示例	P_{req}/kW	SOC	$\max(\eta_{ee})$	P_{batt_opt}/kW
1	15	0.580	0.386 5	-40
2	50	0.625	0.392 0	0
3	95	0.650	0.394 5	50

3 仿真及结果分析

为验证所制定的功率均衡发动机优化控制策略的合理性,以混联式混合动力整车参数:满载质量为 $M=15\ 500\text{ kg}$,迎风面积 $A=7.45\text{ m}^2$,风阻系数 $C_d=0.62$,车轮半径 $r=0.527\ 5\text{ m}$,轴距 $L=4.3\text{ m}$,主减速比 $i_0=6.2$ 等为基础,基于 matlab/simulink 平台建立的子系统(发动机、ISG 电机,驱动主电动机、镍氢电池,具体参数如表 2)数值模型与利用控制理论和汽车动力学建立的驾驶员模型和基于功率均衡优化控制策略(power balancing optimization, PBO)的整车控制器等理论模型建立整车前向仿真模型。

表 2 新型混联式动力系统参数

	参数	数值	单位
柴油发动机	最大功率 P_{e_max}	136	kW
	最大扭矩 T_{e_max}	700 @1 600 r/min	N·m
	转速范围 N_e	900~2 500	r/min
主电机	额定功率 P_m	90	kW
	最大扭矩 T_{m_max}	1 450	N·m
	转速范围 N_m	0~2 500	r/min
ISG 电机	额定功率 P_{isg}	30	kW
	最大扭矩 T_{isg_max}	400	N·m
	转速范围 N_{isg}	0~2 500	r/min
电池	容量 C_b	60	A·h
	标称电压 U_0	336	V

基于上述整车仿真模型,以 $SOC=0.6$ 为初始值,采用中国城市典型循环工况进行仿真,其结果如图 9 所示,发动机和电池的功率之和,始终都能够吻合驱动需求功率。为了更好地说明所制定的优化策略的合理性,把采用等效燃油控制策略(ECMS)的结果作为基准进行比较,如图 10、11 所示。由图 10 可知,采用所制定的 PBO 控制策略的 SOC 运行趋势比采用 ECMS 的更为平缓,但基本在一定范围内保持平衡;在燃油消耗量方面,PBO 比 ECMS 略少一些,通过计算其综合百公里油耗 PBO 比 ECMS 降低 6.74%。由图 11 可知,PBO 所获得的发动机工作点较 ECMS 的更为集中于高效区域内。

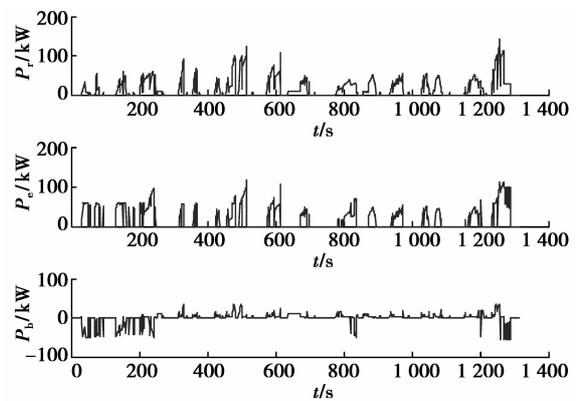


图 9 功率均衡仿真结果

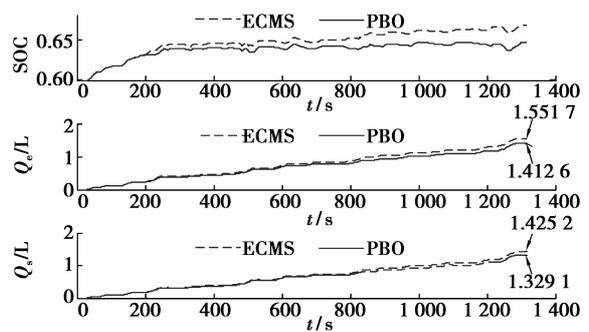


图 10 SOC 和燃油消耗仿真结果

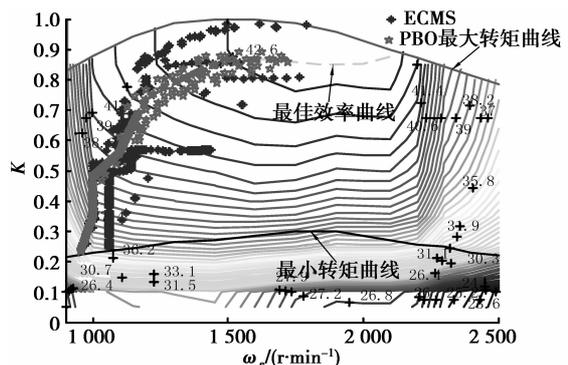


图 11 发动机工作点仿真结果

综上所述,所采用的功率均衡控制策略在优化发动机工作效率方面确实合理而且有效,不仅可以很好地保持电池荷电状态的平衡,而且也很好地将发动机工作点控制在最佳效率曲线上或其周围的高效区域内。

4 结 语

针对一款混联式混合动力客车的结构特点,以考虑动力部件(电池,发动机)整体效率为出发点对发动机的工作点进行优化,并且引入了 PI 控制函数对电池荷电状态进行管理,通过仿真实验结果表明,所采用的功率均衡控制策略在优化发动机工作效率方面确实合理而且有效,不仅可以很好地保持电池荷电状态的平衡,而且也很好地将发动机工作点控制在最佳效率曲线或其周围的高效区域内,燃油经济性也得到了相应的改善。随着研究的深入,下一步的研究工作侧重从系统整体效率对发动机工作点进行优化。

参考文献:

- [1] Wang B H, Luo Y G. Application study on a control strategy for a hybrid electric public bus [J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(1): 141-147.
- [2] Ahn K, Cho S, Cha S W. Optimal operation of the power-split hybrid electric vehicle powertrain [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(5): 789-800.
- [3] 王庆年, 孙树韬, 曾小华, 等. 并联混合动力客车广义最优工作曲线控制研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(5): 391-394.
WANG Qingnian, SUN Shutao, ZENG Xiaohua, et al. A study on the optimal operation line control strategy for hybrid electric bus [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(5): 391-394.
- [4] Wang F, Mao X J, Yang L, et al. Steady-state and idle optimization of internal combustion engine control strategies for hybrid electric vehicles [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(2): 58-64.
- [5] 王锋, 冒晓建, 卓斌. ISG 并联混合动力轿车最优转矩分配策略[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(5): 499-504.
WANG Feng, MAO Xiaojian, ZHUO Bin. Torque distribution for an integrated starter generator parallel hybrid electric car [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(5): 499-504.
- [6] Johansson L, Egardt B. Approximate dynamic programming applied to parallel hybrid powertrains [C]// Proceedings of the 17th World Congress, July 6-11, 2008, Seoul, Korea. Seoul: IFAC, 2008: 3374-3379.
- [7] 张昕, 宋建峰, 田毅, 等. 基于多目标遗传算法的混合动力电动汽车控制策略优化[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 36-40.
ZHANG Xin, SONG Jianfeng, TIAN Yi, et al. Multi-objective optimization of hybrid electric vehicle control strategy with genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 36-40.
- [8] Hui S. Multi-objective optimization for hydraulic hybrid vehicle based on adaptive simulated annealing genetic algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(1): 27 - 33.
- [9] Xiong W W, Zhang Y, Yin C L. Optimal energy management for a series-parallel hybrid electric bus[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(7): 1730-1738.
- [10] 郭晋晟, 王家明, 杨林, 等. 无级变速混联式混合动力客车能量分配策略[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 115-120.
GUO Jinsheng, WANG Jiaming, YANG Lin, et al. Energy assignment strategy for series-parallel hybrid bus with variable transmission [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 115-120.
- [11] Guzzella L, Sciarretta A. Vehicle propulsion systems[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 34.
- [12] Adhikari S, Halgamuge S K, Watson H C. An online power-balancing strategy for a parallel hybrid electric vehicle assisted by an integrated starter generator [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2689-2699.
- [13] Bianchi D, Roiando L, Serrao L, et al. A rule-based strategy for a series/parallel hybrid electric vehicle: an approach based on dynamic programming [C]// Proceedings of the ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, September 12-15, 2010, Cambridge, Massachusetts, USA. Cambridge: [s. n.], 2010: 1-8.
- [14] 朱庆林. 基于瞬时优化的混合动力汽车控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2009.
- [15] 林歆悠, 孙冬野, 秦大同, 等. 混联式混合动力客车全局优化控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(18): 2258-2263.
LIN Xinyou, SUN Dongye, QIN Datong, et al. Development of power-balancing global optimization control strategy for a series-parallel hybrid electric city bus [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2011, 22(18): 2258-2263.

(编辑 张 苹)