

并联混合动力汽车复合电源控制策略的研究^①

张京明^{②*} 任殿波^{*} 崔淑梅^{***} 宋宝玉^{**}

(^{*} 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院 威海 264209)

(^{**} 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

(^{***} 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院 哈尔滨 150001)

摘要 通过对复合电源在混合动力汽车(HEV)中应用的研究,设计了针对某款并联式混合动力汽车的复合电源结构,并对其效率特性进行了分析,提出了复合电源的功率分配控制策略以及电池给超级电容充电策略,基于 MATLAB/Simulink,建立了复合能量存储系统模型,并嵌入 ADVISOR 软件中,在城市道路循环 UDDS 工况下进行了仿真研究。仿真结果表明,通过采用该复合电源控制策略,可以充分发挥超级电容和蓄电池各自的优点,改善整车储能系统的存储效率,提高制动能量的回收效率。

关键词 混合动力汽车(HEV), 超级电容, 控制策略, 建模仿真

0 引言

随着全球气候逐步恶化、城市大气污染加剧和石油资源过度消耗,混合动力电动汽车越来越成为新型汽车开发的热点。蓄电池不能直接用于混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV),因为其比功率较低、循环寿命有限、更换费用较高以及低温工作性能差,会严重影响汽车的能量利用效率。而超级电容作为一种新型电源具有充放电迅速,可实现大电流快速充放电;动态特性好,循环效率高达 90% ~ 95%,循环寿命在 10 万次左右;控制简单、绿色环保^[1-3]等优点,因此,采用由蓄电池和超级电容组成的复合电源来代替单一蓄电池储能系统,可以很好地提高混合动力汽车的能量回收效率。鉴于目前国内对超级电容-蓄电池复合电源应用于混合动力汽车的研究较少,本文对并联混合动力汽车复合电源控制策略进行了建模分析以及仿真研究。

1 复合电源结构及效率特性

1.1 复合电源结构

蓄电池和超级电容并联构成的复合电源的连接形式一般有两种,第一种是蓄电池和超级电容分别

通过 DC/DC 转化器连接电机控制器,使用两个 DC/DC 控制器。这种连接方式的电池和超级电容的电压变化范围大,控制较方便,但是效率较低。第二种是电池和超级电容之间用一个 DC/DC 变换器连接,再与电机控制器连接,这种连接方式的电池和超级电容的电压变化范围小,但是控制的效率较高,其结构如图 1 所示。DC/DC 转化器控制蓄电池和超级电容之间的功率分配,并限制蓄电池在车辆低功率行驶时对超级电容的充电率^[4]。

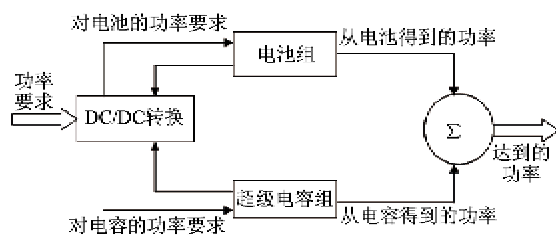


图1 复合电源的结构示意图

1.2 复合电源效率特性

电容组假设以恒定的电流 I 充放电,经时间 t ,电容器的电量从 Q_1 到 Q_2 ,电压从 U_1 到 U_2 ,则电容器组储存/释放的能量 E 为

$$E = \frac{Q_2^2 - Q_1^2}{2C} \quad (1)$$

① 863 计划(2006AA11A175)资助项目。

② 男,1964 年生,博士生,副教授;研究方向:汽车系统动力学及混合动力控制技术;联系人,E-mail: whjingming@163.com (收稿日期:2009-03-10)

可见,当电容的电量下降到一半时,能量变为原来的25%,如果继续让电容放电,能量利用率会很低,因此,设定电容的充放电区间为 $[0.5, 1]$ 。此时电容器组的内阻 R_c 消耗的能量 E_R 为

$$E_R = I^2 R_c t = \frac{(Q_1 - Q_2)^2 R_c}{t} \quad (2)$$

定义超级电容的时间常数 $\tau = RC$, 充放电深度 $\beta = U_1/U_2$ (充电)或 $\beta = U_2/U_1$ (放电),则由式(1)和(2)可得到充电效率 η_c 和放电效率 η_d :

$$\eta_c = \frac{E}{E + E_R} = \frac{t}{t + 2\tau \left(1 - \frac{2\beta}{\beta + 1}\right)} \quad (3)$$

$$\eta_d = \frac{E - E_R}{E} = 1 - \frac{2\tau}{t} \left(1 - \frac{2\beta}{\beta + 1}\right) \quad (4)$$

超级电容的充放电效率特性如图2所示。

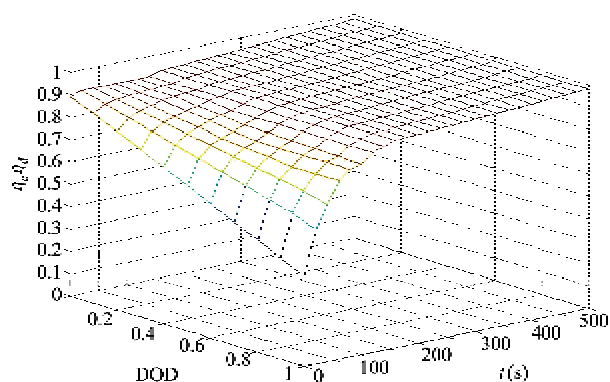


图2 充放电时间、深度和充放电效率的关系

为了使超级电容高效工作,其电量荷电状态值应取大些,存储在电容中的电能为

$$W = qU_c = \frac{1}{2} CU_c^2 \quad (5)$$

一般超级电容放电电压从 U_0 下降到 $U_0/2$, 即放电深度 $\beta = 0.5$ 时,超级电容的能量利用率为75%。从超级电容的充放电效率图上可以看出,放电时间常数相同时,放电时间越长,放电的效率越高;充放电时间相同时,放电时间常数越小,充放电效率就越高。

2 控制策略

复合电源的控制目标是:在保证整车动力性的前提下,充分发挥超级电容“削峰填谷”的作用,减小对电池的大电流冲击,延长电池的寿命,提高充放电的效率;最大限度地回收制动能量,提高整车的燃油经济性^[5,6]。依据控制目标,本文制定了相应的控

制策略——超级电容和蓄电池功率分配控制策略和电池给超级电容充电策略。

2.1 超级电容和蓄电池的功率分配

当电机需求功率较大时,快速变化的峰值功率可由复合电源中的电容提供,而余下的平均功率由电池提供,功率分配逻辑流程如图3所示。并在Matlab/Simulink中建立相应的功率分配策略模型如图4所示。根据以上功率分配策略,无论充电还是放电,蓄电池的功率一般不超过电机要求的平均功率,且变化平缓,有利于提高电池效率,延长使用寿命。

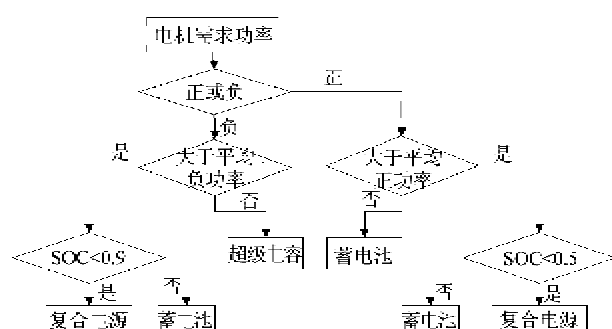


图3 功率分配逻辑流程图

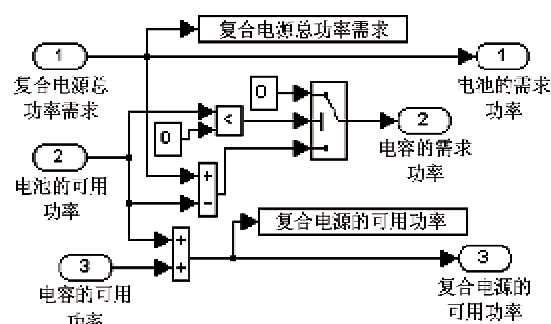


图4 功率分配模型

2.2 电池给超级电容充电策略

电池给超级电容充电的模型如图5所示。

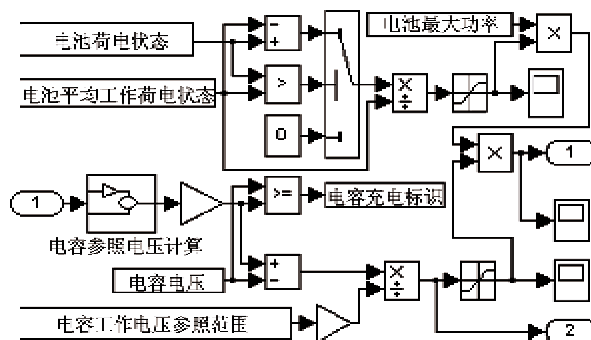


图5 电池给超级电容充电模型

当对电池的要求输出功率较小时,并且超级电容的荷电状态(SOC)已经很低的情况下(本文选定为0.7),要求电池给超级电容充电。此时,电池既要满足电机对电池的功率要求,还要满足对超级电容的充电功率要求,如果两个条件有一个不满足,那么只有满足电机的功率要求,而不需要给超级电容充电。并且,在电机功率小于0时,即能量回收时,禁止电池再给超级电容充电。

电池给超级电容的充电策略可以表达为:

$P_M > 0$ 且 $cap_soc < 0.7$ 时, $P_{bat} = P_M + P_{cap}$; 否则, $P_{bat} = P_M$ 。其中 P_M 为电机功率(kW), cap_soc 为超级电容荷电状态, P_{bat} 为蓄电池功率(kW), P_{cap} 为超级电容功率(kW)。

限制电池对电容的充电功率,目的是减小电池的放电电流,减小大电流对电池的损坏,延长电池的寿命。根据功率分配原理,使电池的效率较高时确定的电机对电池的最大功率要求为 P_{bmax} , 那么,电池对电容的充电功率应该根据电池的 SOC 值确定充电功率大小为

$$P_{capg} = P_{bmax} \times \frac{b_soc - (b_hi_soc + b_lo_soc)/2}{(b_hi_soc - b_lo_soc)/2} \quad (6)$$

式中, P_{capg} 为电池给电容充电功率(kW), P_{bmax} 为电池最大放电功率(kW), b_soc 为蓄电池荷电状态, b_hi_soc 为蓄电池荷电状态最大值, b_lo_soc 为蓄电池荷电状态最小值。

而电池给超级电容充电的多少是由电容的参考电压决定的。超级电容的参考目标电压受车速动态控制;当车速很高时,汽车可能要减速,电容应该有足够的容量来回收制动能量,因此,此时超级电容的参考目标电压应该较低,电池不应该给超级电容充很多电量;当车速很低时,汽车可能要加速,参考目标电压应该设置高一点,让电池多给超级电容充电,为汽车加速时超级电容放电做好准备。

超级电容的节数、电压与车速、最高车速之间的关系式为:

$$\frac{1}{2} C \cdot (U_{cap}^{max2} - U_{cap}^{min2}) \cdot N = \frac{1}{2} m V_{car}^{max2} \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} C \cdot (U_{cap}^{max2} - U_{cap}^2(t)) \cdot N = \frac{1}{2} m V_{car}^2(t) \quad (8)$$

式中, N 为超级电容的节数, C 为超级电容的容量(Ah), U_{cap}^{max} 为超级电容单节最高电压(V), U_{cap}^{min} 为超级电容单节最低电压(V), $U_{cap}(t)$ 为超级电容目标电压(V), $V_{car}(t)$ 为实时车速(km/h), V_{car}^{max} 为最

高车速(km/h), m 为整车质量(kg)。

可得到超级电容的电压与车速之间的关系为:

$$\frac{U_{cap}(t)}{U_{cap}^{max}} = \sqrt{1 - (1 - k^2) \cdot \left(\frac{V_{car}(t)}{V_{car}^{max}} \right)^2} \quad (9)$$

以上计算出了电容的目标电压 $U_{cap}(t)$, 而电容的实际电压 U_{real} 可以通过传感器测得。控制器根据测得的电压值和计算出的目标电压值比较,决定电容电量盈亏状况,进一步决定电池给电容充电电量。

具体工作状况如下:

当 $U_{real} = U_{cap}(t)$ 时,电池输出功率为0。

当 $U_{real} < U_{cap}(t)$ 时,电容处于亏电状态,电池为电容充电功率为

$$P_{soc} = P_{chg} \cdot \frac{U_{real} - U_{cap}(t)}{\frac{1}{2} (U_{cap}^{max} - U_{cap}^{min})} \quad (10)$$

式中, P_{soc} 为电容充电功率(kW), P_{chg} 为电容充电功率系数。

当 $U_{real} > U_{cap}(t)$ 时,电容处于盈电状态,电容能够放电,放电功率为

$$P_{edisc} = P_{dischg} \cdot \frac{U_{real} - U_{cap}(t)}{\frac{1}{2} (U_{cap}^{max} - U_{cap}^{min})} \quad (11)$$

式中, P_{edisc} 为电容放电功率(kW), P_{dischg} 为电容放电功率系数。

3 仿真分析

基于上述控制策略,利用 MATLAB/Simulink 建立复合能量存储系统模型(如图6所示),并将其嵌入 ADVISOR 软件进行仿真^[7,8],仿真参数如表1所示。

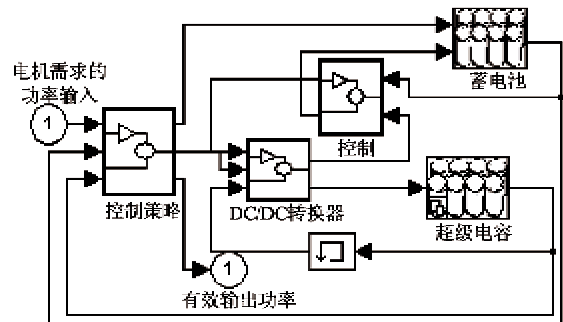


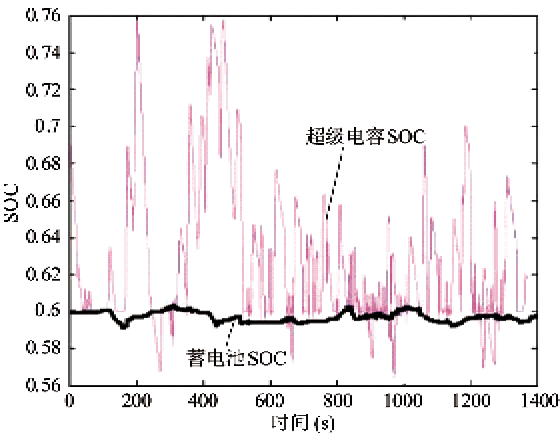
图6 复合能量存储系统模型图

表 1 仿真参数

车身参数	质量(kg)	1225
	轴距(m)	2.34
	质心至前轴距离(m)	1.404
	质心至后轴距离(m)	0.936
	质心高(m)	0.5
	风阻系数	0.335
	迎风面积(m ²)	2.13
电机参数	电机型号	永磁 49kw
	最大功率(W)	4.9×10^4
	最大电流(A)	400
发动机参数	发动机型号	Toyota 8A
	排量(L)	1.3
	最大功率(W)	$6.3 \times 10^4/6000\text{r/min}$
	最大转矩(N·m)	110/5200r/min
蓄电池	电池型号	NiMH 45Ah
	额定容量(A·h)	45
	额定能量(W·h)	598
	峰值功率(W)	3.3×10^3
超级电容	电容型号	SU0100P-0027V-1CA
	额定容量(F)	100
	额定能量(J)	360
	峰值功率(W)	207
其他参数	变速器参数	3.928 2.333 1.456 1.000 0.851
	电子设备功率(W)	700

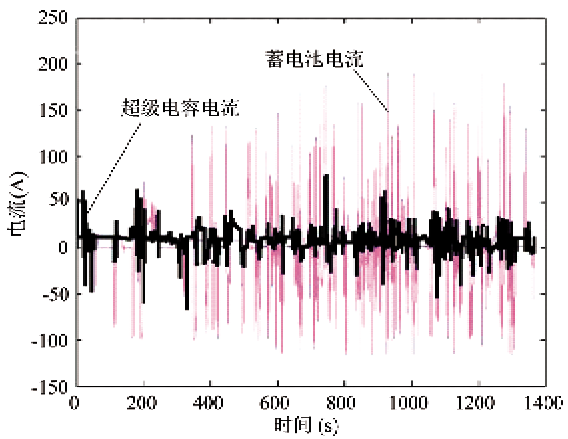
在 Advisor 中选择城市道路循环 UDDS 工况进行仿真,复合电源中蓄电池和超级电容的工作历程对比曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出,电池的电流要比超级电容的电流平稳,变化率也没有超级电容的大,超级电容对蓄电池的“削峰填谷”作用表现得比较明显。制定的

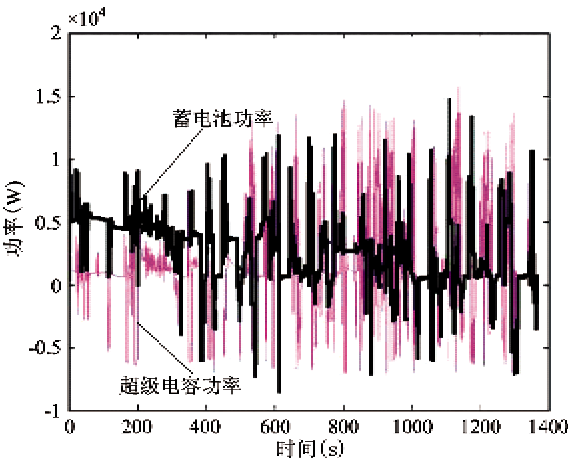


(a)SOC 曲线

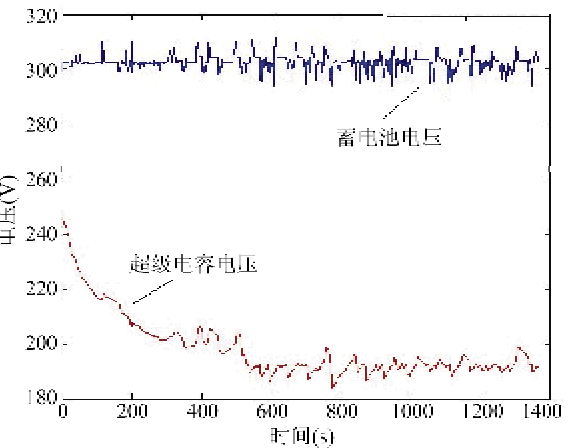
图 7 复合电源中蓄电池和超级电容各自工作曲线的对比



(b)电流曲线



(c)功率曲线



(d)电压曲线

图 7 复合电源中蓄电池和超级电容各自工作曲线的对比

复合电源控制策略很好地发挥了电池和电容各自的优势,提高了能量存储系统的工作效率。

图 8 为样车在 UDDS 多工况循环下的消耗的总能量、制动总能量以及回收能量曲线。驱动循环中整车消耗的总能量为 74841.2kJ,制动过程中消耗的总能量为 33603.5kJ,占总能量的 44.9%,采用复合

电源控制模型及策略后,回收的有效制动能量达到了 18785.1kJ,能量回收率提高到 25.1%,实现了混合动力汽车在 UDDS 工况循环下整车制动能量的高效回收。

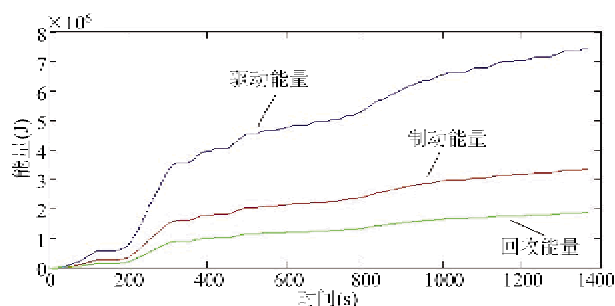


图 8 UDDS 工况下整车能量消耗变化

4 结 论

仿真研究表明,电池和电容的功率能够满足电机要求的前提下,超级电容的使用使得蓄电池的电流变化较为平稳,起到了“削峰填谷”的作用;复合电源的控制策略很好地发挥了电池和电容的优势,提高了蓄电池的工作效率;并且车辆采用基于超级电容复合电源的再生制动系统后,获得了较高的制动能量回收效率,证明了所建模型和控制策略的正确性。同时,超级电容的嵌入使用解决了电池比功率较低、循环寿命有限、更换费用较高以及低温工作性

能差等缺点。因此,对并联混合动力汽车复合电源控制策略的研究,对改善汽车能量存储效率,节约能源有着现实而重要的意义。

参考文献

- [1] 陈会世,仇斌,谢起成. 燃料电池电动汽车. 北京:清华大学出版社,2005. 31-36
- [2] 翟楠松,张东来,徐殿国等. 超级电容国内外研究及应用现状. 见:中国仪器仪表学会第九届青年学术会议论文集. 合肥:中国仪器仪表协会,2007.16-19
- [3] 曹秉刚,曹建波,李军伟等. 超级电容在电动车中的应用研究. 西安交通大学学报,2008,11: 1317-1322
- [4] 张靖. 超级电容蓄电池复合电源的研究与仿真: [硕士学位论文]. 武汉:武汉理工大学汽车工程学院,2005. 20-22
- [5] Philip P. Barker. Ultracapacitors and batteries for energy storage in heavy-duty hybrid-electric vehicles. In: Proceedings of the 22nd International Battery Seminar & Exhibit Broward County Convention Center Fort Lauderdale, Florida, USA, 2005.3. 14-17
- [6] 孙立清,陈伟. 纯电池电动客车超级电容器系统匹配和控制策略研究. 中国电动汽车研究与开发. 2002. 62-66
- [7] 李福文. 复合电源的参数匹配与控制策略研究: [硕士学位论文]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2006. 27-49
- [8] 徐大伟,周荣. 基于燃料电池和超级电容的混合驱动系统参数匹配与仿真. 天津汽车,2008, 3: 44-48

The research on a strategy for control of composite power in parallel hybrid electric vehicles

Zhang Jingming^{*}, Ren Dianbo^{*}, Cui Shumei^{***}, Song Baoyu^{**}

(^{*} Automotive Engineering Department, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209)

(^{**} Mechanical and Electrical Engineering School, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(^{***} Electrical Engineering and Automation School, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

The application of composite power in hybrid electric vehicles was studied. The structure of composite power for a certain parallel hybrid electric vehicle was designed and its efficiency characteristic was researched. The strategy for control of power distribution of composite power and the strategy for the batteries to charge the supercapacitor were established. The model of a composite energy storage system was established in MATLAB/ Simulink. Then, the simulation model was embedded in the ADVISOR software and was simulated on the UDDS driving cycle. The simulation results show that the supercapacitor and batteries can give full play to their respective advantages when the control strategy of composite power is adopted, so the efficiency of the vehicle energy storage system can be enhanced and a higher efficiency of the braking energy recovery can be obtained.

Key words: hybrid electric vehicle (HEV), supercapacitor, control strategy, modeling and simulation