

基于小波变换-模糊控制的复合电源能量管理

史江昆, 申彩英, 陈鑫

(辽宁工业大学, 辽宁, 锦州 121001)

摘要: 以锂电池-超级电容构成的复合电源电动汽车为研究对象, 在满足动力性能的前提下, 为实现超级电容在合理的荷电状态(SOC)下承担高频信号, 且锂电池承担低频信号的目标, 建立了实时小波变换-模糊控制的能量管理控制策略。基于Matlab/Simulink和ADVISOR软件搭建整车模型, 并在NEDC循环工况下进行仿真测试。仿真结果表明, 与单一锂电池相比, 在小波变换-模糊控制策略下, 复合电源锂电池的驱动峰值电流降低了20.68%, 寿命提高了16.74%。搭建了按一定比例缩小的复合电源系统试验平台, 并在NEDC工况下进行试验验证。结果表明, 小波变换-模糊控制策略对复合电源电动汽车的能量管理具有良好的控制效果。

关键词: 电动汽车; 小波变换; 模糊控制; 复合电源

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.01.02

Energy Management in Composite Power Supply Based on Wavelet Transform and Fuzzy Control

SHI Jiangkun, SHEN Caiying, CHEN Xin

(Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract: Focusing on a hybrid electric vehicle equipped with a lithium battery and supercapacitor, the paper establishes a real-time wavelet transform-fuzzy control energy management control strategy. The objective is to enable the supercapacitor to handle high frequency signals at a reasonable state of charge (SOC) and the lithium battery to manage low frequency signals, all under the premise of satisfying dynamic performance requirements. Secondly, the vehicle model was developed based on Matlab/Simulink and ADVISOR software, and simulation tests were carried out under NEDC cycle conditions. The simulation results show that, compared with the single lithium battery, the peak driving current of the lithium battery in the composite power supply is reduced by 20.68% and its lifespan is increased by 16.75% under the wavelet transform-fuzzy control strategy. Finally, a scaled-down experimental platform of the composite power system was built and tested under NEDC conditions. The experimental results show that the proposed control strategy effectively manages the energy of the hybrid electric vehicle.

Keywords: electric vehicle; wavelet transform; fuzzy control; composite power supply

收稿日期: 2023-06-09 改稿日期: 2023-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675257); 辽宁省教育厅自然科学基金项目(LJKMZ20220978)

参考文献引用格式:

史江昆, 申彩英, 陈鑫. 基于小波变换-模糊控制的复合电源能量管理[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(1): 14-23.

SHI Jiangkun, SHEN Caiying, CHEN Xin. Energy Management in Composite Power Supply Based on Wavelet Transform and Fuzzy Control[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(1): 14-23. (in Chinese)



日益严峻的能源短缺与环境污染问题使电动汽车成为研发热点，高效的能量利用率及零污染排放的环境友好性使其受到研究机构的青睐^[1]。以锂电池为主要能源、超级电容为辅助能源的复合电源系统可以弥补单一蓄电池在功率密度、环境温度以及循环寿命等方面的不足，从而满足电动汽车在急加速、爬坡等方面的峰值功率需求^[2]。当前复合电源系统能量管理的难点在于如何设计合理的控制策略，提高第二能源的能量利用率，并延长锂电池的循环使用寿命。此外，由于复合电源系统的结构设计较复杂，如何设计混合能源系统的拓扑结构，实现两种储能装置合理分配整车需求功率，显得尤为重要。

目前，复合电源能量管理控制策略有基于规则的能量管理方法和基于能量策略优化的方法。基于规则的能量管理方法主要有模糊控制策略、逻辑门限控制策略以及小波变换等。王维强等^[3]提出了双能源系统的再生制动力分配模糊控制策略，仿真显示该策略有效提高了能量回收效率，增加了电动汽车的续航里程。王永军等^[4]提出了基于小波规则的能量管理策略，结果显示该策略可以更好地抑制燃料电池的瞬态峰值功率。基于能量策略优化的方法主要有随机动态规划、粒子群优化等。田丽媛等^[5]提出了基于动态规划优化算法的纯电动汽车能量管理控制策略，减少了动力电池的能量消耗，提高了能量利用率。耿文冉等^[6]为了实现降低整车能耗和控制电池电量的双重目标，提出了基于粒子群优化的多目标能量管理策略。

虽然相关学者对复合电源能量管理策略进行了诸多研究，但忽略了车辆在行驶过程中频繁变化的高功率信号对锂电池的冲击。由于锂电池的化学性质，当其频繁受到高频率或快速变化的电流冲击时，不仅会减少循环使用寿命，还会对其耐久性产生负面影响。为了更好地解决这一问题，现阶段主要采用小波变换算法对整车需求功率进行滤波处理，小波变换能把整车需求功率分为高频信号和低频信号，利用超级电容吸收高频信号，进而延长锂电池寿命。但小波变换不能实时监测储能装置的

SOC 变化^[7]，为了实现超级电容在合理的 SOC 下承担高频率信号，同时锂电池承担低频率信号的目标，本文提出了一种基于小波变换-模糊控制的复合电源能量管理策略，不仅对整车需求功率进行分解，还维持了超级电容在合理的 SOC 范围内工作，从而减少高频电流对锂电池的冲击，降低锂电池的峰值电流，延长循环使用寿命，提高整车经济性能^[8]。

1 复合电源系统设计

1.1 复合电源拓扑结构

动力电池、超级电容和 DC/DC 转换器之间的不同组合方式形成了多种拓扑结构，主要有被动并联式、半主动控制式和主动控制式 3 种^[9]。被动并联式拓扑结构只能靠阻抗来输出电流，导致超级电容器的利用率很低；主动控制式拓扑结构复杂，使用成本高。为了充分发挥两种能源的优势，结合锂电池和超级电容器的工作特性，最终确定采用超级电容器与双向 DC/DC 转换器串联后再与锂电池并联的这种半主动控制式结构。复合电源系统的拓扑结构如图 1 所示，双向 DC/DC 变换器的电路如图 2 所示。

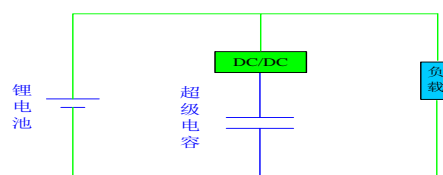


图 1 复合电源系统的拓扑结构

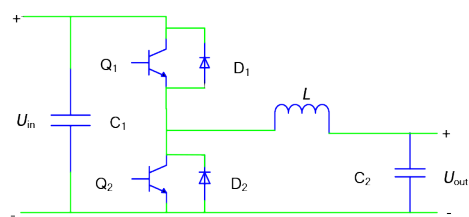


图 2 双向 DC/DC 变换器的电路

图中： U_{in} 、 U_{out} 分别为变换器的输入电压和输出电压； Q_1 、 Q_2 为开关； D_1 、 D_2 为二极管； C_1 、 C_2 为滤波电容； L 为电感。

1.2 DC/DC 转换器模型

结合文献可知，储能系统与驱动电机之间通过功率进行能量传递，但在传递过程中易受转换效率特性的影响，因此，选择效率模型作为仿真模型^[10]。其效率 η 的表达式为：

$$\eta = \frac{U_{out} I_{out}}{U_{in} I_{in}} \quad (1)$$

式中： U_{in} 、 U_{out} 为转换器的输入电压和输出电压； I_{in} 、 I_{out} 为转换器的输入电流和输出电流。

基于 Matlab/Simulink 搭建 DC/DC 效率模型，如图 3 所示。

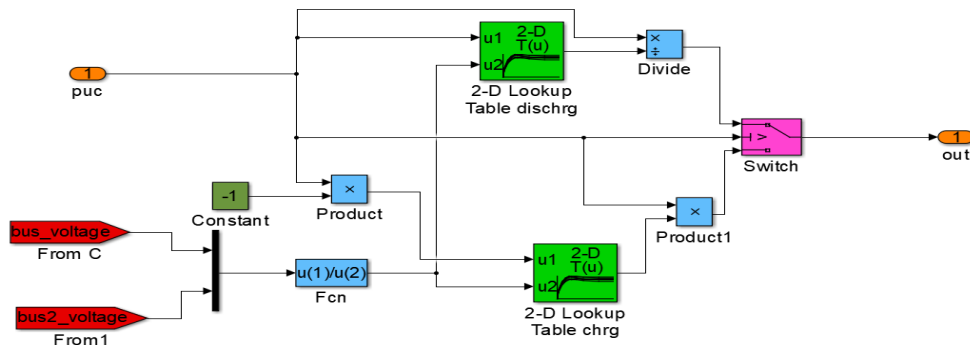


图 3 DC/DC 转换器效率模型

1.3 车辆参数

1.3.1 整车基本参数

依据国标 GB 1589—2016^[11] 的规定，结合市面上某款电动汽车的技术参数，列举整车部分参数见表 1。

表 1 整车部分基本参数

参数	值
整备质量/kg	1 361
空气阻力系数	0.25
滚动阻力系数	0.015
迎风面积/m ²	2.3
旋转质量换算系数	1.1
轴距/m	2.55
车轮滚动半径/m	0.32
传动效率	0.97
电机功率/kW	75

1.3.2 复合电源系统基本参数

对于复合电源系统的车型而言，合理地配置锂电池和超级电容器的数目，可以有效减轻整车质量。复合电源系统的主要参数见表 2。

1.3.3 整车性能指标

根据国标 GB/T 28382—2012^[12]、GB/T 18385

—2005^[13] 中的相关政策，制定整车具体性能指标见表 3。

表 2 复合电源系统主要参数

类型	名称	参数
锂电池	额定电压/V	3.2
	额定容量/Ah	6
	串联数目/节	87
	并联数目/节	30
超级电容器	额定电压/V	2.7
	额定容量/F	3 000
	串联数目/节	119

表 3 整车性能指标

参数	值
最高车速/(km/h)	160
0-100 km/h 加速时间/s	10
最大爬坡度/%	20
综合工况续航里程/km	170

为了确保计算结果的准确性，在 NEDC 工况下对整车模型进行仿真，通过仿真结果可知，0-100 km/h 加速时间为 6.6 s，最高车速为 170 km/h，最大爬坡度为 25%，综合工况行驶里程为 240 km，进而验证电机功率、超级电容器和锂电池的单体数量的选择符合要求。

2 复合电源能量管理策略

复合电源能量管理控制策略的最终目的，是在满足整车动力性能的前提下，以锂电池为主要能源，超级电容器为辅助能源，使超级电容尽可能承担较大的峰值电流；在车辆制动过程中，超级电容优先接受回馈电流。

首先利用实时小波变换算法将汽车需求功率信号分解成高、低频两个部分；其次提取高频功率信号；最后将高频功率信号、锂电池 SOC 和超级电容 SOC 三个变量输入模糊控制器，经过模糊推理机制，输出为超级电容器的比例因子 K 。控制策略如图 4 所示。

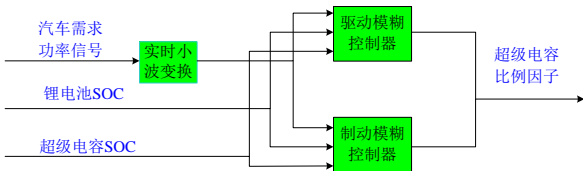


图 4 实时小波变换-模糊控制策略

2.1 小波变换控制策略

由于汽车在行驶过程中频繁受到高频信号冲击，导致锂电池的使用寿命大大减少，为了改善这种情况，本文提出小波变换控制策略，将整车需求功率分解成高频信号和低频信号，超级电容吸收高频信号。

2.1.1 小波变换算法

定义系统的输入功率信号为 $x(t)$ ，利用 Mallat 算法对输入功率信号进行分解，计算如式 (2)~(3) 所示。

$$S_{2^j}x(n) = \sum_{k \in Z} h_k S_{2^{j-1}}x(n - 2^{j-1}k)。 \quad (2)$$

$$W_{2^j}x(n) = \sum_{k \in Z} g_k S_{2^{j-1}}x(n - 2^{j-1}k)。 \quad (3)$$

式中： $S_{2^j}x(n)$ 、 $W_{2^j}x(n)$ 分别为分解后的高、低频功率信号，与其对应的分别是高通滤波器 $h_k(H(\omega))$ 、低通滤波器 $g_k(G(\omega))$ ，如式 (4)~(5) 所示。

$$H(\omega) = \sum_{k \in Z} h_k e^{-ik\omega}。 \quad (4)$$

$$G(\omega) = \sum_{k \in Z} g_k e^{-ik\omega}。 \quad (5)$$

在分解过程中，会产生最高层次近似系数和所有层次细节系数，如式 (6)~(7) 所示。

$$cA_1(k) = \sum_n h_0(n - 2k) cA_0(n)。 \quad (6)$$

$$cD_1(k) = \sum_n h_1(n - 2k) cA_0(n)。 \quad (7)$$

用最高层次近似系数 $cA_1(k)$ 表示低频部分，其余的细节系数 $cD_1(k)$ 表示高频部分，两者之和为原始功率信号的全部信息，即：

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_k cA_0(n) \varphi_{j,k}(t) \\ &= \sum_k cA_1(n) \varphi_{j-1,k}(t) + \sum_k cD_1(n) \omega_{j-1,k}(t) \\ &= A_1(t) + D_1(t)。 \end{aligned} \quad (8)$$

由于 Haar 小波在时域中的滤波短且正逆变换相同，所以得到广泛应用^[14]。文献 [15] 中的研究表明，采用 3 阶 Haar 小波对整车需求功率信号分解的准确率更高，因此，本文采用 3 阶 Haar 小波对汽车需求功率信号进行分解。即：第 1 层分解出低频信号 A_1 和高频信号 D_1 ，随即对低频信号 A_1 进行第 2 层分解得到低频信号 A_2 和高频信号 D_2 ，依次类推，最终超级电容接受高频信号 $D_1 + D_2 + D_3$ ，锂电池接受低频信号 A_3 。

2.1.2 滑动窗口大小的确定

为了确保车辆在行驶过程中快速实现功率信号在两种储能装置之间的实时分配，需要设计一个滑动窗口^[16]，即在滤波过程中，选取一段固定长度的矩形窗以固定的速率向前移动并实时采集数据，将采集的数据进行小波变换以达到实时性效果^[17]。而 Mallat 算法对数据数量的要求为 2 的整次幂，因此，滑动窗口长度的大小为 2^j ， $j \in Z$ 。为了确定合理的滑动窗口长度，取长度为 4、8、16、32、64、128 的滑动窗口分别在 NEDC 工况下进行电池平均功率变化率测试，结果显示，随着滑动窗口长度的增加，电池平均功率变化率在逐渐减小，在滑动窗口长度大于 16 时，电池平均功率变化率不再变动，即实时小波变换已经达到最优效果。在确保滤波效果良好的前提下，为了提高实时小波变换的速度，滑动窗口的长度应尽可能小。因此，滑动窗口的长度为 32。

2.1.3 小波分解层数的确定

设定系统的采样频率为 f_s ，电池工作频率上限为 f_c ，滑动窗口的长度为 L ，则分解层数 n 与三者的关系如式(9)~(10)所示。

$$n = \text{round} \left[\frac{\lg(f_s/f_c)}{\lg 2} - 1 \right] \quad (9)$$

$$n \leq \lg_2^L \quad (10)$$

设定系统的采样频率为1 Hz，锂电池的工作频率范围为 $[10^2, 10^1]$ ，代入式(9)和式(10)，得到分解层数的范围是 $[2, 5]$ 层。以超级电容与锂电池的输出能量之比为信噪比，通过对比不同分解层数的信噪比来确定最终的小波分解层数。基于NEDC工况对Haar小波进行仿真测试，结果显示，随着分解层数的增加，信噪比的数值逐渐变小，最大值为7.2，最小值为1.3。这表明分解层数越高，得到的高频信号越多，对锂电池的保护作用越强。因此，小波变换的分解层数为5。

2.2 模糊控制策略

由于模糊控制策略在鲁棒性、容错能力、语言规则理解等方面具有很强的优势，所以采用模糊控制规则将超级电容的SOC控制在合理的范围内，使其充分发挥“削峰填谷”的作用。此外，模糊控制策略需遵循以下规则：

1) 当汽车需求功率 $P_r > 0$ 时，在满足汽车动力性的前提下，使锂电池安全稳定地输出电流，超级电容负责高峰值的驱动电流；

2) 当汽车需求功率 $P_r < 0$ 时，即车辆处于制动或减速状态，可最大限度地使超级电容接收回馈能量。

2.2.1 模糊控制器的设计

电动汽车复合电源的工作模式分为驱动模式与制动模式，由于复合电源在两种工作模式下的需求功率不同，则需要设计两种不同的模糊控制器以达到更好的控制效果。两种模糊控制器均采用Mamdani结构，即以汽车需求功率 P_r 、锂电池SOC(SOC)、超级电容SOC(SOC₂)为输入变量，超级电容器输出的比例因子 K 为输出变量。

2.2.2 输入、输出变量的隶属度函数

驱动模式下：汽车需求功率 P_r 的模糊论域为 $[0, 1]$ ，模糊子集为 $[Z1, S1, M1, H1, N1]$ ，隶属度函数均为梯形；SOC的模糊论域为 $[0, 1]$ ，模糊子集为 $[Z1, S1, M1, H1, N1]$ ，Z1和N1设为高斯形，其余设为三角形；SOC₂的模糊论域为 $[0, 1]$ ，模糊子集为 $[Z1, S1, M1, H1, N1]$ ，Z1和N1设为高斯形，其余设为三角形；比例因子 K 的模糊论域为 $[0, 2]$ ，模糊子集为 $[Z1, Z2, S1, M1, H1, N1, N2, N3, N4, N5, N6]$ ，Z1和N5设为高斯形，其余均设为三角形隶属度函数。

制动模式下：汽车需求功率 P_r 的模糊论域为 $[0, 1]$ ，模糊子集为 $[Z1, S1, M1, H1, N1]$ ，隶属度函数均为梯形；SOC的模糊论域为 $[0, 1]$ ，模糊子集为 $[Z1, S1, M1, H1, N1]$ ，Z1和N1设为高斯形，其余设为三角形；SOC的模糊论域为 $[0, 1]$ ，模糊子集为 $[Z1, S1, M1, H1]$ ，Z1和H1设为高斯形，其余为三角形；比例因子 K 的模糊论域为 $[0, 1.9]$ ，模糊子集为 $[Z1, Z2, S1, M1, N1, N2, H1, N3, N4, N5]$ ，Z2、S1、M1和N1设置成梯形，其余设为三角形隶属度函数。

其中，Z1, S1, M1, H1, N1代表的实际意义分别是很小、小、中、大、很大；Z1, Z2, S1, M1, H1, N1, N2, N3, N4, N5, N6代表的实际意义是依次表示程度加大。

2.2.3 模糊控制规则

模糊规则的制定多是通过If-and-Then等条件语句来体现逻辑化思维^[10]。列举驱动及制动模式下的部分模糊规则见表4。

综上所述，基于Matlab/Simulink搭建双模糊控制器的仿真模型，如图5所示。

2.4 复合电源系统整车仿真模型

将小波变换模块、模糊控制器模块、DC/DC转换器模块、超级电容模块添加到ADVISOR2002/BD_EV仿真模型中，建立复合电源系统整车仿真模型，如图6所示。

表 4 不同工作模式下部分模糊规则

工作模式	P_r	SOC	SOC ₂	K
驱动模式	Z1	Z1	S1	N1
	S1	H1	N1	N3
	H1	S1	S1	N1
	N1	Z1	N1	N3
制动模式	Z1	M1	S1	N3
	S1	H1	M1	N2
	M1	Z1	S1	H1
	N1	M1	M1	H1

3 仿真测试分析

根据上述设计，在 NEDC 循环工况下对小波变换-模糊控制策略进行仿真测试及分析。为了对比单一锂电池和复合锂电池的寿命情况，引入电池寿命公式^[18]，如式 (11) ~ (12) 所示。

$$Q_N = B_1 e^{-\frac{-31\ 329.7}{RT}} \left(N \sum_k^{0.55} \sqrt{\frac{B_n}{B_1} e^{-\frac{-370.3+370.3n_k}{RT}} \frac{n_k I_1 \Delta t_k}{3\ 600}} \right)^{0.55} \quad (11)$$

$$B_n = 21\ 350 e^{-0.670\ 6n_k} + 16\ 670 e^{-0.027\ 48n_k} \quad (12)$$

式中： N 为循环工况次数； Q_N 为电池寿命损失百分比，取 0.2； B_1 为前因子，取 27 672； B_n 为 n 次循环

之后的因子； k 为采样间隔数； Δt_k 为时间间隔，取 1 s； n_k 为在第 k 点时的电池放电倍率； I_1 为电池 1 C 时的放电电流，单位 A； R 为理想气体常数，取 8.314 J/(mol·K)； T 为温度，单位 K。

NEDC 工况下的速度-曲线关系，如图 7 所示。基于仿真数据，由图 8 可知，单一锂电池峰值驱动电流为 113.470 A，基于小波变换-模糊控制的复合锂电池驱动峰值电流为 90.006 A，表明在此控制策略下复合锂电池的驱动峰值电流降低了 20.68%。通过单一锂电池与复合锂电池的电流对比发现，在多数情况下，复合锂电池的电流均有明显降低，即表明超级电容的加入能降低锂电池的峰值电流，减少高电流对锂电池的冲击，进而延长使用寿命。此外，分别对单一锂电池电动汽车以及复合锂电池电动汽车进行仿真测试，单一锂电池的寿命损失为 6.45%，复合锂电池的寿命损失为 5.37%，寿命提高了 16.74%。由图 9 可知，在绝大多数情况下，超级电容器相对于复合锂电池一直在承担高电流，尤其是在 1 120 s 时，超级电容器承担高频电流 92.195 A，而复合锂电池承担低频电流 20.178 A。这表明采用的控制策略不仅将整车需求功率分解成高、低

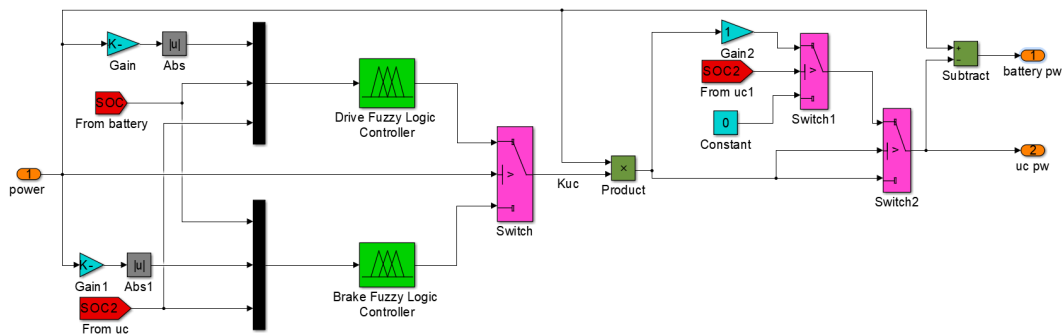


图 5 模糊控制策略仿真模型

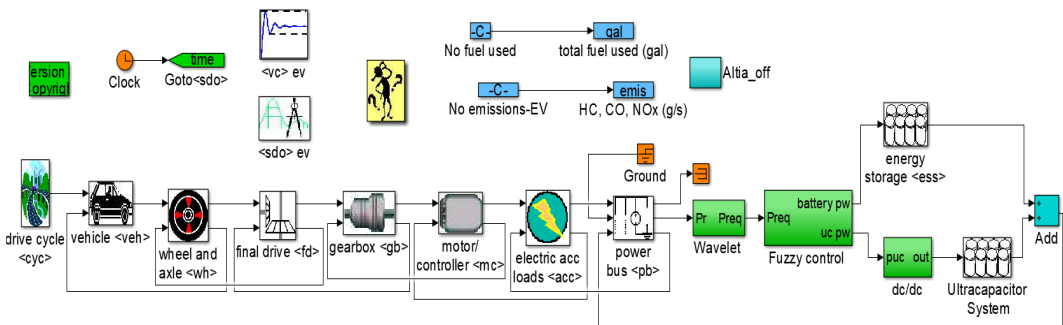


图 6 复合电源系统整车仿真模型

频信号,还充分发挥了超级电容“削峰填谷”的优势,最大限度地吸收大电流。此外,从整个循环工况中可知,在忽略系统损耗的情况下,锂电池承担较小的功率,范围为 $0\sim 29\text{ kW}$,超级电容器承担较大的功率,范围为 $0\sim 46\text{ kW}$ 。在平稳工况下,锂电池作为主要能量源为整车提供需求功率,在急加速工况下,超级电容器发挥作用,为整车提供瞬时高功率。结合图9和图10可知,随着仿真时间的推移,超级电容器的SOC值从1逐渐减少,在 1200 s 时达到最小,为 0.586 ,之后出现较高的能量回收功率需求,为避避免高功率信号对锂电池进行冲击,由超级电容器接收后续较大的能量回收功率,导致超级电容器SOC大幅提升。当仿真结束时,超级电容SOC值为 0.791 。这表明模糊控制策略能很好地将超级电容器SOC维持在 0.5 以上的合理范围之内。

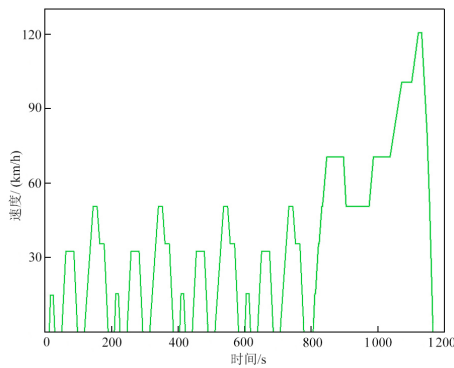


图7 NEDC工况

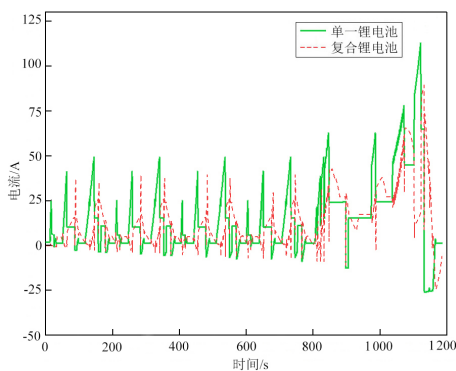


图8 单一锂电池和复合电源锂电池电流曲线

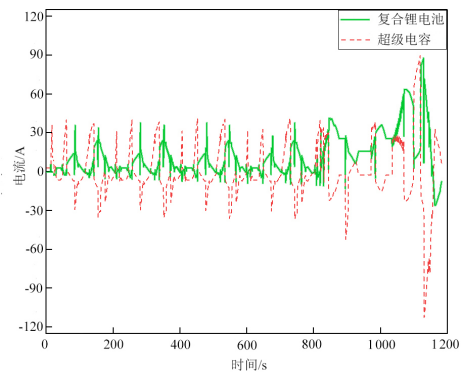


图9 复合锂电池和超级电容电流曲线

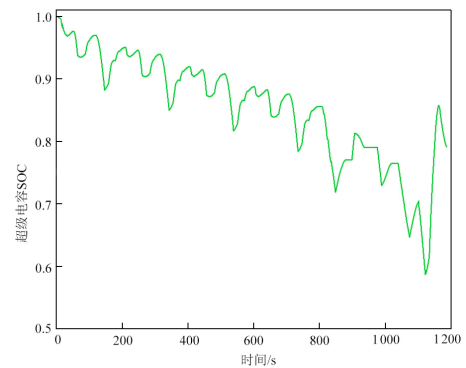


图10 复合电源超级电容SOC曲线

换-模糊控制策略的有效性,搭建了按一定比例缩小的复合电源系统试验平台,并在NEDC工况下对单一锂电池和复合电源系统进行试验测试。试验平台是由磷酸铁锂电池模组,超级电容器模组,双向DC/DC转换器系统,负载模拟系统以及软件控制系统等5部分组成,设备连接如图11所示。

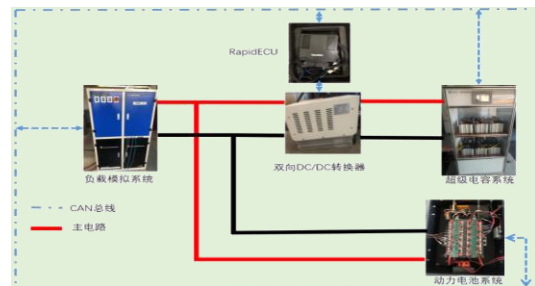


图11 试验平台设备连接

其中,磷酸铁锂电池模组是由24节单体串联组成,单体额定电压为 3.2 V (50 Ah),最高电压为 3.65 V ,最低电压为 2.7 V ,其额定端电压为 76.8 V ;超级电容器模组是由2块具有CAN接口的 48 V (165 F)超级电容器单体串联组成;双向DC/DC转换器系统的额定功率为 20 kW ,电压在 200 V 以内,

4 试验验证分析

在保证试验安全的前提下,为了验证小波变

电流在 120 A 以内；负载模拟系统的输入电源为 380 V 的交流电，输入电流为 68 A，输入功率为 44 kW，输出功率 40 kW；软件控制系统是由北京九州华海科技有限公司提供的 RapidECU 实时控制器。

试验测试流程如下：首先将仿真 Simulink 模型编译成 .mot 文件，然后将 .mot 文件通过 MeCa 硬件设备刷写到 RapidEcu 控制器中，最终在电脑 PC 端实时显示各项数据。

基于试验数据，由图 12 可知，单一锂电池峰值驱动电流为 34.05 A，基于小波变换-模糊控制的复合锂电池驱动峰值电流为 26.95 A，表明复合锂电池的驱动峰值电流降低了 20.85%；通过单一锂电池与复合锂电池的电流对比发现，在绝大部分情况下，复合锂电池的电流均有明显降低。此外，分别对单一锂电池以及复合锂电池模组进行试验测试，单一锂电池的寿命损失为 8.96%，复合锂电池的寿命损失为 7.54%，复合锂电池寿命提高了 15.86%。将试验结果与仿真结果进行对比，发现误差在允许的范围之内，所采用的控制策略具有良好的控制效果。由图 13 可知，在绝大部分情况下，超级电容器相对于复合锂电池一直在承担高电流，特别是在 1 120 s 左右时，超级电容器承担高频电流 28.70 A，而复合锂电池承担低频电流 3.11 A。此时将试验结果与仿真结果进行对比，发现超级电容器不仅承担了绝大部分的高频电流，而且电流变化趋势和仿真结果一致。同样，复合锂电池不仅承担了低频电流，而且电流变化趋势和仿真结果一致。依据超级电容器的物理特性，本文以超级电容器的电压变化代表其 SOC 变化。结合图 13 和图 14 可知，超级电容器的电压从初始的 71 V 逐渐减少，在 1 120 s 时达到最小，为 53 V，之后出现较高的能量回收功率需求，为充分发挥超级电容器“削峰填谷”的作用，在后续行车中对超级电容器进行充电，进而出现超级电容器 SOC 大幅提升的现象。当试验结束时，电压值为 64 V。通过试验进一步验证了模糊控制策略能将超级电容器的 SOC 维持在合理的范围之内。

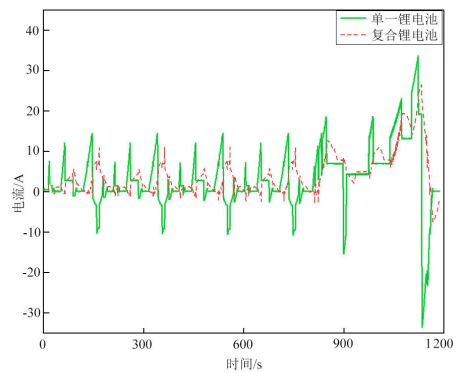


图 12 单一锂电池和复合电源锂电池电流曲线

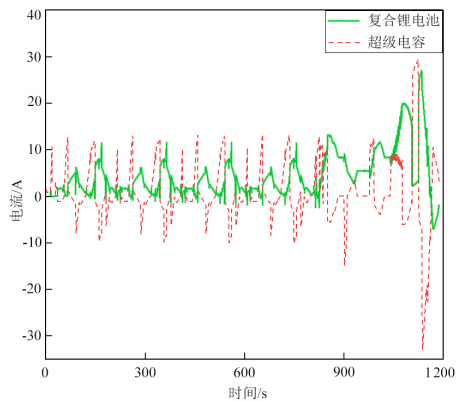


图 13 复合锂电池和超级电容电流曲线

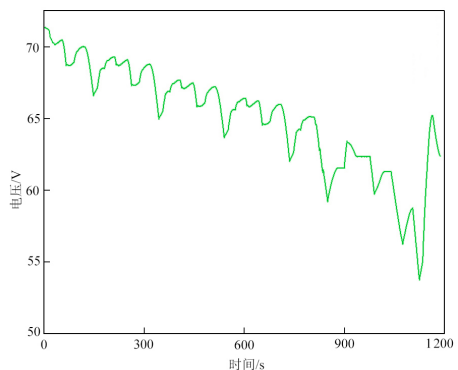


图 14 复合电源超级电容器电压曲线

综上所述，无论是从复合锂电池的驱动峰值电流以及寿命方面，还是从超级电容的 SOC 方面与仿真结果进行对比，均验证了小波变换-模糊控制策略的有效性，对复合电源系统的能量管理具有良好的控制效果。

5 结论

本文首先在确定复合电源系统拓扑结构以及整车基本参数后，以某款电动汽车为原型，应用 Matlab/Simulink 和 ADVISOR 软件搭建整车模型。

其次,为了合理分配锂电池-超级电容两种能量源的功率输出,建立了小波变换-模糊控制能量管理策略。最后,基于NEDC循环工况进行仿真测试并在保证安全的前提下,搭建了按一定比例缩小的复合电源系统试验平台,并对小波变换-模糊控制策略进行验证。结果表明:在满足电动汽车动力性能的前提下,相较于单一锂电池,基于小波变换-模糊控制策略下的复合锂电池的峰值驱动电流得到有效降低,整体电流变得更加平缓,循环使用寿命得到有效提高,进一步提高了整车的经济性能。

参考文献 (References)

- [1] 许兵,张维刚.纯电动汽车复合电源能量管理控制策略研究[J].机械设计与制造,2021(2):294-298.
XU Bing, ZHANG Weigang. Research on Energy Management Control Strategy of Battery Electric Vehicle Hybrid Power Source [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(2):294-298.(in Chinese)
- [2] 唐强,汤赐,曾云龙,等.双源型纯电动汽车能量管理优化策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):161-168.
TANG Qiang, TANG Ci, ZENG Yunlong, et al. Energy Management Optimization Strategy for Dual-Source Pure Electric Vehicle [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):161-168.(in Chinese)
- [3] 王维强,余天赐,严运兵.电动客车再生制动能量回收策略研究[J].机械设计与制造,2023(2):127-131.
WANG Weiqiang, YU Tianci, YAN Yunbing. Research on Regenerative Braking Energy Recovery Strategy for Electric Bus [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(2):127-131.(in Chinese)
- [4] 王永军,孙宾宾,李文涛.基于小波规则的燃料电池电动汽车能量管理策略[J].济南大学学报(自然科学版),2021,35(4):7-13.
WANG Yongjun, SUN Binbin, LI Wentao. Energy Management Strategy for Fuel Cell Electric Vehicles Based on Wavelet Rules [J]. Journal of University of Jinan (Natural Science Edition), 2021, 35(4):7-13.(in Chinese)
- [5] 田丽媛,柳敬伟,孙光达,等.基于动态规划算法的纯电动汽车能量管理研究[J].车辆与动力技术,2022,168(4):27-32.
TIAN Liyuan, LIU Jingwei, SUN Guangda, et al. Research

6 不足及展望

1)通过对小波变换-模糊控制策略的复合锂电池与单一锂电池仿真,以及试验结果的分析,已经能得到预期结果,因此,本文并未与其他控制策略作对比。后续研究可以将其他控制策略与小波变换-模糊控制策略进行对比,进而验证其他控制策略的优劣。

2)由于试验设备的原因,未能对锂电池的老化损失进行测量,今后将改进试验设备,将锂电池老化损失测量作为后续研究的一项内容。

- on Energy Management of Pure Electric Vehicles Based on Dynamic Programming Algorithm [J]. Vehicle and Power Technology, 2022, 168(4):27-32.(in Chinese)
- [6] 耿文冉,楼狄明,张彤.基于粒子群优化的混合动力汽车多目标能量管理策略[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(7):10-18.
GENG Wenran, LOU Diming, ZHANG Tong. Multi-Objective Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicle Based on Particle Swarm Optimization [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(7):10-18.(in Chinese)
- [7] 孙康,苏楚奇,汪怡平,等.全功率燃料电池汽车能量管理策略研究[J].武汉理工大学学报,2021,43(12):37-44.
SUN Kang, SU Chuqi, WANG Yiping, et al. Research on Energy Management Strategy of Full Power Fuel Cell Vehicle [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021, 43(12):37-44.(in Chinese)
- [8] 胡杰,刘迪,杜常清,等.电动汽车复合能源系统能量管理策略研究[J].机械科学与技术,2020,39(10):1606-1614.
HU Jie, LIU Di, DU Changqing, et al. Research on Energy Management Strategy of Electric Vehicle Composite Energy System [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(10):1606-1614.(in Chinese)
- [9] 刘迪.复合能源电动汽车能量管理策略研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
LIU Di. Research on Energy Management Strategy of Composite Energy Electric Vehicle [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.(in Chinese)

- [10] 丁博文. 纯电动汽车复合电源参数匹配及能量管理策略研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
DING Bowen. Research on Parameter Matching and Energy Management Strategy of Battery Electric Vehicle Composite Power Supply[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值: GB 1589—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Limits of Dimensions, Axle Load and Masses for Motor Vehicles, Trailers and Combination Vehicles: GB 1589—2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016. (in Chinese)
- [12] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车动力性能试验方法: GB/T 18385—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
National Technical Committee of Auto Standardization. Electric Vehicles Power Performance Test Method: GB/T 18385—2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2001. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法: GB/T 18386—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Electric Vehicles Energy Consumption and Range Test Procedures: GB/T 18386—2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2001. (in Chinese)
- [14] 汪诗乔, 郭佑民. 一种用于复合储能城轨车辆的能量管理策略研究[J]. 机电信息, 2022(6): 55-60.
WANG Shiqiao, GUO Youmin. Research on Energy Management Strategy for Urban Rail Vehicles with Complex Energy Storage[J]. Mechanical and Electrical Information, 2022(6): 55-60. (in Chinese)
- [15] WANG Chun, XIONG Rui, HE Hongwen, et al. Comparison of Decomposition Levels for Wavelet Transform Based Energy Management in a Plug-in Hybrid Electric Vehicle [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210: 1085-1097.
- [16] 申永鹏, 孙建彬, 王延峰, 等. 电动汽车混合储能装置小波功率分流方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4636-4646.
SHEN Yongpeng, SUN Jianbin, WANG Yanfeng, et al. Wavelet Power Split Method for Electric Vehicle Hybrid Energy Storage Device [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4366-4646. (in Chinese)
- [17] BRAVERMAN V, OSTROVSKY R, ZANIOLO C. Optimal Sampling from Sliding Windows [J]. Journal of Computer and System Sciences, 2012, 78: 260-272.
- [18] 王峰. 电动汽车用复合储能系统关键技术及设计方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
WANG Feng. Research on Key Technologies and Design Methods of Composite Energy Storage System for Electric Vehicles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)

作者简介



史江昆 (1998-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源汽车驱动与控制技术。

Tel: 13673413570

E-mail: 1226363918@qq.com

通信作者



申彩英 (1981-), 女, 辽宁锦州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为电动汽车电驱动系统及其控制技术。

Tel: 15141640963

E-mail: 894406103@qq.com