

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221497

电动汽车混合储能系统 CEEMD-PE 能量管理策略

申永鹏^{1,2}, 谢俊超¹, 梁伟华¹, 袁小芳^{2,3}, 孙嵩楠¹

(1. 郑州轻工业大学, 河南 郑州 450002; 2. 湖南大学机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410082; 3. 湖南大学, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对电动汽车行驶过程中高频需求功率分量引起的锂离子动力电池寿命衰减问题, 提出了一种完备集合经验模态分解-排列熵(complete ensemble empirical mode decomposition-permutation entropy, CEEMD-PE)能量管理策略。电动汽车功率需求被分解为有限个本征模态函数分量, 并依据排列熵量度的各个本征模态函数分量的数据复杂度, 将各个分量重构为低频分量和高频分量。最后, 将包含瞬态功率和快速变化的高频分量分配给超级电容器, 而将低频分量相应地分配给电池, 实现了功率需求低频分量和高频分量在锂离子动力电池和超级电容之间的功率分流。实验结果表明, 相较于 Haar 小波混合储能能量管理策略, 在中速和高速区间的锂离子动力电池电流的均方根值分别减小 5.91%和 4.17%, 电流峰值分别减小 14.70%和 5.77%。所提出的策略有助于抑制锂离子动力电池所承受的高频功率需求, 降低大电流对锂离子动力电池的冲击。

关键词: 电动汽车; 混合储能; 完备集合经验模态分解; 排列熵; 能量管理

Electric vehicle hybrid energy storage system CEEMD-PE energy management strategy

SHEN Yongpeng^{1,2}, XIE Junchao¹, LIANG Weihua¹, YUAN Xiaofang^{2,3}, SUN Songnan¹

(1. Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control Technology, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: There is a problem of the life attenuation of lithium-ion batteries caused by high-frequency demand power components during electric vehicle driving. Thus a complete ensemble empirical mode decomposition-permutation entropy (CEEMD-PE) energy management strategy is proposed. The electric vehicle power demand is decomposed into a finite number of intrinsic mode functions (IMFs), and each component is reconstructed into low- and high frequency components according to the data complexity of each IMF measured by PE. Finally, the high-frequency components containing transient power and fast changes are assigned to the ultracapacitor, while the low-frequency components are assigned to the battery. The experimental results show that, compared with the Haar wavelet strategy, the root mean square (RMS) value of the lithium-ion battery current in the medium-speed and high-speed regions is reduced by 5.91% and 4.17%, respectively, and the current peak value is reduced by 14.70% and 5.77%, respectively. The proposed strategy helps to suppress the high-frequency power demand endured by lithium-ion batteries and reduce the impact of large currents on lithium-ion batteries.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62273313 and No. 62073127).

Key words: electric vehicle; hybrid energy storage system; CEEMD; PE; energy management

0 引言

近年来, 在“双碳”目标和新能源革命的引领

与促进下, 电动汽车技术以及市场快速稳步发展^[1-2]。锂离子动力电池作为电动汽车传统车载储能装置, 其能量密度高, 但功率密度低、高倍率充放电时会衰减容量和寿命^[3]。超级电容功率密度高、充放电速率快、具有更宽的工作温度范围和生命周期, 能够满足高频功率需求^[4]。锂离子动力电池-超级电容组成的混合储能系统同时兼具能量型储能和功率型

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62273313, 62073127); 河南省科技攻关项目资助(222102240005); 郑州市协同创新专项资助(2021ZDPY0204)

储能的优点, 既确保了各种工况下的电动汽车功率需求, 又有效地延长了锂离子动力电池的使用寿命^[5-6]。

目前针对锂离子动力电池-超级电容混合储能系统能量管理策略, 国内外进行了大量的研究^[7-14]。文献[7]针对锂离子动力电池和超级电容混合储能系统, 提出基于列车运行工况的动态比例分配策略, 通过判别列车运行工况调整功率分配比例, 减少电池的使用次数, 以提高混合储能装置的寿命与节能效果。文献[8]使用多输入单输出模糊逻辑策略, 根据锂离子动力电池与超级电容的 SOC 值以及输出功率模糊分配规则得到超级电容功率分配因子, 与逻辑门限控制策略相比, 有效地实现了锂离子动力电池与超级电容之间的功率分配。文献[9]则以整车需求功率、超级电容 SOC、汽车速度为输入, 以锂离子动力电池功率为输出, 建立具有 45 条模糊规则的模糊控制器, 降低高频电流波动对锂离子动力电池寿命的影响。

上述基于规则的混合储能系统能量管理策略执行效率高, 但在定义模糊控制规则时依赖于专家经验, 无法做到混合储能系统最优功率分配, 智能算法的引入克服了这一缺点。文献[11]提出一种考虑电池退化的基于 Pontryagin's 极小值原理的混合储能电动汽车能量管理策略, 显著延缓了电池电量下降和能量消耗, 达到节能和保护电池的目的。文献[10]采用以混合储能系统成本和锂离子动力电池寿命损耗最小为优化目标的动态规划算法, 得到在不同驾驶模式下的最佳功率分配结果。文献[12]以锂离子动力电池、超级电容和 DC/DC 变换器总损耗最小为优化目标, 提出了模型预测控制方法, 以实现混合储能系统最优功率分配。文献[13]为使电池退化成本和混合储能系统电力成本最小化, 提出一种基于车云互联的电动客车混合储能系统动态规划-模型预测控制分层优化能量管理策略。文献[14]提出了深度强化学习策略, 实现了整车功率在电池和超级电容之间的功率分配, 有效减少了系统能量损失, 从而提高了电池寿命。然而, 以上算法需要较大的计算量, 限制了其实际应用。

尽管以上混合储能系统能量管理策略在降低电池寿命损耗和减少系统能量损失方面取得一定进展, 但忽视了车辆运行中出现的高频功率需求对锂离子动力电池性能产生的负面影响^[15]。基于小波变换的功率分流方法将电动汽车功率需求分解重构为低频分量和高频分量, 并将其分别作用于锂离子动力电池和超级电容, 降低了高频功率需求对锂离子动力电池的影响^[16-17]。然而, 小波基的选择和分解层数的设置不同, 可能会导致分解结果出现较大差异,

因此存在对小波基和分解层数的优化选择问题^[18]。与小波变换不同, 经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)依据待分析的功率需求自身的时间尺度特征进行分解, 反映了功率需求自身的变化规律, 具有自适应性。完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)可解决经验模态分解存在的模态混叠效应, 并提高了计算效率。排列熵(permutation entropy, PE)可衡量分解后的功率需求子序列分量的复杂程度, 将其重构为高频部分和低频部分。

针对电动汽车行驶过程中高频需求功率分量引起的锂离子动力电池寿命衰减问题以及小波功率分流方法存在的不足, 本文提出一种基于 CEEMD 和 PE 的能量管理策略, 具体贡献和创新如下:

1) 提出了 CEEMD 电动汽车功率需求分解方法, 得到了有限个本征模态函数分量, 实现了电动汽车功率需求分解;

2) 提出了 PE 本征模态函数分量数据复杂度度量方法, 实现了电动汽车功率需求低频分量和高频分量的重构。

本文第 1 节描述了电动汽车混合储能系统半主动拓扑结构和主要工作模式; 第 2 节介绍了 CEEMD 分解和 PE 算法, 并提出了电动汽车混合储能系统 CEEMD-PE 能量管理方法; 第 3 节给出了实验结果; 在第 4 节中对全文进行了总结。

1 电动汽车混合储能系统

电动汽车混合储能系统结构如图 1 所示。电动汽车半主动拓扑结构混合储能系统由锂离子电池及其功率控制电路(a)、超级电容(b)和负载(c)构成, 有牵引、制动能量回收和超级电容能量补充 3 种工作模式。牵引模式下能量流动方向如图 2 所示。此时锂离子动力电池和超级电容同时向负载供电。锂离子动力电池电流 i_b 、超级电容电流 i_{uc} 和负载电流 i_{dc} 之间的关系为

$$\begin{cases} i_b = \frac{1}{L_1} \int [v_{bat}(t) - v_{dc}(t)(1-d_1)] dt \\ i_{dc} = i_{uc} + i_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_1 为 M_1 占空比; v_{bat} 为电池电压; v_{dc} 为负载端直流母线电压。

制动能量回收模式下能量流动方向如图 3 所示。此时制动回馈能量依次向超级电容锂离子动力电池充电, i_b 、 i_{uc} 和 i_{dc} 满足式(2)。

$$\begin{cases} i_b = \frac{1}{L_1} \int [v_{dc}(t)(1-d_1) - v_{bat}(t)] dt \\ i_{uc} = i_{dc} - i_b \end{cases} \quad (2)$$

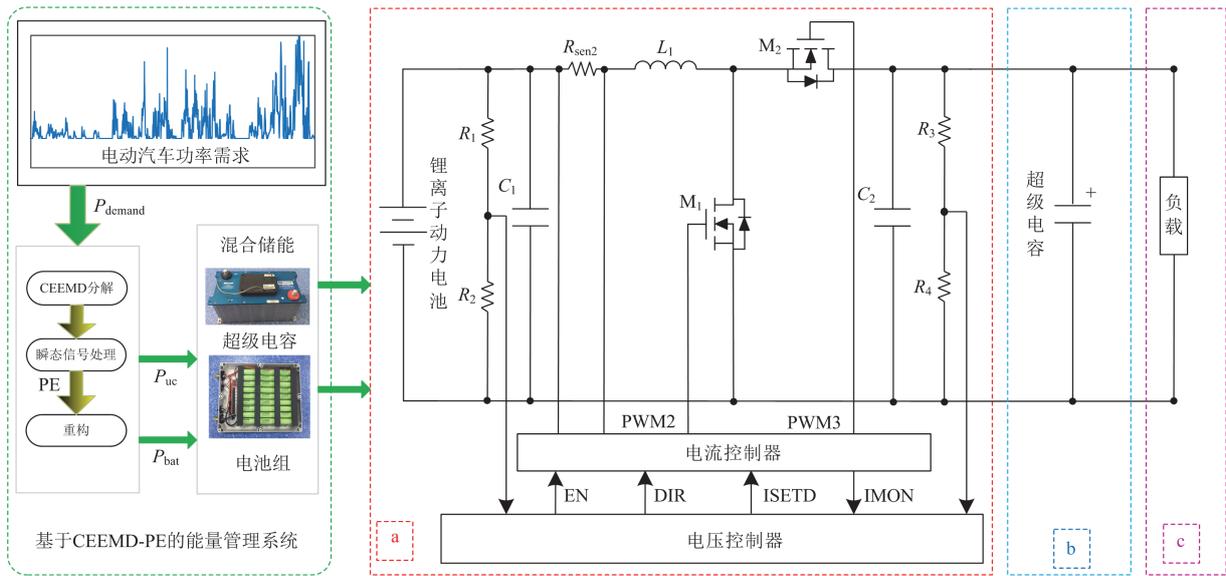


图 1 电动汽车混合储能系统结构

Fig. 1 Structure of hybrid energy storage system for electric vehicle

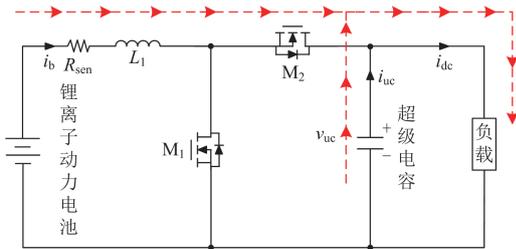


图 2 牵引模式下的能量流向

Fig. 2 Energy flow in traction mode

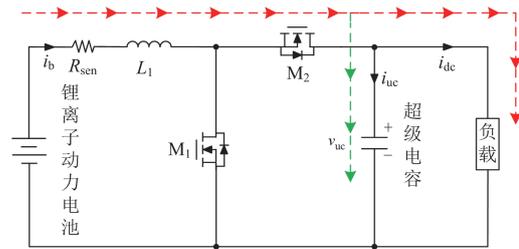


图 4 超级电容能量补充模式下的能量流向

Fig. 4 Energy flow in ultracapacitor energy supplement mode

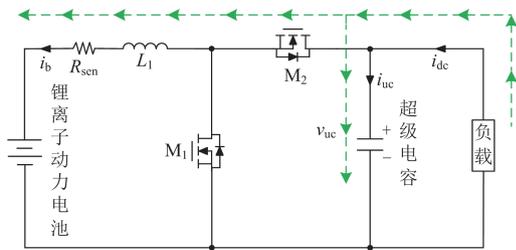


图 3 制动能量回收模式下的能量流向

Fig. 3 Energy flow in braking energy recovery mode

电动汽车启动和加速后需要向超级电容补充能量。因此，处于超级电容能量补充模式下的锂离子动力电池需要向超级电容充电以恢复超级电容能量，同时向负载供电满足行驶要求。此模式下能量流动方向如图 4 所示。其中， i_b 、 i_{uc} 和 i_{dc} 满足式(3)。

$$\begin{cases} i_b = \frac{1}{L_1} \int [v_{bat}(t) - v_{dc}(t)(1-d_1)] dt \\ i_{dc} = i_b - i_{uc} \end{cases} \quad (3)$$

2 CEEMD-PE 混合储能能量管理方法

2.1 完备集合经验模态分解

经验模态分解依据数据自身的时间尺度特征来对信号进行分解，适合处理非线性、非平稳的时间序列^[19]。与建立在先验性的谐波基函数和小波基函数上的傅里叶分解和小波分解相比，EMD 无需预设基函数，具有自适应能力。EMD 通过将非平稳信号分解为一系列不同时间尺度的本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 分量，以精确表征原始信号在不同时间尺度下的局部特征。因此通过对电动汽车行驶需求功率的 EMD 分解，可以聚焦到信号的任意细节，满足时频信号分析的要求。通过 EMD 分解，原始信号与 IMF 分量可表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n m_i(t) + r(t) \quad (4)$$

式中： $x(t)$ 为原始信号； $m_i(t)$ 为第 i 个 IMF 分量； $r(t)$ 为剩余分量。

如果原始信号出现间断信号时，EMD 分解会出

现模态混叠现象, 导致出现错误的 IMF 分量, 丧失具体物理意义^[20]。完备集合经验模态分解在 EMD 的基础上进行改进, 解决了 EMD 的模态混叠问题, 保留了 EMD 对非线性信号的处理优势。该方法通过添加一组大小相等、符号相反的辅助白噪声, 既抑制了 EMD 算法的模态混叠效应, 又不会使得原始信号受到白噪声的添加而产生较大的影响^[21-22]。CEEMD 包括以下步骤。

首先, 在原始信号中添加一组大小相等、符号相反的辅助白噪声。

$$\begin{cases} x_i^+(t) = x(t) + n_i^+(t) \\ x_i^-(t) = x(t) + n_i^-(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $x(t)$ 为原始信号; $n_i^+(t)$ 为正噪声; $n_i^-(t)$ 为负噪声。

然后, 对信号 $x_i^+(t)$ 、 $x_i^-(t)$ 进行 EMD 分解, 每个信号得到一系列 IMF 分量, 其中第 i 个信号的第 j 个 IMF 分量是 $f_{ij}(t)$ 。 $f_{ij}^+(t)$ 和 $f_{ij}^-(t)$ 分别代表第 i 个信号的第 j 个正 IMF 分量和负 IMF 分量。

$$\begin{cases} x_i^+ = \sum_{j=1}^m f_{ij}^+(t) \\ x_i^- = \sum_{j=1}^m f_{ij}^-(t) \end{cases} \quad (6)$$

重复上述步骤 n 次, 每次添加新的白噪声序列, 得到 n 组 IMF 的集合, 其中最后一组为趋势项 Res。对相应模态的 IMF 分量分别求均值, 可得最终模态分量组如式(7)。

$$f_j(t) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (f_{ij}^+(t) + f_{ij}^-(t)) \quad (7)$$

式中, $f_j(t)$ 为 CEEMD 分解后信号的第 j 个 IMF 分量。该方法保证了信号分解的完整性, 能较好地解决模态混叠效应, 大大提高了计算效率^[23]。

2.2 排列熵

针对 CEEMD 得到的若干个子序列分量, 本文引入 PE, 以衡量每个子序列分量的复杂度, 进而合并复杂度相近的分量, 实现重构高频分量与低频分量。PE 是一种检测时间序列随机性和动态变化的方法, 排列熵值越大, 时间序列越复杂^[24]。对于一维时间序列 $\{X(i), i=1, 2, \dots, n\}$, 在相空间内重构任一元素 $x(i)$, 可得到一个 m 维空间的重构矩阵, 如式(8)所示。

$$\begin{pmatrix} x(1) & x(1+t) & \cdots & x(1+(m-1)\tau) \\ x(2) & x(2+t) & \cdots & x(2+(m-1)\tau) \\ x(j) & x(j+t) & \cdots & x(j+(m-1)\tau) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(K) & x(K+t) & \cdots & x(K+(m-1)\tau) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中: j 为重构向量的个数, $j=1, 2, \dots, K$; m 为嵌入的维数; t 为延迟时间; 矩阵的行为重构分量。将每一个重构分量按照升序重新排列, 如式(9)所示。

$$x(i+(j_1-1)\tau) \leq x(i+(j_2-1)\tau) \leq \cdots \leq x(i+(j_m-1)\tau) \quad (9)$$

式中, j_1, j_2, \dots, j_m 为重构分量中各元素所在的列。

对于时间序列 $X(i)$ 相空间重构后得到的矩阵, 每一行都可以得到一组符号序列, 如式(10)所示。

$$s(l) = (j_1, j_2, \dots, j_m) \quad (10)$$

式中, $l=1, 2, \dots, k$, 且 $k \leq m!$ 。 m 维空间映射不同的符号序列可以存在 $m!$ 种排列方式。每种不同的符号序列出现的概率分别设为 P_1, P_2, \dots, P_k ($k \leq m!$)。

由香农熵定义, 排列熵可以表示为

$$H_{PE}(m) = -\sum_{j=1}^k P_j \ln P_j \quad (11)$$

将其归一化处理, 可得排列熵值 P 为

$$P = \frac{H_{PE}}{\ln(m!)}, 0 \leq P \leq 1 \quad (12)$$

2.3 CEEMD-PE 能量管理策略系统实现

电动汽车整车功率需求由高频暂态功率需求分量和稳态功率需求分量构成。研究表明, 一方面, 不断增大电流频率, 电池容量衰减和阻抗上升现象都会逐渐增强。如果管理不当, 电池容量和阻抗变化的增强将导致电池组发热, 进一步缩短电池寿命并降低车辆的运行性能^[25]。另一方面, 锂离子动力电池容量衰减快慢与充放电倍率紧密相关^[26]。如图 5 所示, 混合储能系统能量管理策略的主要目的是实现功率高频暂态分量和稳态分量在超级电容和锂离子动力电池之间的功率分流。因此, 通过 CEEMD 将功率需求信号分解为不同频率的 IMF 分量, 根据 PE 量度得到的 IMF 子序列复杂度, 以确定高频和低频 IMF 分量的分界点, 将需求功率重构为低频稳态功率需求和高频暂态功率需求。

此外, 出于对锂离子动力电池寿命的考量, 在保障车辆起步和加速时峰值功率需求的前提下, 应适当降低锂离子动力电池的电流波动与峰值。同时, 充分利用超级电容大倍率充放电和高功率密度特性, 使其承担高频功率需求。

以 CLTC-P 循环工况为例, 该工况包括低速、中速和高速 3 个速度区间, 分别为 674 s、693 s 和 433 s。工况时长共计 1800 s, 累计行驶里程 14.48 km, 最高车速为 114 km/h, 平均速度为 28.96 km/h^[27], 如图 6 所示。

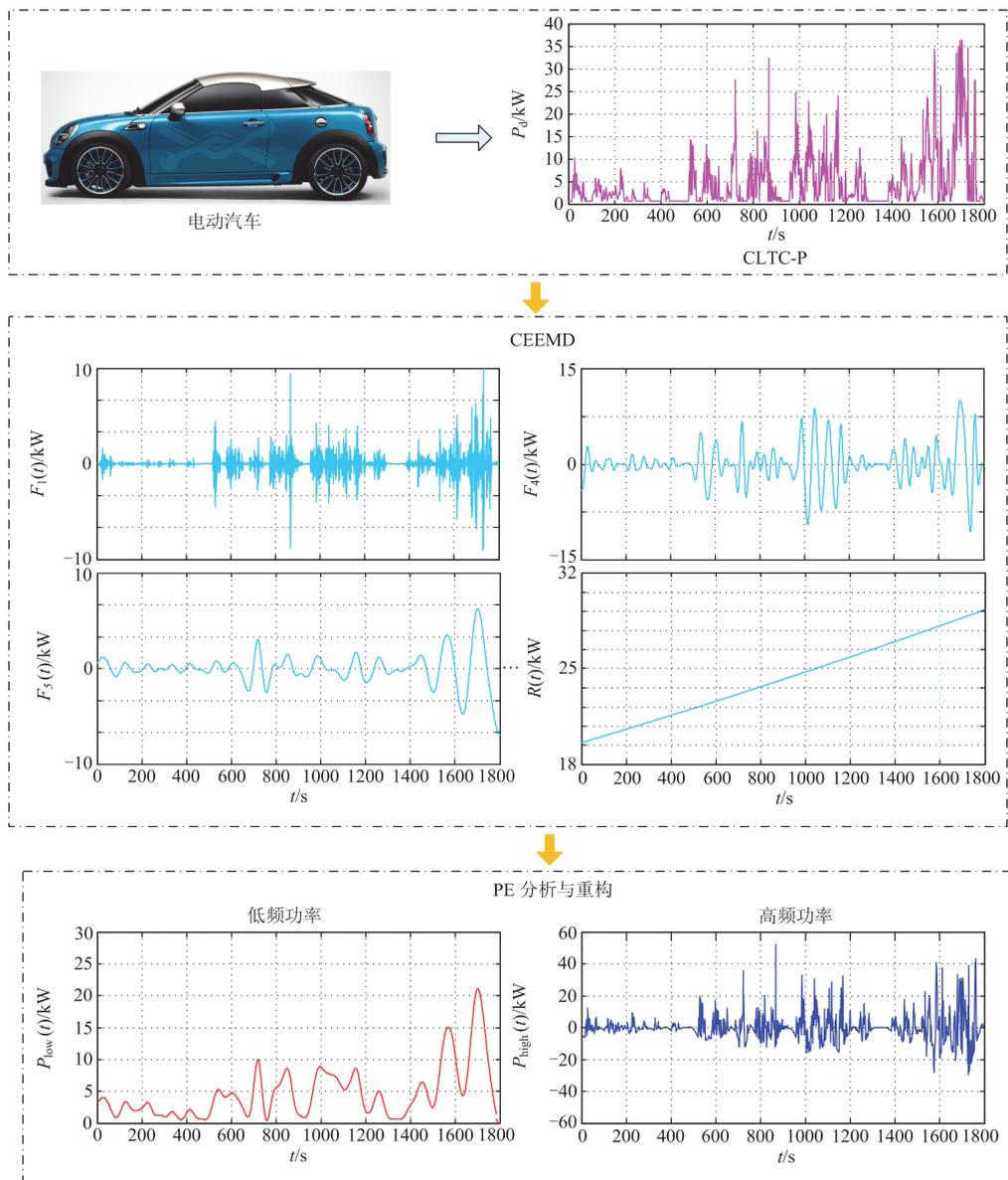


图 5 CEEMD-PE 能量管理策略框图

Fig. 5 Block diagram of CEEMD-PE energy management strategy

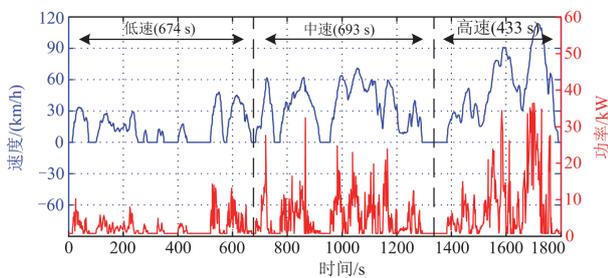


图 6 CLTC-P 循环工况曲线

Fig. 6 CLTC-P cycle curve

令 CEEMD 白噪声标准差为 0.2、总集合次数为 100，对 CLTC-P 工况功率需求进行时间序列分

解，结果如图 7 所示。原始需求功率被分解为 IMF1, IMF2, ..., IMF9 共 9 个本征模态函数分量及 Res，其中 IMF1 分量频率最高，其余分量的波动逐渐平缓。进一步地，PE 量化后的各子序列的排列熵值如图 8 所示。可知，排列熵值从 IMF1 开始依次递减，一直减到 Res 的排列熵值为 0，其中，高频分量的排列熵值较大，表明其复杂度更高。IMF1~IMF4 的排列熵值均大于 0.2 且相差较大，将其视为高频分量。类似地，IMF5~IMF9 及 Res 的排列熵值均小于 0.2，可视为低频分量。将分解后的各 IMF 分量和 Res 重构为低频功率需求与高频功率需求两部分。因此，将低频分量 IMF5~IMF9 及 Res 重构后作为锂离子

动力电池功率需求分量, 高频分量 IMF1~IMF4 重构后作为超级电容功率需求分量, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{bat}}^*(t) = \sum_{k=1}^4 m_k(t) \\ P_{\text{uc}}^*(t) = \sum_{k=5}^9 m_k(t) + r(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $m_k(t)$ 为第 k 个 IMF 分量; $r(t)$ 为剩余分量; $P_{\text{bat}}^*(t)$ 和 $P_{\text{uc}}^*(t)$ 分别为锂离子动力电池和超级电容

参考功率。

图 9 为重构后的锂离子动力电池功率和超级电容功率。此外, 考虑 DC/DC 变换器效率 η , 忽略锂离子动力电池内阻和线路阻抗等因素, 对锂离子动力电池和超级电容充放电功率进行修正, 调整后的实际功率分配如式(14)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{bat}}(t) = \eta P_{\text{bat}}^*(t) \\ P_{\text{uc}}(t) = P_d(t) - \eta P_{\text{bat}}^*(t) \end{cases} \quad (14)$$

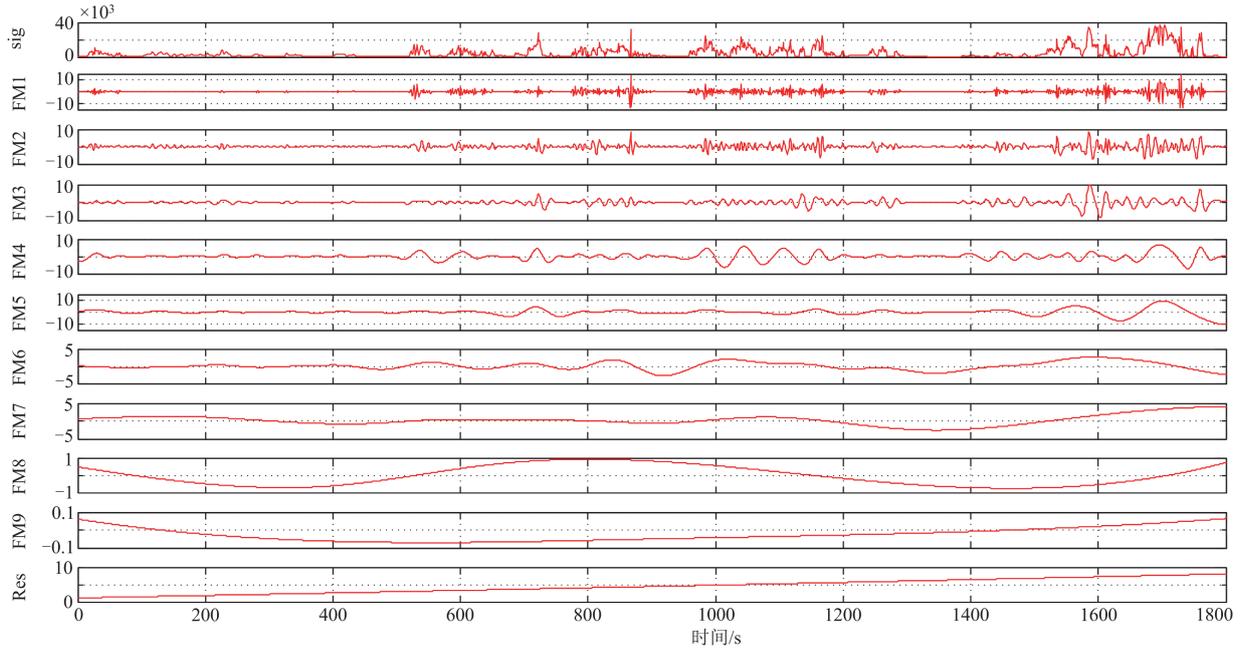


图 7 CLTC-P 工况功率 CEEMD 分解结果

Fig. 7 CEEMD decomposition results of power under CLTC-P condition

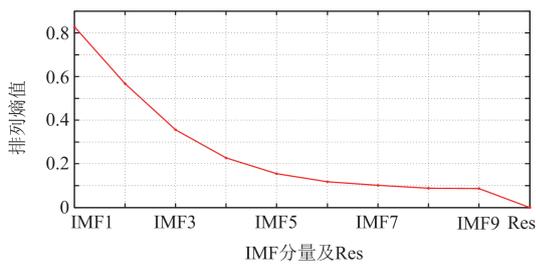


图 8 各子序列排列熵值

Fig. 8 Results of PE of each subsequence

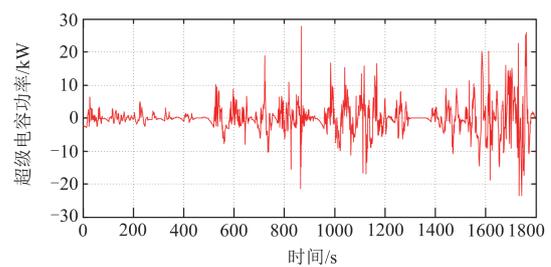
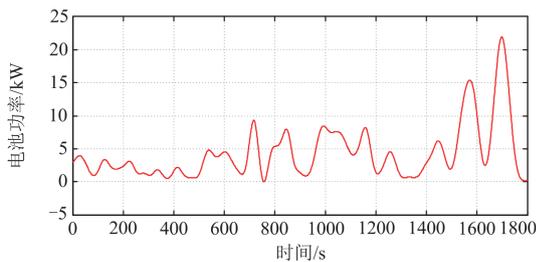


图 9 锂离子动力电池和超级电容参考分配功率

Fig. 9 Reference power distribution for lithium-ion battery and ultracapacitor



3 实验过程及结果分析

3.1 实验装置与实验过程

为验证基于 CEEMD-PE 的电动汽车混合储能系统能量管理策略的有效性, 搭建了实验平台, 实验平台主要参数如表 1 所示。图 10、图 11 分别为

实验平台示意图和实物图。结合所搭建实验平台的工作范围,通过对 CLTC-P 工况降采样,获得模拟 CLTC-P 工况功率曲线,共 450 步,每步步长为 4 s,总计 1800 s,功率为实际 CLTC-P 工况的 1/182,最大峰值功率为 200 W。

表 1 实验平台主要参数

Table 1 Main parameters of experimental setup

设备名称	设备型号	设备参数
超级电容	Maxwell	额定电压(48 V)
		额定电流(1900 A)
锂离子动力电池组	NCR 18650B	额定电压(12.6 V)
		容量(57.6 Ah)
电子负载	RIGOL	额定功率(200 W)
		额定电压(150 V)
		额定电流(40 A)
示波器	TELEDYNE	采样率(2.5 GS/s)
	MDA805A	带宽(500 MHz)
DC/DC 变换器		额定功率(1000 W)
		高压侧电压(20~55 V)
		低压侧电压(6~20 V)

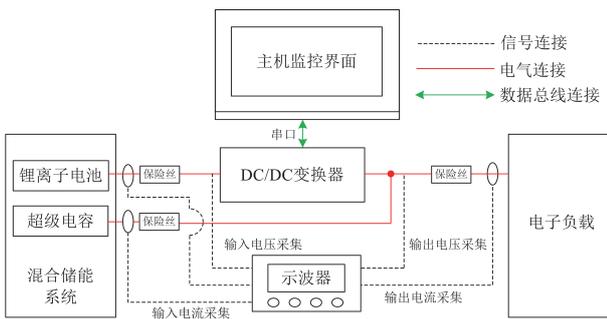


图 10 实验平台示意图

Fig. 10 Schematic diagram of experimental setup

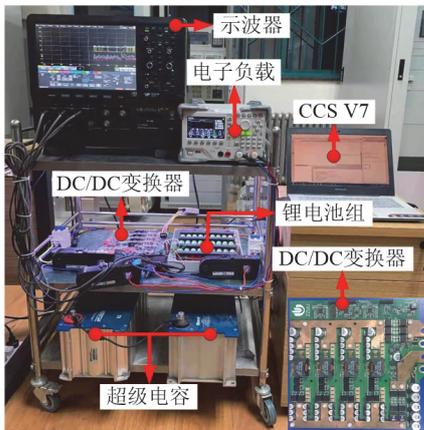


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental setup

实验流程如下:

- 1) 将电子负载工作模式设置为恒功率模式,并导入模拟 CLTC-P 工况数据。
- 2) 将锂离子动力电池 DC/DC 连接至变换器低压侧。超级电容与电子负载并联后连接至 DC/DC 变换器高压侧。直流母线电压设置为 40 V, TMS320F28027 执行控制算法。
- 3) 分别测量锂离子动力电池、超级电容与电子负载端电压和电流。
- 4) 启动电子负载,使用示波器记录实验数据。

3.2 结果分析

图 12 为混合储能系统参考功率和实际输出功率。图 13 为直流母线电压和电流,母线电流根据 CLTC-P 工况需求功率变化,母线电压稳定在 40 V 左右,最大值偏差为 1.87%。

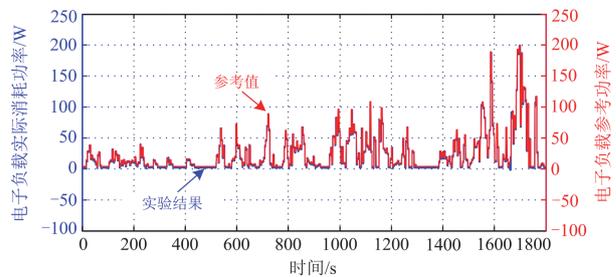


图 12 电子负载参考功率与实际输出功率

Fig. 12 Reference power and actual output power of electronic load

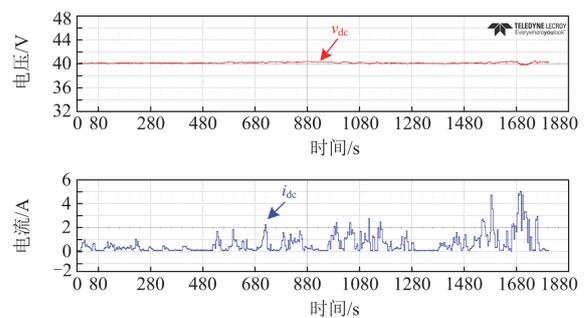


图 13 直流母线电压和电流

Fig. 13 Voltage and current of DC bus

图 14 和图 15 分别为实验过程中动力电池和超级电容的输出电流及功率。可见,实验过程中锂离子动力电池作为电动汽车的主要能量来源提供需求功率的低频分量。超级电容根据需求功率变化提供高频分量,抑制锂离子动力电池峰值电流,平滑电池功率输出,减小功率波动。

为了验证所提方法的有效性,在相同的工况条件下,进行了对比实验。一组仅使用锂离子动力电

池通过 DC/DC 变换器直接对负载供电; 另一组采用基于 Haar 小波变换的混合储能能量管理策略。3 种不同策略下的锂离子动力电池的输出电流曲线对比结果如图 16 所示。

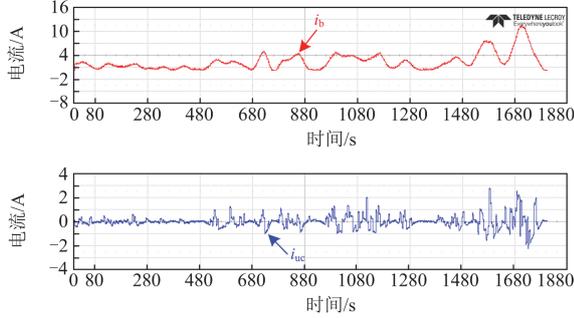


图 14 混合储能系统输出电流

Fig. 14 Output current of hybrid energy storage system

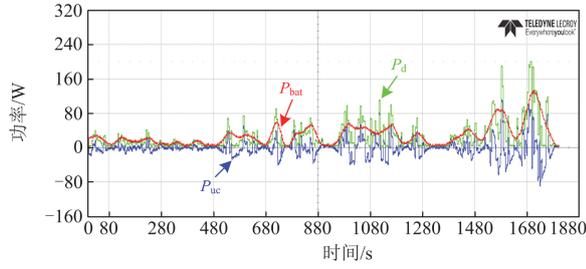


图 15 混合储能系统输出功率与负载功率

Fig. 15 Hybrid energy storage system output power and load power

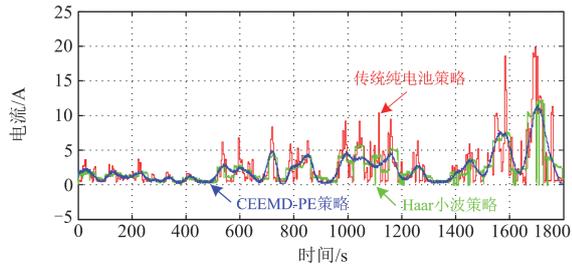


图 16 不同策略下的锂离子动力电池输出电流

Fig. 16 Output current of lithium-ion battery under different strategies

锂离子动力电池电流均方根值通常用作量化老化影响的间接方法^[28]。均方根值越低, 其受大电流的影响越小, 越有利于减少 SOC 变化和能量损失。针对图 16 所示不同策略下的锂离子动力电池输出电流, 根据式(15)进行了均方根值分析。

$$i_b^{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |i_{b_n}|^2} \quad (15)$$

表 2 为 3 种不同策略下的电流均方根值和峰值。可见, 与传统纯电池策略相比, 基于 CEEMD-PE 的混合储能能量策略在低速、中速和高速区间内的锂离子动力电池电流的均方根值分别减小 12.38%、18.64%和 19.41%, 电流峰值分别减小 55.86%、52.32%和 42.08%。相较于 Haar 小波策略, 所提出的 CEEMD-PE 混合储能能量策略在中速和高速区间的锂离子动力电池电流的均方根值分别减小 5.91%和 4.17%, 电流峰值分别减小 14.70%和 5.77%。

表 2 3 种不同策略下的电流均方根值和峰值

Table 2 RMS value and peak value under three different strategies

策略		均方根值/A	峰值/A
传统纯电池策略	低速	1.62	6.81
	中速	3.28	10.41
	高速	6.32	19.88
Haar 小波策略	低速	1.38	2.94
	中速	2.83	5.82
	高速	5.32	12.22
CEEMD-PE 策略	低速	1.42	3.01
	中速	2.67	4.96
	高速	5.10	11.51

文献[29]采用模糊逻辑控制策略, 和纯电池储能系统相比, 锂离子动力电池电流的均方根值减小 18.68%, 而且电流峰值也减小了 50.96%。文献[29]采用模型预测控制策略, 和纯电池储能系统相比, 锂离子动力电池电流的均方根值减小 3.71%, 而且电流峰值也减小了 40.81%。本文方法和纯电池储能系统相比, 锂离子动力电池电流的均方根值减小 19.41%, 而且电流峰值也减小了 55.86%, 如表 3 所示。

表 3 与其他不同方法实验结果对比

Table 3 Comparison of experimental results with other different methods

策略	模糊逻辑策略 ^[29]	模型预测策略 ^[30]	本文所提策略
均方根值下降率/%	18.68	3.71	19.41
峰值下降率/%	50.96	40.81	55.86

为了进一步验证所提出的能量管理策略对电池健康的影响, 将锂离子动力电池的容量衰减 Q_{loss} 作为衡量电池健康的性能指标。文献[26]建立了 15~60 °C 下的锂离子动力电池广义电池寿命模型, 如式(16)所示。

$$Q_{\text{loss}} = B \cdot \exp\left[\frac{-31700 + 370.3 \times C_{\text{rate}}}{RT}\right] C^{0.55} \quad (16)$$

式中: Q_{loss} 为电池容量损失; C_{rate} 为充放电速率;

C 为电池容量; R 为气体常数; T 为环境温度; B 为指前因子。假定在峰值电流下运行, 根据式(16)计算传统纯电池策略与所提策略的容量损失 Q_{loss} 。所提出的混合储能能量策略相较于传统纯电池策略和 Haar 小波策略, 锂离子动力电池的容量衰减分别减小了 22.81% 和 2.17%。综上所述, 所提出的策略能够有效地抑制锂离子动力电池所承受的高频功率需求, 并在一定程度上减缓其寿命衰减。

4 总结

针对电动汽车行驶过程中高频需求功率分量引起的锂离子动力电池寿命衰减问题, 提出了基于 CEEMD-PE 的混合储能系统能量管理策略, 并在 CLTC-P 工况下进行了实验, 理论分析与实验数据表明:

1) 该方法无须预先设定基函数, 可以将电动汽车功率需求分解为若干 IMF 分量, 并依据各 IMF 分量的熵值大小将其重构为低频分量和高频分量, 分别分配给锂离子动力电池和超级电容。

2) 与 Haar 小波策略相比, 所提方法在中速和高速区间内的锂离子动力电池电流的均方根值分别减小 5.91% 和 4.17%, 电流峰值分别减小 14.70% 和 5.77%, 有助于抑制锂离子动力电池所承受的高频功率需求, 降低大电流对锂离子动力电池的冲击。

参考文献

- [1] 魏一凡, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 面向碳中和的新能源汽车与车网互动技术展望[J]. 汽车工程, 2022, 44(4): 449-464, 444.
WEI Yifan, HAN Xuebing, LU Languang, et al. Technology prospects of carbon neutrality-oriented new-energy vehicles and vehicle-grid interaction[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(4): 449-464, 444.
- [2] 王海鑫, 袁佳慧, 陈哲, 等. 智慧城市车-站-网一体化运行关键技术研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 112-132.
WANG Haixin, YUAN Jiahui, CHEN Zhe, et al. Review and prospect of key techniques for vehicle-station-network integrated operation in smart city[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 112-132.
- [3] WANG Y, WANG L, LI M, et al. A review of key issues for control and management in battery and ultra-capacitor hybrid energy storage systems[J]. E Transportation, 2020, 4.
- [4] 袁佳歆, 曲锴, 郑先锋, 等. 高速铁路混合储能系统容量优化研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4161-4169.
YUAN Jiixin, QU Kai, ZHENG Xianfeng, et al. Optimizing research on hybrid energy storage system of high speed railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4161-4169.
- [5] ZHOU S, CHEN Z, HUANG D, et al. Model prediction and rule based energy management strategy for a plug-in hybrid electric vehicle with hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5926-5940.
- [6] HU J, LIU D, DU C, et al. Intelligent energy management strategy of hybrid energy storage system for electric vehicle based on driving pattern recognition[J]. Energy, 2020, 198.
- [7] 杨浩丰, 刘冲, 李彬, 等. 基于列车运行工况的城轨地面式混合储能系统控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊 1): 168-178.
YANG Haofeng, LIU Chong, LI Bin, et al. Research on control strategy of urban rail ground hybrid energy storage device based on train operating condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 168-178.
- [8] 周美兰, 冯继峰, 张宇, 等. 纯电动客车复合储能系统功率分配控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(23): 5001-5013.
ZHOU Meilan, FENG Jifeng, ZHANG Yu, et al. Research on power allocation control strategy for compound electric energy storage system of pure electric bus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 5001-5013.
- [9] 安小宇, 李元丰, 孙建彬, 等. 基于模糊逻辑的电动汽车双源混合储能系统能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 135-142.
AN Xiaoyu, LI Yuanfeng, SUN Jianbin, et al. Energy management strategy of a dual-source hybrid energy storage system for electric vehicles based on fuzzy logic[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 135-142.
- [10] LI M, WANG L, WANG Y, et al. Sizing optimization and energy management strategy for hybrid energy storage system using multiobjective optimization and random forests[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11421-11430.
- [11] YI F, LU D, WANG X, et al. Energy management strategy for hybrid energy storage electric vehicles based on Pontryagin's minimum principle considering battery degradation[J]. Sustainability, 2022, 14(3): 1214.
- [12] CHEN H, XIONG R, LIN C, et al. Model predictive control based real-time energy management for hybrid energy storage system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 7(4): 862-874.
- [13] HOU J, SONG Z. A hierarchical energy management strategy for hybrid energy storage via vehicle-to-cloud connectivity[J]. Applied energy, 2020, 257.
- [14] LI W, CUI H, NEMETH T, et al. Deep reinforcement learning-based energy management of hybrid battery

- systems in electric vehicles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 36.
- [15] 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. Power distribution method of wavelet for hybrid energy storage systems in an electric vehicle[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(13): 4636-4646.
- [16] ELDEEB H H, ELSAYED A T, LASHWAY C R, et al. Hybrid energy storage sizing and power splitting optimization for plug-in electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(3): 2252-2262.
- [17] 申永鹏, 孙嵩楠, 刘东奇, 等. 车载混合储能系统 Symlets 小波变换能量管理方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6): 74-81.
SHEN Yongpeng, SUN Songnan, LIU Dongqi, et al. Symlets wavelet transform energy management method for a vehicle-mounted hybrid energy storage system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 74-81.
- [18] 吴俊, 张榆锋. 经验模态分解和小波分解滤波特性的比较研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(3): 285-290, 297.
WU Jun, ZHANG Yufeng. The differences analysis on filtering properties of empirical mode decomposition and wavelet decomposition[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2012, 34(3): 285-290, 297.
- [19] HUANG N E, LONG S R, SHEN Z. The mechanism for frequency downshift in nonlinear wave evolution[J]. *Advances in Applied Mechanics*, 1996, 32: 59-117.
- [20] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [21] 李秉晨, 于惠钧, 丁华轩, 等. 基于 CEEMD 和 LSTM-ARIMA 的短期风速预测[J]. *中国测试*, 2022, 48(2): 163-168.
LI Bingchen, YU Huijun, DING Huaxuan, et al. Short-term wind speed prediction based on CEEMD and LSTM-ARIMA[J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(2): 163-168.
- [22] ZUO L Q, SUN H M, MAO Q C, et al. Noise suppression method of microseismic signal based on complementary ensemble empirical mode decomposition and wavelet packet threshold[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 176504-176513.
- [23] 白浩, 钟振鑫, 李巍, 等. 基于 CEEMD 和 NTEO 的故障行波定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(20): 50-59.
BAI Hao, ZHONG Zhenxin, LI Wei, et al. A fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(20): 50-59.
- [24] BANDT C, POMPE B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(17).
- [25] UDDIN K, MOORE A D, BARAI A, et al. The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 142-154.
- [26] WANG J, LIU P, HICKS-GARNER J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(8): 3942-3948.
- [27] 中国汽车行驶工况第 1 部分: 轻型汽车: GB/T38146.1—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
China automotive driving cycle part I: light-duty vehicles: GB/T38146.1—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [28] CASTAINGS A, LHOMME W, TRIGUI R, et al. Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints[J]. *Applied Energy*, 2016, 163: 190-200.
- [29] SHEN Y, LI Y, TANG Y, et al. An energy management strategy based on fuzzy logic for hybrid energy storage system in electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2022, 17(1): 53-60.
- [30] 李元丰. 混合储能装置能量管理方法研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.
LI Yuanfeng. Research on energy management method of hybrid energy storage device[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.
-
- 收稿日期: 2022-09-19; 修回日期: 2023-01-30
作者简介:
申永鹏(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电动汽车动力系统驱动与控制、交流电机控制、储能装置能量管理与优化; E-mail: shenyongpeng@zzuli.edu.cn
谢俊超(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能系统功率变换器及能量管理与优化; E-mail: xjc1677350907@163.com
梁伟华(1988—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电机与驱动、可再生能源发电、Z 源逆变器。E-mail: weihualiang@163.com
- (编辑 魏小丽)