DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.280 **中图分类号**：U482.1 **文献标志码**：A

计及容量配置优化的有轨电车多阈值能量管理策略

高锋阳[1](中国电源学会高级会员)，高智山[1]，强雅昕[1]，韩国鹏[2]
(1.兰州交通大学自动化与电气工程学院，兰州 730070；2.中车唐山机车车辆有限公司，唐山 063035)

摘要：为提高燃料电池/超级电容/锂电池混合储能有轨电车系统响应能力、系统效率和运行经济性，提出基于列车运行状态的有轨电车混合储能系统多阈值能量管理策略。首先，根据列车实际运行状态划分有轨电车不同行驶工况，并设定多种阈值，实现多介质、多场景功率交换，实时控制储能系统各能量源之间的功率分配。同时根据各储能介质的物理特性，设置超级电容优先启动，减少锂电池循环次数，延长储能系统使用寿命。其次，以混合储能系统全寿命周期成本为优化目标，以储能系统功率、能量需求及锂电池和超级电容荷电状态SOC(state-of-charge)为约束条件，对储能系统容量配置进行寻优，得到优化后容量配置参数。最后，将所提策略与固定阈值策略、传统等效氢耗最小化策略ECMS(equivalent consumption minimization strategy)进行对比分析。结果表明，所提策略在混合储能系统功率分配方面更为合理，能够提高系统响应速度；锂电池和超级电容SOC偏移范围有显著改善；所提策略相较于固定阈值和ECMS策略氢气消耗分别降低了1.47 kg和0.81 kg，燃料经济性得以提高。

关键词：混合储能系统；有轨电车；容量配置；能量管理；全寿命周期

Multi-threshold Energy Management Strategy for Trams with Capacity Configuration Optimization

GAO Fengyang[1], *Senior Member*, *CPSS*, GAO Zhishan[1], QIANG Yaxin[1], HAN Guopeng[2]
(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063035, China)

Abstract: To improve the responsiveness, system efficiency and operation economy of a fuel cell/supercapacitor/lithium-ion battery hybrid energy storage system for trams, a multi-threshold energy management strategy for the hybrid energy storage system based on the operation states of trains is proposed. First, according to the actual operation states oftrains, different working conditions of tram driving are divided and multiple thresholds are set, so as to realize multi-media and multi-scenario power exchange and achieve real-time control of power allocation among energy sources of the energy storage system. At the same time, according to the physical characteristics of each energy storage medium, the supercapacitor is set to start as priority, thus reducing the number of cycles of lithium-ion batteries and extending the service life of the energy storage system. Second, the life cycle cost of the hybrid energy storage system is taken as an optimization objective, and the power of the energy storage system, energy demand and state-of-charge (SOC) of the lithium-ion battery and supercapacitor are used as constraints, so as to optimize the capacity configuration of the energy storage system and obtain the optimized capacity configuration parameters. Finally, the proposed strategy is compared with the fixed-threshold strategy and traditional equivalent consumption minimization strategy (ECMS). Results

收稿日期：2023-05-04；**修回日期**：2023-07-08，2023-08-21；
录用日期：2023-09-25；**网络首发日期**：2023-12-19
基金项目：中车“十四五”科技重大专项计划资助项目(2021CXZ021)；甘肃省教育厅：优秀研究生“创新之星”资助项目(2023CXZX-616)
This work is supported by Key Project of the “14th Five-Year Plan” of the Major Special Projects of Science and Technology of CRRC under the grant 2021CXZ021; Outstanding Graduate Students “Innovation Star” of Department of Education of Gansu Province under the grant 2023CXZX-616

show that the proposed strategy is more reasonable in terms of power allocation of the hybrid energy storage system, and it can improve the system response speed. The SOC offset ranges of lithium-ion battery and supercapacitor are significantly improved. The hydrogen consumption is reduced by 1.47 kg and 0.81 kg compared with those under the fixed-threshold and ECMS strategies, respectively, indicating that the fuel economy is improved.

Keywords: Hybrid energy storage system; tram; capacity configuration; energy management; life cycle

近年来，我国积极推广节能低碳型交通工具，同时大力提倡绿色出行理念。现代有轨电车因其运量大、能耗低、污染小、时间精准、速度快等优点备受人们青睐。储能式有轨电车在运行时需要同时达到大功率和高能耗的要求，为了满足有轨电车的运行需求及提升其动力性能，通常采用燃料电池、锂电池、超级电容混合储能系统作为有轨电车的动力系统[1-3]，而能量管理策略与容量配置则是燃料电池有轨电车混合动力系统中的核心技术。

混合动力有轨电车的能量管理策略可主要划分为 2 类: 基于规则的策略和基于优化的策略[4-5]。诸斐琴等[6]通过对有轨电车车辆加速时间预测得到储能系统实际使用功率，进而对混合储能系统功率进行重新分配；高锋阳等[7]通过传统动态规划得到混合储能系统的最优功率分配，随后通过算法寻优在不同电压范围下简化分配策略。以上策略虽然都能得到全局最优，但动态性能较差，很大程度依靠工程人员实际经验制定，缺乏全局适用性。混合储能系统能量管理策略决定有轨电车的实际功率分配，容量配置则影响储能系统的能量分配，合理配置储能系统容量对提高有轨电车燃料经济性尤为重要。在对储能系统的设计要求相对宽松的情况下，利用基本约束条件可以获得储能系统期望的容量分配。王玓等[8]在确定能量管理策略的基础上，以锂电池和超级电容能量及功率需求作为约束条件，得到锂电池串并联数及超级电容配置。优化配置是在满足基本约束条件的同时，使用优化算法对储能系统容量配置进一步寻优。Herrera 等[9]将电动大巴最优功率分配作为基本约束条件，同时与容量配置协同优化，将多目标优化转化为电动大巴全寿命周期成本，再通过模糊算法进行寻优；Shen 等[10]通过 1 种细分矩形算法对车载储能系统的电池寿命、储能系统全寿命周期成本进行全局寻优，同时结合帕累托前沿得到最优容量配置；Silvas 等[11]将混合储能系统用电成本作为优化目标，并通过动态规划得到储能系统最优容量配置，但未将能量管理纳入考虑，导致各储能元件之间需求功率分配不合理，不仅无法发挥系统最优性能，还可能加速系统衰老。

为保证多动力源有轨电车混合储能系统同时满足大功率、高能耗需求，提出 1 种多阈值能量管理策略。根据列车不同运行工况，通过设置多种充放电阈值实现储能系统多场景功率交换。在此能量管理策略基础上，采用联合优化方法，以储能系统全寿命周期成本为优化目标求解最优容量配置，进而延长混合储能系统的使用寿命。

1　混合储能系统

多动力源有轨电车混合储能系统以燃料电池为主动力源、锂电池与超级电容为辅助动力源，拓扑结构如图 1 所示。其中，燃料电池与锂电池通过单向与双向 DC-DC 变换器分别与直流母线相连，超级电容则起“削峰填谷”的作用。

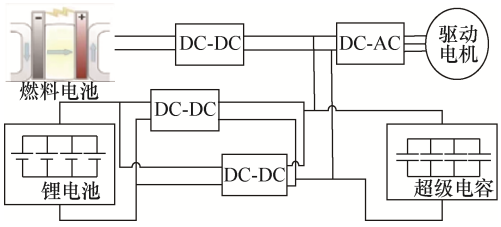


图 1　多动力源有轨电车混合储能系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of multi-power source hybrid energy storage system for trams

1.1　燃料电池模型

燃料电池等效电路如图 2 所示。图中：E_{fc} 为开路电压；U_{fc}、I_{fc} 分别为输出电压、输出电流；R_{fa} 为燃料电池活化过电压等效内阻；U_{fa} 为燃料电池活化过电压等效内阻两端活化过电压；R_{foh} 为燃料

电池欧姆过电压等效内阻；U_{foh} 为燃料电池欧姆过电压等效内阻两端欧姆过电压。

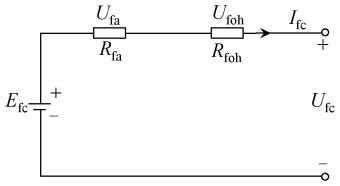


图 2 燃料电池等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of fuel cell

1.2 锂电池模型

由于锂电池在能量密度、功率密度、使用寿命及整体效率方面都优于传统蓄电池[12]，因此其在有轨电车混合储能系统中使用较为广泛，所采用锂电池单体等效电路模型如图 3 所示。图中：E_b 为锂电池开路电压；U_b、I_b 分别为输出电压、输出电流；R_b 为锂电池内阻。

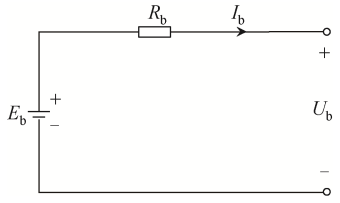


图 3 锂电池单体等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of single cell of lithium-ion battery

1.3 超级电容模型

超级电容的优势在于更快的充放电速度和较高的功率密度，在使用寿命方面也远高于传统蓄电池和锂电池[13]。图 4 所示为超级电容单体等效电路模型。图中：E_{sc} 为超级电容理想电压；I_{sc} 为超级电容理想电流；R_{sp} 为超级电容等效并联内阻；I_{sp} 为流过其并联内阻的电流；R_{ss} 为超级电容等效串联内阻；I_{ss} 为流过其串联内阻的电流。

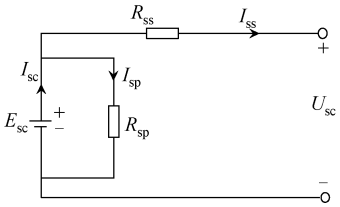


图 4 超级电容单体等效电路模型

Fig. 4 Equivalent circuit model of single cell of supercapacitor

2 能量管理策略

合适的能量管理策略能够使车辆根据当前的运行条件做出最佳的功率分配，从而提高系统运行效率使车辆以最小成本完成运行工况。多阈值能量管理策略的核心思想在于根据有轨电车行驶的不同工况，设定多种与之对应的阈值，实现多种介质的多场景功率交换，实时控制储能系统各个能量源之间的功率分配。能量管理策略运行状态见表 1，方案判据与输出如图 5 所示。在牵引工况下，混合储能系统分别以主动力源能馈阈值、高功率能馈阈值和储能系统最大能馈功率阈值为界限，同时根据列车所需牵引功率与设定阈值间的大小关系，将列车牵引工况划分为 4 种状态，各工况输出为：牵引工况 1，当列车需求功率大于储能系统最大能馈功率阈值时，储能系统均输出功率，满足列车运行功率需求，此时混合储能系统牵引功率 $P_{tract1}=P_{fc}+P_b+P_{sc}$，其中，$P_{fc}$ 为燃料电池功率，P_b 为锂电池功率，P_{sc} 为超级电容功率；牵引工况 2，当列车需求功率介于储能系统最大能馈阈值与主动力源能馈阈值之间时，燃料电池以最大功率保持输出，同时超级电容弥补列车功率缺额部分，此时 $P_{tract2}=P_{fc}+P_{sc}$；牵引工况 3，当牵引功率介于高功率系统能馈阈值与主动力源系统能馈阈值之间时，由超级电容完全提供列车运行功率，此时 $P_{tract3}=P_{sc}$；牵引工况 4，当牵引功率小于等于主动力源系统能馈功率阈值时，燃料电池将承担列车运行所需功率，此时 $P_{tract4}=P_{fc}$。

表 1 能量管理策略运行状态

Tab. 1 Operation states under energy management strategy

编号	运行状态	具体描述
1	牵引工况 1	$P_{tract1}=P_{fc}+P_b+P_{sc}$
2	牵引工况 2	$P_{tract2}=P_{fc}+P_{sc}$
3	牵引工况 3	$P_{tract3}=P_{sc}$
4	牵引工况 4	$P_{tract4}=P_{fc}$
5	制动工况 1	$P_{break1}=P'_{sc,max}+P'_{b,max}$
6	制动工况 2	$P_{break2}=P'_{sc,max}+P'_b$
7	制动工况 3	$P_{break3}=P'_{sc}$

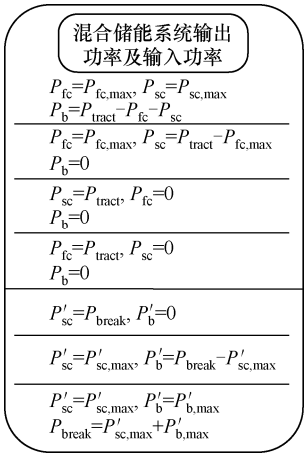


图 5　混合储能系统输出功率及输入功率

Fig. 5 Output and input power of hybrid energy storage system

针对超级电容功率密度大、充放电效率高等特点，将其设定在较高的优先级，提高混合储能系统综合响应能力；对于锂电池储能系统，根据其能量密度大、充放电次数较少的特点设置为较低优先级，减少其充放电次数。

当列车处于制动工况下时，为提高储能系统反应速度，在此仅设定 2 个储能阈值，将超级电容系统的储能功率最大值确定为第一储能阈值，所述混合储能系统的总功率为第二储能阈值。根据各储能系统特性，设置超级电容储能系统在再生制动工况下优先启动，首先满足其充电需求。具体各工况下储能系统吸收再生制动能量情况为：制动工况 1，当列车再生制动功率大于第二储能阈值时，混合储能系统辅助动力源以全功率吸收再生制动能量，此时混合储能系统再生制动功率 $P_{break1}=P'_{sc,max}+P'_{b,max}$，其中，$P'_{sc,max}$ 为超级电容最大再生制动功率，$P'_{b,max}$ 为锂电池最大再生制动功率；制动工况 2，当列车再生制动功率大于第一储能阈值且小于等于第二储能阈值时，超级电容以全功率吸收制动能量，锂电池吸收剩余制动能量，此时 $P_{break2}=P'_{sc,max}+P'_b$，其中，$P'_b$ 为锂电池再生制动功率；制动工况 3，当列车再生制动功率小于等于第一能馈阈值时，由超级电容全部吸收列车再生制动能量，此时 $P_{break3}=P'_{sc}$，其中，P'_{sc} 为超级电容再生制动功率。

3　容量配置方案

容量配置方案的制定是基于确定的能量管理策略，它们共同影响着储能系统的经济效益。通过建立混合储能系统全寿命周期成本，以储能系统功率、能量需求及锂电池和超级电容荷电状态 SOC(state-of-charge)为约束条件，对储能系统容量配置进行寻优，得到最优容量配置参数。

3.1　优化目标函数

混合储能系统的容量配置优化以降低储能系统全寿命周期成本[14-15]为目标，其中包括燃料电池、锂电池、超级电容各子系统的全寿命周期成本，其表达式为

$$\min f(X)=f_1(X)+f_2(X)+f_3(X) \tag{1}$$

式中：$f(X)$为优化目标；$f_1(X)$为燃料电池全寿命周期成本；$f_2(X)$为锂电池全寿命周期成本；$f_3(X)$为超级电容全寿命周期成本。

3.1.1　燃料电池全寿命周期成本

燃料电池的循环寿命老化主要表现在其性能衰减率，性能衰减率越低，燃料电池的使用寿命越长。其中，电压衰减率是燃料电池性能衰减率的主要评价指标，其表达式为

$$v_{deg}=k(\overline{n_1}V'_1+\overline{t_1}U'_1+\overline{n_2}V'_2+\overline{t_2}U'_2) \tag{2}$$

式中：v_{deg}为燃料电池电压衰减量；k 为修正系数，k=1.72；$\overline{n_1}$ 为燃料电池系统平均启停周期数；V'_1 为发生一次启停工况后，燃料电池的电压衰减值；$\overline{t_1}$ 为燃料电池评价怠速运行时间；U'_1 为进行单位时间的怠速工况后燃料电池的电压衰减值；$\overline{n_2}$ 为燃料电池平均负载变化幅度；V'_2 为发生单位幅度的负载变化后燃料电池的电压衰减率；$\overline{t_2}$ 为燃料电池平均高负载输出时间；U'_2 为进行单位时间的高负载工况后，燃料电池的电压衰减值。

根据式(2)，燃料电池的电压衰减率可定义为

$$\Psi_{fc}=\frac{v_{deg}}{\Delta V}=\frac{k(\overline{n_1}V'_1+\overline{t_1}U'_1+\overline{n_2}V'_2+\overline{t_2}U'_2)}{\Delta V} \tag{3}$$

式中，ΔV 为燃料电池寿命终结时的电压衰减值。

由此可见，燃料电池电压衰减率 Ψ_{fc} 越小，其理想使用寿命越长，耐久性越好。

燃料电池的全寿命周期可表示为

$$f_1(X)=f_{inv}+f_{rep}+f_{main} \tag{4}$$

式中：f_{inv} 为燃料电池的初始投资成本；f_{rep} 为燃料电池的置换成本；f_{main} 为燃料电池的维护成本。

3.1.2 锂电池全寿命周期成本

结合有轨电车的负荷特性，锂电池的性能衰减率主要表现在其总循环次数与放电深度 DOD (depth of discharge)。在储能元件正常运行时，重点考虑放电深度对于元件使用寿命的影响，锂电池放电深度计算公式为

$$D_b=S_{OC,bmax}-S_{OC,b} \tag{5}$$

式中：$S_{OC,bmax}$ 为锂电池在正常工作状态下允许的最大 SOC；$S_{OC,b}$ 为锂电池当前状态下的 SOC。

电池性能衰减率的定义为不同放电深度下，电池的使用次数与最大允许使用次数的比值，其表达式为

$$\Psi_b=\sum_{i=1}^{N_{DOD}}\left(\frac{N_{bci}}{N_i}\right) \tag{6}$$

式中：N_{DOD} 为锂电池正常运行在放电深度变化范围内的数量，可通过雨流计数法得到；N_{bci} 为有轨电车完成一次工况后，锂电池在放电深度区间内的充放电循环次数；N_i 为锂电池在放电深度区间内允许的最大充放电循环次数。由式(6)可知，Ψ_b 越小，锂电池的理想寿命越长，耐久性能越好。

锂电池的全寿命周期成本可表示为

$$f_2(X)=b_{inv}+b_{req}+b_{main} \tag{7}$$

式中：b_{inv} 为锂电池初始投资成本；b_{req} 为锂电池更换成本；b_{main} 为锂电池维护保养成本。

3.1.3 超级电容全寿命周期成本

超级电容性能衰减率及放电深度是评价超级电容寿命的主要指标，其计算公式分别为

$$D_{sc}=S_{OC,scmax}-S_{OC,sc} \tag{8}$$

$$\Psi_{sc}=\sum_{i=1}^{N_{DOD}}\left(\frac{N_{sci}}{N_{si}}\right) \tag{9}$$

式中：$S_{OC,scmax}$ 为超级电容正常工作允许的最大 SOC；$S_{OC,sc}$ 为超级电容当前状态下的 SOC；N_{sci} 为列车完成一次行驶工况后，超级电容在允许放电深度区间内的充放电次数；N_{si} 为放电深度区间内最大充放电循环次数。由此可见，Ψ_{sc} 越小，超级电容的期望寿命越长，耐久性越好。

综合考虑超级电容自身特性，其全寿命周期成本可表示为

$$f_3(X)=S_{inv}+S_{main} \tag{10}$$

式中：S_{inv} 为超级电容的初始投资成本；S_{main} 为超级电容的后期维护成本。

3.2 约束条件

列车功率约束条件为

$$N_{s1}N_{p1}P_{sc}+N_{s2}N_{p2}P_b+P_{fc}\geqslant P_{tract} \tag{11}$$

$$N_{s1}N_{p1}P'_{sc}+N_{s2}N_{p2}P'_b\geqslant P_{break} \tag{12}$$

式中：N_{s1}、N_{p1} 分别为超级电容储能介质串、并联数；N_{s2}、N_{p2} 分别为锂电池储能介质串、并联数。

列车能量约束条件为

$$\int_{t_1,st(k)}^{t_1,end(k)}N_{s1}N_{p1}P_{sc}dt+\int_{t_2,st(k)}^{t_2,end(k)}N_{s2}N_{p2}P_b\,dt+\int_{t_3,st(k)}^{t_3,end(k)}P_{fc}dt\geqslant E_{track} \tag{13}$$

$$\int_{t_1,st(k)}^{t_1,end(k)}N_{s1}N_{p1}P'_{sc}dt+\int_{t_2,st(k)}^{t_2,end(k)}N_{s2}N_{p2}P'_b dt\geqslant E_{break} \tag{14}$$

式中：t_1、t_2、t_3 分别为超级电容、锂电池、燃料电池运行时间；end(k)、st(k)分别为混合动力系统停止、启动时间；E_{track}、E_{break} 分别为有轨电车牵引、制动工况下所需能量。

超级电容及锂电池荷电状态约束条件为

$$S_{OC,scmin}(X)\leqslant S_{OC,sc}(X)\leqslant S_{OC,scmax}(X) \tag{15}$$

$$S_{OC,bmin}(X)\leqslant S_{OC,b}(X)\leqslant S_{OC,bmax}(X) \tag{16}$$

式中：$S_{OC,scmin}$ 为超级电容正常工作允许的最小 SOC；$S_{OC,bmin}$ 为锂电池在正常工作状态下允许的最小 SOC。

本文所提混合储能系统容量配置优化流程

如图 6 所示。

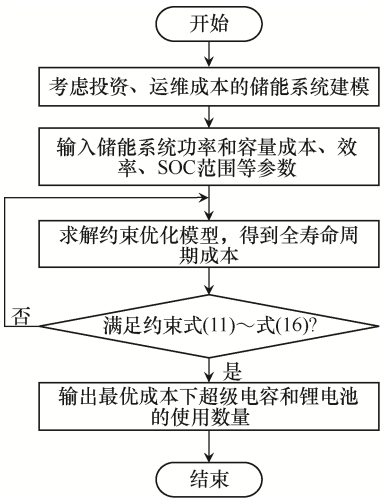


图 6　容量配置优化流程

Fig. 6 Flow chart of capacity allocation optimization

4　对比分析

本文构建了以燃料电池作为主动力源，锂电池、超级电容为辅助动力源的有轨电车混合储能系统模型，车辆仿真参数见表 2，综合对比了不同能量管理策略下混合储能系统的性能参数。根据列车条件与实际工况条件，依照图 6 的容量配置优化流程，得到混合储能系统燃料电池、超级电容、锂电池配置见表 3。

表 2　车辆及各动力源主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of train and each power source

参数	数值
母线电压(直流)/V	750
负载功率/kW	280
轴重/t	12
列车自重/t	47
续航里程/km	>40
最高行驶速度/(km·h^{-1})	60
主动力源电压上限/V	750
燃料电池电堆数	2
电堆额定功率/kW	150
电芯额定容量/(A·h)	40
超级电容最大电流/A	98
超级电容最大充放电次数	1 000 000
超级电容储存能量/(W·h)	52.8

表 3　容量配置结果

Tab. 3 Results of capacity configuration

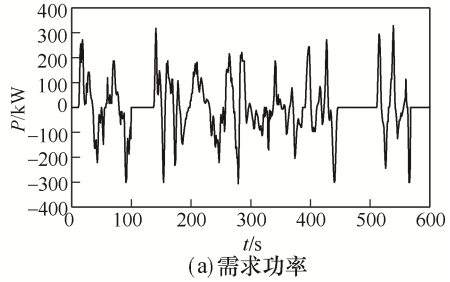
参数	数值
燃料电池单体数量	735
锂电池组串、并联数	144(串联)、2(并联)
超级电容组串、并联数	12(串联)、3(并联)
燃料电池堆额定电压/V	540.0
锂电池组单体额定电压/V	2.3
超级电容组额定电压/V	750.0

4.1　功率分配对比

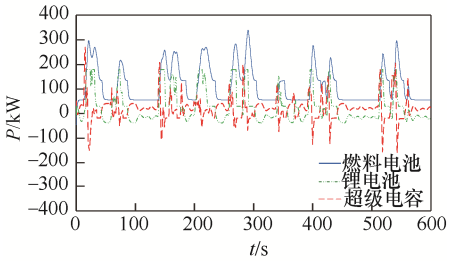
根据车辆条件与有轨电车负载工况条件进行牵引仿真可得有轨电车需求功率曲线如图 7(a)所示。对比 ECMS 策略与固定阈值策略功率分配结果，分别如图 7(b)~(d)所示。可以看出，在所验证 3 种策略下，混合储能系统通过超级电容补充峰值功率，有效缓解了燃料电池和锂电池波动幅度大的问题。如图 7(b)所示，由于 ECMS 策略下超级电容储能系统回收列车再生制动能量较小，导致锂电池频繁充放电，故其功率曲线波动幅度较大，弱化了超级电容“削峰填谷”的能力；如图 7(c)所示，虽然超级电容回收再生制动能量有所提升，但由于固定阈值策略本身适应性不足，对于突变工况适应能力较差，导致燃料电池功率和锂电池功率在工况突变情况下波动幅度较大；如图 7(d)所示，多阈值能量管理策略根据列车运行不同工况设置多个阈值区间，超级电容和锂电池作为补偿平均功率和峰值功率的辅助电源，有效降低了燃料电池峰值功率的冲击，通过设置超级电容优先启动吸收列车再生制动能量，减少锂电池启动次数，在满足列车运行功率需求条件下进一步延长储能系统使用寿命。燃料电池、锂电池、超级电容整个系统工作的功率总和基本上与负载的需求功率相等，验证了该系统充分提供牵引能量和吸收再生制动能量的能力。

4.2　锂电池和超级电容 SOC 对比

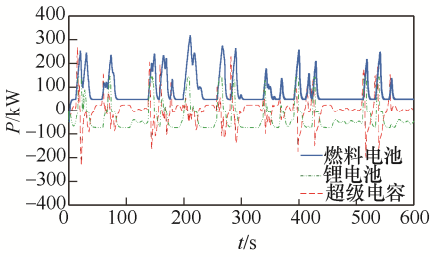
锂电池和超级电容 SOC 的仿真结果如图 8 所示。由于固定阈值策略属于离线能量管理策略，不能进行在线计算，对燃料电池实时状态的评价不够准确，造成锂电池能源浪费，锂电池 SOC 呈下降



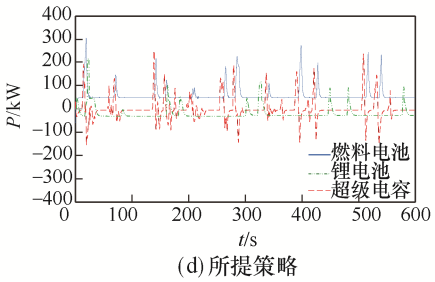
(a) 需求功率



(b) ECMS控制策略



(c) 固定阈值策略

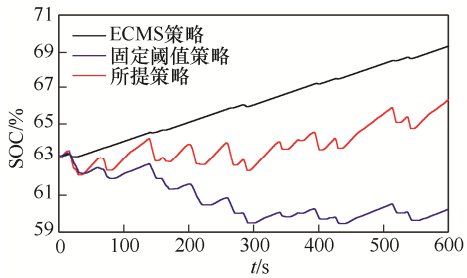


(d) 所提策略

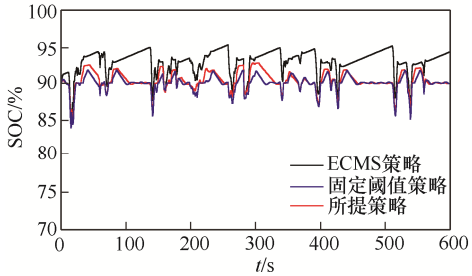
图 7 不同策略下的功率分配

Fig. 7 Power allocation under different strategies

趋势，末态 SOC 值较低，最终达到 60.2%，而对于 ECMS 策略而言，由于等效能耗评估不够准确，导致锂电池出现过充现象，锂电池 SOC 呈上升趋势，末态 SOC 值较高，最终达到 69.4%；对于所



(a) 锂电池SOC



(b) 超级电容SOC

图 8 不同策略下的锂电池和超级电容 SOC

Fig. 8 SOCs of lithium-ion battery and supercapacitor under different strategies

提策略，锂电池 SOC 全程均在 63%左右浮动，当列车处于启动或加速阶段时，由于需求功率过大，燃料电池提前响应为锂电池充电，在保证不影响功率输出的前提下抑制了锂电池 SOC 的波动。

图 8(b)中固定阈值策略、ECMS 策略、所提策略下超级电容 SOC 的波动范围依次为 85.58%~95.41%、83.52%~91.50%、85.00% ~92.48%，末态 SOC 分别为 94.48%、89.90%、89.96%，表明所提策略在超级电容 SOC 方面相较于固定阈值策略和 ECMS 策略具有最小的波动幅度，充分发挥了超级电容快速充放电、功率密度大等优点，维持了混合储能系统稳定运行。

4.3 氢气消耗量对比

整个循环工况中燃料电池氢气消耗量如图 9 所示，在运行结束时，固定阈值策略、ECMS 策略、所提策略的氢气消耗量依次为 3.41 kg、2.75 kg、1.94 kg。所提策略的氢气消耗相较于固定阈值策略降低了 43.11%，相较于 ECMS 策略降低了 29.45%，表明所提策略能够大幅降低氢气消耗量，使得混合储能系统燃料经济性达到全局最优。

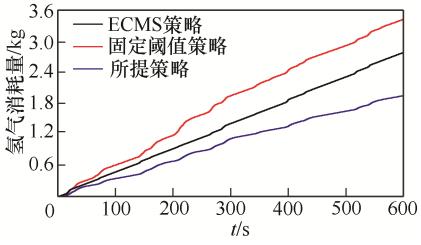


图 9 不同策略下的氢气消耗量

Fig. 9 Hydrogen consumption under different strategies

5　结语

多阈值能量管理策略依据列车不同运行工况设置多种充放电阈值，可根据列车运行工况做出相应功率变化，灵活性好，对负载的适应性更强，提高了混合储能系统可靠性及稳定运行能力。在所提策略的基础上通过容量配置优化，实现了混合储能系统功率分配、锂电池和超级电容 SOC 偏移范围最优的同时，大幅降低了氢气消耗量，使储能系统在保证列车运行功率需求的情况下同时兼具经济性。所提策略和优化配置的有机结合易于实现，能够为燃料电池混合动力有轨电车储能系统设计及优化整车动力系统性能提供参考。

参考文献：

[1] 赵野, 朱志国. 我国现代有轨电车功能定位的初探[J]. 交通运输工程与信息学报, 2016, 14(1): 70-75.
Zhao Ye, Zhu Zhiguo. Exploration on the modern tram function in our country [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2016, 14(1): 70-75. (in Chinese)

[2] Zhang Qiao, Li Gang. Experimental study on a semi-active battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicle application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1014-1021.

[3] Herrera V I, Gaztañaga H, Milo A, et al. Optimal energy management and sizing of a battery-supercar-pacitor-based light rail vehicle with a multiobjective approach [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 3367-3377.

[4] 高锋阳, 张国恒, 石岩, 等. 新型城轨电车混合动力系统能量管理策略[J]. 铁道学报, 2019, 41(4): 48-54.
Gao Fengyang, Zhang Guoheng, Shi Yan, et al. Energy management strategy for new type urban rail vehicle hybrid power system [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(4): 48-54. (in Chinese)

[5] Zhang Han, Yang Jibin, Zhang Jiye, et al. A firefly algorithm optimization-based equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid light rail vehicle [J]. Energies, 2019, 12(14): 2665.

[6] 诸斐琴, 杨中平, 林飞, 等. 基于加速时间预测的现代有轨电车储能系统能量管理与容量配置优化研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 158-166.
Zhu Feiqin, Yang Zhongping, Lin Fei, et al. Research on acceleration-time-prediction-based energy management and optimal sizing of onboard energy storage system for modern trams [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 158-166. (in Chinese)

[7] 高锋阳, 张浩然, 王文祥, 等. 氢燃料电池有轨电车混合储能系统的节能运行优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 686-696.
Gao Fengyang, Zhang Haoran, Wang Wenxiang, et al. Energy saving operation optimization of hybrid energy storage system for hydrogen fuel cell tram [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 686-696. (in Chinese)

[8] 王玓, 杨中平, 林飞, 等. 有轨电车车载混合储能系统动态比例分配策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 405-413.
Wang Yu, Yang Zhongping, Lin Fei, et al. Dynamic ratio distribution strategy for hybrid storage system of tram [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 405-413.

[9] Herrera V I, Milo A, Gaztanaga H, et al. Multi-objective optimization of energy management and sizing for a hybrid bus with dual energy storage system [C]// 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Hangzhou, China, 2016: 1-6.

[10] Shen Junyi, Dusmez S, Khaligh A. Optimization of sizing and battery cycle life in battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2112-2121.

[11] Silvas E, Hofman T, Murgovski N, et al. Review of optimization strategies for system-level design in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1): 57-70.

[12] 罗嘉明, 韦晓广, 高仕斌, 等. 高速铁路储能系统容量配置与能量管理技术综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7028-7051.

Luo Jiaming, Wei Xiaoguang, Gao Shibin, et al. Summary and outlook of capacity configuration and energy management technology of high-speed railway energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7028-7051. (in Chinese)

[13] 马茜, 郭昕, 罗培, 等. 基于超级电容储能的新型铁路功率调节器协调控制策略设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 765-776.

Ma Qian, Guo Xin, Luo Pei, et al. Coordinated control strategy design of new type railway power regulator based on super capacitor energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 765-776. (in Chinese)

[14] 程昱明, 孟高军, 贾鹏, 等. 用于平抑风电功率波动的混合储能容量优化配置方法[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 251-261.

Cheng Yuming, Meng Gaojun, Jia Peng, et al. Optimal hybrid energy storage capacity configuration method for mitigating fluctuations of wind power [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 251-261. (in Chinese)

[15] 李陇杰, 李蒙恩, 卢勇, 等. 计及寿命损耗及需求响应的储能优化配置方法[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 208-219.

Li Longjie, Li Meng'en, Lu Yong, et al. Optimal configuration method for energy storage taking into account lifetime losses and demand response [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 208-219. (in Chinese)



高锋阳

作者简介：

高锋阳(1970—)，男，中国电源学会高级会员，硕士，教授级高工。研究方向：混合储能系统能量管理及大功率电源。E-mail：ljdgaofy@lzjtu.edu.cn。

高智山(1999—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：混合储能系统能量管理。E-mail：1834651825@qq.com。

强雅昕(1999—)，女，硕士研究生。研究方向：混合储能系统能量管理。E-mail：939211524@qq.com。

韩国鹏(1988—)，男，博士，副高级工程师。研究方向：混合储能系统能量管理。E-mail：hanguopeng@tangche.com。

(责任编辑：郭凯凯)