

燃料电池船复合储能容量优化与配置经济性分析

李昕^{1,3}, 张靖凯¹, 汤旭晶^{1,2,3}, 黄江帆¹, 石宇涵¹, 杨祥国¹

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;

3. 武汉理工大学 交通运输部船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘要:复合储能系统可改善由船舶负载功率波动引起的燃料电池寿命损耗问题,但配置成本限制了其在燃料电池船上的广泛应用。为合理配置储能容量,使船舶动力系统具备长期的可靠性,提出了一种计及复合储能系统全寿命周期的容量优化配置方法。在构建各电源系统模型的基础上,建立包括购置成本、维护成本、置换成本和能耗成本的复合储能系统全寿命周期成本模型,并采用雨流计数法来评估储能的置换成本。最后依据“Alsterwasser”号燃料电池船的典型功率需求数据,以储能设备的容量参数、燃料电池的输出功率和电源系统的运行参数为优化变量,采用灰狼优化算法进行求解。通过不同储能类型和优化目标下的配置方案对比,验证了所提方法的经济性。

关键词:燃料电池船;复合储能系统;容量优化配置;全寿命周期成本;灰狼优化算法

中图分类号:U665

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2024.03.007

Optimization and economic allocation analysis of hybrid energy storage capacity of fuel cell ship

LI Xin^{1,3}, ZHANG Jingkai¹, TANG Xujing^{1,2,3}, HUANG Jiangfan¹, SHI Yuhuan¹, YANG Xiangguo¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430063, China; 2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. Key Laboratory of Marine Power

Engineering & Technology, Ministry of Transport, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Hybrid Energy Storage System (HESS) can improve the lifetime loss of fuel cells caused by ship load power fluctuation, but the configuration cost limits the wide application of HESS in fuel cell ships. In order to rationally allocate energy storage capacity and make ship power system design have long-term reliability, this paper proposes a capacity optimal allocation method which takes into account the whole life cycle of HESS. Based on the model of each power supply system, the life-cycle cost model of HESS including purchase cost, maintenance cost, replacement cost and energy consumption cost is established, and the rain-flow counting method is used to evaluate the replacement cost of energy storage. Finally, according to the typical power demand data of "Alsterwasser" fuel cell ship, the capacity parameters of energy storage equipment, the output power of fuel cells and the operation parameters of power system are taken as optimization variables, and the gray Wolf optimization algorithm is used to solve the problem. Through the comparison of configuration schemes under different energy storage types and optimization objectives, the economic efficiency of the proposed method is verified.

收稿日期:2023-04-09

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFE0104600);国家自然科学基金项目(51909199);工信部绿色智能内河船舶创新专项(MC-202002-C01)

作者简介:李昕(1988—),男,副教授,博士,研究方向为新能源船舶智能控制与优化。E-mail: littleval@126.com

通信作者:张靖凯(1997—),男,硕士生,研究方向为新能源船舶电力推进系统优化与先进控制技术。E-mail: a1145008136@163.com

引用格式:李昕,张靖凯,汤旭晶,等. 燃料电池船复合储能容量优化与配置经济性分析[J]. 中国航海,2024,47(3):55-64.

LI X,ZHANG J K,TANG X J, et al. Optimization and economic allocation analysis of hybrid energy storage capacity of fuel cell ship[J].

Navigation of China,2024,47(3):55-64. (in Chinese)

Key words: fuel cell ship; hybrid energy storage system; capacity optimization allocation; full life cycle cost; gray wolf algorithm

随着航运业的快速发展,船舶碳排放问题不容忽视。根据国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)的数据,2021年全球航运领域CO₂的排放量达8.33亿t,约占世界总排放量的3%,因此,亟待开展新型清洁能源在船舶上的应用研究。燃料电池具有噪声小、能量密度大等优势,有望成为船舶的主动力设备。但目前燃料电池技术尚未成熟,其使用寿命受负载波动的影响程度较大^[1]。因此,受船舶多变工况的影响,仅燃料电池作为动力源难以及时适应船舶负载的频繁变化,通常需要配置一定容量的储能设备来抑制燃料电池的输出,以延长其使用寿命。储能设备按照功能可分为能量型储能设备和功率型储能设备两类,前者应用于容量需求较大但对不平衡功率响应速度要求较低的场合,后者则与之相反。由于目前的储能设备难以同时兼顾能量特性与功率特性,由两种储能设备组成的复合储能系统(Hybrid Energy Storage System, HESS)成为研究的热点。

HESS的综合效益与储能设备的容量配比直接相关,在保证船舶安全稳定运行的前提下,合理配置储能容量,降低冗余及配置成本,可为船用燃料电池的推广应用创造有利条件。目前国内外学者已针对船舶HESS的容量优化配置问题开展了一系列研究工作。文献[2-6]结合船舶动力系统的能量与功率需求设置储能系统的约束限值进而计算储能容量。这类方法从技术层面给出了储能的配置方案,具有计算简单、实现难度低等特点,但对储能运行特性的考虑较少,且未能对储能的配置成本进行评价。文献[7-12]在分析HESS优化目标构成的基础上,建立了容量优化配置模型,随后采用智能优化算法进行求解。其中,文献[7]以成本、负载波动和供求平衡为优化目标,建立了多目标容量优化配置模型,然后采用适应度值离差排序法确定各目标函数对应的惯性权重,并结合智能优化算法获得HESS的最终容量配比。文献[8]将锂电池的寿命衰减考虑在内,在建立锂电池寿命衰减百分比模型的基础上,提出了改进的粒子群混沌优化算法,并以HESS的经济性为优化目标,完成了储能设备的容量优化配置。文献[9]采用了一个高功率密度的蓄电池来避免频繁充放电对电池寿命的影响,提出了一种以经济和环境为优化目标的双层优化模型,并通过标准边界交叉法与列和约束生成算法相结合的方法来求解。文献[10-12]考虑容量配置与能量管理之间的耦合

性,以燃料电池船“Alsterwasser”号为试验对象,将铅酸电池改装为HESS,然后在提出基于功率分流的能量管理策略的基础上,通过容量配置与能量管理联合优化确定了容量的最优配置方案。这种基于模型优化的配置方法可对HESS的配置容量进行综合性评价,便于获得最优的配置方案。

上述文献对HESS容量优化配置的相关因素进行了深入研究,且从技术层面给出了较为合理的配置方案,但仍存在以下不足:1)研究多集中于HESS初次投资成本的最优化问题,对后期运行维护过程中产生的费用及相关影响因素缺乏细致的分析,可能导致在设计年限内的综合成本较高,且设计方案的适用性不强,较难保证船舶运行的安全性;2)船舶在不同运行方式下,各电源产生的成本也存在较大差异,若采用固定的运行策略,无法求得成本最优的HESS容量,且配置方案的可行性较差,不能充分发挥HESS的优势。

针对上述问题,本文以世界第一艘燃料电池船“Alsterwasser”号游船为研究对象,首先分析其动力系统的结构特性,将原船的铅酸电池更换为由锂电池和超级电容组成的HESS,以抑制燃料电池的功率输出,延长其使用寿命。然后,建立以最大额定容量、储能功率和母线电压波动范围等为约束,以全寿命周期成本最低为目标的HESS容量优化模型,并采用灰狼算法求解,以获得最优成本下的配置方案。最后,结合实例进行仿真分析,以验证HESS容量配置方案的优越性。

1 动力系统结构与建模

1.1 动力系统拓扑结构

燃料电池船“Alsterwasser”号的动力系统由燃料电池、铅酸电池、电动机和单向DC/DC变换器构成。由于铅酸电池存在体积大、污染环境等问题,不适宜作为船舶的动力电源。因此,考虑将原船中的铅酸电池替换为锂电池,并增加超级电容和双向DC/DC变换器。

本研究采用如图1所示的锂电池半主动式拓扑结构。锂电池自身的电压特性较“硬”,该结构中锂电池直接并联在直流母线上,便于稳定母线电压。在配置容量方面,由于其端电压受母线电压的制约,锂电池的串联电压等级需要与母线电压相匹配。

1.2 燃料电池模型

“Alsterwasser”号装备了两台“PM Basic A 50 maritime”燃料电池系统,其主要参数如表1所示。

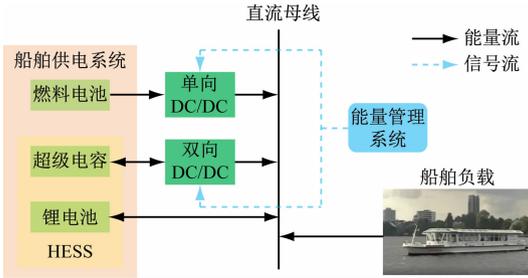


图1 燃料电池船动力系统拓扑结构

Fig.1 Topological structure of power system of fuel cell ship

表1 燃料电池系统的主要参数^[13]

Tab.1 Main parameters of fuel cell system

参数	数值	参数	数值
峰值功率/kW	48	工作电流/A	280 ~ 520
工作电压/V	140 ~ 260	体积/mm ³	1 100 × 2 200 × 900

燃料电池的效率曲线如图2所示^[14],其高效工作区间为10~80 kW。本文中燃料电池输出功率与效率的关系表达式由9阶多项式拟合得到。

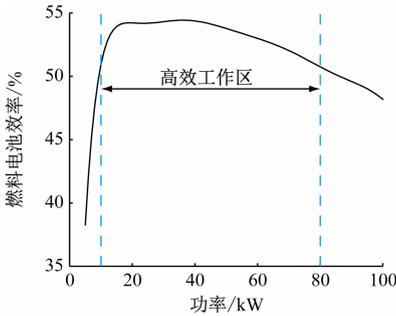


图2 燃料电池效率曲线

Fig.2 Fuel cell efficiency curve

在一个时长为 T 的循环工况下燃料电池系统的耗氢量为 m_{H_2} ,其计算公式为

$$m_{H_2} = \int_0^T \frac{P_{fc}(t)}{\eta_{fc}(P_{fc}(t)) \times Q_{H_2}} dt \quad (1)$$

式中: $P_{fc}(t)$, $\eta_{fc}(P_{fc}(t))$ 分别表示 t 时刻燃料电池的输出功率和输出效率; Q_{H_2} 表示 H_2 的热值。

燃料电池的寿命衰减与负载功率有关,负载功率与燃料电池寿命衰减量 ΔV_{fc} 之间的量化关系^[15]为

$$\Delta V_{fc} = N_{fc} [(\bar{d}_1 t_1 + \bar{d}_2 t_2) + \bar{d}_3 n_3] + \bar{d}_4 |\Delta P_{fc}| \quad (2)$$

式中: N_{fc} 为燃料电池单体数量; $\bar{d}_1 \sim \bar{d}_4$ 分别表示燃料电池高功率运行、低功率运行、启/停机、变载造成的电压平均衰减率; t_1 、 t_2 分别为高、低功率运行时间; n_3 表示启/停机次数; ΔP_{fc} 表示输出功率变化率。

由式(2)可知,燃料电池寿命的影响因素有低功率运行、高功率运行、启/停机、变载。文献[16]

指出燃料电池输出功率不大于额定功率的20%为低功率运行,输出功率不小于额定功率的80%为高功率运行。为了最大限度延长燃料电池的使用寿命,燃料电池以恒定功率进行输出,输出范围是额定功率的20%~80%。

1.3 锂电池模型

本文的锂电池单体主要参数如表2所示,锂电池单体的能量与功率的计算公式为

$$\begin{cases} E_{ba,cell} = C_{ba,cell} U_{ba,cell} \\ P_{ba,cell} = I_{ba,cell} U_{ba,cell} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_{ba,cell}$ 、 $P_{ba,cell}$ 分别为锂电池的单体能量和单体功率; $C_{ba,cell}$ 为额定容量; $U_{ba,cell}$ 为标称电压; $I_{ba,cell}$ 为最大持续放电电流。

表2 锂电池单体主要参数

Tab.2 Main parameters of lithium battery monomer

参数	数值
额定电压/V	3.8
额定容量/Ah	20
截止电压/V	3.3
最大工作电流/A	100

锂电池的等效电路模型选用图3所示的一阶Thevenin模型,该模型由等效内阻 R_1 、极化电容 C_p 和极化电阻 R_p 构成, $U_{ocv,b}$ 为开路电压, I_b 为充放电电流, U_b 为输出电压。模型的参数设定可参考文献[17]。

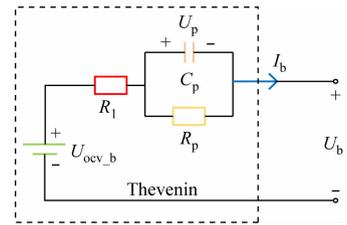


图3 锂电池等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model of lithium battery

锂电池的荷电状态(State of Charge, SoC)用于估计锂电池在不同时刻的电量,计算公式为

$$B_{soc}(t) = B_{soc,0} - \frac{\int P_{ba}(t) dt}{E_{ba,rate}} \quad (4)$$

式中: $B_{soc}(t)$ 、 $P_{ba}(t)$ 为电池在 t 时刻的SoC和充放电功率; $B_{soc,0}$ 为电池的初始SoC; $E_{ba,rate}$ 为电池的额定能量。

1.4 超级电容模型

超级电容单体的主要参数如表3所示,考虑到超级电容的高效工作电压不得低于0.5倍的额定电压,超级电容单体能量计算公式为

$$E_{sc,cell} = \frac{1}{2} C_{sc,cell} \left(U_{sc,cell}^2 - \left(\frac{U_{sc,cell}}{2} \right)^2 \right) \quad (5)$$

式中: $E_{sc,cell}$ 为超级电容单体的能量; $C_{sc,cell}$ 为额定电容; $U_{sc,cell}$ 为额定电压。

据国际电工委员会发布的 IEC 62391-2 标准, 超级电容的功率计算公式为

$$P_{sc,cell} = \frac{0.12 U_{sc,cell}^2}{R_{ESR}} \quad (6)$$

式中: $P_{sc,cell}$ 为超级电容的单体功率; R_{ESR} 表示内阻。

表3 超级电容单体主要参数

Tab.3 Main parameters of supercapacitor monomer

参数	数值
额定电压/V	16
额定容量/F	58
最小工作电压/V	9.6
最大工作电流/A	100

超级电容 SoC 与输出电压有关, 计算公式为

$$\begin{cases} S_{soc}(t) = \frac{U_{sc}^2(t)}{U_{sc,rate}^2} \\ S_{soc}(t) = S_{soc,0} - \frac{\int P_{sc}(t) dt}{E_{sc,rate}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $S_{soc}(t)$ 、 $P_{sc}(t)$ 、 $U_{sc}(t)$ 为超级电容在 t 时刻的 SoC、充放电功率、电压; $S_{soc,0}$ 为初始 SoC, $U_{sc,rate}$ 和 $E_{sc,rate}$ 为额定电压和额定容量。

2 HESS 容量优化模型的建立与求解

2.1 HESS 运行策略

燃料电池的运行策略与容量配置成本具有一定的耦合性。为了充分发挥 HESS 的储能优势, 满足船舶不同运行工况下的负载需求, 本文采用一种基于工况分类的 HESS 功率分配策略^[18-19]。

“Alsterwasser”号游船一次典型航行中的功率需求曲线如图4所示, 经过对该曲线变化特征的分析, 将0~85 s 和 202~360 s 设置为巡航工况(I类), 86~201 s 设置为机动工况(II类), 然后针对

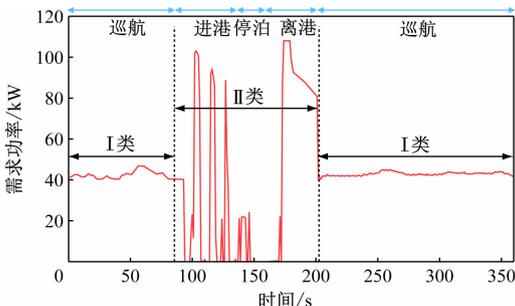


图4 “Alsterwasser”号游船功率需求曲线

Fig.4 Power demand curve of "Alsterwasser" cruise ship

这两种工况分别设置不同时间常数(T_1, T_2)的一阶低通滤波器, 以应对不同的负载需求, 最后将分解后的高频分量由超级电容承担, 低频功率则由锂电池承担。

2.2 优化目标函数

本文涉及的全寿命周期成本主要包括初始购置成本 C_{Inv} 、设备维护成本 C_{Mai} 、储能置换成本 C_{Rep} 、能源消耗成本 C_{Ene} 。HESS 容量优化配置的优化目标为全寿命周期成本(C_{Lcc})最低, 可表示为

$$\min C_{Lcc} = \min \{ C_{Inv} + C_{Mai} + C_{Rep} + C_{Ene} \} \quad (8)$$

本文选取五个可变参数组成 HESS 容量优化配置的决策向量 \mathbf{x} , 分别是锂电池容量 $E_{ba,rate}$ 、超级电容容量 $E_{sc,rate}$ 、燃料电池的输出功率 $P_{fc,rate}$ 、时间常数 T_1 、时间常数 T_2 , 即

$$\mathbf{x} = [E_{ba,rate} \quad E_{sc,rate} \quad P_{fc,rate} \quad T_1 \quad T_2]^T \quad (9)$$

2.2.1 初始购置成本

HESS 的初始投资成本由容量购置成本、设备安装成本和配套电池管理系统(Battery Management System, BMS)成本构成。在实际应用中, 船用 HESS 模组由设备单体通过串联和并联的形式组成, 随着串并联数量的增加, 所需要的控制系统就更加精密, 控制成本也会增加。为简化 C_{Inv} 的计算, 本文采用的计算公式为

$$C_{Inv} = C_{Inv,ba} + C_{Inv,sc} \quad (10)$$

$C_{Inv,ba}$ 和 $C_{Inv,sc}$ 的表达式为

$$\begin{cases} C_{Inv,ba} = C_{ba,kWh} E_{ba,rate} \\ C_{Inv,sc} = C_{sc,kWh} E_{sc,rate} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $C_{ba,kWh}$ 和 $C_{sc,kWh}$ 表示锂电池和超级电容的单位容量成本。其中, $C_{ba,kWh}$ 取 4 000 元/kWh^[20]; 由于 Maxwell 公司的 BMS 技术较为成熟, 本文结合该公司大容量超级电容在国内的售卖价格, $C_{sc,kWh}$ 取 100 000 元/kWh。

2.2.2 设备维护成本

设备的维护成本由燃料电池 $C_{Mai,fc}$ 、锂电池 $C_{Mai,ba}$ 和超级电容 $C_{Mai,sc}$ 的维护成本组成, 即

$$C_{Mai} = \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} (C_{Mai,ba} + C_{Mai,sc} + C_{Mai,fc}) \quad (12)$$

式中: r 为折现率; Y 为燃料电池船的设计年限。

燃料电池的维护成本与发电量成正比, 其维护成本可表示为

$$C_{Mai,fc} = N_{cyc} 365 Y C_{m,fc} \int_0^T P_{fc}(t) dt \quad (13)$$

式中, $C_{m,fc}$ 是燃料电池的维护成本系数; N_{cyc} 为负载工况循环次数; T 为一个循环周期。

储能设备的维护成本与其能量的吞吐量成正

比^[21], HESS 的维护成本可表示为

$$\begin{cases} C_{\text{Mai,ba}} = N_{\text{cyc}} 365 Y C_{\text{m,ba}} \int_0^T |P_{\text{ba}}(t)| dt \\ C_{\text{Mai,sc}} = N_{\text{cyc}} 365 Y C_{\text{m,sc}} \int_0^T |P_{\text{sc}}(t)| dt \end{cases} \quad (14)$$

式中, $C_{\text{m,ba}}$ 、 $C_{\text{m,sc}}$ 为锂电池和超级电容的维护成本系数。

2.2.3 设备置换成本

储能设备在全寿命周期内的置换成本与置换次数有关, 置换成本可表示为

$$C_{\text{Rep}} = n_{\text{ba}} C_{\text{Inv,ba}} + n_{\text{sc}} C_{\text{Inv,sc}} \quad (15)$$

式中, n_{ba} 、 n_{sc} 为储能的置换次数。

由于超级电容充放电过程中不发生化学反应, 其循环次数可达 50 ~ 100 万次, 故认为在全寿命周期内超级电容不发生置换成本。影响锂电池寿命的主要因素包括充放电倍率^[22]、工作温度^[23] 和放电深度 (Depth of Discharge, DoD) 等。当锂电池工作在安全范围时, 放电深度是寿命折损的主要影响因素。

DoD 对锂电池寿命的影响程度可通过雨流计数法计算。该方法可用于统计锂电池的 DoD 和充放电循环次数, 从而求得一个循环工况下锂电池的等效循环寿命。

置换次数的计算公式为

$$n_{\text{ba}} = \left\lfloor \sum_{i=1}^{N_{\text{DoD}}} \frac{1}{N_{\text{ba}}(I_{\text{DoD},i})} \cdot N_{\text{cyc}} \cdot 365 \cdot Y \right\rfloor \quad (16)$$

式中: $I_{\text{DoD},i}$ 是第 i 次等效循环的放电深度; $N_{\text{ba}}(I_{\text{DoD},i})$ 是放电深度为 $I_{\text{DoD},i}$ 时锂电池的等效循环寿命; N_{DoD} 是等效循环数量; 锂电池的 DoD 与等效循环寿命的变化关系可参考文献[24]。

2.2.4 设备能耗成本

设备的能耗成本由氢燃料成本 C_{H_2} 和购电成本 C_{ele} 组成, 即

$$C_{\text{Ene}} = C_{\text{H}_2} + C_{\text{ele}} \quad (17)$$

燃料电池的氢气消耗成本 C_{H_2} 与氢气价格 $C_{\text{H}_2,\text{kg}}$ 以及耗氢量 m_{H_2} 有关。由于 $C_{\text{H}_2,\text{kg}}$ 受制氢方式、运输距离、氢能产业发展趋势等多方面因素的影响, 本文以 20 元/kg 的氢气单价进行计算, C_{H_2} 可表示为

$$C_{\text{H}_2} = C_{\text{H}_2,\text{kg}} \cdot m_{\text{H}_2} \cdot N_{\text{cyc}} \cdot 365 \cdot Y \quad (18)$$

购电成本以每日的电能消耗成本 $C_{\text{ele,day}}$ 来计算, 即

$$C_{\text{ele}} = C_{\text{ele,day}} \cdot C_e \cdot 365 \cdot Y \quad (19)$$

$$C_{\text{ele,day}} = E_{\text{ba,rate}} \cdot \Delta B_{\text{soc}} + E_{\text{sc,rate}} \cdot \Delta S_{\text{soc}} \quad (20)$$

式中: ΔB_{soc} 、 ΔS_{soc} 表示锂电池和超级电容每日的 SoC 变化量, 可表示为

$$\begin{cases} \Delta B_{\text{soc}} = (B_{\text{soc},0} - B_{\text{soc},T}) \cdot N_{\text{cyc}} \\ \Delta S_{\text{soc}} = (S_{\text{soc},0} - S_{\text{soc},T}) \cdot N_{\text{cyc}} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $B_{\text{soc},0}$ 、 $S_{\text{soc},0}$ 和 $B_{\text{soc},T}$ 、 $S_{\text{soc},T}$ 分别表示锂电池和超级电容的初始 SoC 和一个循环工况下的最终 SoC; C_e 为岸电电价。

2.3 约束条件

2.3.1 HESS 最大额定容量约束

HESS 的需求功率 $P_{\text{load,ref}}(t)$ 可由船舶负载功率 $P_{\text{load}}(t)$ 减去燃料电池的输出功率 $P_{\text{fc}}(t)$ 得到, 即

$$P_{\text{load,ref}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{fc}}(t) \quad (22)$$

为提高寻优速度, 设以单一储能设备承担功率余量时的能量需求 $E_{\text{ba/sc,max}}$ 为最大容量限值, 计算公式为

$$E_{\text{rate,max}} = \frac{\max\left\{\frac{E_1}{\eta_{\text{dis}}\eta_{\text{inv}}}, E_2\eta_{\text{ch}}\eta_{\text{inv}}\right\}}{s_{\text{soc,max}} - s_{\text{soc,min}}} \quad (23)$$

式中: η_{ch} 、 η_{dis} 分别表示储能设备的充放电效率; η_{inv} 表示变压器效率; $s_{\text{soc,max}}$ 和 $s_{\text{soc,min}}$ 为储能荷电状态的上下限值; E_1 和 E_2 表示储能设备提供的最小放电能量和最小吸收能量, 计算公式为

$$\begin{cases} E_1 = \left| \max_{\Delta t \in (0,T)} \left\{ \int_0^{\Delta t} P_{\text{load,ref}}(t) dt \right\} \right| \\ E_2 = \left| \min_{\Delta t \in (0,T)} \left\{ \int_0^{\Delta t} P_{\text{load,ref}}(t) dt \right\} \right| \end{cases} \quad (24)$$

2.3.2 HESS 最小额定功率约束

储能设备的额定功率 P_{rate} 需要满足船舶运行的最小功率需求, 即

$$P_{\text{rate}} \geq \max\left\{\frac{|\max(P(t))|}{\eta_{\text{dis}}\eta_{\text{inv}}}, |\min(P(t))|\eta_{\text{ch}}\eta_{\text{inv}}\right\} \quad (25)$$

式中, $P(t)$ 为储能设备的承担功率。

2.3.3 HESS 荷电状态约束

过充和过放会缩短储能设备的使用寿命, 锂电池与超级电容的荷电状态限值如下:

$$\begin{cases} B_{\text{soc,min}} \leq B_{\text{soc}} \leq B_{\text{soc,max}} \\ S_{\text{soc,min}} \leq S_{\text{soc}} \leq S_{\text{soc,max}} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $B_{\text{soc,min}}$ 、 $B_{\text{soc,max}}$ 为锂电池 SoC 的最大值和最小值; $S_{\text{soc,min}}$ 、 $S_{\text{soc,max}}$ 为超级电容 SoC 的最小值和最大值。

2.3.4 母线电压 U_{bus} 波动范围约束

船舶的稳定运行需要母线电压维持在一定的波动范围, 须满足

$$U_{\text{bus,max}} - U_{\text{bus,min}} \leq \Delta U_{\text{bus,ref}} \quad (27)$$

式中: $U_{\text{bus,max}}$ 、 $U_{\text{bus,min}}$ 表示母线电压波动的最大值和最小值; $\Delta U_{\text{bus,ref}}$ 表示电压波动参考值, 取 10 V。

2.4 模型求解

本文的 HESS 容量优化模型由包含多个决策变

量的复杂目标函数和船舶运行约束条件组成,使用传统的数学优化方法(如梯度法、牛顿法等)求解该模型易陷入局部最优解,且求解结果很大程度上取决于初始的设定值。MIRJALILI 等^[25]根据灰狼群的社会等级结构和捕食猎物的规律提出灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)。与传统优化方法相比,该算法可用于求解非线性强、不可微的复杂优化问题。该算法收敛速度比同类算法更快,同时具有参数设置少、鲁棒性强、操作简单等优势。因此,本文采用灰狼优化算法进行求解。

GWO 中狼群等级分层如图 5 所示,其中 α 狼是狼群领袖; β 狼为 α 狼的候选者; δ 狼受命于 α 狼和 β 狼; ω 狼接收 α 狼的搜寻指令,并对猎物展开追捕。



图5 灰狼等级分层

Fig. 5 Grey wolf hierarchy

GWO 的基本思想是以个体狼的位置向量为决策向量,在迭代过程中,保留 3 只头狼,并根据头狼位置信息来更新 ω 狼群的位置,灰狼群的位置更替过程即是决策向量的寻优过程。如图 6 所示, A_1 、 A_2 、 A_3 和 a_1 、 a_2 、 a_3 分别为头狼的搜寻半径和对应的收敛因子, D_α 、 D_β 、 D_δ 为 ω 狼与头狼的距离。

3 算例分析

3.1 计算结果与验证分析

本文根据图 4 所示“Alsterwasser”号游船的功率需求进行仿真计算与分析,电源设备的仿真参数设置如表 4 所示,GWO 狼群个体数设置为 30,迭代次数为 100 次。经过 GWO 寻优,决策向量的优化结果如表 5 所示。

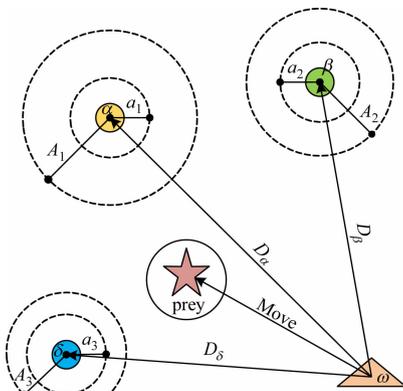


图6 GWO 的寻优过程

Fig. 6 Optimization process of GWO

表4 HESS 仿真参数设置

Tab. 4 HESS simulation parameter setting

电源设备	参数	数值
锂电池	单位能量成本 $C_{ba, kWh}/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	4 000
	维护成本系数 $C_{m, ba}/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.08
	荷电状态 SoC 阈值	0.1 ~ 0.9
超级电容	单位能量成本 $C_{sc, kWh}/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	100 000
	维护成本系数 $C_{m, sc}/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.05
	荷电状态 SoC 阈值	0.36 ~ 1
燃料电池	氢气热值 $Q_{H_2}/(\text{kJ} \cdot \text{kg})$	1.4×10^5
	氢气成本 $C_{H_2, kg}/(\text{元} \cdot \text{kg})$ ^[26]	20
	维护成本系数 $C_{m, fc}/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.1
其他	折现率 $r/\%$	5
	工况循环次数 $N_{cyc}/\text{次}$	80
	设计年限 Y/a	10
	岸电电价 $C_c/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.7

表5 GWO 的优化结果

Tab. 5 Optimization results of GWO

决策变量	优化结果
锂电池容量 $E_{ba, rate}/\text{kWh}$	24.124 0
超级电容容量 $E_{sc, rate}/\text{kWh}$	8.004 0
燃料电池输出功率 $P_{fc, rate}/\text{kW}$	37.936 9
时间常数 T_1/s	4.166 8
时间常数 T_2/s	88.699 7

由表 5 可知,燃料电池的输出功率介于额定功率的 20% ~ 80% 之间,可以最大限度地延长其使用寿命。各电源设备的需求功率曲线如图 7 所示。从图中可以看出,在最优的配置方案下,燃料电池作为船舶的主动力源,承担了大部分的负载功率。HESS 起到了补偿功率余量的作用,在巡航工况下负载功率较为平稳,锂电池承担了较多的负载;在机动工况下,锂电池与超级电容相互配合,分别承担了负载余量的低频部分和高频部分。储能设备的 SoC 和电压变化如图 8 所示。从图 8a 可看出,在一次循环工况下,锂电池的充放电过程较为平稳,而超级电容的充放电较为频繁,故超级电容的加入有利于延长锂电池的使用寿命。从图 8b 中可看出,锂电池的电压特性较“硬”,有利于维持母线电压的稳定。经计算,储能设备的 SoC 始终处于健康状态,且母线电压也能满足船舶的运行约束,故本文的 HESS 的容量配置方案满足船舶在全寿命周期内的运行条件。

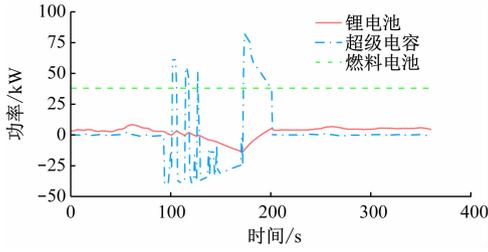
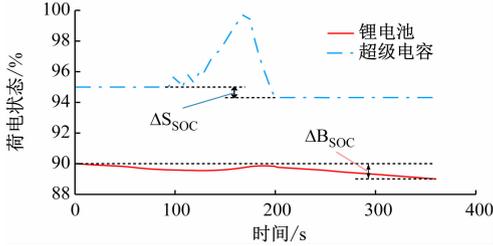
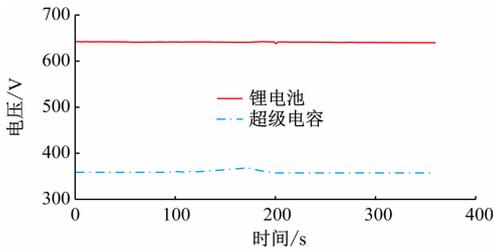


图7 各电源设备需求功率

Fig. 7 Required power of each power supply equipment



(a) 储能设备 SoC 变化



(b) 储能设备电压变化曲线

图8 储能设备 SoC 和电压变化

Fig. 8 SoC and voltage change of energy storage equipment

3.2 配置方案对比分析

将本文方案(方案1)与采用不同储能类型和优化目标的配置方案进行对比,具体方案见表6,不同方案的全寿命周期成本构成如图9所示。

表6 容量配置方案对比

Tab. 6 Capacity configuration options comparison

项目	储能系统	优化模型
方案1	HESS	全寿命周期成本模型
方案2	仅锂电池	全寿命周期成本模型
方案3	仅超级电容	全寿命周期成本模型
方案4	HESS	不计及置换成本
方案5	HESS	不计及购电成本

表7 不同方案的锂电池价值损耗对比

Tab. 7 Comparison of value loss of lithium battery in different options

项目	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
锂电池容量/kWh	24.124 0	108.558 0	0	108.558 0	410.108 0
锂电池购置成本/万元	9.649 6	43.423 2	-	43.423 2	164.043 2
充放电循环次数/次	3	5	-	5	1
寿命损耗系数	1.605 6	2.623 2	-	2.623 2	0.548 0
锂电池置换次数/次	1	2	-	2	0
锂电池价值损耗 J_{ba} /万元	15.493 4	113.907 7	-	113.907 7	89.890 9

此外,为了能够量化分析锂电池的寿命损耗程度,本文以价值损耗 J_{ba} 作为锂电池损耗的评价指标^[27],其计算公式为

$$J_{ba} = C_{Inv,ba} L_{ba} \quad (28)$$

式中, L_{ba} 表示电池的寿命损耗系数,计算公式为

$$L_{ba} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N_{ba}(D_i)} N_{cyc} 365 Y \quad (29)$$

式中: D_i 为第 i 个充放电循环对应的放电深度; $N_{ba}(D_i)$ 为放电深度为 D_i 时的锂电池等效循环寿命; N 为充放电循环次数。

价值损耗 J_{ba} 不代表锂电池实际产生的成本值,仅作为分析不同配置方案下锂电池寿命损耗的评价量。对于 HESS, 价值损耗 J_{ba} 越小,说明锂电池的寿命损耗程度越小。

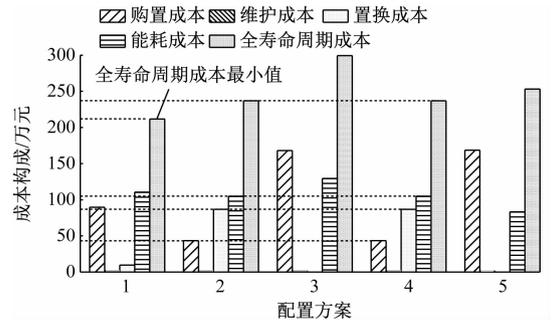


图9 不同配置方案的全寿命周期成本构成

Fig. 9 Life cycle cost composition of different configuration options

3.2.1 储能类型对全寿命周期成本的影响分析

对比图9中方案1~3的配置结果可知,仅配置锂电池(方案2)或超级电容(方案3)都会增加发电系统的全寿命周期成本,其中方案2成本增加了25.23万元,方案3增加了87.68万元。

方案2凭借锂电池成本低的优势,同时降低了初始购置成本、系统维护成本和能耗成本,但单一锂电池使用时会由于置换次数多而影响最终的配置成本。如图10所示,方案2在应对机动工况时,锂电池输出功率的变化频率和变化幅度较大,结合图11和表7可知,受到负载波动的影响,方案2会加剧锂电池的寿命损耗,增加锂电池置换成本。

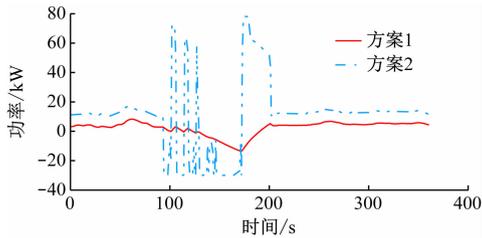


图10 方案1和方案2锂电池的需求功率

Fig. 10 Required power of lithium battery in Option 1 and 2

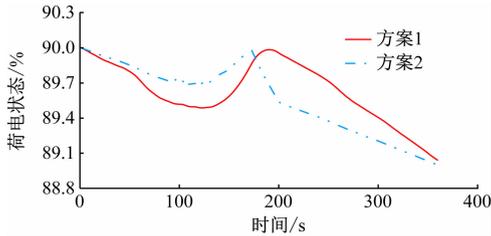


图11 方案1和方案2锂电池 SoC

Fig. 11 Lithium battery SoC in option 1 and 2

表8 不同方案的 H₂ 消耗量对比Tab. 8 Comparison of H₂ consumption of different options

项目	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
燃料电池输出功率/kW	37.936 9	29.926 1	40.268 9	29.926 1	0
燃料电池效率/%	54.42	54.31	54.36	54.31	0
H ₂ 消耗量/kg	52 347.82	41 375.94	55 622.16	41 375.94	0
H ₂ 燃料成本/万元	104.695 6	82.751 9	111.244 3	82.751 9	0

3.2.2 优化目标对全寿命周期成本的影响分析

对比图9中方案1、4、5的配置结果可知,当舍弃置换成本或购电成本时,都会引起全寿命周期成本的增加,与方案1相比,分别增加了25.23万元和41.38万元。

方案4忽略了波动负载对锂电池寿命的影响,从理论上分析,锂电池不再需要超级电容的辅助。如图13所示,该方案下锂电池承担了全部的功率余量。由图9可知,方案4和仅配置锂电池的方案2具有相同配置结果,说明当不考虑放电深度对锂电池寿命的影响时,全部由锂电池承担负载的功率余量是最优的配置方案。然而与方案2同理,单独配置锂电池时,其使用寿命会受到波动负载的影响,使

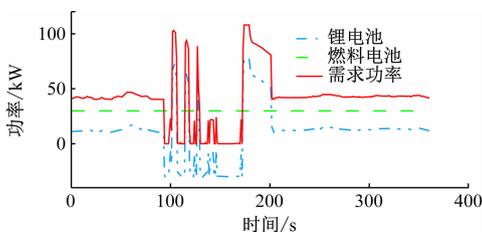


图13 方案4燃料电池与锂电池的需求功率

Fig. 13 Power demand of fuel cell and lithium battery in option 4

方案3不需要考虑储能设备的寿命问题,避免了储能设备的置换成本,但单一的超级电容存储电能有限,且容量成本较高。由图12可知,该方案超级电容仅承担了少部分负载,其余由燃料电池全部承担。通过对比表8中方案1、方案3可知,方案3的燃料电池输出功率、H₂消耗量和H₂燃料成本均大于其他方案。

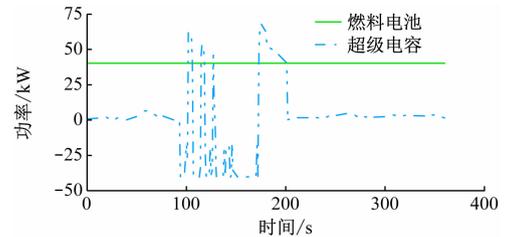


图12 方案3燃料电池与超级电容的需求功率

Fig. 12 Required power of fuel cell and supercapacitor in option 3

得锂电池的置换成本增加,继而增加全寿命周期成本。

方案5具有最高的锂电池配置容量和最低能耗成本,参考图14可知,这是由于该方案中锂电池几乎承担了船舶的全部负载,少量的功率余量由超级电容承担,而燃料电池的输出功率为0(见表8)。因此,当不计及电能成本时,采用储能设备发电是最优配置方案。由于该方案锂电池的配置容量较大,可以减缓锂电池的寿命损耗,使其在全寿命周期内不产生置换成本(见表7),但该方案中燃料电池未有功率输出,造成其容量的冗余。此外,图14中大部分的高频负载仍由锂电池承担,未能发挥出HESS的能量与功率特性。

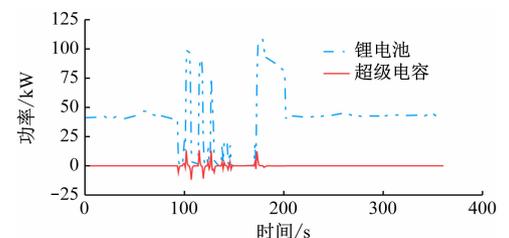


图14 方案5锂电池与超级电容的需求功率

Fig. 14 Required power of lithium battery and supercapacitor in option 5

综上可知,本文的配置方案在满足船舶负载需求的前提下避免了波动负载对燃料电池使用寿命的影响,最大限度地延长其使用寿命。同时弥补了单一储能介质的不足,实现了能量型与功率型储能设备的相互配合,发挥出了 HESS 的优势。而且与全寿命周期成本最高的方案相比,本文提出的方案节省了 29.29% 的成本费用,体现了本文方法的经济性和合理性。

4 结论

在发展绿色船舶的时代背景下,本文基于以“Alsterwasser”号为原型的燃料电池船,提出了考虑 HESS 全寿命周期的容量优化配置模型。该模型综合考虑了储能设备的购置成本、维护成本、置换成本和能耗成本,使得模型更加贴合实际情况。最后通过灰狼优化算法寻优,得到当全寿命周期成本最低时 HESS 的容量配置方案。试验结果表明。

1) 本文将运行策略参数和 HESS 的容量参数共同作为决策变量进行优化,可以同时获得最优的 HESS 最优配置方案以及与其相匹配的船舶运行策略,并通过试验结果验证了两者间的耦合关系。

2) 在本文配置方案中,燃料电池在其高效工作区间内以恒定功率输出,可最大限度延长其使用寿命。同时,通过引入雨流计数法评估锂电池的损耗程度,可有效降低锂电池置换成本。

3) 本文以 HESS 全寿命周期视角设计储能容量,并将储能设备的置换成本和购电成本考虑在内,不仅使船舶动力系统具备长期的可靠性,而且可以获得船舶设计年限内综合成本最低的 HESS 容量配置方案。

参 考 文 献

- [1] SCHOOTS K, KRAMER G J, VAN DER ZWAAN B C. Technology learning for fuel cells: an assessment of past and potential cost reductions[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(6):2887-2897.
- [2] 徐宏东,高海波,林治国,等.纯电动船复合储能系统的设计与优化[J]. *新能源进展*, 2018,6(6):526-532.
- XU H D, GAO H B, LIN Z G, et al. Design and optimization of all-electric boat's composite energy storage system[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2018,6(6):526-532. (in Chinese)
- [3] 吴骏,方世源,吴国栋,等.含大功率脉冲性负荷的船舶供电系统设计[J]. *船舶工程*, 2019,41(6):63-71.
- WU J, FANG S Y, WU G D, et al. Design of ship power supply with high power pulsed loads[J]. *Ship Engineering*, 2019,41(6):63-71. (in Chinese)
- [4] 黄贵江,何祖军,徐犇,等.基于超级电容的车客渡船能量管理策略[J]. *船舶工程*, 2021,43(3):34-39.
- HUANG G J, HE Z J, XU B, et al. Energy management strategy of passenger car ferry based on super capacitor[J]. *Ship Engineering*, 2021,43(3):34-39. (in Chinese)
- [5] TROÃO J P, MACHADO F, PEREIRINHA P G. Hybrid electric excursion ships power supply system based on a multiple energy storage system[J]. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2016, 6(3):190-201.
- [6] KIM K, AN J, PARK K, et al. Analysis of a supercapacitor/battery hybrid power system for a bulk carrier[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(8):1547.
- [7] 杨祥国,孙盼,杨诚,等.电力推进船舶复合储能装置容量多目标优化[J]. *中国航海*, 2018,41(2):9-14.
- YANG X G, SUN P, YANG C, et al. Multi-objective optimization of capacity of hybrid energy storage device for ship electric propulsion system[J]. *Navigation of China*, 2018,41(2):9-14. (in Chinese)
- [8] 王凌宇.船舶电力推进储能控制策略与容量配置研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- WANG L Y. Research of energy storage control strategy and capacity allocation of ship electric propulsion[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [9] FANG S D, XU Y, LI Z M, et al. Two-step multi-objective management of hybrid energy storage system in all-electric ship microgrids[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4):3361-3373.
- [10] 张泽辉,高海波,管聪,等.典型工况下的燃料电池船舶复合储能系统设计[J]. *船舶工程*, 2018,40(8):100-105.
- ZHANG Z H, GAO H B, GUAN C, et al. Design of hybrid energy storage system for fuel cell ship based on typical load profile[J]. *Ship Engineering*, 2018, 40(8):100-105. (in Chinese)
- [11] 张泽辉.混合动力船舶复合电源能量管理策略及容量配置研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- ZHANG Z H. Study on sizing and energy management strategy of hybrid energy storage system for hybrid ship[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] 潘钊,商蕾,高海波,等.燃料电池混合动力船舶复合储能系统与能量管理策略优化[J]. *大连海事大学*

- 学报, 2021, 47(3):79-85.
- PAN Z, SHANG L, GAO H B, et al. Optimization of composite energy storage system and energy management strategy for fuel cell hybrid ships[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(3):79-85. (in Chinese)
- [13] BASSAM A M, PHILLIPS A B, TURNOCK S R, et al. An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41 (47): 22453-22464.
- [14] 刘正杰, 朱云芳, 戴朝华, 等. 增程式燃料电池混合动力有轨电车电源系统优化配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3):67-73.
- LIU Z J, ZHU Y F, DAI C H, et al. Optimization of power system configuration for extended-range fuel cell hybrid tram[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43 (3):67-73. (in Chinese)
- [15] PEI P C, CHANG Q F, TANG T. A quick evaluating Method for automotive fuel cell lifetime [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33 (14):3829-3836.
- [16] PEI P C, CHEN H C. Main factors affecting the lifetime of proton exchange membrane fuel cells in vehicle applications;a review[J]. Applied Energy, 2014, 125: 60-75.
- [17] 熊然, 王顺利, 于春梅, 等. 基于 Thevenin 模型和改进扩展卡尔曼的特种机器人锂离子电池 SOC 估算方法[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2):695-704.
- XIONG R, WANG S L, YU C M, et al. An estimation method for lithium-ion battery SOC of special robots based on Thevenin model and improved extended Kalman [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10 (2):695-704. (in Chinese)
- [18] 张泽辉, 高海波, 陈辉, 等. 基于复合电源的电动船能量管理策略[J]. 中国航海, 2018, 41(3):16-20.
- ZHANG Z H, GAO H B, CHEN H, et al. Energy management strategy for electric ships with hybrid energy source[J]. Navigation of China, 2018, 41(3): 16-20. (in Chinese)
- [19] 张泽辉, 陈辉, 高海波, 等. 基于实时小波变换的燃料电池混合动力船舶能量管理策略[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(2):127-136.
- ZHANG Z H, CHEN H, GAO H B, et al. Energy management strategies for fuel cell hybrid ships based on real-time wavelet transform[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(2):127-136. (in Chinese)
- [20] 刘宇嫣, 杨中平, 林飞, 等. 城轨地面式混合储能系统自适应能量管理与容量优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23):4874-4884.
- LIU Y Y, YANG Z P, LIN F, et al. Study on adaptive energy management and optimal capacity configuration of urban rail ground hybrid energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (23):4874-4884. (in Chinese)
- [21] 刘春阳, 王秀丽, 刘世民, 等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10):29-36.
- LIU C Y, WANG X L, LIU S M, et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35 (10):29-36. (in Chinese)
- [22] SHEN J Y, DUSMEZ S, KHALIGH A. Optimization of sizing and battery cycle life in battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicle applications [J]. Industrial Informatics IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10 (4): 2112-2121.
- [23] ZHANG L, HU X S, WANG Z P, et al. Multi-objective optimal sizing of hybrid energy storage system for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2): 1027-1035.
- [24] 孙凯胜. 风电-混合储能联合系统控制策略及其容量配置研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
- SUN K S. Research on control strategy and capacity configuration of wind power-hybrid energy storage combined system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021. (in Chinese)
- [25] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS R. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69:46-61.
- [26] 张文斌. 燃料电池有轨电车动力系统关键技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017.
- ZHANG W B. Research on key technologies of powertrain system for fuel cell tram [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017. (in Chinese)
- [27] 刘楠, 李明高, 郭爱, 等. 基于价值损耗的燃料电池混合动力能量管理策略评价[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2):281-288.
- LIU N, LI M G, GUO A, et al. Evaluation of energy management strategy based on value loss of fuel cell hybrid system[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(2):281-288. (in Chinese)