

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03617>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 易辉, 陈辉. 基于灰狼算法的复合电源能量管理[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(3): 249–257.

YI H, CHEN H. Energy management of compound power supply based on grey wolf algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(3): 249–257 (in Chinese).

基于灰狼算法的复合电源能量管理



扫码阅读全文

易辉^{1,2}, 陈辉^{*1,2}

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 高性能舰船技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430063

摘要: [目的] 为了提高复杂工况下的船舶电能质量, 针对由电池-超级电容作为复合储能系统的燃料电池船, 提出一种基于小波分解的能量管理策略。[方法] 首先, 采用小波分解和模糊逻辑控制对船舶负载功率进行分配, 同时优化电池的充放电过程; 然后, 采用灰狼算法对复合储能系统的参数进行优化, 从而使能量管理策略与设备参数相匹配; 最后, 在 Matlab/Simulink 平台中搭建船舶动力系统模型, 进行仿真实验验证。[结果] 仿真结果表明: 该能量管理策略可以有效抑制燃料电池的输出功率波动, 实现了各设备之间功率的合理分配, 其优化后的母线电压波动降低了 23.19%。[结论] 研究成果可对船舶电能质量的优化设计提供参考。

关键词: 燃料电池船舶; 复合储能系统; 储能; 能量管理; 多目标优化; 小波分解; 模糊控制; 灰狼算法

中图分类号: U674.925

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03617

0 引言

传统的混合动力船舶一般是指电动机和柴油发动机相结合的动力系统, 随着新能源技术的迅猛发展, 光伏、液化天然气、燃料电池等新能源技术也开始应用于混合动力船舶, 而超级电容-电池复合储能^[1]、燃料电池^[2]及直流电网^[3]等新兴技术也逐渐进入了大众视野。对于不同类型能源耦合的船舶, 如何在不同工况下进行功率的合理分配是影响船舶动力系统性能的重要因素, 所以有必要开展混合动力船舶能量管理方面的研究。

混合动力船舶的能量管理是一个多目标优化问题, 涵盖了机械能、化学能以及电能等能量的转换与控制技术, 同时还需考虑船舶的安全稳定运行要求, 并可在此基础上进一步优化船舶运行的经济性和环保性。对于单一管理目标而言, 现有的能量管理策略主要分为以考虑电能质量、故障恢复、能耗排放、系统经济性为主的能量管理目标。

兰熙等^[4]基于构建电池荷电状态(SOC)的补偿函数来研究 SOC, 通过将补偿函数列为优化目

标, 并引入评价函数的权重系数, 从而使电池 SOC 保持在设定值的附近, 从而提升电池健康状态。Srivastava 等^[5]采用基于决策支持系统的自动重构方法研究了船舶供电系统故障后的恢复问题, 并参照供电系统的动态数据和网络拓扑结构, 对故障后的供电系统进行了恰当的能量管理和规划, 以确保重要系统的正常运行。Stone 等^[6]针对以电池-超级电容作为复合储能系统(HESS)的燃料电池船舶开展能量管理研究, 以保证船舶供电系统在复杂工况和功率需求波动剧烈工况下正常运行, 并提高混合动力船舶电网的电能质量。

混合动力船舶的能量管理主要分为 2 类: 基于实际工程的规则型和基于不同优化目标的优化型。其中, 规则型即根据人为经验和试验来制定混合动力系统的运行模式, 该策略已广泛应用于工程实践, 但其缺点是无法在复杂工况下保持最优的控制策略; 优化型即通过分析对象的特征来确定优化目标和约束条件, 并在此基础上构建整体优化模型, 进而采用优化算法对目标函数进行求解。

目前, 大量学者已针对混合动力船舶的能量

收稿日期: 2023-10-28 修回日期: 2024-02-04 网络首发时间: 2024-04-17 14:27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52271329)

作者简介: 易辉, 男, 2000 年生, 硕士生。研究方向: 船舶电力推进与智能船舶。E-mail: 1978129369@qq.com

陈辉, 男, 1962 年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶轮机系统建模、仿真与控制, 船舶电力推进及船舶智能化技术, 船舶燃料电池与复合储能系统控制。E-mail: hchen@whut.edu.cn

*通信作者: 陈辉

管理开展了相关研究工作。例如, Bassam 等^[7]提出了基于经典比例积分控制器的能量管理策略, 从而改进了燃料电池的工作效率; Yuan 等^[8]针对柴电混合动力船舶提出一种基于 DP-MPC 的能量管理策略, 但并未考虑设备使用寿命带来的影响; Kalikatzarakis 等^[9]将等效消耗最小化策略 (ECMS) 应用于混合动力船舶, 从而实现了不同设备之间的实时功率分配。

然而, 上述研究的优化对象均仅为能量管理策略, 并未同时对动力系统的设备参数进行匹配优化, 故本文拟以 Alsterwasser 号燃料电池船作为研究对象, 采用灰狼算法 (GWO) 对动力系统的设备参数与能量管理策略进行匹配优化, 并将通过搭建其动力系统的 Matlab/Simulink 仿真模型, 以验证该能量管理算法的有效性。

1 研究对象

Alsterwasser 号燃料电池船由欧盟零排放船舶项目资助开发^[10], 该项目始于 2006 年底, 结束于 2010 年 4 月, 旨在提供适用于水面舰艇的技术解决方案, 其相关参数如表 1 所示。图 1 为该燃料电池船的典型功率负载, 其包含 2 种不同的运行状态: 在 90~200 s 时, 船舶处于机动航行状态, 负载波动剧烈, 功率需求在 0~115 kW 剧烈波动; 而在其余时刻, 船舶处于定速航行状态, 负载功率平稳在 42 kW 左右。对小型船舶研究而言, 该负载工况曲线所包含的复杂工况非常重要, 故本文将基于该典型工况展开分析。

表 1 Alsterwasser 号燃料电池船的参数
Table 1 Parameters of the FCS Alsterwasser

参数	数值
电池 (铅凝胶) 电压/V	560
电池 (铅凝胶) 容量/(A·h)	360
排水量/t	72
船长/m	25.56
船宽/m	5.20
载客量/人	100
最大速度/(km·h ⁻¹)	15

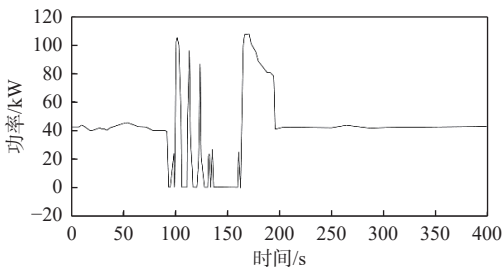


图 1 Alsterwasser 号燃料电池船的功率负载
Fig. 1 Power load of the FCS Alsterwasser

2 混合动力系统结构

锂电池的能量密度高, 但响应速度慢, 而超级电容器则具有响应速度快、循环寿命长等优点。本文将采用由超级电容和锂电池组成的 HESS 系统来替代原船动力系统的电池, 其拓扑结构如图 2 所示, 其中 P_{load} 为船舶负载功率。

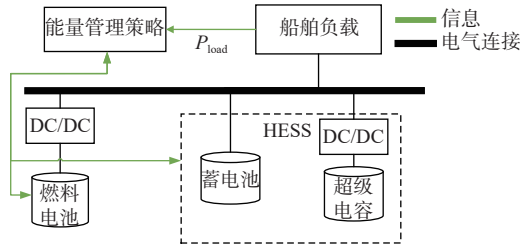


图 2 燃料电池混合动力系统的拓扑结构
Fig. 2 Topological architecture of a fuel cell hybrid power system

图 2 中, 原船动力系统的燃料电池通过单向 DC/DC 变换器连接至直流母线, 而本文的复合电源采用了半主动式拓扑结构, 超级电容通过双向 DC/DC 变换器与锂电池并联, 其中燃料电池为主电源, 复合电源为辅助电源。由文献 [10] 可知, 燃料电池模块一般采用 Boost 型单向 DC/DC 变换器, 而超级电容模块一般采用双向全桥 DC/DC 变换器 (图 3), 并采用移相控制策略对超级电容的输出功率进行调节^[11]。

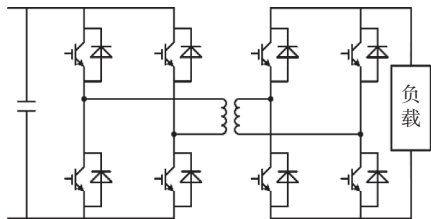


图 3 双向全桥 DC/DC 拓扑示意图
Fig. 3 Schematic of bidirectional full bridge DC/DC topology

3 能量管理策略

本文的能量管理策略 (图 4) 以考虑电能质量为主, 分为小波变换算法和复合储能系统控制这两部分。首先, 对船舶功率需求数据进行采集; 然后, 采用小波变换对功率需求进行处理, 其中功率需求的低频部分由燃料电池模块承担, 而剩余的功率需求则由复合储能系统模块承担。

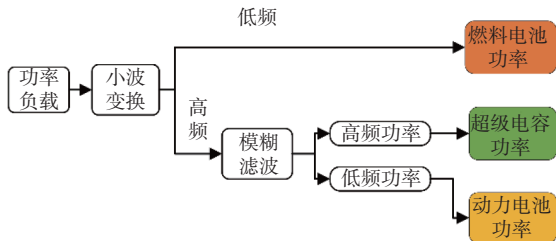


图 4 能量管理策略
Fig. 4 Illustration of energy management strategy

本文的复合储能系统将采用模糊逻辑控制策略, 通过综合考虑锂电池 SOC、超级电容 SOC 以及复合储能系统功率需求, 对复合储能系统所承担的功率进行分解处理, 其中低频部分由锂电池模块承担, 而剩余部分则通过控制 DC/DC 变换器由超级电容模块承担。

3.1 小波变换

小波变换是一种信号的时频分析方法, 与傅立叶变换相比, 其可提供一个随频率变化的“时频”窗口, 从而实现对信号的局部分析, 所以在能量管理领域的应用较为广泛。船舶的功率需求是实时信号, 可以利用离散小波变换将船舶的功率需求分解为高频信号和低频信号, 再将低频信号依次通过高通滤波器和低通滤波器进行分解^[12]。

连续小波变换的表达式 $W(\lambda, \mu)$ 为

$$W(\lambda, \mu) = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\mu}{\lambda}\right) dt \tag{1}$$

式中: λ 为尺度因子; μ 为平移因子; $x(t)$ 为功率信号; ψ 为母波函数; t 为时间。

令 $\lambda = 2^j, \mu = 2^j \cdot k$, 其中 $j, k \in \mathbf{Z}, \mathbf{Z}$ 为整数集, 将式(1)的连续小波变换 $W(\lambda, \mu)$ 转变为离散小波变换 $W(j, k)$, 即

$$W(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi(2^{-j} \cdot t - k) dt \tag{2}$$

逆变公式为

$$x(t) = \sum_{j \in \mathbf{Z}} \sum_{k \in \mathbf{Z}} \psi_{j,k}(t) W(j, k) \tag{3}$$

由于 Haar 小波具有最优的时域分辨率, 并且 Haar 小波的公式与其逆变换公式相同, 故在实际控制系统中更容易实现, 其表达式 $\psi_H(t)$ 为

$$\psi_H(t) = \begin{cases} 1, & t \in (0, 0.5) \\ -1, & t \in [0.5, 1] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{4}$$

小波分解的具体过程如图 5 所示。首先, 基于高通滤波器 $H_1(Z)$ 和低通滤波器 $H_0(Z)$ 进行 Haar 小波变换, 使原始的功率信号 $x(t)$ 经滤波后分解为高频信号 $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ 和低频信号 $x_0(t)$; 然后, 通过重构高通、低通滤波器, 得到重构信号。

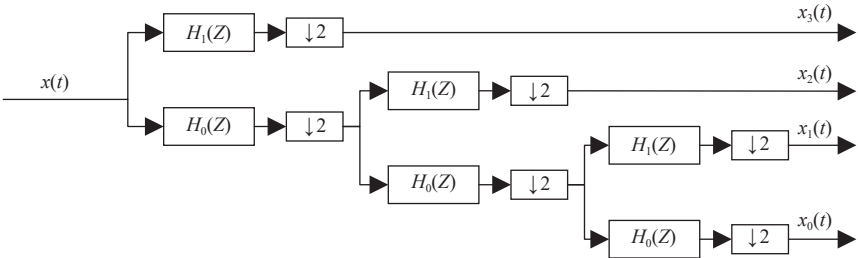


图 5 小波分解过程
Fig. 5 Wavelet decomposition process

随着小波分解层数的增加, 分配给复合电源的功率也越多。复合电源作为辅助电源, 其主要功能是削峰补谷, 而燃料电池才是主要电源, 故小波分解的层数不宜过高。本文拟采用 3 阶 Haar 小波变换, 根据混合动力系统的特点, 将功率需求的低频信号 $x_0(t)$ 分配给燃料电池承担, 而高频信号 $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ 则由复合储能系统承担。

3.2 复合储能系统能量管理

模糊逻辑控制 (fuzzy logic control, FLC) 作为一种有效的控制方法, 因其固有的鲁棒性和针对非线性问题的处理能力等优点而得以广泛应用。对于复杂多变的船舶工况而言, 采用模糊控制进行实时功率分配的效果非常好^[13]。

由上文可知, 复合储能系统主要承担负载功率需求的高频部分。因此, 针对复合储能模块, 本文设计了基于模糊控制器的复合储能系统能量管理

策略, 如图 6 所示。该策略通过对复合储能系统所承担的功率需求进行分配, 从而协调各设备的能量。

基于图 6 的模糊控制器, 根据锂电池、超级电容的荷电状态和复合储能系统功率, 即可确定功率分配模块输入——功率分配系数 M , 用以调节锂电池所需承担的功率, 而复合储能系统功率的剩余部分则由超级电容承担。

模糊控制器的隶属度函数如图 7 所示, 相应的模糊规则如表 2 所示, 其中: SOC_{bat}, SOC_{sc} 分别为锂电池、超级电容的荷电状态值; P_{stor} 为复合电源的功率需求; L, M, H 分别表示低、中、高 3 种状态。当复合电源的功率需求较高时, 模糊控制将令超级电容承担更多的功率需求; 反之, 则令锂电池承担更多的功率需求。同时, 当电池或超级电容的电量过低时, 将优先考虑使其承担功率信号的负功率部分; 而当其电量过高时, 则

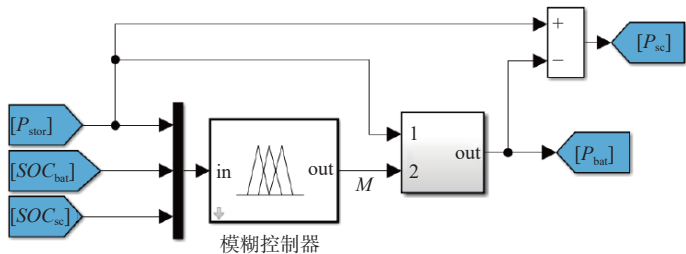


图6 复合储能系统的能量管理仿真图

Fig. 6 Energy management simulation diagram of hybrid energy storage system

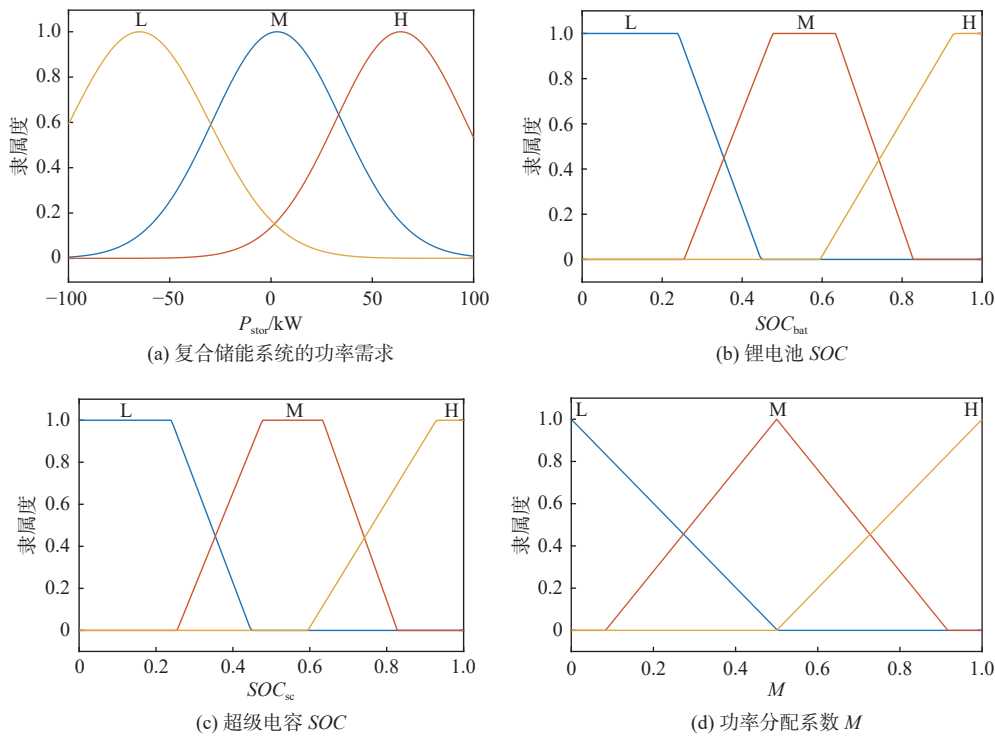


图7 输入/输出的隶属度函数

Fig. 7 Input/output membership function

表 2 模糊规则				
Table 2 Fuzzy rules				
超级电容SOC	锂电池SOC	功率分配系数M		
		$P_{stor}=L$	$P_{stor}=M$	$P_{stor}=H$
$SOC_{sc}=L$	$SOC_{bat}=L$	L	H	L
	$SOC_{bat}=M$	L	H	M
	$SOC_{bat}=H$	L	H	M
$SOC_{sc}=M$	$SOC_{bat}=L$	M	H	L
	$SOC_{bat}=M$	L	H	L
	$SOC_{bat}=H$	L	H	L
$SOC_{sc}=H$	$SOC_{bat}=L$	M	H	L
	$SOC_{bat}=M$	M	H	L
	$SOC_{bat}=H$	L	H	L

将优先考虑使其承担功率信号的正功率部分。

在图6的功率分配模块中,本文采用了典型的一阶低通滤波器 $L(s)$ 作为控制策略的滤波设备。其表达式如下:

$$L(s)=\frac{1}{Ts+1}$$

(5)

式中: s 为拉普拉斯变换中的复变量; T 为滤波器的时间常数,时间常数越大,则通过滤波器的高频功率部分越小,锂电池承担的功率需求也越平稳。

若复合电源在低电量工况下继续放电,将严重损害其使用寿命;反之,若在高电量时继续充电,则可能导致电源损坏甚至自燃。一般来说,安全工作区间 $SOC=[0.2,0.8]$ 。因此,当复合电源SOC超过安全区限值时,应采用充放电保护措施;当复合电源SOC处于正常充/放电区时,即可按照表2的功率分配结果进行充放电;当复合电源处于过放区时,则不允许放电,仅能充电;当复合电源处于过充区时,则不允许充电,仅能放电。

3.3 约束条件

为保障燃料电池和复合储能系统的正常运行,在满足功率负载需求的同时,还需建立相应的系统约束^[14]:

$$\begin{cases} P_{\text{bat}} + P_{\text{fc}} + P_{\text{sc}} = P_{\text{N}} \\ 0.5V_{\text{max}} \leq V_{\text{sc}} \leq V_{\text{max}} \\ |I_{\text{fc}}(t)| \leq I_{\text{fc,max}} \\ |I_{\text{sc}}(t)| \leq I_{\text{sc,max}} \\ |I_{\text{bat}}(t)| \leq I_{\text{bat,max}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{bat} , P_{fc} , P_{sc} 分别为锂电池、燃料电池、超级电容的输出功率; P_{N} 为典型工况的功率需求; V_{sc} 为超级电容电压, 其工作电压不能低于 0.5 倍的最大电压 V_{max} ; I_{fc} , I_{sc} , I_{bat} 分别为燃料电池、超级电容和锂电池的输出电流, 均不得超过其相应的最大输出电流 ($I_{\text{fc,max}}$, $I_{\text{sc,max}}$, $I_{\text{bat,max}}$)。

4 参数优化

灰狼算法具有结构简单、控制参数少、易于实现等优点, 故被广泛应用于参数最优选择和模式识别分类等问题。本节将采用灰狼算法与燃料电池混合动力系统仿真相结合的优化方法, 以混合动力系统能量损失、直流母线电压为指标而建立评价船舶动力系统的目标函数, 并将根据系统约束来确定复合储能系统相关参数的取值范围, 进而采用灰狼算法对目标函数进行优化计算, 最终得到复合储能系统相关设备参数的配置方案。

4.1 优化目标

为评价复合储能系统参数设计和动力系统设计的优劣, 在考虑设备成本的基础上, 本文将从 3 个方面进行评价。

1) 直流母线电压波动, 其评价公式 C_1 为

$$C_1 = \sum_{i=1}^N (V_{\text{dcbus}}(i) - V_{\text{dcbus}}(i-1))^2 \quad (7)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$, 表示采样时刻, 其中 N 为总的采样数量; $V_{\text{dcbus}}(i)$, $V_{\text{dcbus}}(i-1)$ 分别为 i 和 $i-1$ 时刻的直流母线电压。

2) 系统能量损失, 其评价公式 C_2 为

$$C_2 = \sum_{i=1}^N \{ t [R_{\text{sc}} I_{\text{sc}}^2(i) + R_{\text{bat}} I_{\text{bat}}^2(i)] + (1 - \mu_{\text{dc}}) P_{\text{dc}}(i) \} \quad (8)$$

式中: R_{sc} , R_{bat} 分别为超级电容、锂电池的内阻; $I_{\text{sc}}(i)$, $I_{\text{bat}}(i)$ 分别为第 i 时刻超级电容、锂电池的电流; μ_{dc} 为 DC/DC 变换器的效率, 取值 0.8; $P_{\text{dc}}(i)$ 为第 i 时刻 DC/DC 变换器的功率。

3) 系统设备成本 J , 其评价公式为

$$J = C_{\text{bat}} + N_{\text{ref}} \cdot M_{\text{sc}} \quad (9)$$

式中: C_{bat} 为锂电池的总成本; N_{ref} 为超级电容的数量; M_{sc} 为超级电容的单价。

本文以燃料电池混合动力船舶作为研究对象, 故其优化目标更侧重于船舶电网质量的改善^[15]。从能量管理的目标而言, 即更注重提高系统能量的利用率, 因此, 本文将引入权重系数来设定优化目标函数:

$$C = \alpha C_1 + \beta C_2 + J \quad (10)$$

式中: C 为系统目标函数值, 其值越小, 则表示系统参数越接近算法的寻优目标; α , β 分别为母线电压波动、系统能量损失的权重系数。由于本文的研究对象为小型燃料电池船, 故选择将母线电压作为评价函数的主要目标, 最终的权重系数取值为: $\alpha = 0.65$, $\beta = 0.35$ 。

4.2 灰狼算法计算

对于上文建立的目标函数, 本节将采用灰狼算法进行优化计算(图 8), 从而得到超级电容的电压配置方案及滤波器的时间常数值。根据目标船型的电力系统参数, 本文采用了 40 A·h 容量的锂电池(电压设定为 570 V)以及额定电压 48 V 的超级电容。由文献 [16] 可知, 根据约束条件, 串联超级电容组的电压参考范围为 $V_{\text{sc}} = 288 \sim 576$ V, 一阶低通滤波器时间常数 T 设定为 10~20 s。

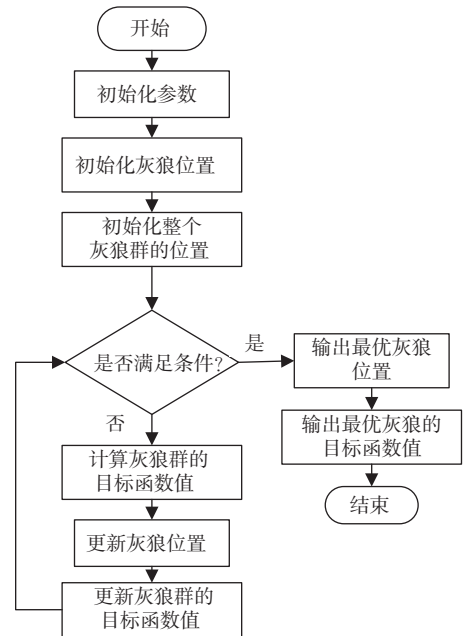


图 8 灰狼优化算法流程

Fig. 8 Grey wolf optimizer flowchart

基于灰狼优化算法, 本节在 Matlab/Simulink 平台上对混合动力系统进行建模仿真(图 9), 进而优化复合储能系统中的滤波器时间常数和超级电容电压的设定参数。首先, 在灰狼算法中设定超级电容电压、滤波器时间常数的优化范围, 其中 $V_{\text{sc}} = 288 \sim 576$ V, $T = 10 \sim 20$ s, 并将这 2 个优化变

量代入动力系统仿真模型中进行仿真;然后,对模型仿真所得的电压波动、能量损失予以评估,并利用评价函数来判定优化结果的优劣。在灰狼算法优化过程中,设定的最大迭代次数为 100 次,种群数量为 50,相应的参数优化结果如表 3 所示。因此,最终选择超级电容电压为 384 V。

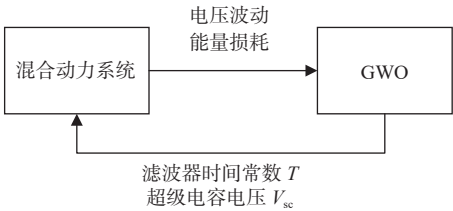


图 9 系统优化流程图
Fig. 9 System optimization flowchart

表 3 参数优化结果
Table 3 Parameter optimization result

优化参数	优化结果
超级电容电压 V_{sc}/V	392.42
滤波器时间常数 T/s	14.32

5 仿真分析

船舶动力系统的 Simulink 仿真模型整体框架如图 10 所示,包括燃料电池系统、由锂电池和超级电容组成的复合储能系统、船舶典型工况负载及能量管理策略等仿真模块,其中 V_{ret} 为 DC/DC 变换器的电压参考值。将目标船的功率需求、电池 SOC 和超级电容 SOC 作为输入信号,经动力系统评价模型和灰狼算法处理,将最终的参数优化结果重新导入至仿真模型中进行计算分析。

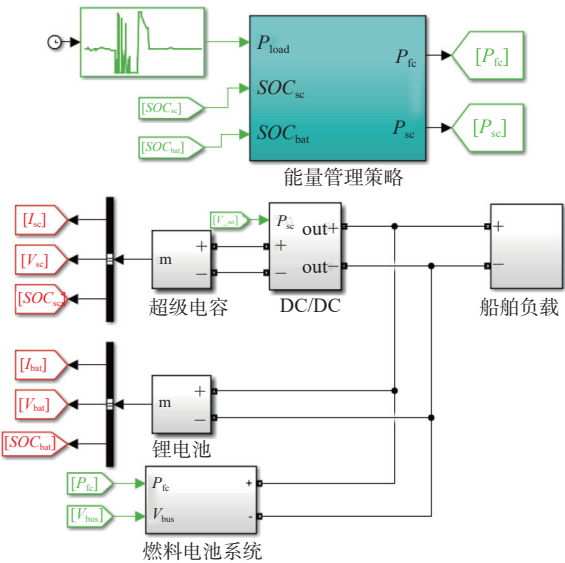


图 10 混合储能系统及控制策略的简化模型
Fig. 10 Simplified model of HESS and control strategy

5.1 仿真实验 1

在典型功率负载下,将本文提出的含复合储能的动力系统与仅使用动力电池的原燃料电池动力系统(FC-bat)进行对比。图 11(a)为燃料电池的输出功率对比结果,在第 80~140 s 区间,在本文控制策略的作用下,船舶机动状态下的燃料电池功率波动得以明显抑制。从图 11(b)可以看出,在船舶机动航行状态下,原船的母线电压波动和电压跌落更为显著,其中母线电压的最大波动差值高达 41.3 V,而在本文策略下的母线电压波动则较为平缓,仅为 5.3 V,因为超级电容及时承担了负荷扰动导致的高频分量,从而改善了船舶电能质量。图 11(c)为电池功率的对比结果,与原船铅酸蓄电池相比,采用超级电容后的锂电池输出功率更为平缓,其充放电功率的波动幅值降低了 56%,有效改善了电池的充放电状态。

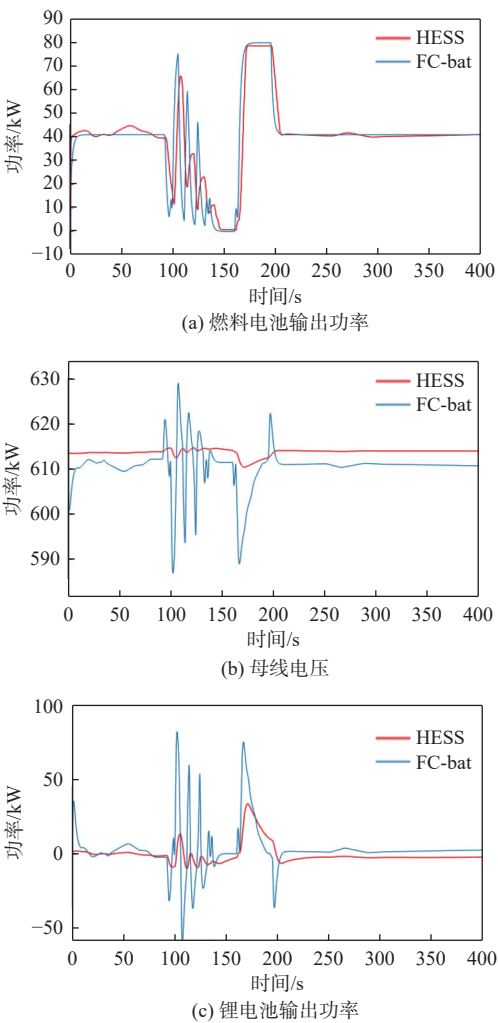


图 11 复合储能动力系统与仅使用动力电池的原燃料电池动力系统的仿真结果对比
Fig. 11 Comparison of simulation results: hybrid energy energy storage system vs. fuel cell ship power system using only batteries

5.2 仿真实验 2

本节将在动力系统各参数相同的情况下, 将复合储能系统能量管理策略 FLC-Filter 与不同的复合储能系统控制策略 Filter 进行对比, 结果如图 12 所示, 其中 Filter 控制策略即直接选用固定滤波器对复合储能系统的功率需求进行滤波处理。由图 12(a)可知, 2 种策略对燃料电池输出功率的影响差别较小; 图 12(b)和图 12(c)的仿真结果表明, 当船舶负载波动剧烈时, 本文策略在抑制锂电池输出功率波动、稳定母线电压等方面的效果更好, 经优化后的母线电压波动降低了 23.19%, 其在很大程度上发挥了超级电容短时输出功率高的优点。

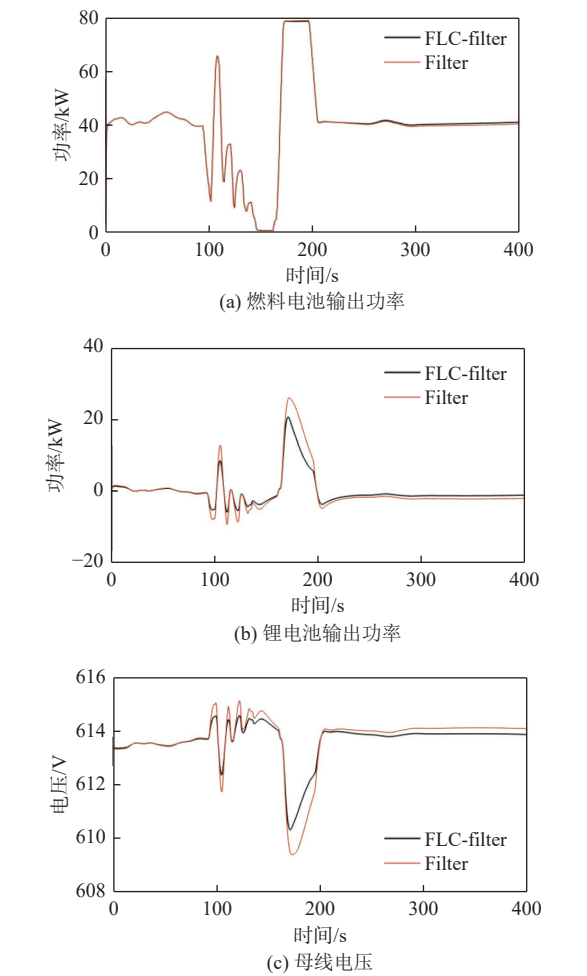


图 12 不同控制策略下的仿真结果对比
Fig. 12 Comparison of simulation results under different control strategies

5.3 仿真实验 3

鉴于复合电源系统在复杂工况中承担了较高频率的功率波动, 本节将考虑电池或超级电容电量的极端情况, 分别对复合电源 SOC 过高或过低的情况进行仿真实验, 以验证能量管理策略对复合

电源设备的保护能力。

5.3.1 工况 1

假定电池和超级电容的初始 SOC 均过高, 分别设置为 83.8% 和 83.6%。如图 13 所示, 当复合电源 SOC 过高时, 各设备均进行放电操作, 以避免复合电源设备的过度充电, 从而有效保护电源的健康状态, 其中超级电容可通过自身进行快速放电。由图 13(a)可知, 母线电压的最大波动基本保持在 5 V 左右, 因此, 在本文控制策略下, 复合电源并未因 SOC 过高而出现母线电压失稳的问题。

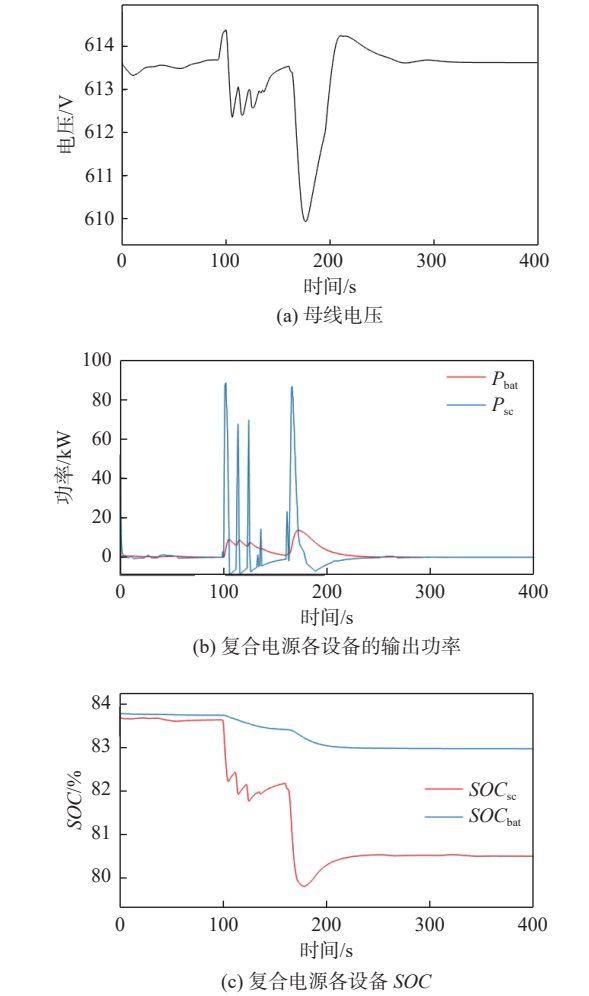


图 13 复合电源电量过高时的仿真结果
Fig. 13 Simulation results when the battery level of the composite power supply is too high

5.3.2 工况 2

假定电池和超级电容的初始 SOC 均过低, 均设置为 13.4%。从图 14 可以看出, 电池和超级电容的电量均不足时, 整个复合电源系统将实施降功率工作, 以避免设备过度放电; 同时, 各设备将进行充电操作, 从而有效保护复合电源。

6 结 语

针对复杂工况下船舶需求功率波动对直流电

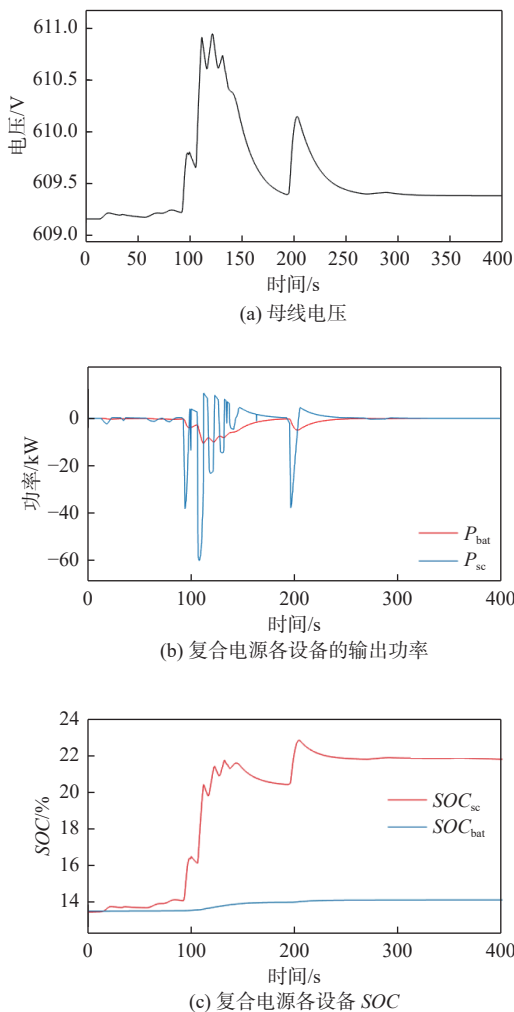


图 14 复合电源电量过低时的仿真结果

Fig. 14 Simulation results when the battery level of the composite power supply is too low

力系统的不良影响,本文基于电池-超级电容作为燃料电池船的复合储能系统,提出了一种考虑船舶运行工况的能量管理策略。该策略采用小波分解和模糊逻辑控制对船舶功率信号进行能量管理,基于能量平衡建立复合储能控制策略模型并建立优化目标函数,进而采用灰狼算法对燃料电池混合动力系统的能量管理策略参数和容量参数进行优化;在此基础上,在 Matlab/Simulink 环境下对混合动力系统进行建模,针对典型船舶工况进行仿真模拟实验,结果表明:对于由超级电容和锂电池组成的复合电源,超级电容承担了更高频的功率负载,可以维持锂电池更长时间的稳定输出;本文的能量管理策略可以有效抑制燃料电池的输出功率波动,在船舶复杂工况下稳定母线电压,从而提高电能质量,相较于 Filter 控制策略,优化后的母线电压波动降低了 23.19%;同时,复合储能系统在机动工况下的充放电过程得以优化,有利于延长设备的使用寿命。需注意的是,本文主要研究了复合储能系统的控制策略,故对

燃料电池的分析过于简单,后续将进一步优化能量管理策略。

参考文献:

- [1] 郭焱,于士振,郭将驰,等. 舰船中压直流电力系统的混合储能管理策略仿真分析[J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(2): 126–136, 143.
GUO Y, YU S Z, GUO J C, et al. Simulation analysis on hybrid energy storage management strategy in warship medium voltage DC power system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(2): 126–136, 143 (in Chinese).
- [2] 刘子杨,翁方龙,李玉生,等. 燃料电池技术在船舶电力推进系统中的应用分析[J]. *船电技术*, 2019, 39(11): 6–11.
LIU Z Y, WENG F L, LI Y S, et al. Analysis of fuel cell technology application in marine electric propulsion system[J]. *Marine Electric & Electronic Technology*, 2019, 39(11): 6–11 (in Chinese).
- [3] ZAHEDI B, NORUM L E, LUDVIGSEN K B. Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 255: 341–354.
- [4] 兰熙,沈爱弟,高迪驹,等. 混合动力船舶能量管理系统的最优控制[J]. *电源技术*, 2016, 40(9): 1859–1862.
LAN X, SHEN A D, GAO D J, et al. Optimal control of hybrid ship energy management system[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(9): 1859–1862 (in Chinese).
- [5] SRIVASTAVA S, BUTLER-PURRY K L. Expert-system method for automatic reconfiguration for restoration of shipboard power systems[J]. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2006, 153(3): 253–260.
- [6] STONE P, OPILA D F, PARK H, et al. Shipboard power management using constrained nonlinear model predictive control[C]//2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Old Town Alexandria, VA, USA: IEEE, 2015: 1–7.
- [7] BASSAM A M, PHILLIPS A B, TURNOCK S R, et al. Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(1): 623–635.
- [8] YUAN Y P, CHEN M S, WANG J X, et al. A novel hybrid energy management strategy of a diesel-electric hybrid ship based on dynamic programming and model predictive control[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2022, 236(3): 644–657.
- [9] KALIKATZARAKIS M, GEERTSMA R D, BOONEN E J, et al. Ship energy management for hybrid propulsion and power supply with shore charging[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 76: 133–154.
- [10] HAN J G, CHARPENTIER J F, TANG T H. An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat[J]. *Energies*, 2014, 7(5): 2799–2820.
- [11] 唐智. 双移相控制双向全桥 DC-DC 变换器研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
TANG Z. Research on dual phase-shift controlled bidirectional dual-active-bridge DC-DC converter[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019 (in Chinese).

[12] 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 both Chinese and English).

[13] 吕应明, 袁海文, 崔勇. 移动式机器人复合电源能量管理策略 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2012, 38(11): 1552–1556.
LÜ Y M, YUAN H W, CUI Y. Energy management strategy for composite energy storage for mobile robots [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 38(11): 1552–1556 (in Chinese).

[14] ABEYWARDANA D B W, HREDZAK B, AGELIDIS V G, et al. Supercapacitor sizing method for energy-controlled filter-based hybrid energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(2): 1626–1637.

[15] 朱天丽. 船舶直流微电网稳定性分析 [D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
ZHU T L. Stability analysis of ship DC microgrid[D]. Tianjin: Tiangong University, 2021 (in Chinese).

[16] CHEN H, ZHANG Z H, GUAN C, et al. Optimization of sizing and frequency control in battery/supercapacitor hybrid energy storage system for fuel cell ship[J]. *Energy*, 2020, 197: 117285.

Energy management of compound power supply based on grey wolf algorithm

YI Hui^{1,2}, CHEN Hui^{*1,2}

1 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 Key Laboratory of High Performance Ship Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: [**Objective**] In order to improve the power quality of ships under complex working conditions, an energy management strategy based on wavelet decomposition is proposed for fuel cell ships with a hybrid energy storage system (HESS) consisting of a battery and supercapacitor. [**Methods**] First, wavelet decomposition and fuzzy logic control are used to distribute the load power of the ship and optimize the charging and discharging process of the battery. Next, grey wolf optimizer (GWO) is used to optimize the parameters of the HESS and ensure that the energy management strategy matches the equipment parameters. Finally, the ship power system model is built using the Matlab/Simulink platform, and the simulation experiment is verified. [**Results**] The simulation results show that the proposed energy management strategy can effectively suppress the output power fluctuation of the fuel cell and realize rational power distribution among devices, reducing the optimized bus voltage fluctuation by 23.19%. [**Conclusion**] This study can provide useful references for the optimization design of the power quality of ships.

Key words: fuel cell-powered vessels; hybrid energy storage system; energy storage; energy management; multiobjective optimization; wavelet decomposition; fuzzy control; grey wolf optimizer