

邱皓 范爱龙 管聪

QIU Hao, FAN Ailong, GUAN Cong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04169>

Articles you may be interested in

Energy management strategies for fuel cell hybrid ships based on real-time wavelet transform

中国舰船研究. 2020, 15(2): 127-136 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01597>

Review of hybrid ship energy management

中国舰船研究. 2021, 16(5): 216-229 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02133>

Ship hydrogen–electric hybrid power system model and life cycle carbon emission assessment method

中国舰船研究. 2024, 19(4): 122-130 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03354>

Energy management strategy of photovoltaic hybrid energy storage system based on optimal power distribution

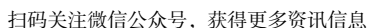
中国舰船研究. 2021, 16(2): 168-175 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01869>

Power fluctuation control strategy of ship power system based on hybrid energy storage system

中国舰船研究. 2021, 16(4): 190-198 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02006>

Cyber-physical co-simulation of shipboard energy management network and power system

中国舰船研究. 2020, 15(6): 29-36 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01740>



引用格式: 邱皓, 范爱龙, 管聪. 基于多环反馈的混合动力系统正向仿真与策略应用 [J]. 中国舰船研究. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04169.

QIU H, FAN A L, GUAN C. Forward simulation and strategy application of hybrid power system based on multi-loop feedback[J]. Chinese Journal of Ship Research (in Chinese). DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04169.

基于多环反馈的混合动力系统 正向仿真与策略应用



扫码阅读全文

邱皓¹, 范爱龙^{*2,3,4}, 管聪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 水路交通控制全国重点实验室(武汉理工大学), 湖北 武汉 430063

3 湖北东湖实验室, 湖北 武汉 430063

4 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063

摘要: [目的] 船舶混合动力系统日趋复杂, 为提升模型的精度和性能, 针对机械和电气耦合特性, 提出基于多环反馈的正向机理建模方法。[方法] 首先, 以长江内河 7 500 t 散货船为研究对象, 分析其动力系统拓扑结构和工作模式, 采用 Simulink 构建柴-气-电船舶混合动力系统模型, 并设计规则型能量管理策略与功率控制器; 然后, 基于实测数据, 从油耗、转速控制响应、充放电特性、发电特性以及船-机-桨匹配等方面开展模型的适用性分析; 最后, 通过对比既有功率流和 AMESIM 模型, 分析该 Simulink 模型在能量管理策略中的应用效果。[结果] 仿真结果表明: 该模型具有良好的转速及功率响应特性, 可以在小于 4% 的误差范围内模拟目标船的动态特性, 且 4 种模式下的船-机-桨匹配特性均与目标船趋于一致, 有效体现了中间环节损失、控制响应、模式切换和变流器干扰等因素对能量管理过程的影响; 该模型可在 0.001 s 步长下通过 dSPACE 实时仿真测试, 具有良好的实时性能。[结论] 研究成果可为多能源混合动力系统能量管理的长时段、全工况测试提供参考。

关键词: 船舶混合动力; 系统建模; 能量管理; 实时仿真

中图分类号: U674.925

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04169

0 引言

对于船舶混合动力系统而言, 协调各设备运行的高效能量管理策略至关重要, 然而, 策略性能测试方面尚无统一标准, 通常通过数值仿真来评估能量管理及控制的效果^[1-2]。目前, 模型仿真已成为分析和优化复杂系统策略性能的重要工具, 柴油主机、电机、电池、变换器等独立建模技术也逐渐趋于成熟^[3-4]。在系统建模过程中, 需按照拓扑结构将各设备的独立模型进行连接, 以模拟系统的运行特性。鉴于模型复杂性、仿真规模、算力资源及测试成本等影响因素^[5], 一般需对系统模型进行简化处理。

在船舶能量管理策略的验证领域, 常用的系统

建模方式包括功率/能量流、AMESIM/Simscape/电力电子库以及数值机理建模。功率流模型即通过对能量的来源、去向和传递路径进行建模, 从而揭示系统中不同组件之间的能量流动关系。肖齐能等^[6]基于柴电混合动力系统的结构特点, 设计了柴电混合动力系统的后向能量流模型, 并基于船舶工况验证了多模式场景下的规则型策略性能, 但该模型未考虑模式切换对策略的冲击和功率响应迟滞等影响。Zhang 等^[7]采用多项式拟合方式建立了功率和油耗之间的二次多项式关系, 并通过仿真评估了多目标遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm-II, NASG-II) 对柴电混合动力系统的节能减排效果。褚玥等^[8]、胡东亮等^[9]基于能量流传递路径以及各设备平均效率, 构建了

收稿日期: 2024-09-04 修回日期: 2024-11-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51809202); 绿色智能内河船舶创新专项 (MC-202002-C01)

作者简介: 邱皓, 男, 1998 年生, 硕士生。研究方向: 船舶混合动力系统。E-mail: qiuhaollz@whut.edu.cn

范爱龙, 男, 1990 年生, 博士, 特设教授。研究方向: 船舶新能源与能效控制、船舶混合动力、船舶能耗与碳排放监控、绿色智能船舶等。E-mail: fanailong@whut.edu.cn

*通信作者: 范爱龙

氢电混合动力系统的后向仿真模型,评估了规则型策略的能效及排放水平。在不考虑系统瞬态响应和效率变化的前提下,采用功率流来建立系统模型能够以较小的资源消耗来评估策略或系统综合性能^[9],这一特性推动了其在机器学习、强化学习等智能型策略验证领域的广泛应用^[10-12]。然而,由于功率流的反馈环节较少,故难以捕捉多参数的耦合作用,例如电压电流、扭矩转速之间的相互干扰等,最终将导致策略评估结果与实际工况的差距较大,所以该方法适用于策略的稳态评估或趋势性分析,而对于精细化验证和瞬态工况分析则存在明显的局限性。

AMESIM 和 Simulink 等商业化软件也提供了便捷多样的模块式建模方法,从而简化了复杂系统的建模流程,使研究学者可以更深入地研究策略设计与优化^[13]。刘代飞等^[14]基于 Simscape 库构建了波浪能发电系统模型,验证了波浪频率、浪高等因素对发电质量的影响。Li 等^[15]、Liu 等^[16]采用 AMESIM 电气和机械库构建了并联式柴电混动系统模型,通过 Simulink 构建了等效燃油消耗最小化策略 (equivalent consumption minimization strategy, ECMS)、模型预测控制 (model predictive control, MPC) 等策略算法,并采用联合仿真方式检验了策略性能;此外,该模型还对动力系统进行了一定简化,例如选用直流替代交流电网,并忽视了设备类型、连接及控制方式对仿真结果的影响。通过软件建模时,由于各模块来源于不同的模型库,仿真时需进行信号转换,所以将导致不同程度的信号延迟,进而影响结果的准确性;同时,通用模块也无法完全满足定制化系统的建模需求,对于不同的应用场景,通用模块将由于更多的冗余计算而导致更低的计算效率。电力电子库建模多用于微电网领域^[17-18],可以反映电路的暂态效应,但其依赖于高频控制波形,且

仿真步长多为 $1e^{-5}$ 或 $1e^{-6}$,所以需消耗较多的算力资源,故其多适用于暂态电路分析^[19],而难以满足长时间尺度的策略验证需求。

机理建模是一种基于物理规律和数学原理来描述系统内部结构与动态行为的方法。孙立等^[20]采用机理建模方法构建了光热复合多能源系统,并考虑了多变量耦合、源荷干扰等因素,从而提升了模型精度和性能。王哲等^[21]、韩北川^[22]采用燃料电池、锂电池机理公式构建了氢电 1.8 kW 混动模型,采用融合 Simscape 部分元件替代了 DC/DC 等变流装置的数值建模,并采用反向仿真检验了该模型的有效性。然而,现有船舶的机理建模多集中于微电网、电源控制等领域,对于兼具机械和电气特性的并联式混合动力系统则考虑较少。

基于此,本文拟针对机械和电气耦合特性,提出基于多环反馈的正向机理建模方法,构建船舶柴气电混合动力系统模型,进而设计规则型能量管理策略与控制系统;通过与功率流、AMESIM 模型进行对比来验证本模型的应用效果,并采用 dSPACE 实时仿真来验证其实时性能,从而为长时域、全工况下的能量管理策略测试提供系统模型支持。

1 多环反馈的正向机理建模方法

鉴于船舶混合动力系统模型的复杂性,本文将提出基于多环反馈的正向机理建模方法,如图 1 所示。根据观测物理量的差异,可以将各设备划分为机械和电气两部分,进而依次独立构建主机、电机、电池、发电机、传动及变流装置子模型。对于机械部分而言,可以采用转速和扭矩环来建立反馈关系,以离合器作为中心节点,根据转速差来提供主机和齿轮箱的输入扭矩信号,并基于推力和速度环来构建外部环境系统与系统之间的传递关系,从而识别外部负载状态。对于电气部分而

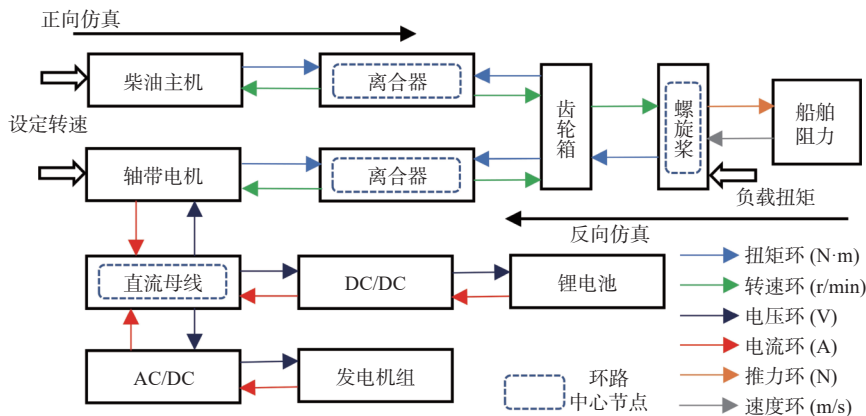


图 1 基于多环反馈的正向机理建模原理

Fig. 1 Forward mechanistic modeling based on multi-loop feedback

言,以直流母线为中心节点,根据负载和各电源的输入电流来生成母线电压,以此作为 DC/DC、AC/DC 和电机的反馈信号,并基于电压和电流环来建立各电气设备之间的状态转移关系。

未建立船舶阻力模型时,即无推力和速度环时,可以将负载扭矩作为整体模型的外部测试信号,即建立反向仿真模型。Li 等^[15]所构建的 AMESIM 混动模型和褚玥等^[8]所构建的功率流模型均采用了反向仿真方式进行建模,而忽视了船舶速度与推力之间的联系。为弥补这部分的仿真差异,本文将以设定转速作为输入,直接驱动柴油主机和电机运行,即通过多环反馈正向生成动态负载。

2 混合动力系统

2.1 拓扑结构

以“长航货运 001”号 7 500 t 散货船作为研究对象,其动力系统分为机械侧和电网侧,如图 2

所示:机械侧采用主机和轴带电机协同推进;电网侧包含液化天然气 (liquefied natural gas, LNG) 发电机组、锂电池及变流装置等,可为日用、推进负载提供 AC 380 V / 50 Hz 和 DC 750 V 供电,主要参数如表 1 所示。

2.2 工作模式

依据不同的能量流动方向,可以分为电力推进 (power take home, PTH)、主机直推 (main engine direct propulsion, MP)、混合推进 (power take-in, PTI) 和轴带发电 (power take-off, PTO) 等 4 种工作模式。通过改变离合器的合排、脱排以及电机状态,即可实现各模式间的平滑切换,如图 3 所示。轻载航行时,首选 PTH 模式,由电机承担全部负荷;当负荷增加时,则进入 PTI 模式,以电机作为补充能源,从而满足不同航行任务的需要;当锂电池电量较低时,进入 PTO 模式,以提高主机负荷至合适运行区间,而电机则处于

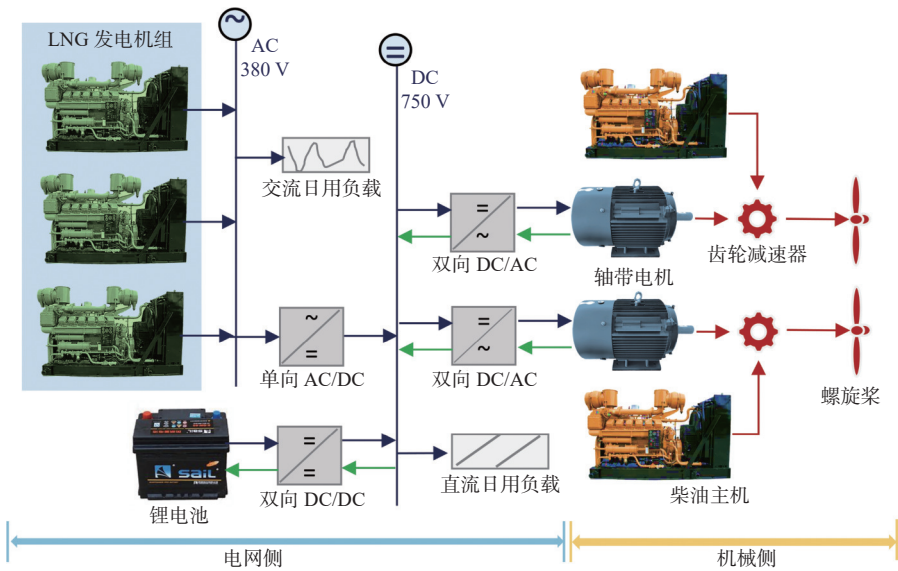


图 2 混合动力系统的拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of hybrid power system

表 1 主要设备参数^[23]

Table 1 Main equipment parameters^[23]

位置	设备名称	数量	参数
机械侧	柴油主机	2 台	额定功率: 648 kW; 额定转速: 900 r/min
	轴带电机	2 台	混合推进功率 320 kW, 轴带发电功率 60 kW
	主机减速器	2 组	传动比: 6.0148:1
	电机减速器	2 组	传动比: 10.0247:1
电网侧	LNG 发电机	3 台	额定功率: 220 kW; 额定转速: 1 500 r/min
	锂电池	1 组	额定容量: 280 Ah
	DC/DC	1 组	平均效率: 98 %
	DC/AC	2 组	平均效率: 95 %
	AC/DC	1 组	平均效率: 98 %

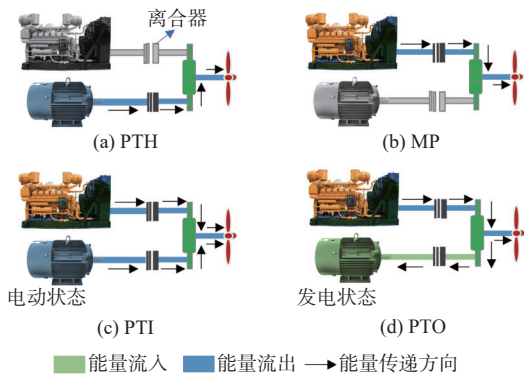


图3 不同模式能量流动方向的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of energy flow direction

发电状态,从而改善主机工况并吸收富余能量。

3 系统建模

3.1 机械侧建模

3.1.1 柴油主机

为简化柴油机工作过程,可以采用平均值法进行建模,通过忽略柴油机内部管路、腔壁结构等差异,并采用部分试验数据插值拟合及经验公式对增压、传热、喷油和燃烧等过程进行平均处理,从而在保证一定精度的条件下获得更高的运算效率,该方法主要适用于实时控制和系统级仿真。由于混合动力系统模型面向能量管理策略设计,所以对实时控制性能的要求较高。如图4所示,本文选用了平均值法来构建柴油主机模型^[4],其均值模块包括废气涡轮增压器、中冷器、喷油器及柴油机本体等部分,相关参数如表2所示(源自XCW6200ZC-4型四冲程柴油机说明书)。

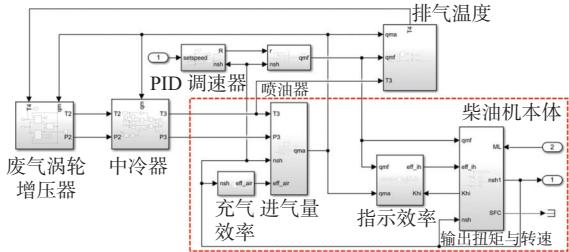


图4 柴油主机模型

Fig. 4 Diesel engine model

柴油主机的数学建模如下:

$$\begin{cases} \eta_v = \eta_0 \left[1 - K \left(\frac{n_d}{n_0} - 1 \right)^2 \right] \\ q_a = \frac{0.001 \eta_v \rho_a V_0 n_d}{120} \end{cases} \quad (1)$$

式中: η_v , η_0 分别为充气效率及其最大值; n_d , n_0 分别为柴油机主机转速和最大充气效率所对应的转速,单位为 r/min; K 为修正系数; q_a 为气缸瞬时进气量,单位为 kg/s; ρ_a 为空气密度,单位为 kg/m³;

表2 四冲程柴油主机参数

Table 2 Parameters of the four-stroke diesel engine

参数名称	参数描述
气缸布置	直列式
喷油泵	整体式
气缸数量	6
(缸径/冲程)/mm	200/270
活塞平均速度/(m·s ⁻¹)	8.1
进气方式	增压、中冷
喷射方式	直喷式
气缸容积/L	8.482
冲程数	四冲程
最低稳定转速/(r·min ⁻¹)	360

V_0 为气缸总排量,单位为 L。

依据能量守恒定理,柴油机输出扭矩与转速之间的关系为

$$\begin{cases} M_i = \frac{30 q_f H_L \eta_i}{\pi n_d} \\ M_f = \frac{p_f V_0}{4\pi} \\ M_i - M_f - M_l = \frac{\pi (J_c + J_l)}{30} \frac{dn_d}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: M_i , M_f , M_l 分别为主机指示扭矩、摩擦扭矩和负载扭矩,单位为 N·m; q_f 为燃油瞬时消耗量,单位为 kg/s; H_L 为燃油低热值,单位为 kJ/kg; $\eta_i = f(q_a/q_f)$, 为指示效率; p_f 为平均摩擦压力,单位为 N/m²; J_c , J_l 分别为柴油机本体和负载的转动惯量,单位为 kg·m²; t 为时间变量。

柴油主机采用比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制方式进行调速,输入量为主机设定转速和当前转速的差值,输出量则为喷油泵的齿条位置,通过改变单循环供油量即可调节主机转速。

$$R = K_p \Delta n + K_i \int \Delta n + K_d \frac{d\Delta n}{dt} \quad (3)$$

式中: R 为喷油泵齿条位置,单位为 mm; K_p , K_i , K_d 分别为 PID 比例系数、积分系数和微分系数; 转速差 $\Delta n = n_s - n_d$, 其中 n_s 为主机设定转速,单位为 r/min。

3.1.2 轴带电机

轴带电机将采用表贴式永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 形式,可提供最大 320 kW 的输出功率,其在 PTO 模式下的最大充电功率为 60 kW。轴带电机建模需满足式(4)电压、式(5)磁链、式(6)转矩和式(7)运动方程的物理规律,各方程均将采用交轴-直轴的

dq 分量予以表示。

$$\begin{cases} U_d = R_s I_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - w_e \varphi_q \\ U_q = R_s I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} - w_e \varphi_d \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + \varphi_r \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (5)$$

$$T_r = 1.5 [I_d I_q (L_d - L_q) + \varphi_r I_q] \quad (6)$$

$$T_r - T_L = \frac{J_m}{p} \frac{dw_r}{dt} \quad (7)$$

式中: U_d, U_q 为定子电压的 dq 分量, 单位为 V; I_d, I_q 为定子电流的 dq 分量, 单位为 A; R_s 为定子内阻, 单位为 Ω ; φ_d 和 φ_q, φ_r 分别为定子磁链的 dq 分量和永磁体磁链, 单位为 Wb; w_e, w_r 为转子电角速度和机械角速度, 单位为 rad/s; L_d, L_q 为定子电感的 dq 分量, 单位为 H; T_r, T_L 为电机输出扭矩和负载扭矩, 单位为 N·m; J_m 为转子的转动惯量, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; p 为绕组极对数。

为设定电机转速, 需通过改变逆变器的占空比来控制电机 dq 轴的电压电流, 常见方法包括脉宽调制调速 (pulse width modulation, PWM) 和直接扭矩控制法 (direct torque control, DTC)。DTC 是一种定子磁通和转矩的直接控制法 (图 5), 其采用滞环比较器对磁链和转矩误差进行实时检测, 并根据误差大小来选择最优的电压矢量作用于电机, 从而快速调整磁链幅值和转矩大小, 具有动态响应快、控制精度高及对参数变化不敏感等优点, 故广泛应用于变频调速系统^[24]。

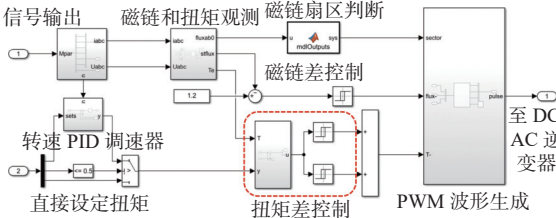


图 5 DTC 控制器模型

Fig. 5 DTC controller model

3.1.3 传动装置

1) 离合器。

采用一阶双曲正弦函数进行离合器建模, 其闭合时将输入扭矩传递至输出轴, 断开时则输出扭矩为 0。

$$T_i = T_o = f_s D_m \tan\left(\frac{2\Delta n_i}{\Delta n_m}\right) \quad (8)$$

式中: T_i, T_o 分别为离合器的输入端、输出端扭矩, 单位为 N·m; f_s 为最大传递扭矩, 单位为 N·m;

D_m 为离合器状态, $D_m=1$ 表示闭合, $D_m=0$ 则表示断开; $\Delta n_i = n_i - n_c$, 为输入端转速 n_i 和输出端转速 n_c 的差, 单位为 r/min; Δn_m 为最大许可转差。由于目标船存在两类离合器, 所以定义 f_{s1}, f_{s2} 分别为主机和轴带电机离合器的最大传递扭矩, 则 $\Delta n_{m1}, \Delta n_{m2}$ 分别为对应的最大许可转差。

2) 齿轮减速器。

齿轮减速器需考虑主传动比和辅传动比, 其模型输入为螺旋桨转速、主机扭矩、电机扭矩, 模型输出为主机转速、电机转速和螺旋桨扭矩, 表达式如下:

$$\begin{cases} n_d = K_1 n_p \\ n_m = K_2 n_p \\ T_p = K_1 T_d + K_2 T_m \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_1, K_2 分别为主传动比和辅传动比; n_m, n_p 分别为轴带电机和螺旋桨的转速, 单位为 r/min; T_d, T_m, T_p 分别为柴油主机、轴带电机和螺旋桨的扭矩, 单位为 N·m。

3.1.4 螺旋桨

依据水动力特性构建螺旋桨模型, 用以描述螺旋桨转速扭矩、推力系数 K_t 及扭矩系数 K_q 等参数之间的相互作用关系:

$$\begin{cases} F_p = K_t \rho_w n_p^2 d^4 (1-t) \\ T_p = K_q \rho_w n_p^2 d^5 \end{cases} \quad (10)$$

式中: F_p 为螺旋桨对船舶的推力, 单位为 N; $\rho_w = 1.025 \times 10^3$, 为航道的水密度, 单位为 kg/m^3 ; d 为螺旋桨直径, 单位为 m; $t = 0.5C_p - 0.12$, 为推力减额系数, 其中 C_p 为船体菱形系数。

K_t, K_q 数据可由船厂提供, 其拟合表达式为

$$\begin{cases} K_t = 0.3574J^3 - 0.4439J^2 - 0.2344J + 0.3659 \\ 10K_q = -0.0031J^3 - 0.2197J^2 - 0.224J + 0.433 \end{cases} \quad (11)$$

式中: 进速系数 $J = V_s(1-w)/(n_p d)$, 其中 V_s 为船舶对水航速, w 为伴流系数。伴流系数可根据经验公示 $w = 0.5C_b - 0.05$ 进行计算, 其中 C_b 为船体方形系数。

3.1.5 船舶阻力

船舶阻力包括风阻、兴波、摩擦及涡流阻力等, 在实际航行中难以定量描述多种参数, 因此一般采用实验方式进行建模, 即通过船厂提供的静水航行数据 (水流速度 ≈ 0), 建立船舶对水航速与阻力的曲线关系。

$$F_r = 11.579V_s^3 - 331.951V_s^2 + 5248.497V_s - 17578.977 \quad (12)$$

$$F_p - F_r = m \frac{dV_s}{dt} \quad (13)$$

式中: F_r 为船舶阻力, 单位为 N; m 为船舶质量, 单位为 kg。

3.2 电网侧建模

3.2.1 变流装置

1) AC/DC 变换。

不考虑变流器内双级晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)、二极管及电阻等瞬态关断过程对电流、功耗的影响, 仅基于其输入/输出电压、电流的转化关系来构建 AC/DC 均值模型, 其表达式如下:

$$\begin{cases} U_r = \frac{1}{3} \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2} \\ U_d = \frac{U_1 U_r}{U_2} \\ I_r = \frac{U_d I_d}{3 U_r \eta_a \gamma} \end{cases} \quad (14)$$

式中: U_a, U_b, U_c 和 U_r 分别为输入三相电压及其有效值, 单位为 V; U_d 为输出直流电压; U_1, U_2 分别为 AC/DC 标定的直流电压值和交流电压值, 通常为常数; I_r, I_d 分别为三相电流的有效值和直流电流, 单位为 A; η_a, γ 分别为 AC/DC 的效率和功率因数。

2) DC/DC 变换。

DC/DC 采用基于平均值的双向 Buck-Boost 模型, 表达式如下:

$$U_o = \frac{D}{1-D} U_i \quad (15)$$

式中: U_o, U_i 依次为 DC/DC 的输出、输入电压, 单位为 V; D 为占空比。

3) DC/AC 变换。

DC/AC 逆变器如图 6 所示, 其电压转换公式为

$$\begin{cases} Q_0 = (Q_1 + Q_2 + Q_3)/3 \\ U_a = U_d(Q_1 - Q_0) \\ U_b = U_d(Q_2 - Q_0) \\ U_c = U_d(Q_3 - Q_0) \end{cases} \quad (16)$$

式中, Q_1, Q_2, Q_3 为三相 IGBT 的关断信号。

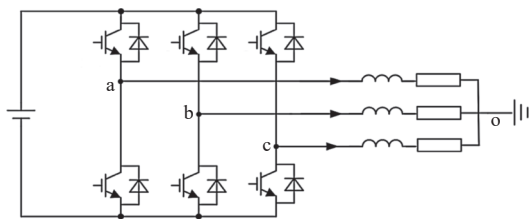


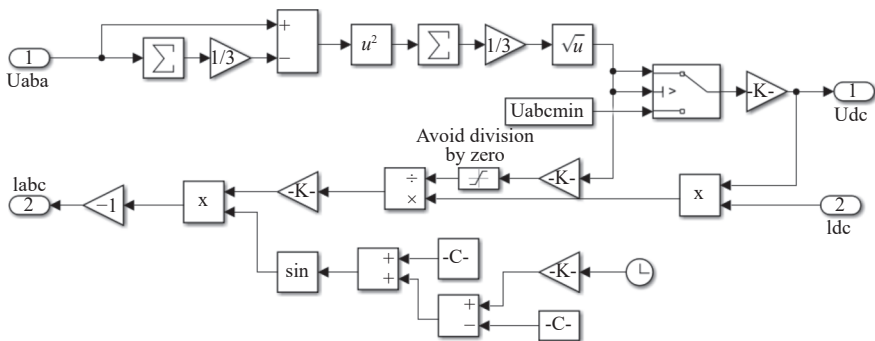
图 6 DC/AC 逆变器
Fig. 6 DC/AC inverter

基于式 (14) ~ 式 (16), 依次搭建 AC/DC, DC/DC, DC/AC 模型, 如图 7 所示。

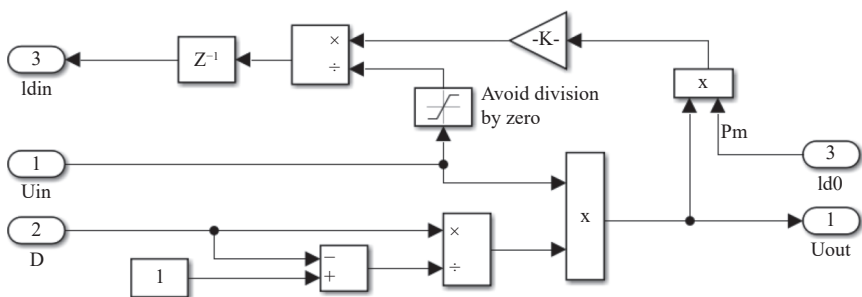
3.2.2 锂电池组

目标船采用的电池型号为 LK 280, 总容量为 280 Ah, 由 6 个 96 V 的电池包串联而成, 可提供 576 V 标称电压; 每个电池包含 3 个 32 V 的电池模块, 其最小组成单元为 3.2 V 的电池单体, 其单体特性曲线可由试验测得, 如图 8 所示。

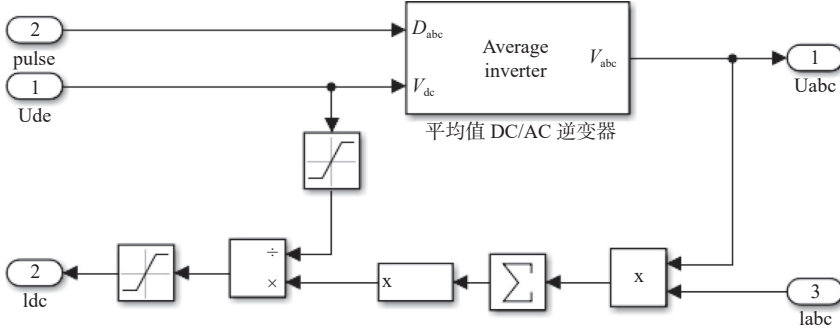
为实现直流电网的削峰填谷和稳压作用, 可



(a) AC/DC 模型



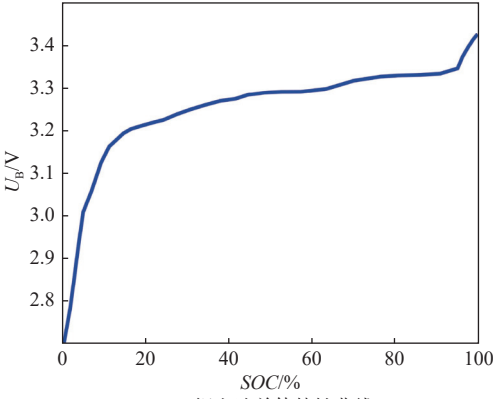
(b) DC/DC 模型



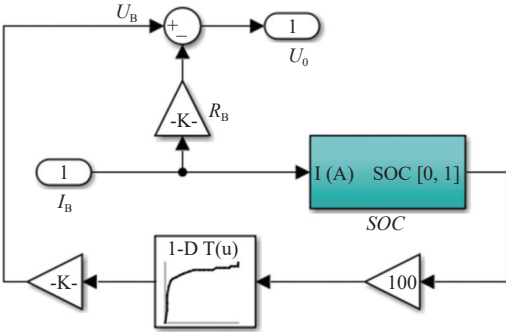
(c) DC/AC 模型

图 7 变流装置模型

Fig. 7 Power converter model



(a) 锂电池单体特性曲线



(b) 锂电池模型

图 8 锂电池单体特性与模型

Fig. 8 Characteristics and model of lithium battery

依据电阻特性进行锂电池建模, 其表达式为

$$U_0 = U_B - R_B I_B \quad (17)$$

式中: U_0 , U_B 分别为电池输出电压和开环电压, 单位为 V; R_B 为电池内阻, 单位为 Ω ; I_B 为通过电池的电流, 单位为 A。

电池荷电系数 (state of charge, SOC) 是评估电池剩余容量和使用寿命的重要参数, 可采用安时积分法计算, 其表达式为

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int_0^t I_B dt}{Q_B} \quad (18)$$

式中: SOC_0 为电池荷电系数的初始值; Q_B 为电池

总容量, 单位为 Ah。

3.2.3 发电机组

LNG 发电机组分为原动机和发电机两部分, 其中原动机的动态特性精度要求较低, 可以采用实验数据插值建模, 并基于厂家台架实验来测定原动机的万有特性, 如图 9 所示。

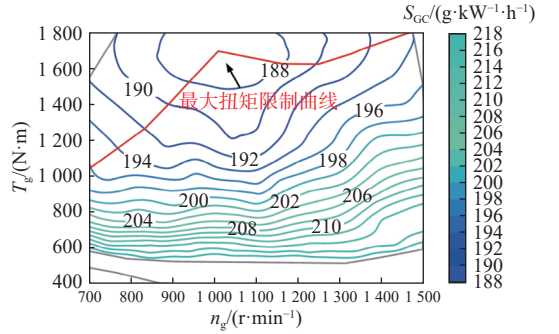


图 9 LNG 原动机的万有特性

Fig. 9 The universal characteristic of LNG prime mover

采用 Simulink 的 Simple Engine 模块导入最大扭矩-转速曲线, 其表达式为

$$\begin{cases} T_g = \min\{T_e, T_a\} \\ T_g - T_s - R_f n_g = \frac{\pi J_g}{30} \frac{dn_g}{dt} \\ S_{GC} = f_g(n_g, T_g) \end{cases} \quad (19)$$

式中: T_e , T_g , T_s 分别为原动机的需求扭矩、输出扭矩和负载扭矩; $\min\{\bullet\}$ 为最小值函数; T_a 为转速 n_g 在最大扭矩限制曲线所对应的限制值, 单位为 N·m; R_f 为惯性阻尼系数; J_g 为转动惯量, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; S_{GC} 为 LNG 的气耗率, 单位为 g/kWh ; f_g 为 LNG 气耗率的二元函数, 可通过万有特性二维插值构建。

原动机通过 PID 来控制转速, 发电机为三相异步电机, 采用 Simulink 内的 Induction Motor 模块即可实现异步发电模拟, LNG 发电机组模型如图 10 所示。

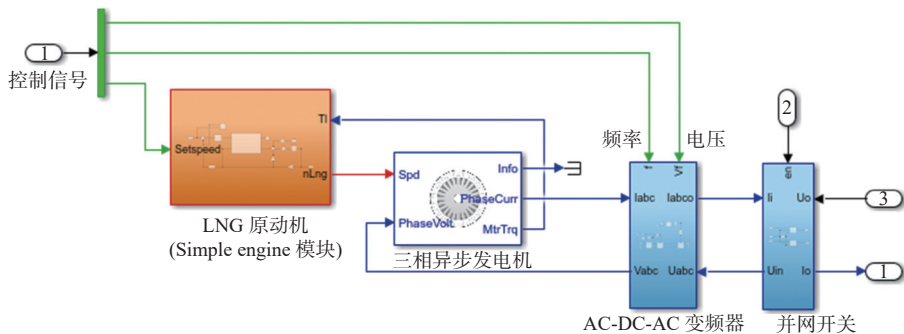


图 10 LNG 发电机组模型

Fig. 10 LNG generator sets model

3.3 模型参数设置

完成各设备建模之后,即可根据物理逻辑将

其输入输出信号进行连接,形成如图 11 所示的目标船混合动力系统模型,其参数详见表 3。

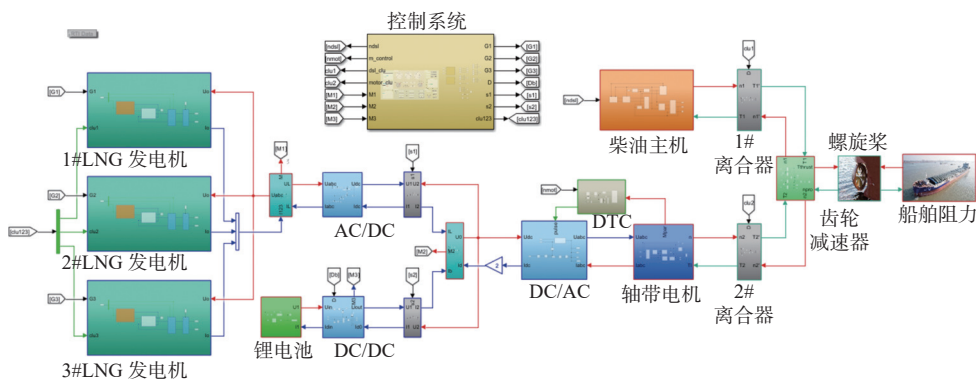


图 11 混合动力系统模型总图

Fig. 11 Overall diagram of hybrid power system model

表 3 混合动力系统模型的主要参数

Table 3 Main parameters of the hybrid power system model

模型名称	参数设置
柴油主机	$\eta_0=0.75$, $n_0=500$ r/min, $K=1$, $V_0=8.482$ L $H_L=42\ 700$ kJ/kg, $J_c+J_1=35$ kg·m ²
轴带电机	$R_s=1.38e^{-3}$ Ω, $L_d=L_q=0.651\ 8e^{-3}$ H $\varphi_r=0.987$ Wb, $p=2$, $J_m=7.315$ kg·m ²
传动装置	$K_1=6$, $K_2=10$, $f_{s1}=10\ 000$ N·m, $f_{s2}=3\ 250$ N·m $\Delta n_{m1}=\Delta n_{m2}=100$ r/min
螺旋桨	$C_b=0.8$, $C_p=0.68$, $D=3.15$
船舶阻力	$m=7\ 500\ 000$ kg
变流装置	$U_a=750$ V, $U_b=220$ V, $\eta_a=0.98$, $\gamma=0.98$
锂电池	$R_b=0.015$ Ω, $Q_b=280$ Ah
发电机组	$R_f=0.02$, $J_g=5$ kg·m ²

4 控制系统

4.1 人机交互界面

如图 12 所示,采用 Simulink 中的 Dashboard 模块搭建人机交互界面,即可实现用户与对象模型的交互操作,涉及的主要信号如下:

1) 推进侧控制信号:包括主机和电机的设定

转速、电机设定扭矩、1 #和 2 #离合器的接排、脱排信号。

2) 电网侧控制信号:包括 DC/DC 占空比、1#~3# LNG 机组设定转速/频率/电压信号、AC/DC 及 DC/DC 开关信号、1#~3# 发电机的并网信号。

3) 观测信号:1#~3# LNG 发电机组、锂电池、主机和电机的功率及电池 SOC 等。

4.2 能量管理系统

能量管理系统用于调整各设备功率的分配占比,包括能量管理和功率控制环节,如图 13 所示。能量管理的核心是能量管理策略,通常包括规则型和优化型两类,即通过合适的策略来计算主机、电机、电池和发电机组的设定参考功率。功率控制环节基于 PID 来实现参考功率跟踪,其中主机采用转速控制,电机则为功率控制,从而调节二者的功率占比。电池采用电压和功率的双闭环控制,即根据目标功率与实际功率的差值来生成补偿电压,并将补偿电压与设定母线电压之和作为锂电池 DC/DC 的设定电压,从而改变 DC/DC 占空比,同时直流电网的剩余功率将自动转移至交流电网。

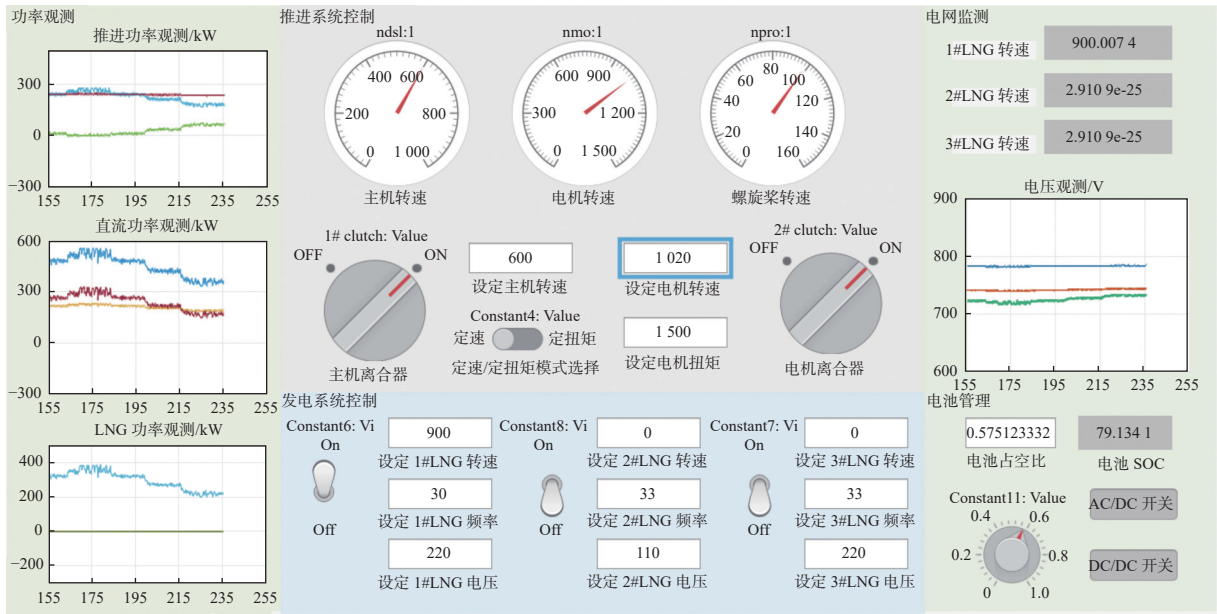


图 12 人机交互界面

Fig. 12 Human-computer interaction interface

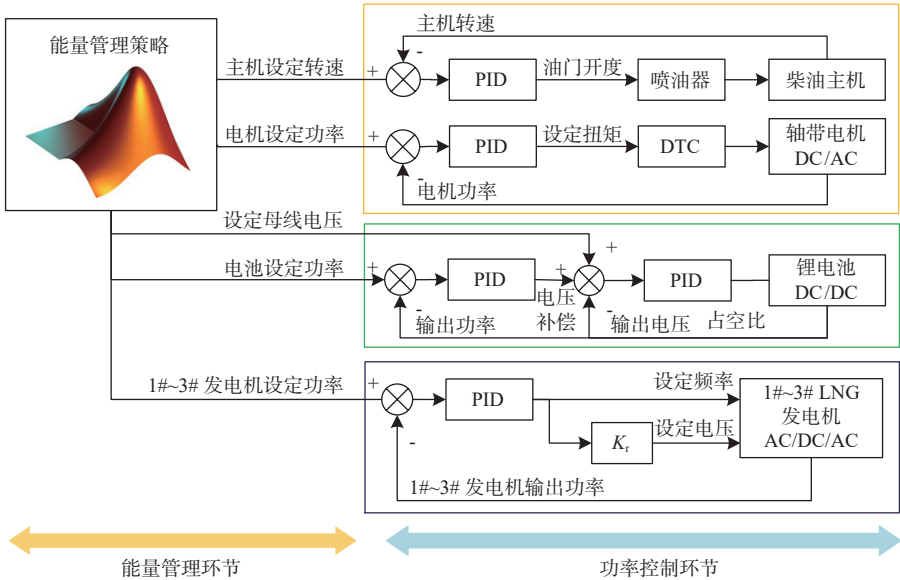


图 13 能量管理系统原理

Fig. 13 Principle of energy management system

1#~3# LNG 采用 V/F 恒压频比控制, 即保持 AC/DC/AC 变频器的交流输出电压有效值与其频率等于恒定比例值 K_r , 通过改变变频器的设定频率, 即可调整各机组的发电功率。

4.3 能量管理策略

在船舶航行过程中, 根据螺旋桨需求功率 P_{pro} 、电池 SOC、直流电网负荷功率 P_L 及各设备负荷限制, 即可制定规则型能量管理策略, 其中螺旋桨需求功率的最大限制为 820 kW, 即占主机与电机最大功率之和的 85 %。此外, 设定 P_1 , P_2 , P_3 分别为 1#~3# LNG 发电机的设定功率, P_b , P_m , P_d 分别为电池、电机和主机的设定功率, 单位

均为 kW。

机械侧的能量管理规则如①~④所示:

① 当电池 $SOC > 0.3$ 且 $0 \leq P_{pro} < 270$ kW 时, 选择 PTH 模式, 令 $P_m = P_{pro}$, $P_d = 0$, 仅由轴带电机承担全部负荷。

② 当电池 $SOC > 0.3$ 且 270 kW $\leq P_{pro} < 550$ kW 时, 选择 MP 模式, 令 $P_m = 0$, $P_d = P_{pro}$, 仅由柴油主机承担全部负荷。

③ 当电池 $SOC > 0.3$ 且 550 kW $\leq P_{pro} < 820$ kW 时, 选择 PTI 模式, 令 $P_m = 270$ kW, $P_d = P_{pro} - 270$, 此时电机保持 85 % 的最大功率输出, 而由主机承担其余负荷。

④ 当电池 $SOC \leq 0.3$ 时, 选择 PTO 模式, 令

$P_m=-60\text{ kW}$, $P_d=P_{\text{pro}}+60$, 其中 $0\leq P_d\leq 648\text{ kW}$, 此时让电机以最大功率对电池充电;当主机达到最大功率限制时,将无法承担更多的螺旋桨负荷,则保持 PTO 模式直至电池 SOC 达到 0.5。

电网侧的能量管理规则如⑤~⑩所示:

- ⑤当 $0\leq P_L<161\text{ kW}$ 时,不启动发电机,由锂电池承担全部直流负载。
- ⑥当 $161\text{ kW}\leq P_L<220\text{ kW}$ 时,启动 1 台发电机,令 $P_1=P_L$, $P_b=0$,此时由发电机承担全部负荷,可在一定程度上改善机组的运行区间。
- ⑦当 $220\text{ kW}\leq P_L<381\text{ kW}$ 时,启动 1 台发电机,令 $P_1=P_L-161$, $P_b=161\text{ kW}$,电池保持最大功率输出。
- ⑧当 $381\text{ kW}\leq P_L<601\text{ kW}$ 时,启动 2 台发电机,令 $P_1=P_2=(P_L-P_b)/2$, $P_b=161\text{ kW}$,电池保持最大功率输出,各发电机组则功率均分。
- ⑨当 $601\text{ kW}\leq P_L<821\text{ kW}$ 时,启动 3 台发电机,令 $P_1=P_2=P_3=(P_L-P_b)/3$, $P_b=161\text{ kW}$ 。
- ⑩当 $P_L<0$ 时,仅保持 1 台发电机组,令 $P_1=0$, $P_b=P_L$,采用电池全部吸收 PTO 模式的发电功率。

5 仿真分析

本文模型仿真采用的计算机 CPU 型号为 13th Gen Intel(R) Core(TM) i5-13600K, CPU 的主频率为 3.2 GHz, 运算内存为 32 GB, 操作系统为 Windows 11 专业版。仿真软件为 Matlab R2021b, 在其 Simulink 界面设置求解器为 ode4, 仿真步长 0.001 s。

5.1 模型适用性分析

1) 主机动态特性。

设定调速器 PID 为 $K_p=0.039$, $K_i=0.68$, 图 14(a) 所示为空载调速效果, 图 14(b) 为额定转速下突加或突降 100 % 负载的结果。由图 14 可知, 空载超调率为 3.62 %, 响应时间小于 1 s, 突变负荷时的瞬时变化率均小于 10 %。当主机单独运行时,

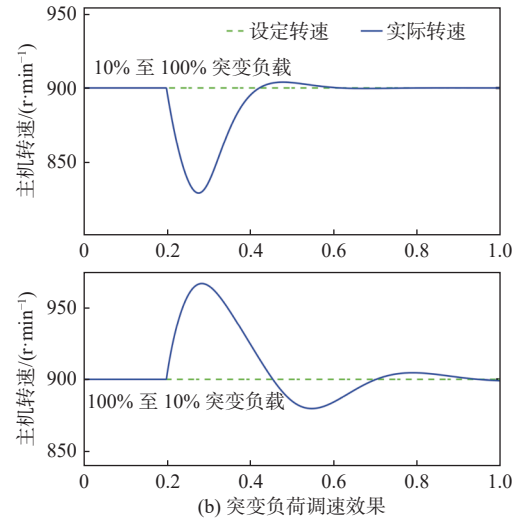
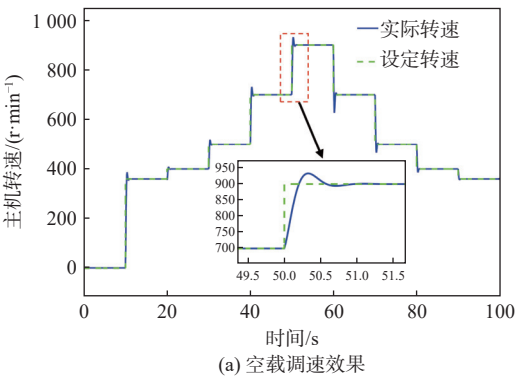


图 14 柴油主机调速器模型的验证

Fig. 14 Verification of diesel engine governor model

将转速设定为 400~900 r/min, 依次承担 30 %~100 % 的负荷, 对应的单位燃油消耗率 (specific fuel consumption, SFC) 如表 4 所示, 其中 SFC 的仿真误差范围为 $[-0.9, 4.5]$, 占对应实测值的 0.339 %~2.219 %, 即该模型的油耗误差小于 3 %。

2) 电机响应特性。

经调试, 将轴带电机的转速 PID 参数设置为 $K_p=18$, $K_i=25$ 。设定转速为 300~1 500 r/min, 仿真结果如图 15 所示, 其中图 15(a) 为 DTC 控制过程的磁链分布, 图 15(b) 为实际转速对设定转速的

表 4 不同转速负荷下主机 SFC 对比

Table 4 Comparison of main engine's SFC under different rotational speeds

设定转速/(r·min ⁻¹)	单位燃油消耗率(SFC)/(g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)							
	30 %负荷		50 %负荷		70 %负荷		100 %负荷	
	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测	仿真	实测
400	264.2	265.1	241.6	242	228.2	228.5	223.7	223.6
500	238.7	237.1	216.4	214	209.7	207.7	212.2	211.5
600	230.3	227.7	207.6	203.6	203.1	200	204.5	203.4
700	221.8	217.46	205	200.7	202.8	200	205.7	205.2
800	227.6	223.6	207.3	202.8	203.7	200.8	206.9	206.6
900	238.4	235.4	214.7	211.2	211.3	209.4	210	209.8

跟踪情况。图 15(a)将电机磁链分解为 φ_α 和 φ_β 两个分量,磁链分布近似成圆形。图 15(b)中电机的实际转速将围绕设定转速 ± 20 r/min 范围波动,在设定转速增加或降低瞬间,存在小于 0.5 s 的响应时间,这表明 DTC 对轴带电机转速和磁链的控制效果良好。

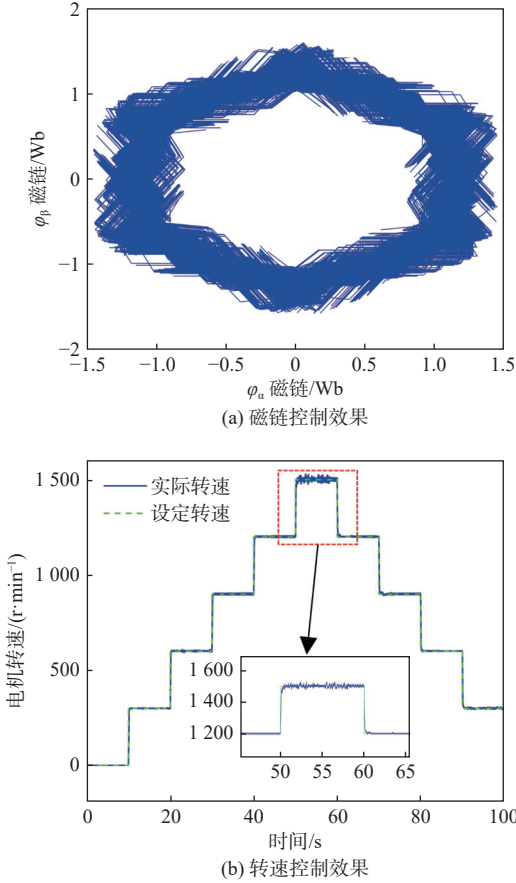


图 15 轴带电机的 DTC 控制效果

Fig. 15 DTC control effect of shaft generator

3) 电池充放电特性。

当电池舱温度为 32 ℃ 时,锂电池恒功率放电(SOC 从 100%~0)的试验与仿真结果如图 16(a)所示,图 16(b)为同等条件下 SOC 从 0~100 % 的恒功率充电测试结果,充放电功率设置为 161 kW 和 -161 kW,即保持最大充放电工况。根据结果可知,电池充放电过程均存在一定压降,其变化幅度 $<10\%$,符合船舶电力系统指南标准^[23];电池充放电过程的输出电压仿真值与实测值趋于一致,误差控制在 ± 5 V 内,说明该模型的精度可以满足实船条件下电池动态特性的模拟要求。

4) LNG 功率特性。

将 LNG 发电机的转速 PID 参数设置为 $K_p=18$, $K_i=25$,当 AC-DC-AC 参数恒定为 50 Hz/220 V 时,以额定转速发电并带载 80 % 负荷(约 180 kW),仿真结果如图 17 所示。发电机在并网励磁时先处于电动状态,并在小于 0.5 s 的响应时间内迅速

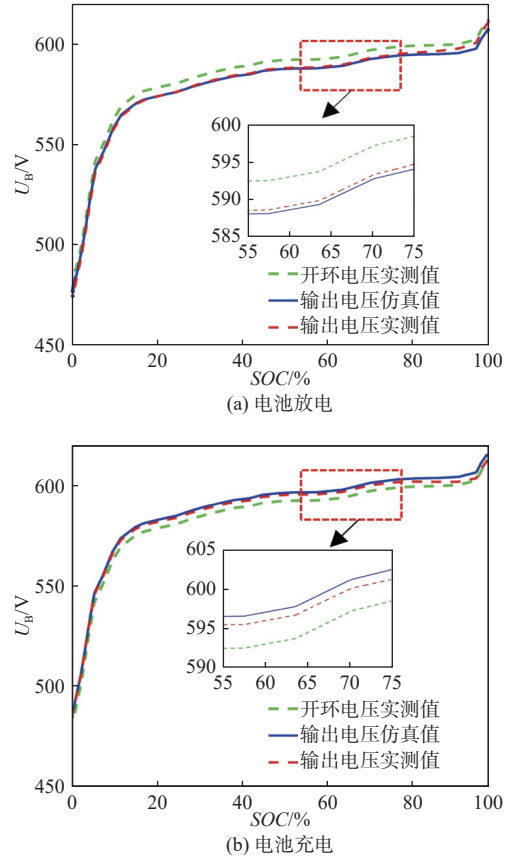


图 16 锂电池充放电试验与仿真结果

Fig. 16 Battery charge-discharge test and simulation results

调整至发电状态以满足异步发电特性;带载时的发电功率在 ± 5 kW 范围内波动,电压稳定在 50 Hz,且三相电流波形逐渐趋于正弦,这说明该模型可以模拟异步发电机的动态特性,并保证发电质量。

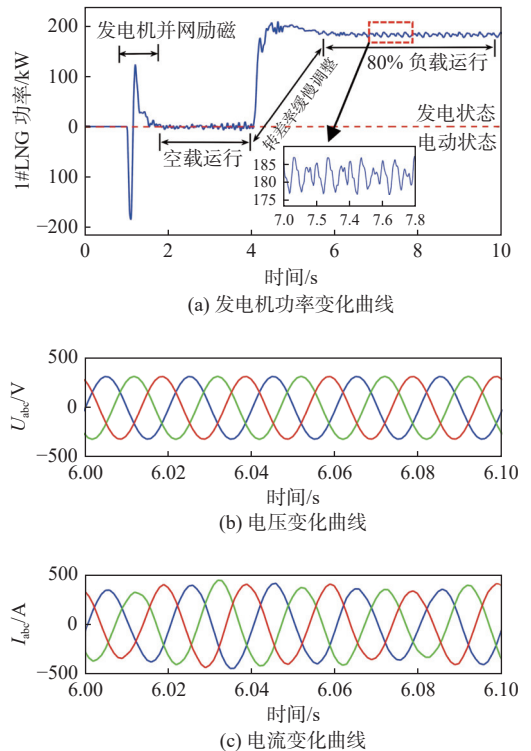


图 17 LNG 发电机的仿真结果

Fig. 17 Simulation results of LNG generator

5)船-机-桨的匹配特性。

如图 18 所示(设计院提供的容量匹配参数),主机、电机的推进曲线与螺旋桨负载曲线存在交点,可以反映各模式所能维持的最大螺旋桨转速及功率,从而在一定程度上体现船-机-桨的匹配情况。本文仿真数据与图 18 设计院数据的对比结果如表 5 所示,4 种推进模式与负荷曲线的交点对应的转速误差均小于 3 %,功率误差小于 4 %,这说明该模型与目标船的船-机-桨匹配特性趋于一致,故适用于混合动力系统能量管理及其控制策略的相关研究。

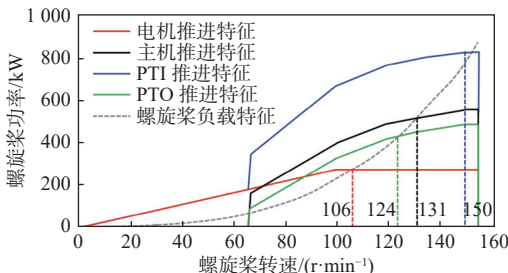


图 18 推进负载的匹配特性

Fig. 18 The matching characteristics of propulsion load

5.2 能量管理策略应用

为验证评估本模型在能量管理策略中的应用效果,以 4.3 节规则型能量管理策略为例,选择现有的功率流模型^[8]和 AMESIM 模型^[23]作为对照,从而得出 3 种模型在相同工况和策略下的仿真结果,

表 5 推进模式与螺旋桨负载的匹配情况

Table 5 The matching situation between propulsion mode and propeller load

推进模式	仿真转速 /(r·min ⁻¹)	实测转速 /(r·min ⁻¹)	误差 /%	仿真功率 /kW	实测功率 /kW	误差 /%
PTH	105.2	106.1	0.85	260.8	270.1	3.44
MP	130.5	131.6	0.84	511.1	518.2	1.37
PTI	147.2	149.7	1.67	772.5	769.8	0.35
PTO	121.5	124.1	2.1	434.6	431.1	0.81

如图 19 所示,其中 3 #LNG 均未启动。由图 19 可以看出,不同模型的参数变化趋势基本相同,各设备均可有效跟踪能量管理策略所设定的参考值,且母线电压稳定在 750 V±10 % 范围内,证明了本文规则型能量管理策略可以有效实现混合动力系统的能量管理。

将功率流模型、AMESIM 模型、本文 Simulink 机理模型分别简称为 A, B, C, 在第 80 s 和第 100 s 时刻外部负载发生变化,模型 A 中各功率呈突变形态,直接达到了参考值;模型 B, C 则存在 0~2 s 左右的调整时间,这反映了能量管理策略作用于瞬间控制器的响应过程,且模型 B, C 与参考值之间存在一定的偏差,这是由于能量转化存在的中间环节损失所致,例如传动损失、离合器摩擦损失、变流器效率等。

在第 50~60 s 时,模型 B 中各参数迅速调整至参考范围,而模型 C 的主机功率则先增加尔后

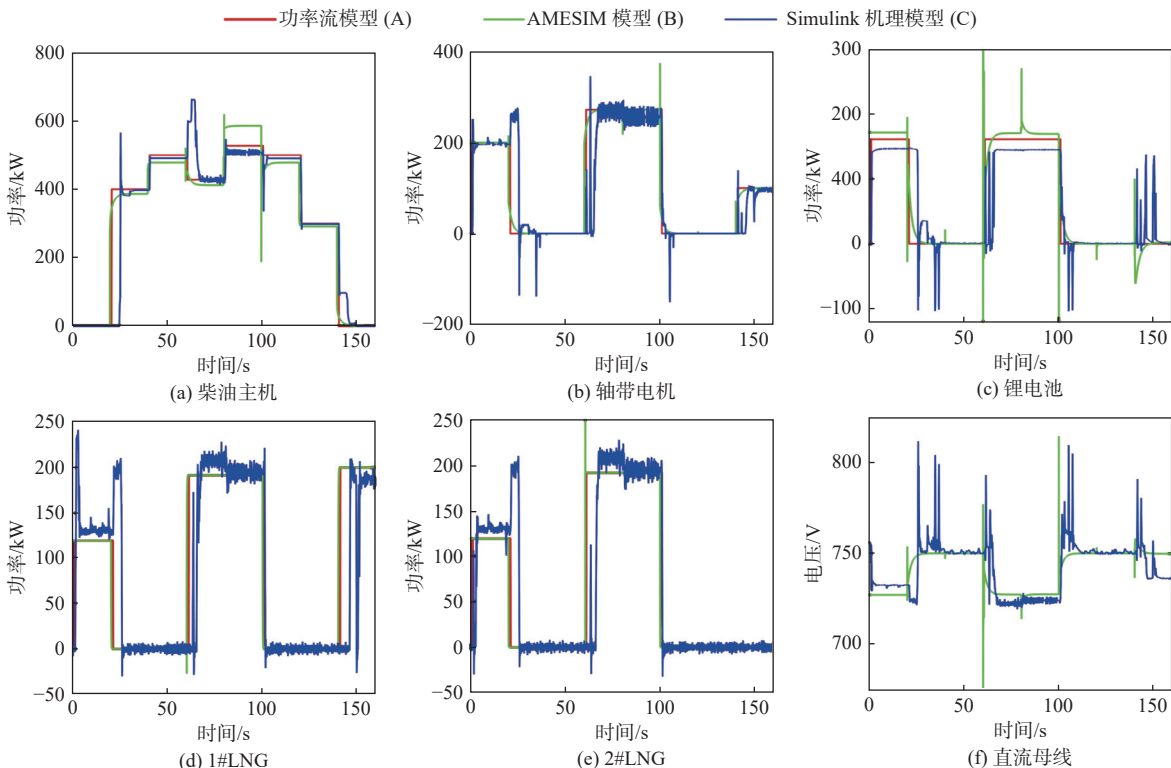


图 19 不同模型下的规则型能量管理策略应用效果

Fig. 19 Performance of rule-based energy management strategy under different models

减少,这是由于电机未启动而需求负载突增所致。当电机启动后即可逐渐分担负载,最终实现主机电机功率调整,这说明模型 C 可以体现模式切换、设备启停等状态变化。图 19(b)中,稳态过程中模型 B 的电机功率几乎无波动,即无法反映交流电机调速过程对电网的干扰。由图 19(d)和图 19(f)可知,模型 C 的发电过程比模型 B 更加平稳,这是因为模型 B 简化了发电过程控制,所以当从 0 瞬时增加至 80 % 负荷时,出现了大幅的功率波动。

此外,模型 B 仅关注了能量管理策略功率分配的总体趋势,而对设备具体类型则考虑不足,例如选用直流电机替代交流电机、电网侧仅采用直流组网等,虽然降低了建模难度,但忽视了设备之间的耦合作用。如图 19(b)所示,第 25~30 s 时发生了电机降速,可能由电动状态转为发电状态,这部分功率可以通过锂电池吸收,同时由于变流装置存在一定的响应迟滞,所以导致了电压短时升高;当各设备的输出功率稳定之后,由于变流装置采用高频开关控制,故其通断瞬间对电网产生了一定的电流噪声,从图 19(f)中也可以看出模型 B 无法体现多变流器之间的相互作用影响。模型 A 仅侧重于功率变化,未设置电压、电流等反馈环节,所以无法计算母线电压,同时也不利于全面评估能量管理策略对电能质量的影响。

图 20 为 3 种模型的电池 SOC 变化情况,其电池消耗的趋势基本相同,但对于 SOC 最终值而言,模型 B<模型 A<模型 C,其中模型 A 忽视了能量管理中间环节损失、模式切换、设备启停、变流器干扰等因素的影响,是一种理想情况;而模型 B 采用直流替代了交流,虽然考虑了中间损失,但简化了各设备的具体控制方式,导致其电量消耗有所增加,且在部分场合下容易发生电池过载。模型 C 基于电流跟踪控制而建立,可以有效满足电池的最大负荷限制,故其 SOC 变化最小。

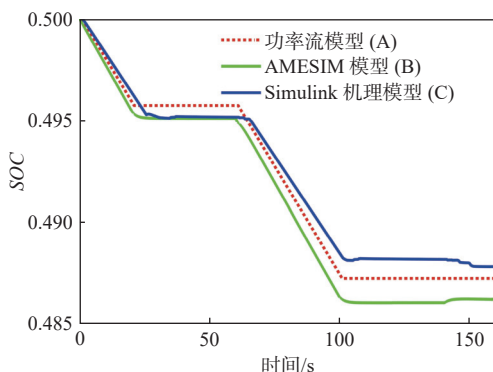


图 20 不同模型的 SOC 变化趋势

Fig. 20 SOC variation trends under different models

5.3 实时性分析

本节将采用 dSPACE 实时仿真器来验证本文模型的实时性,如图 21 所示,将混合动力系统和规则型能量管理策略通过 C 代码分别编译至 dSPACE 内,并利用 I/O 口建立能量管理策略和系统模型的通信联系,即可在实时环境下验证模型和策略的实时性能,其中模型运算时间与真实的物理环境保持同步。该测试采用了型号为 DS1202、版本为 MicroLabBox 的 dSPACE,以及 Freescale QorIQ P5020 2GHz 双核 CPU 处理器。

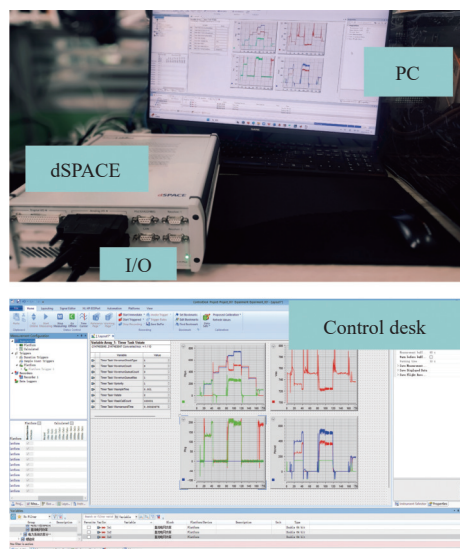


图 21 dSPACE 实时仿真测试

Fig. 21 Real-time simulation test based on dSPACE

经测试,本文所设计的混合动力系统 Simulink 机理模型在 dSPACE 内的单步运算时间在 0.000 149~0.000 152 s 范围内,小于仿真步长 0.001 s,即具有良好的实时性能。AMESIM 模型(模型 B)最小可支持 0.1 s 仿真步长,其单步运算时间为 0.022 16~0.023 3 s,远高于本文机理模型,这是由于 AMESIM 各模型库之间需要进行信号转换,且其应用能量管理策略时还存在跨平台信号交互过程,也需要额外算力。

本文机理模型在实时仿真和离线仿真下的直流母线电压对比结果如图 22 所示,可知其实时仿真过程存在 1~3 s 左右的延迟,同时由于 I/O 信号噪声干扰,其电压波动比离线仿真高出约 0.69 %,但 2 种仿真工况的结果总体一致,验证了该 Simulink 机理模型良好的实时应用效果。

6 结论

本文提出基于多环反馈的正向机理建模方法,通过构建柴-气-电船舶混合动力系统模型,并设计了规则型能量管理系统,得到如下结论:

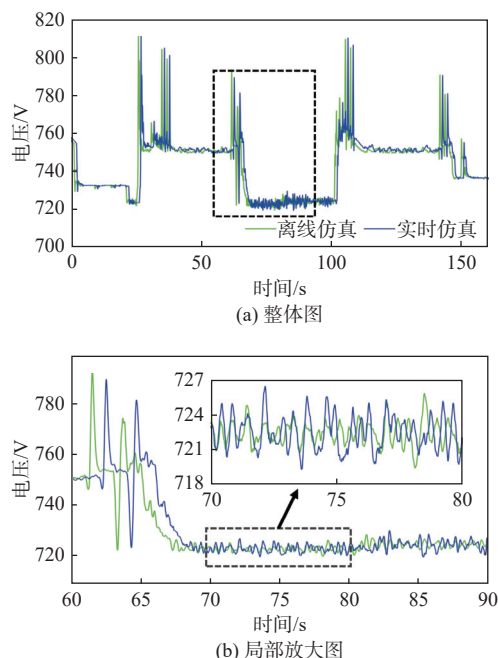


图22 离线仿真与实时仿真的对比结果

Fig. 22 Comparison between offline simulation and real-time simulation

1) 基于实测数据分析, 在 0.001 s 仿真步长下验证了主机、电机、锂电池及螺旋桨模型的动态特性, 证明了该模型可以在误差 < 4 % 的范围内模拟目标船系统的动态过程。

2) 以规则型策略为例, 通过对比相同策略下不同模型的应用效果, 本文 Simulink 机理模型有效体现了中间环节损失、控制响应、模式切换和变流器干扰等因素对能量管理过程的影响, 且在一定程度上反映了能量管理策略的各个瞬态过程, 从而提升了验证精度。

3) 通过 dSPACE 实时仿真证明了该模型可在 0.001 s 步长实时运行, 且仅存在 0.69 % 的通信噪声干扰, 且算力消耗低于现有的 AMESIM 模型, 故其具有良好的实时性能, 可为未来混合动力系统能量管理的长时域、全工况研究提供模型支持。

参考文献:

- [1] 方斯顿, 王鸿东, 张军军. 船舶大容量储能系统应用研究综述 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(6): 22–35.
- [2] FAN A L, LI Y P, LIU H Y, et al. Development trend and hotspot analysis of ship energy management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 389: 135899.
- [3] VIDLAK M, MAKYS P, STANO M. Comparison between model based and non-model based sensorless methods of brushed DC motor[J]. *Transportation Research Procedia*, 2021, 55: 911–918.
- [4] 黄加亮, 项勇兵, 尹自斌, 等. 压缩比对 4190 型船用柴油机能的影响 [J]. *中国航海*, 2014, 37(3): 15–20.
- [5] HUANG J L, XIANG Y B, YIN Z B, et al. Effects of compression ratio on performance of 4190 type marine diesel engine[J]. *Navigation of China*, 2014, 37(3): 15–20 (in Chinese).
- [6] 范爱龙, 严新平, 李忠奎, 等. 我国航运业绿色低碳发展的需求、路径与展望 [J]. *船海工程*, 2024, 53(4): 1–5, 12.
- [7] FAN A L, YAN X P, LI Z K, et al. Demand, pathway, and prospects of green and low-carbon development in China's shipping industry[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2024, 53(4): 1–5, 12 (in Chinese).
- [8] 肖能齐, 徐翔, 周瑞平. 船舶柴电混合动力系统能量管理控制策略 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(1): 153–160.
- [9] XIAO Q N, XU X, ZHOU R P. Energy management and control strategy of ship diesel-electric hybrid power system[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(1): 153–160 (in Chinese).
- [10] ZHANG C, JIA B Z. The research of power allocation in diesel-electric hybrid propulsion system[C]//2019 Chinese Automation Congress (CAC). Hangzhou, China: IEEE, 2019: 3664–3668. doi: 10.1109/CAC48633.2019.8996870.
- [11] 褚玥, 陈俐, 管聪. 船舶氢电混合动力系统建模与全生命周期碳排放评价 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(4): 122–130.
- [12] CHU Y, CHEN L, GUAN C. Ship hydrogen-electric hybrid power system model and life cycle carbon emission assessment method[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(4): 122–130 (in both Chinese and English).
- [13] 胡东亮, 袁裕鹏, 瞿小豪, 等. 基于鲸鱼优化算法的燃料电池/锂电池混合动力船舶能效优化分析 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(6): 155–166.
- [14] HU D L, YUAN Y P, QU X H, et al. Energy efficiency optimization analysis of fuel cell/lithium battery hybrid ship based on whale optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(6): 155–166 (in both Chinese and English).
- [15] REDDY N P, SKJETNE R, OS O S, et al. A comparison of the state-of-the-art reinforcement learning algorithms for health-aware energy and emissions management in zero-emission ships[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2024, 5(1): 149–166.
- [16] AHMADI H, RAFIEI M, AFSHARI IGDER M, et al. An energy efficient solution for fuel cell heat recovery in zero-emission ferry boats: deep deterministic policy gradient[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*,

- 2021, 70(8): 7571–7581.
- [12] SHANG C Y, FU L J, BAO X Q, et al. Energy optimal dispatching of ship's integrated power system based on deep reinforcement learning[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 208: 107885.
- [13] ROSLAN S B, KONOVESSIS D, ANG J H, et al. Simulation of LNG-Battery hybrid tugboat under the influence of environmental loads and manoeuvre[C]//International Marine Design Conference. 2024. (查阅网上资料, 未找到本条文献的出版信息, 请确认)
- [14] 刘代飞, 杨宏佳, 寇方党, 等. 基于 MATLAB/SimScape 的摆式波浪能发电系统建模与仿真 [J]. *长沙理工大学学报 (自然科学版)*, 2017, 14(2): 75–79, 97.
LIU D F, YANG H J, KOU F D, et al. Pendulum wave power system modeling and simulation based on MATLAB/SimScape[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2017, 14(2): 75–79, 97 (in Chinese).
- [15] LI Y P, FAN A L, FANG S D, et al. Energy management and simulation verification of hybrid power ship based on double-layer ECMS[C]//2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). Chongqing: IEEE, 2023: 663–668. doi: 10.1109/ICPSAsia58343.2023.10294584.
- [16] LIU H Y, FAN A L, LI Y P, et al. Hierarchical distributed MPC method for hybrid energy management: a case study of ship with variable operating conditions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 189: 113894.
- [17] TABART Q, VECHIU I, ETXEBERRIA A, et al. Hybrid energy storage system microgrids integration for power quality improvement using four-leg three-level NPC inverter and second-order sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(1): 424–435.
- [18] CANSIZ A, FAYDACI C, QURESHI M T, et al. Integration of a SMES–battery-based hybrid energy storage system into microgrids[J]. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2018, 31(5): 1449–1457.
- [19] SEMWAL P, NARAYANAN V, SINGH B, et al. Performance investigation of hybrid shipboard microgrid using ESOGI-FLL Technique[J]. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2024, 7: 100437.
- [20] 孙立, 吴梦丹, 郭萌萌, 等. 基于扩张状态卡尔曼滤波器的光伏/光热复合热泵系统经济模型预测控制研究 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2025, 55(2): 245–260.
SUN L, WU M D, GUO M M, et al. Extended state Kalman filter-based economic model predictive control of solar photovoltaic/thermal composite heat pump system [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2025, 55(2): 245–260 (in Chinese).
- [21] 王哲, 郭迎清. 混合动力系统建模及能量管理策略应用 [J]. *航空发动机*, 2019, 45(5): 7–11.
WANG Z, GUO Y Q. Hybrid power system modeling and energy management strategy application[J]. *Aeroengine*, 2019, 45(5): 7–11 (in Chinese).
- [22] 韩北川. 基于模糊控制的混合动力船舶能量管理策略研究 [J]. *机电工程技术*, 2019, 48(7): 84–87.
HAN B C. Research on energy management system for hybrid ship based on fuzzy control[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(7): 84–87 (in Chinese).
- [23] FAN A L, LI Y P, FANG S D, et al. Energy management strategies and comprehensive evaluation of parallel hybrid ship based on improved fuzzy logic control[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(4): 7651–7666.
- [24] GHAMRI A, BOUMAARAF R, BENCHOUIA M T, et al. Comparative study of ANN DTC and conventional DTC controlled PMSM motor[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, 167: 219–230.

Forward simulation and strategy application of hybrid power system based on multi-loop feedback

QIU Hao¹, FAN Ailong^{*2,3,4}, GUAN Cong¹

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

2 State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety (Wuhan University of Technology), Wuhan 430063, China

3 Hubei East Lake Laboratory, Wuhan 430063, China

4 School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: [**Objectives**] To address the growing complexity of ship hybrid power systems, this study proposes a forward modeling approach based on multi-loop feedback to enhance modeling accuracy and performance, with a focus on the coupling characteristics of mechanical and electrical systems. [**Methods**] Firstly, a 7 500-ton inland bulk carrier operating on the Yangtze River is selected as the case study. The topological structure and operational modes of its power system are analyzed. A diesel–gas–electric hybrid power system model is constructed in Simulink, which includes a rule-based energy management strategy and a power controller. Then, based on measured data, the model's applicability is evaluated in terms of fuel consumption, speed control response, charging and discharging characteristics, power generation behavior and ship–engine–propeller matching. Finally, the effectiveness of the Simulink model in energy management strategy development is assessed by comparison with existing power flow model and AMESIM model. [**Results**] Simulation results indicate that the model exhibits excellent responses in terms of speed and power, accurately replicating the dynamic behavior of the target vessel with a margin of error less than 4%. The ship–engine–propeller matching characteristics under four operating modes are consistent with those of the actual vessel, effectively capturing the influence of intermediate losses, control dynamics, mode transitions, and converter disturbances on the energy management process. Moreover, the model supports real-time simulation on dSPACE with a time step of 0.001 s, demonstrating strong real-time performance. [**Conclusions**] The research outcomes can serve as a reference for long-term testing across full operating conditions in the energy management of multi-energy hybrid power systems.

Key words: ship hybrid power; system modeling; energy management; real-time simulation