

基于拖船的并联式气电混合动力系统能量流解耦及优化控制

张风林

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所无锡分部, 江苏 无锡 214151)

摘要: 并联式气电混合动力系统存在部件间耦合严重、能量控制策略复杂等问题。为使系统多部件协同工作, 提高系统能量效率, 以应用于拖船的并联式气电混合动力系统为推进系统研究载体, 通过仿真建模对混合动力系统部件进行解耦分析, 基于蚁群算法设计了能量管理策略, 使系统多部件协同工作。结果表明: 相比于基于规则的能量管理策略, 推进系统在基于蚁群算法的能量管理策略控制下使拖船航速跟随性提高了73%, 平均能量效率提高了0.7%, 等效气耗节约了8.3%, 蓄电池组SOC变化值增加14.1%; 实现了混合动力系统参数准确控制, 提高了系统能量效率, 为气电混合动力系统大规模普及应用提供了技术支持。

关键词: 气电混合; 能量管理; 解耦分析; 蚁群算法

中图分类号: U665.13

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2024.12.009

[引用本文格式] 张风林. 基于拖船的并联式气电混合动力系统能量流解耦及优化控制[J]. 热能动力工程, 2024, 39(12): 75-87.
ZHANG Fenglin. Energy flow decoupling and optimal control of a parallel gas-electric hybrid propulsion system based on tugboat[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(12): 75-87.

Energy Flow Decoupling and Optimal Control of a Parallel Gas-electric Hybrid Propulsion System based on Tugboat

ZHANG Fenglin

(Wuxi Division of No. 703 Research Institute of CSSC, Wuxi, China, Post Code: 214151)

Abstract: The parallel gas-electric hybrid power system has problems such as serious coupling between components and complex energy control strategies. In order to make the multiple components of the system work together and improve the energy efficiency of the system, the parallel gas-electric hybrid power system applying for the tugboat was used as the research carrier of the propulsion system. The decoupling of hybrid power system components was analyzed by means of simulation modeling, and the energy management strategy based on ant colony algorithm was designed to make the multiple components of the system work together. The results show that the speed following ability of the tugboat under the energy management strategy based on ant colony algorithm is increased by 73%, compared with that under the rule-based energy management strategy. The average energy efficiency is increased by 0.7%, equivalent gas consumption saves 8.3% and the SOC change value of battery pack is increased by 14.1%, which realizes the accurate control of hybrid power system parameters, improves the energy efficiency of the system, and provides technical support for the large-scale popularization and application of gas-electric hybrid power system.

Key words: gas-electric hybrid, energy management, decoupling analysis, ant colony algorithm

引 言

随着“双碳”计划和日益严苛的排放法规实施,船舶行业传统柴油动力形式面临严峻挑战。天然气发动机使用储量丰富的清洁能源,在降低碳和氮等污染物排放方面具有明显优势。但是,以液化天然气(LNG)为燃料源的内燃机,在低负荷工况下,排放的碳氢颗粒和一氧化碳残留量可达传统柴油燃烧的几十倍甚至上百倍;当负载工况突变时,LNG 主机与柴油机相比在功率加载阶段有 20% ~ 30% 的迟滞;在满载工况下变载时,LNG 主机更容易发生爆燃现象^[1-2]。船舶气电混合动力系统通过将电机设备的响应快速性、电能清洁性、全工况无差异性的特点与天然气发动机的燃料绿色性特点有机结合,可以克服天然气发动机功率加载迟滞与低负荷排放差等缺陷,同时规避了纯电力推动续航能力差的缺点,成为天然气发动机应用于船舶动力系统的最佳途径。

目前,应用于船舶领域的混合动力结构通常以传统推进形式与新型动力源相结合为主^[3-4]。应用于船舶领域的能量管理策略主要有:基于规则的控制策略、基于全局优化的控制策略和基于瞬时优化的控制策略。通常以经济性、动力性、稳定性以及多目标综合优化等特性作为能量管理策略的调控目标^[5-7]。宋恩哲等人^[8]提出动态协调切换控制策略,证明电机在促使气电混合动力系统稳定运行过程中具有积极作用。彭程等人^[9]提出了一种基于离合器滑摩扭矩估计的模式切换控制方法,有效降低了系统在模式切换过程中轴系冲击问题。金立源等人^[10]采用变频器切换控制策略,充分利用电机特性,提高了系统的动态加速性能。傅圣来等人^[11]提出级联内模控制,对系统运行过程中的不确定延迟加以控制,实现平稳切换。

本文以并联式气电混合动力系统为研究对象,立足于拖船整体性能,将拖船航速作为系统研究线索,将拖船实际航速与系统能量管理策略仿真模型相结合,对推进系统航速及能效解耦分析,研究各设备参数对拖船航速的影响。针对混合动力系统存在的部件间耦合严重、能量控制策略复杂等问题,提出基于蚁群算法的能量管理策略,使推进系统各设备工作在最优状态,提高了船舶气电混合动力系统能

量效率,实现了气电混合动力系统的优化控制。

1 系统结构及适配船型研究

1.1 混合动力系统拓扑结构

船舶领域的气电混合动力系统结构形式主要分为串联式、并联式和混联式^[12]。并联式结构一方面可应用于新船建造,另外一方面适用于改装旧船动力系统。该结构适用范围更宽,安装成本较低且可满足日益严格的排放法规。因此,本文对并联式船舶气电混合动力系统结构展开研究,其拓扑结构如图 1 所示。根据系统部件工作状态不同,将系统工作模式划分为电动、机械、混合和充电推进模式。各工作模式能量流状态如图 2 所示。

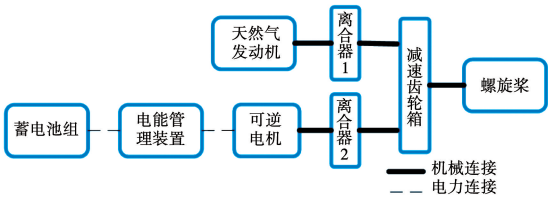


图 1 并联式船舶气电混合动力系统拓扑结构

Fig. 1 Parallel gas-electric hybrid power system topology of ship

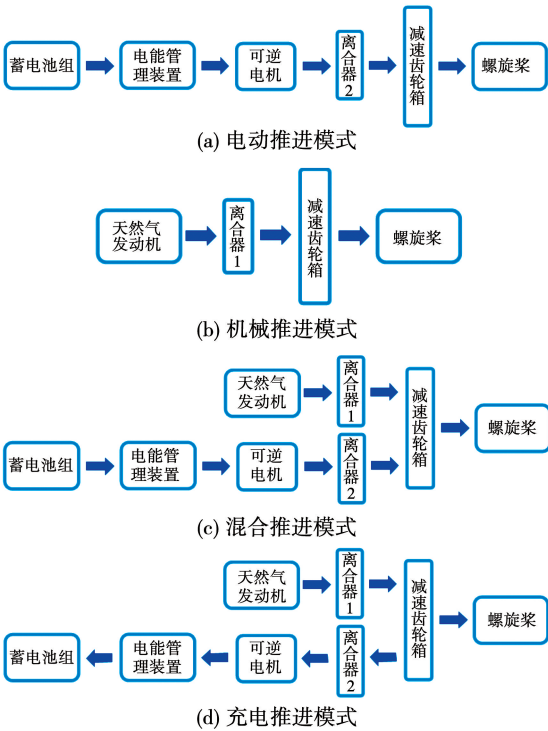


图 2 并联式船舶气电混合动力系统能量流状态

Fig. 2 Parallel gas-electric hybrid power system energy flow state of ship

1.2 适配船型特性分析

并联式气电混合系统特点如图 3 所示。可以看到, 并联式船舶气电混合动力系统可以多模式切换推进, 可为船舶提供宽范围的功率选择; 对推进功率的快速调整, 适用于航行工况多变的船舶; 同时天然气作为绿色能源, 适用于在沿海、沿江和沿河等排放控制区内运营的船舶。同时并联式混合动力系统可有效减小天然气发动机的装机容量, 降低安装及运行成本, 减少污染物排放。

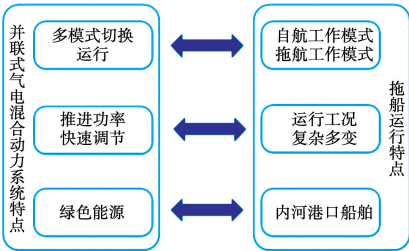


图 3 并联式气电混合动力系统特点图

Fig. 3 Characteristic diagram of parallel gas-electric hybrid power system

本文以在上海某港口运行的 11 艘拖船一周的运行状态作为航速数据源, 深度分析拖船的运行特点, 通过将不同拖船航速归一化处理, 获得如图 4 所示的拖船航速比分布图。将图 5 所示的特定航速作为本文仿真的目标航速。目标拖船航速节选运行时长适中, 运行工况覆盖全面, 符合拖船船舶运行特性。本文所择取的目标拖船航速信息如表 1 所示。

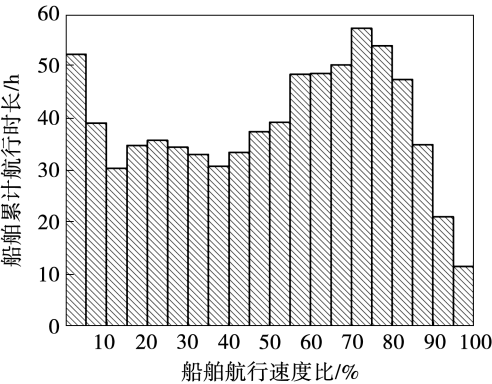


图 4 拖船航速比分布图

Fig. 4 Tugboat navigational speed ratio layout

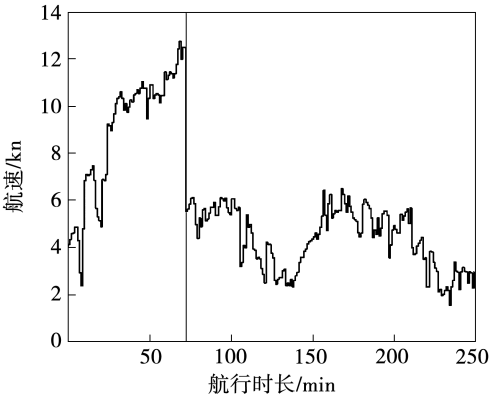


图 5 仿真目标航速图

Fig. 5 Simulation target navigational speed chart

表 1 目标拖船航速信息

Tab. 1 Navigational speed information of target tugboat

参 数	数 值
船长/m	35
功率/kW	375
最高航速/kn	12.76
平均航速/kn	5.57
航行时长/min	250
单次停靠平均时长/h	4
自航状态运行时间/min	0 ~ 72
拖船工况运行时间/min	72 ~ 250
总航行距离/海里	23.3

2 仿真模型搭建及能量管理策略构建

2.1 系统模型搭建

根据系统部件工作侧重点不同将并联式船舶气电混合动力系统划分为负载部分、传动部分和动力源部分。将船体阻力并入推进系统研究, 使得并联式船舶气电混合动力系统能量流形成闭环控制, 通过船舶航速反映推进系统运行特性。结合目标船舶运行工况特点及研究内容, 完成部件仿真模型搭建, 仿真模型拓扑结构如图 6 所示。模型负载部分包括船体阻力模型、螺旋桨模型; 模型传动部分包括离合器模型、减速齿轮箱模型; 模型动力源部分包括天然气发动机模型搭建、永磁同步可逆电机模型和蓄电池组模型。

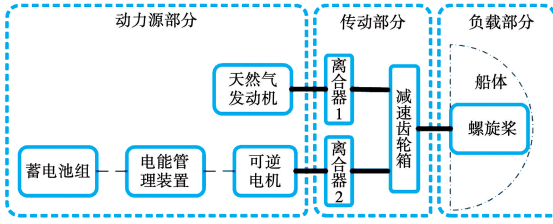


图6 仿真模型拓扑结构

Fig. 6 Simulation model topology

2.1.1 船体阻力模型

拖船在自航状态下航行阻力 R_Z 为:

$$R_Z = R_f + R_{res} + R_A + R_{air} \quad (1)$$

拖船在拖航状态下航行阻力 R_T 为:

$$R_T = 1.15 [R_Z + R_{ft} + R_{rest}] \quad (2)$$

式中: R_f —船舶摩擦阻力, N; R_{res} —剩余阻力, N; R_A —附体阻力, N; R_{air} —空气阻力, N; R_{ft} —被拖船的摩擦阻力, N; R_{rest} —被拖船的剩余阻力, N。

2.1.2 螺旋桨模型

$$T_p = K_T \rho n_p^2 D^4 \quad (3)$$

$$Q_p = K_Q \rho n_p^2 D^5 \quad (4)$$

$$J = \frac{V_s}{n_p D} \quad (5)$$

式中: T_p —螺旋桨推力, N·m; D —螺旋桨直径, m; K_T —螺旋桨推力系数; ρ —水的密度, kg/m³; n_p —螺旋桨转速, r/min; Q_p —螺旋桨转矩, N·m; K_Q —螺旋桨转矩系数; J —进速系数; V_s —船舶航速, m/s。

2.1.3 减速齿轮箱模型

$$(Q_g n_g + Q_m n_m) \eta_B = Q_B n_B \quad (6)$$

式中: Q_g —发动机输入齿轮箱扭矩, N·m; Q_m —可逆电机输入齿轮箱扭矩, N·m; n_g —发动机输入齿轮箱转速, r/min; n_m —可逆电机输入齿轮箱转速, r/min; Q_B —齿轮箱输出扭矩, N·m; n_B —齿轮箱输出转速, r/min。

2.1.4 离合器模型

离合器模型中接合过程的时间及滑摩功主要关系为:

$$\begin{cases} Q_{c,in} - Q_a = j_{c,in} \frac{d\omega_{c,in}(t)}{dt} \\ Q_a - Q_{c,out} = j_{c,out} \frac{d\omega_{c,out}(t)}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Q_{c,in}$ —原动机的输入齿轮箱转矩, N·m; Q_a —离合器的动转矩, N·m; $j_{c,in}$ —输入离合器的转动惯量, kg·m²; $\omega_{c,in}(t)$ 、 $\omega_{c,out}(t)$ —主、从动部分的角速度, rad/s; $Q_{c,out}$ —从动件对离合器工作扭矩, N·m; $j_{c,out}$ —离合器输出转动惯量, kg·m²。

2.1.5 天然气发动机模型

天然气发动机建模时利用热力学知识模拟天然气燃烧,求得发动机各种指标参数,可较为精确地反映天然气发动机动态响应过程。

$$\frac{du_{cyc}}{d\varphi} = \frac{dq_D}{d\varphi} + \frac{dm_{cyc,in}}{d\varphi} h_{cyc,in} - \frac{dm_{cyc,out}}{d\varphi} h_{cyc,out} - \frac{dq_w}{d\varphi} - p \frac{dV_{eng}}{d\varphi} \quad (8)$$

$$\frac{dV_{eng}}{d\varphi} = \frac{\pi^2 D_{eng}^2 S_e}{8 \times 180} \left[\sin\left(\frac{\pi\varphi}{180}\right) + \frac{\lambda}{2} \times \frac{\sin\left(\frac{\pi}{180} \times 2\varphi\right)}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{180} \varphi\right)}} \right] \quad (9)$$

$$\frac{dq_w}{d\varphi} = \sum_{i=1}^3 \frac{dq_{wi}}{d\varphi} = \sum_{i=1}^3 a_w \times A_i (F_{eng} - F_{wi}) \quad (10)$$

$$\frac{dq_D}{d\varphi} = m_{cyc} H_u \frac{dx}{d\varphi} \quad (11)$$

式中: u_{cyc} —系统内能, J; q_D —燃料在缸内燃烧放热量, J; q_w —通过气缸壁的热量, J; $h_{cyc,in}$ 、 $h_{cyc,out}$ —进、排气阀处工质的比焓, J/kg; p —缸压, Pa; V_{eng} —气缸工作容积, m³; $m_{cyc,in}$ —流入气缸的质量, kg; $m_{cyc,out}$ —流出气缸质量, kg; D_{eng} —气缸直径, m; S_e —活塞行程, m; λ —连杆曲柄比; φ —曲轴旋转角度; a_g —缸壁瞬时换热系数; A —气缸换热面积, m²; F_{eng} —缸内工质瞬时平均温度, K; F_w —缸壁平均换热温度, K; $i = 1, 2, 3$ 分别表示气缸套、气缸盖和活塞; m_{cyc} —缸内燃料质量, kg; H_u —缸内燃料热值, J/kg; $dx/d\varphi$ —燃烧速率。

2.1.6 永磁同步可逆电机模型

电机选择同步旋转坐标系 $d-q$ 轴下的数学建模,其定子电压方程可以表示为:

$$\begin{cases} U_d = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_x \psi_q \\ U_q = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_x \psi_d \end{cases} \quad (12)$$

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (13)$$

此时电磁转矩方程为:

$$Q_m = \frac{3}{2} P_n i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (14)$$

$$\begin{cases} \omega_e = p_n \omega_m \\ n_m = \frac{30}{\pi} \omega_m \\ \theta_x = \int \omega_x dt \end{cases} \quad (15)$$

式中: U_d 、 U_q —定子电压位于 $d-q$ 轴的分量, V; i_d 、 i_q —定子电流位于 $d-q$ 轴的分量, A; R —定子电阻, Ω ; ψ_d 、 ψ_q —定子磁链位于 $d-q$ 轴的分量, Wb; ω_x —电角速度, rad/s; L_d 、 L_q —电感位于 $d-q$ 轴的分量, H; ψ_f —永磁体磁链, Wb; ω_m —电机的机械角速度, rad/s; n_m —电机的转速, r/min; P_n —极对数; Q_x —电机运行角度。

2.1.7 蓄电池模型

$$U_{ocv} = f_{bV}(\text{SOC}, F_{bat}) \quad (16)$$

$$R_{in} = f_{bR}(\text{SOC}, F_{bat}) \quad (17)$$

$$U = U_{ocv} - I_i R_i \quad (18)$$

式中: U_{ocv} —开路电压, V; f_{bV} —开路电压与荷电状态的关系; SOC—荷电状态, %; F_{bat} —电池温度, K; R_i —电池内阻, Ω ; f_{bR} —内阻与荷电状态的关系; U —输出电压, V; I_i —充放电电流, A。

2.2 基于规则的能量管理策略构建

船舶气电混合动力系统具有多变量、强耦合、非线性和大惯性等特点。系统能量由动力源部分产生并输出,经传动部分传递,在负载部分实现推进系统动力与船舶阻力之间的平衡。面对复杂多变的实际航行工况及外界干扰,合理且有效的能量管理策略对拖船稳定、快速、精确航行尤为关键。本文采用设计简单、容易实现的基于规则的能量管理策略对船舶气电混合动力系统解耦分析,为后续搭建基于优化算法的能量管理策略提供参照依据。船舶气电混合动力系统基于规则的能量管理策略构建准则

如下^[13]:

(1) 天然气发动机优先原则:以天然气发动机为主动力源、可逆电机为辅助动力源;设定推进系统所有能量源于天然气发动机,即蓄电池组全部能量来源于天然气发动机工作输入;由于可逆电机输出功率存在机械能—电能—机械能的不可避免的能量转化损耗,因此采用天然气发动机优先原则。

(2) 工作模式划分原则:船舶气电混合动力系统工作模式划分以系统整体能量效率最优为原则;模式划分受船舶目标航速、蓄电池组荷电状态(SOC)、天然气发动机运行状态以及可逆电机运行状态限制;工作模式切换通过离合器控制。

(3) 天然气发动机能效最佳原则:天然气发动机应稳定运行于最优经济范围区间内,避免长时间高于额定功率运行,且减小功率波动幅度;天然气发动机启动方式为无负载启动,同时减少启停及功率调整以提高能量效率及增强系统稳定性。

(4) 蓄电池组 SOC 储能控制原则:蓄电池组 SOC 工作限值为 20% ~ 90%,以确保输出稳定电压。当 SOC 低于下限值 20% 时,蓄电池组停止放电过程,并在合适状态提高发动机输出功率,为蓄电池组充电;当 SOC 高于 90% 上限值时,蓄电池组停止充电过程,并在合适状态降低发动机输出功率。拖船运行过程中,应使蓄电池组电量保持在较安全的 30% ~ 80% 工作区间内,保证拖船在启动、进出港或者加速等状态下蓄电池组输出能量充足。

(5) 功率平衡原则:通过螺旋桨螺距比控制使得推进系统输出扭矩与船舶航行所需推力平衡,避免出现螺旋桨转速大范围波动的现象。

2.3 仿真模型运行分析

在基于规则的能量管理控制策略下仿真模型运行状态如图 7 所示。由图 7 可知,当拖船运行于自航状态时,船舶仿真航速与目标航速变化趋势基本相同,但仿真航速跟随性较差,当目标航速变化急剧时,推进系统在基于规则的能量管理控制下航速无法快速响应,仿真航速与目标航速之间差距拉大;当拖船运行于拖航状态时,在航行时长为 72 ~ 125 min 时,受减速齿轮箱减速比调整和推进系统巨大的惯性影响,船舶航速滞后性严重,但当目标航速变化较缓时,推进系统具有较好的跟随特性。

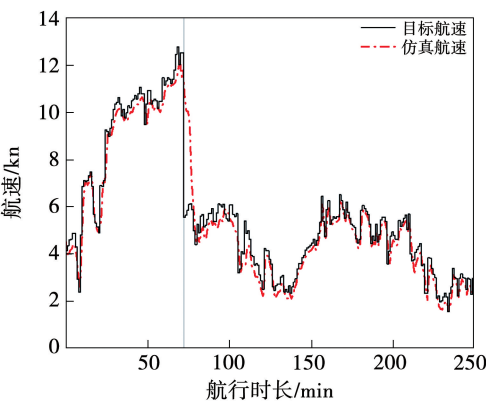


图 7 拖船航行仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of tugboat navigation

3 推进系统解耦分析

混合动力系统部件间的连接关联性、功能关联

性和物理关联性使系统能量控制十分复杂。基于规则的能量管理策略主要从预设基本运行规则、系统目标航速与推进系统部件状态等方面宏观进行各部件间的协调控制。通过研究部件间的耦合关系,充分认识关键部件对推进系统的作用机理,通过对部件更加细致的规则预设使系统运行于最佳状态。

3.1 动力源状态解耦分析

船舶气电混合动力系统动力源部分解耦分析包括:(1) 基于规则的能量管理控制策略下,混合动力系统动力源整体能量效率受动力源转速、混合度、航行速度及拖船航行状态的影响;(2) 蓄电池组 SOC 初始状态及温度对拖船续航里程的影响。

图 8 为航速能效图。可以看到,拖船动力源部分能量效率随着航速的增加而整体呈增加趋势。

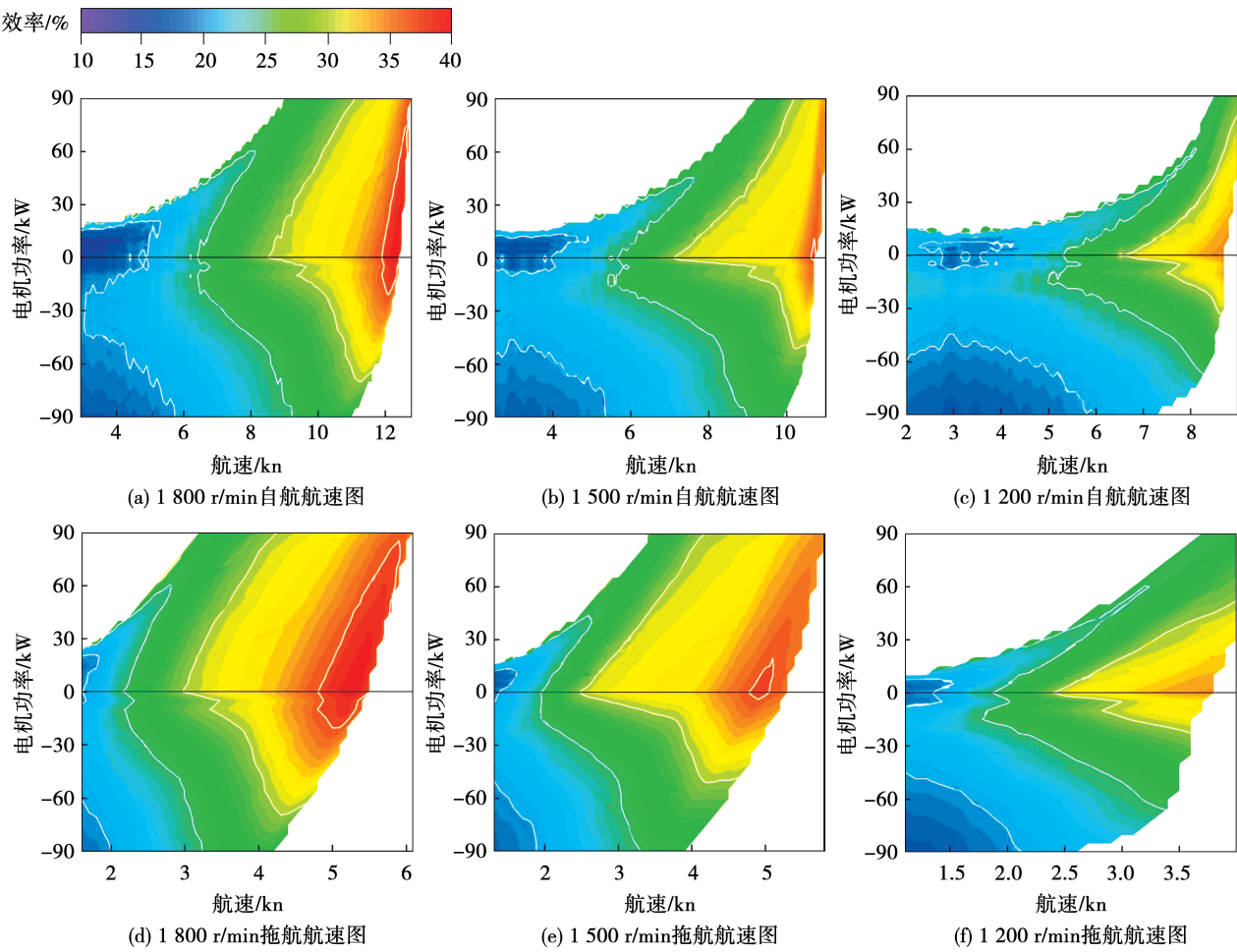


图 8 航速能效图

Fig. 8 Energy efficiency diagrams of navigational speed

如图所示。当电机输出功率小于 0 时,系统为充电推进模式;当电机输出功率等于 0 时,系统为机械推进模式;当电机输出功率大于 0 且小于系统所需全部功率时,系统为混合推进模式;当电机输出功率等于系统所需全部功率时,系统为电动推进模式。随着推进系统转速增加,拖船运行最低航速、最高航速、航速范围、动力源最高能量效率均增加。

由图 8(a)可知,自航状态下,航速为 12.3 kn 时,动力源能量效率最高达到 36.7%,为混合推进模式。当航速低于 6 kn 时,电动推进模式能量效率最高;当航速位于 6~8 kn 时,充电推进模式与电动推进模式能量效率较高;当航速大于 8 kn 时,机械推进模式能量效率较高;当航速高于 11 kn 时,机械推进模式能量效率与混合推进模式能量效率、充电推进模式能量效率相差不大。图 8(d)可见拖航状态下,当航速为 5.3 kn 时,动力源能量效率最高达到 36.2%,为机械推进模式;当航速低于 2 kn 时,电动推进模式能量效率最高;当航速位于 2~2.7 kn 时,充电推进模式、电动推进模式能量效率较高;当航速高于 2.7 kn 时,机械推进模式能量效率较高;当航速大于 4.8 kn 时,机械推进模式能量效率最高。

由图 8(b)可知,自航状态下,航速为 10.7 kn 时动力源能量效率最高达到 35.4%,为机械推进模式;当航速低于 4.7 kn 时,电动推进模式的能量效率最高;当航速位于 4.7~7 kn 时,充电推进模式能量效率最高;当航速高于 7 kn 时,机械推进模式与混合推进模式能量效率较高,由图 8(e)可知,拖航状态下,航速为 4.9 kn 时动力源能量效率最高达到 35.4%,为混合推进模式;当航速低于 2 kn 时,电动推进模式能量效率最高;当航速为 2~2.8 kn 时,充电推进模式、电动推进模式能量效率较高;当航速高于 2.8 kn 时,机械推进模式能量效率明显高于其他推进模式。

由图 8(c)可知,自航状态下,航速为 8.7 kn 时动力源能量效率最高达到 33.9%,为机械推进模式;当航速为 2~4.9 kn 时,电动推进模式能量效率较高;当航速为 4.9~6.5 kn 时,充电推进模式能量效率较高;当航速高于 6.5 kn 时,机械推进模式能量效率较高。由图 8(f)可知,拖航状态下,航速为 3.9 kn 时动力源能量效率最高达到 33.5%,为机械推进模式;当航速低于 1.5 kn 时,电动推进模式能

量效率最高;当航速为 1.5~2 kn 时,充电推进模式、电动推进模式能量效率较高;当航速高于 2 kn 时,机械推进模式能量效率较高。

蓄电池组电荷初始状态 SOC_0 及运行温度对于拖船续航里程及能量效率具有关键作用。其蓄电池组运行温度范围为 $-5\sim45\text{ }^{\circ}\text{C}$, SOC_0 预设范围为 30%~80%, SOC 波动阈值为 20%~90%。图 9 为 SOC_0 及温度对等效航程的影响。等效航程指环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, SOC_0 充电至 90% 所需能量或放电至 30% 所释放能量与 SOC_0 由 30% 充电至 90% 所需能量的比值。图 9(a) 表示可逆电机以 1 100 r/min、50 kW 状态输出能量,直至 SOC 为 20% 时在不同工作温度下提供的等效航程;图 9(b) 表示,以 1 100 r/min、-50 kW 状态输入可逆电机能量,直至 SOC 为 90% 时不同工作温度下所需的等效航程。

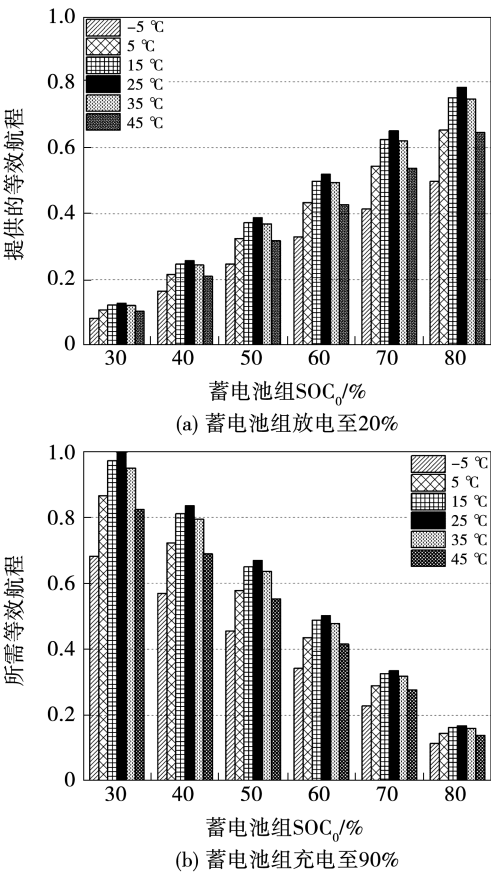


图 9 SOC_0 及温度对等效航程的影响

Fig. 9 Influences of SOC_0 and temperature on equivalent distance by sea

由图 9(a)可知,随着 SOC_0 增加,放电使 SOC 达到 20% 时,所提供的等效航程逐渐增加。相同

SOC₀状态下,随着温度的增加,提供的等效航程先增加后减小,在 25 ℃时提供的等效航程最大。由图 9(b)可知,随着 SOC₀ 增加,充电使 SOC 达到 90% 时,所需的等效航程逐渐减少。相同 SOC₀ 状态下,随着温度的增加,充电过程所需的等效航程先增加后减小,在 25 ℃时所需的等效航程最大。

由此可知,相同条件下,充电过程所需的等效航程大于放电过程提供的等效航程。当蓄电池组处于放电状态时,应将其工作温度稳定于 25 ℃左右,当蓄电池组处于充电状态时,应将其工作温度适当降低。

3.2 传动部分控制策略解耦分析

混合动力系统传动部分包含连接轴、离合器以及减速齿轮箱等。通过控制离合器的开启与闭合,实现系统工作模式切换控制。推进系统工作模式及离合器开关状态如图 10 所示。混合动力系统在基于规则的能量管理控制策略下,系统工作模式及离合器开关的切换状态。基于表 1,拖能在 0 ~ 72 min 为自航状态,在 72 ~ 250 min 为拖航状态。

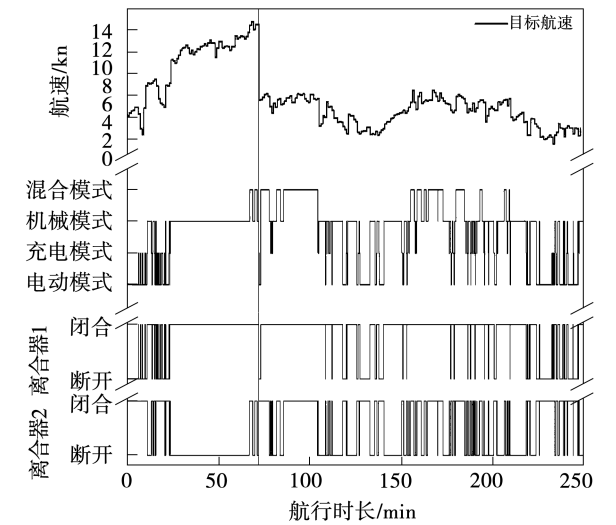


图 10 推进系统工作模式及离合器开关状态
Fig. 10 Working mode of propulsion system and state of clutch switch

拖船在自航状态下,机械推进模式运行时长占比 68.1%、电动推进模式运行时长占比 20.7%、充电推进模式运行时长占比 6.5%、混合推进模式运行时长占比 4.7%。在低航速工况下,电动推进模式与充电推进模式切换频繁,仅在最高航速状态下进行混合推进模式。

拖船在拖航状态下,机械推进模式运行时长占

比 47.1%、电动推进模式运行时长占比 20.0%、充电推进模式运行时长占比 7.3%、混合推进模式运行时长占比 25.6%。在中等航速状态下,电动推进模式、充电推进模式与机械推进模式切换频繁,主要原因为船舶在拖航运行过程中,负荷变化受航速影响剧烈。在中高航速状态下,离合器 2 频繁切换,为推进系统提供充足动力;在低航速状态下,离合器 1 与离合器 2 均切换频繁。

拖船在自航与拖航状态下运行时,电动推进模式与充电推进模式运行时长占比相差不大。机械推进模式运行时长在自航状态下远大于拖航状态,混合推进模式运行时长在拖航状态下远大于自航状态,主要原因为拖航状态下,拖船常运行于较高航速,反映出可逆电机在拖航状态下对推进系统影响更大。推进系统在的基于规则的能量管理控制策略下,系统工作模式因目标航速波动而变化频繁,使得离合器在工作过程中频繁接合与断开,不利于推进系统稳定运行。

3.3 负载部分控制策略解耦分析

混合动力系统负载部分通过调整螺旋桨螺距比 W 调整拖船航速,使推进系统在不同工况下工作时保持良好的经济性,同时使螺旋桨在任何工况下均能吸收动力源的全功率,提高系统运行的稳定性。本节主要研究螺距比对船舶航速、输入功率的影响,同时分析螺距比对船舶航速、螺旋桨转速的影响。

不同航速下螺距比 W 对推进系统影响如图 11 所示,由图 11(a)、11(b)可知,随着拖船航速增加,推进系统所需等效转速呈线性增加,同一航速下,螺距比越小,推进系统所需输入螺旋桨转速越高;同一转速下,螺距比越大,船舶航速越高。当推进系统转速不变时,通过螺距比的调整,船舶可以获得不同的船速,转速越高,航速调整范围越大。由 11(c)、11(d)可知,随着拖船航速增加,推进系统所需输入螺旋桨的等效功率呈指数增加,同一航速下,螺距比越小,推进系统所需输入螺旋桨功率越大;同一输入功率下,螺距比越大,船舶航速越高。当螺旋桨输入功率不变时,通过螺距比的调整,船舶可以获得不同的船速。当推进系统螺距比较小时,螺旋桨所需最大负荷小于动力源部分全功率输出,此时可通过增加螺距比或降低动力源功率输出使推进系统能量达到平衡。

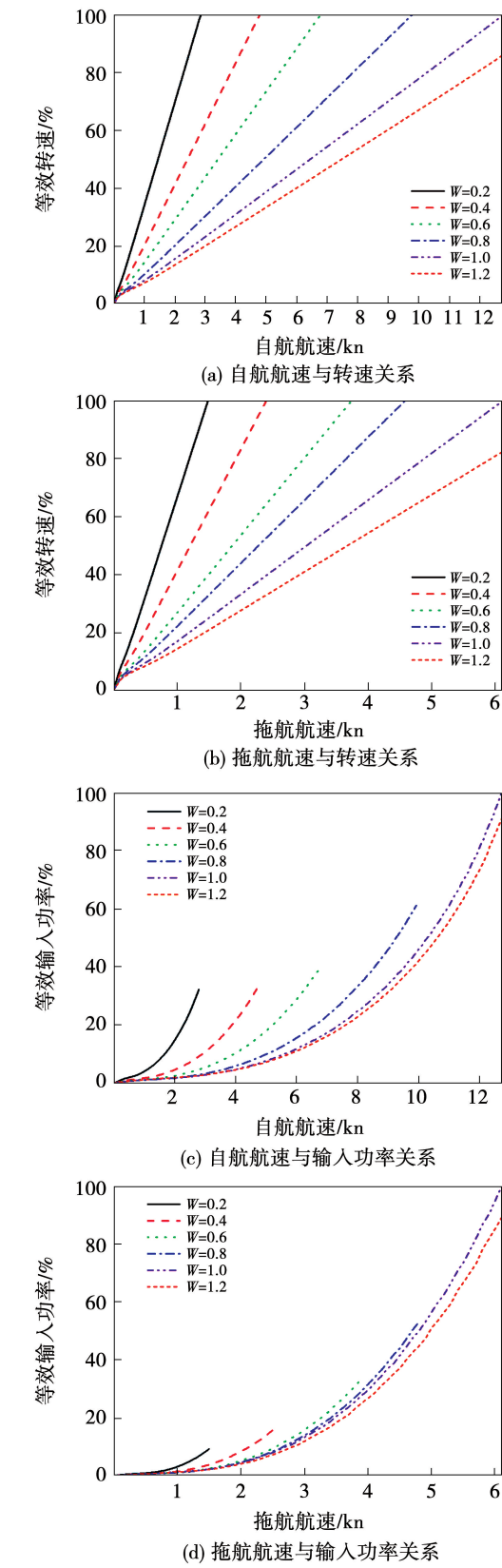


图 11 不同航速下螺距比对推进系统影响

Fig. 11 Influences of pitch ratio on propulsion system at different navigational speeds

3.4 航速范围的影响分析

由前文针对基于规则的能量管理策略下的推进系统的解耦分析可知,推进系统能量效率的主要影响因素包括:动力源状态、蓄电池 SOC 状态、离合器状态、减速齿轮箱减速比以及螺旋桨螺距比。为更加具体地体现出系统部件间的耦合特性,通过列表方式,探讨动力源状态以及螺旋桨螺距比等因素对于拖船航速范围的影响。表 2 给出了当螺旋桨螺距比不同时,推进系统中天然气发动机负荷为 30%、60% 和 90% 情况下,拖船航速范围在永磁同步可逆电机变负荷调控下的变化。

表 2 航速范围集

Tab. 2 Navigational speed range

天然气发动 机负荷/%	自航状态		拖航状态	
	螺距比	航速范围/kn	螺距比	航速范围/kn
30	0.2	0 ~ 2.7	0.2	0 ~ 1.5
30	0.4	0 ~ 4.8	0.4	0 ~ 2.5
30	0.6	0 ~ 6.8	0.6	0 ~ 3.9
30	0.8	0 ~ 9.1	0.8	0 ~ 4.6
30	1.1	0 ~ 10.1	1.0	0 ~ 4.7
30	1.2	0 ~ 10.4	1.2	0 ~ 4.9
60	0.2	2.5 ~ 2.7	0.2	1.5
60	0.4	4.2 ~ 4.8	0.4	2.5
60	0.6	5.6 ~ 6.8	0.6	3.5 ~ 3.9
60	0.8	7.1 ~ 9.9	0.8	3.7 ~ 4.8
60	1.1	7.9 ~ 11.5	1.1	3.8 ~ 5.4
60	1.2	8.2 ~ 11.9	1.2	3.9 ~ 5.6
90	0.2	2.7	0.2	1.5
90	0.4	4.8	0.4	2.5
90	0.6	6.8	0.6	3.9
90	0.8	9.2 ~ 9.9	0.8	4.8
90	1.0	10.2 ~ 12.4	1.1	4.8 ~ 5.8
90	1.2	10.5 ~ 12.8	1.2	5.0 ~ 6.2

由表 2 可知,可逆电机对推进系统航速范围的影响随着天然气发动机负荷的增大而逐渐减小。当天然气发动机负荷为 30%,可逆电机处于最大充电模式下时,天然气发动机输出能量可完全转化为电能,此时拖船航速为零。当天然气发动机处于大负荷状态时,可逆电机无法完全有效消耗天然气发动机输出功率,此时,推进系统能量效率急剧减小,在拖船实际运行过程中应完全避免此类情况发生。当拖船

目标航速确定时,即使动力源状态不同,也可以通过调整螺旋桨螺距比使得推进系统航速达到目标值。

4 基于蚁群算法的能量管理优化控制

拖船复杂的运行工况及部件间耦合关系使基于规则的能量管理策略设计愈加复杂。面对复杂的推进系统优化问题,使用自适应性更强、全局寻优能力优良并且易于实现的基于蚁群最优控制算法的能量管理策略更符合控制需求。

4.1 蚁群控制策略规则设计

4.1.1 混合动力系统问题分析

船舶气电混合动力系统能量流控制规划问题的主要目标为,在一定约束条件下提高动力系统整体能量效率,可等效为多阶段最优决策问题。从时间段 1 到时间段 t 的所有时间段中,每个时间段取推进系统各部件的工作状态形成一个决策集合,这样组成的一个决策集合视为一条“路径”。时段 0 为初始阶段,推进系统各部件均处于初始默认值,进入时段 1 时,各部件参数有多种可选状态,不同的决策将导致推进系统能效的差别,从而导致推进系统耗气量差异,求解目标即寻找一个从时间段 0 到时间段 t 的决策路径,使得推进系统运行期间累计耗气量最低。

4.1.2 算法设计

本文算法依据参考文献 [14] 所设计,具体如下:

(1) 将各部件控制参数运行状态组合为推进系统所能达到的所有状态,计算每种状态下推进拖船所能达到的运行航速,得到该状态拖船运行航速的上限值与下限值。

(2) 将拖船运行时间段进行划分,将各部件状态组合所能达到的航速与时间段内目标航速相比较,对符合该时间段内目标航速的状态组合进行记录,并对该状态组合对应航速的上、下限值进行记录。

(3) 判断初始状态 S_0 。

(4) 蚁群算法的初始化,蚂蚁数量 $m = 1\ 000$,信息素启发因子 $\alpha = 0.2$,期望启发因子 $\beta = 7$,信息素挥发系数 $\rho = 0.5$,最大循环次数 $N_{\text{cmax}} = 100$ 。

(5) 进入下一时间段,判断是否为最终时间段 T ,若是,则跳转到第 7 步,否则跳转到第 6 步。

(6) 对所有蚂蚁,按状态转移规则选择下一状态 j ,将蚂蚁 k 移至 j ,计算此状态下目标函数,并对蚂蚁 k 的路径进行累加,然后跳转至第 5 步。

(7) 记录所得的最短路径,按全局信息更新规则对路径信息进行更新。

(8) 若未达到最大迭代次数,且未出现停滞现象,则令 $t = t + 1$,并跳转到第 5 步,进行下一次迭代,否则结束。

4.1.3 基于蚁群算法的能量管理迭代运行结果

图 12 为最小累计耗气量进化曲线。由图 12 可知,随着迭代次数的增加,拖船累计耗气量逐渐减小,由初始阶段的 105 kg 逐渐减小为 72 kg。迭代初始阶段,减小较为缓慢,随着信息素浓度差异逐渐增大,累计耗气量降低速度增快,迭代至 30 次时,剩余路径间信息素浓度相差较小,因此累计耗气量减小速度又逐渐减小,大约迭代 40 次后不再降低,此时得到了最优控制效果。

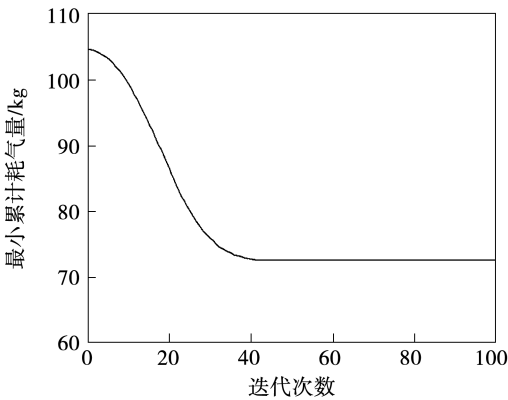


图 12 最小累计耗气量进化曲线

Fig. 12 Evolutionary curve of minimum cumulative gas consumption

4.2 航速能效范围分析

当推进系统达到目标航速过程时,不同部件状态组合使得推进系统整体能量效率差异,最终造成推进系统耗油量不同,影响船舶运行的经济性。本节以特定航速和不同螺旋桨螺距比为例,探讨随着动力源状态的调整所造成的推进系统整体能量效率变化情况。

表 3 为航速能效范围集。由表 3 可知,随着拖船目标航速的增加,螺旋桨螺距比的调整范围逐渐减小,当船舶位于低航速工况时,螺旋桨螺距比调整

范围为 0.2 ~ 1.2;当船舶位于高航速时,螺旋桨螺距比调整范围为 1.0 ~ 1.2。在同一航速状态下,螺旋桨螺距比越大,推进系统能量效率越高。当自航状态与拖航状态航速相同时,在螺距比相同的状态下,拖航状态的能量效率较高。自航状态下,拖船运行能量效率最高为 17.9%,此时推进系统属于电动推进模式。推进系统能量效率最高值随着航速增加而先变小后变大,主要原因为低航速工况下推进系统为电动推进模式,随着航速的增加,逐渐向机械推进模式和混合推进模式转变。拖航状态下,拖船运行能量效率最高为 18.2%,此时推进系统属于电动推进模式。在相同螺旋桨螺距比下,能量效率范围随着航速的增加而逐渐减小,主要原因为随着航速的增加,动力源能量效率变化范围减小。

表 3 航速能效范围

Tab. 3 Navigational speed energy efficiency range

自航状态			拖航状态		
拖船 航速/kn	螺距比	能效 范围/%	拖船 航速/kn	螺距比	能效 范围/%
2	0.2	1.0 ~ 1.5	1	0.2	1.7 ~ 3.2
2	0.4	1.9 ~ 4.3	1	0.4	2.8 ~ 6.5
2	0.6	2.9 ~ 8.1	1	0.6	3.8 ~ 10.1
2	0.8	4.1 ~ 11.9	1	0.8	4.7 ~ 13.2
2	1.0	4.9 ~ 15.2	1	1.0	5.5 ~ 16.1
2	1.2	5.6 ~ 17.9	1	1.2	6.1 ~ 18.2
4	0.4	2.8 ~ 3.6	2	0.4	3.9 ~ 5.5
4	0.6	4.1 ~ 6.7	2	0.6	4.8 ~ 9.8
4	0.8	4.8 ~ 11.1	2	0.8	5.9 ~ 13.5
4	1.0	5.6 ~ 14.6	2	1.0	6.4 ~ 16.8
4	1.2	6.3 ~ 17.7	2	1.2	7.0 ~ 19.4
6	0.6	5.1 ~ 6.9	3	0.6	6.5 ~ 9.1
6	0.8	6.5 ~ 9.9	3	0.8	7.9 ~ 11.8
6	1.0	7.0 ~ 13.1	3	1.0	8.3 ~ 15.1
6	1.2	7.5 ~ 15.9	3	1.2	8.4 ~ 17.8
8	0.8	7.8 ~ 9.9	4	0.6	7.5 ~ 8.9
8	1.0	8.9 ~ 12.9	4	0.8	9.6 ~ 12.1
8	1.2	9.8 ~ 14.9	4	1.0	10.6 ~ 15.0
10	0.8	8.8 ~ 10.8	4	1.2	11.3 ~ 17.5
10	1.0	10.1 ~ 13.5	5	1.0	11.8 ~ 15.8
10	1.2	11.4 ~ 15.9	5	1.2	13.0 ~ 17.3
12	1.0	12.8 ~ 13.8	6	1.0	14.6 ~ 16.8
12	1.2	15.0 ~ 15.8	6	1.2	16.7 ~ 17.0

4.3 气电混合动力系统优化控制

基于规则与基于蚁群最优算法的能量管理策略分别控制船舶气电混合动力系统在目标航速下行驶。本节从推进系统目标航速跟随、能量效率、等效耗气量和蓄电池组 SOC 变化 4 个维度对推进系统能量管理策略控制效果进行对比分析。

图 13 为推进系统分别在基于规则和基于蚁群算法的能量管理策略控制下的拖船行驶状态。由图 13 可知,推进系统在基于规则的能量管理策略下拖船航速差的方差值为 0.229。基于蚁群算法的能量管理策略控制下的拖船对于目标航速跟随有显著提升,在拖船实际运行航速与目标航速存在差距时,利用多部件协同控制,将推进系统转速、动力源状态与可调螺距螺旋桨螺距比调整相结合,使得推进系统快速响应,其航速差的方差值降低为 0.059。与基于规则的能量管理策略相比,推进系统在基于蚁群算法的能量管理策略下的拖航航速跟随性提高了 73%。

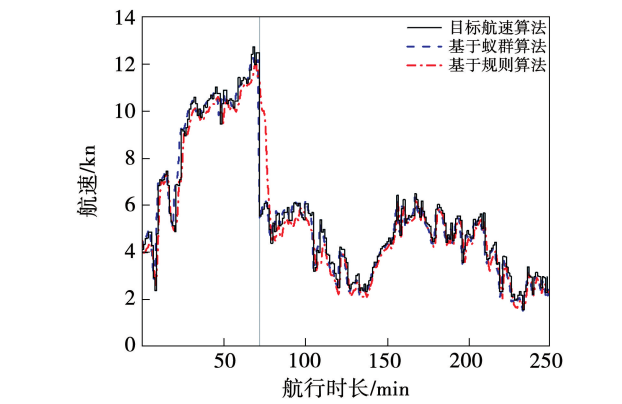


图 13 推进系统航速图

Fig. 13 Navigational speed diagram of propulsion system

图 14 为推进系统分别在基于规则和基于蚁群算法的能量管理控制策略下的能量效率图。本节推进系统能量效率为推进系统运行 1 min 的平均能量效率。由图 14 所示,基于蚁群算法的平均能量效率为 16.9%,基于规则的平均能量效率为 16.2%,两种控制策略的能量效率区别不大,且变化趋势基本相同。当拖船航速快速波动时,基于蚁群算法的能量管理策略下的能量效率略高,其主要原因是动力源状态、螺距比和可逆电机共同调整。

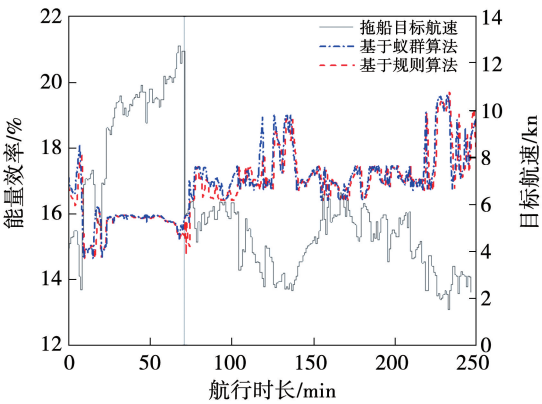


图 14 推进系统能量效率图

Fig. 14 Energy efficiency diagram of propulsion system

图 15 为推进系统分别在基于规则和基于蚁群算法的能量管理控制策略下的等效耗气量。由图 15 可知,基于蚁群算法的能量管理控制策略下的船舶耗气量明显小于基于规则能量管理控制策略下的船舶耗气量。当拖船运行于自航状态时,两种控制策略耗气量相差不大。当拖船运行于拖航状态时,两种控制策略耗气量差值显著增加。在全部仿真运行期间,基于蚁群算法的能量管理控制策略下的等效耗气量为 72.8 kg,基于规则的能量管理控制策略下的等效耗气量为 79.4 kg。由此可知推进系统在基于蚁群算法的能量管理策略下运行更节能,比基于规则的能量管理控制策略下运行节约能量 8.3%。

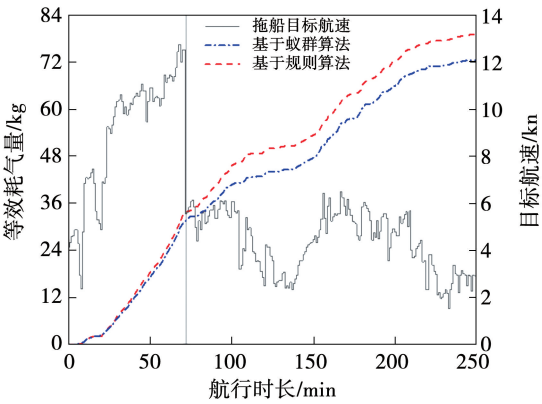


图 15 推进系统等效耗气图

Fig. 15 Equivalent gas consumption diagram of propulsion system

图 16 为推进系统分别在基于规则和基于蚁群算法的能量管理控制策略下的蓄电池组 SOC 变化图。

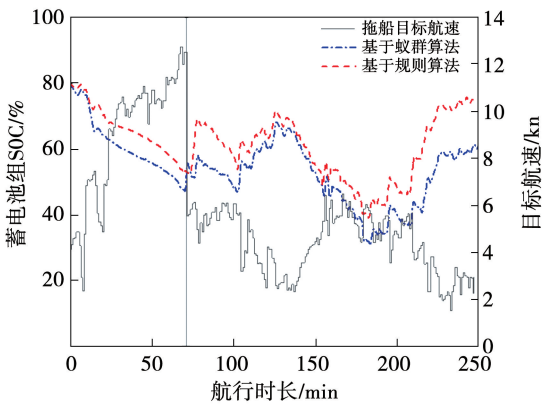


图 16 推进系统 SOC 变化图

Fig. 16 SOC variation diagram of propulsion system

如图 16 可知,在仿真航速运行期间,基于蚁群算法的能量管理控制策略下的蓄电池组 SOC 变化值为 18.6%,基于规则的能量管理控制策略下的蓄电池组 SOC 变化值为 4.5%。两种控制策略控制下的蓄电池组 SOC 变化趋势基本一致。基于蚁群算法的能量管理控制策略下的蓄电池组 SOC 变化幅度大于基于规则的能量管理策略控制下的蓄电池组 SOC 变化幅度。主要原因为推进系统在基于蚁群算法的能量管理控制策略下,其蓄电池组参与度较高。

5 结 论

(1) 并联式气电混合动力系统适用于拖船船舶,可以满足拖船各航速时长均衡、工作模式多变、运行环境复杂的工作特点。

(2) 基于规则的能量管理控制下,系统动力源部分能量效率随着航速的增加而整体上呈增加趋势。系统各推进模式切换较为频繁,在不同工作模式下,各推进模式运行时长占比区别明显。可逆电机对于推进系统航速范围的影响随着天然气发动机负荷的增大而逐渐减小。混合动力系统可通过调节动力源状态、螺旋桨螺距比使系统航速达到预设值。

(3) 基于蚁群算法的能量管理策略对于推进系统控制效果更优。相较于基于规则的能量管理策略,推进系统在基于蚁群算法的能量管理策略下的拖航航速跟随性提高了 73%,平均能量效率提高了 0.7%,等效气耗节约了 8.3%,蓄电池组 SOC 增加了 14.1%。

参考文献:

[1] 王伟彬,曹昌魁. 船舶减排满足 IMO Tier III 法规的探讨与实践[J]. 中国航海,2017,40(2):108-111,118.
WANG Weibin,CAO Changkui. Discussion and practice about ship emission reduction to meet IMO Tier III regulations[J]. Navigation of China,2017,40(2):108-111,118.

[2] 方永春,曾志伟,许山明,等. 柴油与天然气发动机动力性能对比分析[J]. 石油和化工设备,2015,18(9):43-46.
FANG Yongchun,ZENG Zhiwei,XU Shanming,et al. Comparative analysis of power performance of diesel and natural gas engines[J]. Petro & Chemical Equipment,2015,18(9):43-46.

[3] 刘乐,高海波,缪光辉,等. 基于 PSO 优化模糊控制的船舶能量管理策略研究[J]. 武汉理工大学学报,2017,39(3):32-37.
LIU Le,GAO Haibo,MIAO Guanghui,et al. Study of marine energy management strategy based on fuzzy logic controller with particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2017,39(3):32-37.

[4] 徐振峰. 柴电混合动力船舶推进系统方案评估研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
XU Zhenfeng. Evaluation study on diesel-electric hybrid propulsion system scheme of ship[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2018.

[5] YUAN Y,WANG J,YAN X,et al. A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship[J]. Energy,2018,165:965-978.

[6] ANCONA M,BALDI F,BIANCHI M,et al. Efficiency improvement on a cruise ship: Load allocation optimization[J]. Energy Conversion and Management,2018,164:42-58.

[7] VAN C T, RAMIREZ J, RAINEY T, et al. Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions[J]. Transportation Research Part D, 2019, 70: 123-134.

[8] 宋恩哲,孙晓军,姚崇,等. 船舶混合动力系统模式切换与动态协调控制[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(4):522-528.
SONG Enzhe,SUN Xiaojun,YAO Chong,et al. Mode switching and dynamic coordination control of ships with a hybrid power system[J]. Journal of Harbin Engineering University,2022,43(4):522-528.

[9] 彭程,陈俐,傅圣来. 基于离合器滑摩扭矩估计的并联式气电混合动力船舶模式切换控制[J]. 中国机械工程,2024,35(8):1489-1497.
PENG Cheng,CHEN Li,FU Shenglai. Mode transition control of parallel gas-electric hybrid ships based on clutch sliding torque estimation[J]. China Mechanical Engineering,2024,35(8):1489-1497.

[10] 金立源,刘佳彬,孟嗣斐,等. 并联式船舶气电混合动力系统动态加速性能仿真[J]. 柴油机,2022,44(2):36-43.
JIN Liyuan,LIU Jiabin,MENG Sifei,et al. Simulation on dynamic acceleration performance of parallel marine gas electric hybrid power system[J]. Diesel Engine,2022,44(2):36-43.

[11] 傅圣来,陈俐,陈自强. 考虑不确定延迟的并联式气电混合动力系统模式切换控制[J/OL]. 上海交通大学学报:1-25[2024-02-05]. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.473.
FU Shenglai,CHEN Li,CHEN Ziqiang. Mode transition control of parallel gas-electric hybrid power system with uncertain delay[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University:1-25[2024-02-05]. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.473.

[12] 白慧泉. 船舶气电混合动力系统能量管理控制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
BAI Huiquan. Research on energy management and control strategy of ship gas-electric hybrid power system[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2021.

[13] 毛建中,张文. 并联式混合动力汽车模糊能量管理策略优化[J]. 可再生能源,2018,36(3):372-379.
MAO Jianzhong,ZHANG Wen. The optimization of fuzzy energy control strategy for parallel hybrid electric vehicles[J]. Renewable Energy Resources,2018,36(3):372-379.

[14] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
DUAN Haibin. Principle of ant colony algorithm and its application[M]. Beijing:Science Press,2005.

(姜雪梅 编辑)