

柴电混合动力船舶机动性能研究

刘永志, 胡 义, 徐振峰

(武汉理工大学 能源与动力工程学院, 武汉 430063)

Research on Maneuverability of Marine Diesel-Electric Hybrid System

LIU Yongzhi, HU Yi, XU Zhenfeng

(School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: To solve the problem of high fuel consumption and serious environmental pollution in traditional mechanical propulsion system at low speed maneuvering stage, a four-quadrant ship-diesel-propellers model, and a dynamic simulation model of diesel engine and motor power system were established respectively by using the MATLAB/Simulink and by integrating the advantages of diesel engine drive and motor drive. The comparative analysis was made of the navigating speed response and fuel consumption of pure diesel engine drive and the navigating speed response and power consumption of pure motor drive at low load propulsion. The results of the study show that the power take in (PTI) mode has the advantages of fuel economy, energy saving, environmental protection and high power at low-speed maneuvering navigation. The study method can provide a theoretical support and guidance for the research of marine hybrid system.

摘要: 为解决传统机械推进系统在低速机动航行阶段出现油耗率高及环境污染严重等问题,结合柴油机驱动与电机驱动各自的优点,运用 Matlab/Simulink 分别建立四象限船-机-桨运动模型及柴油机、电机动力系统的动态仿真模型,对比分析低负荷机动航行工况下纯柴油机驱动船舶速度响应与电机驱动船舶速度响应及油耗量与耗电量情况。研究表明,低速机动航行起动工况下电动机驱动(power take in, PTI)模式具有经济、节能环保和动力性良好的优势,该研究为船舶混合动力系统的研究提供了理论支撑及指导。

关键词: 混合动力; 机动性能; Matlab/Simulink; 仿真

Key words: hybrid system; maneuverability; Matlab/Simulink; simulation

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2019.01.008

中图分类号: TK421⁺.8

文献标识码: A

0 概述

近年来,中国船舶数量增加,近海及港内船舶需要大量机动航行,柴油机严重偏离标定功率的最佳效率点,导致燃烧效率低、油耗量增加及产生大量有害排放污染物等后果。中国政府对此制定了严格的

船舶排放法规,要求新造船舶需从动力系统设计选型阶段采用节能减排方案。提高船舶机动性能是解决当前问题的重要举措之一。机动性是指船舶航速从一种状态切换到另一种状态的动态响应性能。研究人员提出运用柴电混合动力方案来提高船舶的机动性能,以减少油耗量和控制污染物的排放^[1]。

投稿日期: 2018-05-02

修回日期: 2018-06-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAG04B02)

Fund Project: National Science and Technology Support Program of China(2014BAG04B02)

作者简介: 刘永志(1992—),男,硕士生,主要研究方向为柴电混合动力系统, E-mail: 1550611768@qq.com;

胡 义(通信作者), E-mail: huyiwuhut@163.com。

柴电混合动力系统使用柴油机与电动机两种原动力,兼具动力性和经济性,是结合传统机械推进与电力推进的一种新型混合动力的系统方案,适用于新形势下的各种运输工具^[2-3]。但其技术极其复杂,涉及发动机、电机、控制模块及传动系统等各个方面,因此柴电混合动力尚未大规模普及运用,仍处于关键研发试用阶段。目前柴电混合动力主要以3种状态工作:(1)轴带发电机(power take off, PTO)模式。当船舶所需负荷较低且航行于稳定状态时,柴油机长期处于低负荷高油耗率状态,此时运行PTO模式能够利用主机富余功率向船舶电网供电,减少一台辅机运行,大大提升了船舶的经济性及环保性。(2)电动机(power take in, PTI)模式。当船舶处于起动或在较低负荷机动航行时,可以利用电动机良好的加速性能提升船舶的机动响应能力,尤其在进出港及特殊机动航行工况时,PTI模式运行不仅能够提升船舶的机动性,还可以大大节省油耗;当船舶主机发生故障时,PTI模式可以作为备用模式确保船舶安全运行,是柴电混合动力的一大优势。(3)柴油机模式。柴油机由于其热效率高、功率密度大被广泛应用于船舶推进系统中^[4-5]。本文研究对象“浙渔科2”为近海海洋渔业资源综合考察船,主要用于中国东海与近海海域海洋渔业资源勘探,采用柴电混合动力推进系统,柴油机动力主要用于持续航行,电力主要运用于勘探及低速巡航状态。

国内外学者对柴电混合动力进行了深入探究:文献[6]重点论述混合动力推进系统的特点,提出依据船舶要求与特点选取配套的推进装置;文献[7]将混合动力推进系统应用于金枪鱼延绳钓船,对比传统推进系统与混合推进系统的不同之处,研究其可靠性与经济性;文献[8]对不同类型船舶进行混合推进的可行性研究,分析其经济性能;文献[9]主要针对船舶特点及海域环境条件,采用混合动力系统分析推进系统组成及工作模式,在满足船舶作业需求的情况下考虑其经济性能。学者们大多数以推进系统的选型为研究热点进而考虑船舶经济性能,而未对柴电混合动力船舶机动性能进行直接探究。本文将以“浙渔科2”科考船为研究对象,运用Matlab/Simulink分别对柴油机、螺旋桨及电机进行建模仿真,探究PTI模式与柴油机单独驱动时船舶的机动加速性能,通过对比不同驱动模式下船舶速度响应情况及对柴油机油耗量与电动机耗电量,得出混合动力系统在低负荷时采用PTI模式具有节能减排的优势等结论。研究结果可为船舶柴电混合动力系统的设计和研究提供参考和理论指导。

1 船-机-桨运动模型及感应电机基本方程

本文为了探究低负荷工况下柴电混合动力推进系统低负荷速度响应情况,根据相关理论建立了柴油机数学模型、四象限螺旋桨模型、船-机数学模型及电机数学模型。

1.1 柴油机数学模型

由柴油机动力学原理可知,可将柴油机的动力装置简化为两个回转质量(柴油发动机与负荷)与一个无惯性联接轴节组成的当量系统。根据牛顿第二定律得出柴油发动机的平衡方程:

$$M_s - M_f - M_L = \frac{\pi}{30} J_s \frac{dn_s}{dt} \quad (1)$$

式中, M_s 为柴油机的指示转矩, $N \cdot m$; M_L 为负荷转矩, $N \cdot m$; M_f 为摩擦转矩, $N \cdot m$; n_s 为柴油机转速, r/min ; J_s 为柴油机与负荷的当量转动惯量之和, $kg \cdot m^2$ 。

指示转矩与指示热效率如式(2)和式(3)所示:

$$M_s = q_f H_u \eta_r \frac{30}{\pi n_s} \quad (2)$$

$$\eta_r = \frac{3\,600 \cdot P_i}{B H_u} \quad (3)$$

式中, q_f 为柴油机燃油消耗量, kg/s ; H_u 为燃料低热值, J/kg ,一般取值 $42\,700 J/kg$; η_r 为柴油机的指示热效率; B 为每小时耗油量, kg/h ; P_i 为柴油机的指示功率, W 。

柴油机在运转期间,各运动部件存在摩擦阻力,摩擦转矩会随着转速的增加而增加;本文不考虑复杂的摩擦转矩模型,只采取平均摩擦转矩与转速间经验公式进行计算。

$$M_f = \frac{1\,000 \times \left(75 + \frac{48n_s}{1\,000} + 0.4S_p^2 \right) V}{2\pi S_c} \quad (4)$$

式中, S_c 为冲程数; S_p 为活塞平均速度, m/s ; V 为柴油机排量, m^3 。

燃油消耗率 g_e 如式(5)所示:

$$g_e = \frac{1\,000B}{P_e} = \frac{3.6 \times 10^6}{\eta_r \eta_m H_u} \quad (5)$$

式中, P_e 为柴油机有效功率, kW ; η_m 为机械效率。由式(5)可得,当柴油机刚起动时无机械负荷,燃油消耗率趋于无穷大。随着柴油机负荷的增加,燃油消耗率迅速下降,一般当负荷增加到80%左右,燃油消耗率达到最小值,之后随着负荷增加燃油消耗率迅速增大。因此,柴油机在运行时应尽量避免低负荷长期运

行,保持在最佳负荷左右运行,以降低燃油消耗率。

1.2 四象限螺旋桨模型

螺旋桨旋转前进时与海水相互作用,产生转矩与推力,应用量纲分析法,螺旋桨的推力与转矩在转速不为 0 时,用无因次量表示为:

$$T = K_T \rho n^2 D_p^4 \quad (6)$$

$$Q = K_Q \rho n^2 D_p^5 \quad (7)$$

$$J = \frac{h_p}{D_p} = \frac{v_p}{n D_p} \quad (8)$$

式中, T 为螺旋桨的推力, N; Q 为螺旋桨的转矩, N·m; J 为螺旋桨进速比; n 为螺旋桨转速, r/s; ρ 为海水的密度, kg/m³, 一般取 1 025 kg/m³; D_p 为螺旋桨的直径, m; K_Q 、 K_T 分别是螺旋桨的转矩系数和推力系数, 都是 J 的函数; h_p 为进程(螺旋桨在轴线上旋转一周的位移), m; v_p 为桨速(桨的前进速度), m/s。

本文研究对象柴电混合动力船舶为变距桨,工作在动态情况下必然会超过螺旋桨特性曲线的第一象限,故采用四象限螺旋桨。其中,螺旋桨特性参数 J 、 K_T 、 K_Q 的工作范围为 $-\infty \sim +\infty$ 。这种螺旋桨特性为无界形式,但无界形式螺旋桨特性给实际工作特性的表达带来困难,故转换为螺旋桨特性的有界形式。因此,对四象限螺旋桨工作特性作有界定义^[10-11]。

$$K'_T = \frac{T}{\rho D_p^2 (v_p^2 + n^2 D_p^2)} \quad (9)$$

$$K'_Q = \frac{Q}{\rho D_p^3 (v_p^2 + n^2 D_p^2)} \quad (10)$$

$$J' = \frac{v_p}{\sqrt{v_p^2 + n^2 D_p^2}}, J' \in [-1, 1] \quad (11)$$

当 $v_p = n = 0$ 时,有 $J' = K'_T = K'_Q = 0$ 。因此 J' 与 J 的转换关系为:

$$J' = \begin{cases} \frac{J}{\sqrt{1+J^2}}, & n > 0 \\ -\frac{J}{\sqrt{1+J^2}}, & n < 0 \end{cases} \quad (12)$$

转换后螺旋桨性能参数 J' 、 K'_T 、 K'_Q 有界,且 $J' \in (-1, 1)$ 。

$$K'_T = K_T \frac{n^2 D_p^2}{v_p^2 + n^2 D_p^2} = K_T (1 - J'^2) \quad (13)$$

$$K'_Q = K_Q \frac{n^2 D_p^2}{v_p^2 + n^2 D_p^2} = K_Q (1 - J'^2) \quad (14)$$

故螺旋桨的推力 T 及转矩 Q 为:

$$T = K'_T \rho D_p^2 (v_p^2 + n^2 D_p^2) = K'_T \rho D_p^2 v_p^2 / J'^2 \quad (15)$$

$$Q = K'_Q \rho D_p^3 (v_p^2 + n^2 D_p^2) = K'_Q \rho D_p^3 v_p^2 / J'^2 \quad (16)$$

1.3 船-桨数学模型

螺旋桨与船体间存在相互作用关系,这种关系表现在船体形成的速度场与螺旋桨形成的速度场之间的相互影响中。船舶行驶及螺旋桨转动必然会受到阻力,根据能量守恒原理船舶与螺旋桨的运动学方程^[12-13]得:

$$m \frac{dv_s}{dt} = T - R_t \quad (17)$$

$$2\pi \frac{dn}{dt} = M_d i - M_p - M'_f \quad (18)$$

式中, m 为船体与附水的总质量, kg; v_s 为船舶航速, m/s; R_t 为船舶阻力, N; M_d 为柴油机输出的转矩, N·m; M_p 为螺旋桨旋转时的阻力矩, N·m; M'_f 为轴系在传动过程中机械损失产生的转矩, N·m; i 为齿轮箱减速比。

在一定的外界条件下,船舶阻力是船舶航速的函数:

$$R_t = f(v_s) \quad (19)$$

根据试验可得,船舶阻力与船舶航速的 θ 次方成正比,即: $R_t = \lambda v_s^\theta$, 其中 λ 为船舶阻力系数, θ 为常数。

1.4 三相感应电动机的数学模型

本文根据柴电混合动力船舶特点并考虑到异步电机具有结构简单、故障少、使用方便等优点,电机模型选取三相异步电机,既可作电动机又可作发电机。当从柴油机吸收功率时作发电机使用,当从船舶电站吸收功率时作电动机使用。电动机基于 $dq0$ 坐标建立三相异步电机数学模型^[14-16]。

在 $d-q$ 坐标系下,三相感应电动机的电压方程为:

$$\begin{cases} u_{sd} = r_s i_{sd} + p \psi_{sd} - \omega_{dqs} \psi_{sq} \\ u_{sq} = r_s i_{sq} + p \psi_{sq} + \omega_{dqs} \psi_{sd} \\ u_{rd} = r_r i_{rd} + p \psi_{rd} - \omega_{dq\tau} \psi_{rq} \\ u_{rq} = r_r i_{rq} + p \psi_{rq} + \omega_{dq\tau} \psi_{rd} \end{cases} \quad (20)$$

式中, u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 、 u_{rq} 为电压, V; i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 为电流, A; ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 、 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 为磁链, Wb; r_s 、 r_r 为电阻, Ω ; p 为微分算子; ω_{dqs} 是 $d-q$ 坐标系相对于定子的角转速, rad/s; $\omega_{dq\tau}$ 是 $d-q$ 坐标系相对于转子的角转速, rad/s。

在 $d-q$ 坐标系下,三相感应电动机的磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (21)$$

式中, L_s 为定子等效两相绕组的自感, H; L_r 为转子等效两相绕组的自感, H; L_m 为定子与转子同轴等

效绕组间的互感, H 。

转矩和转矩方程如下:

$$T_N = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \tag{22}$$

$$T_N = T_p + \frac{J_r}{n_r p} \cdot \frac{d\omega}{dt} \tag{23}$$

式中, T_N 为电机电磁转矩, $N \cdot m$; n_p 为电机极对数; T_p 为负荷转矩, $N \cdot m$; n_r 为电机转速, r/min ; J_r 为转子的转动惯量, $kg \cdot m^2$; ω 为转子角速度, rad/s 。

基于以上基本方程与公式,对柴电混合动力系统进行建模仿真,搭建其简化模型进行船舶机动性能的研究。

2 柴电混合动力系统建模与仿真

本系统基于“浙渔科 2”科考船,所用的主要技术参数如表 1、表 2 所示。

表 1 机-桨主要参数表

项目	参数
螺距比	0.86
柴油机功率/kW	1 007
螺旋桨直径/m	2.2
标定转速/($r \cdot min^{-1}$)	1 900

表 2 轴带电机主要参数表

项目	参数
标定功率/kW	220
标定电流/A	380
标定电压/V	380
功率因数	0.92

结合“浙渔科 2”科考船的实船参数和船-机-桨及电机的基本公式与方程,在经典模型^[17-18]的基础上进行改进,对柴油机、四象限螺旋桨及电机进行机动航行动态建模仿真,并将仿真结果与实船的试航报告对比,来验证仿真模型的有效性和正确性。柴油机输入为主机的油门开度,电机输入为螺旋桨负荷,模型如图 1~图 3 所示。

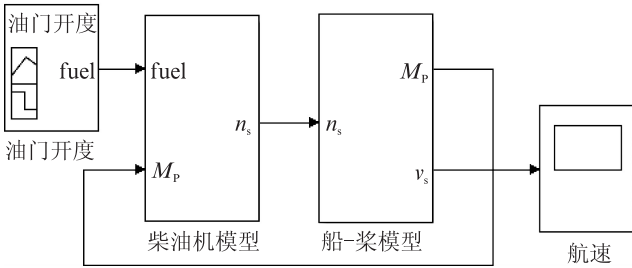


图 1 柴油机驱动仿真图

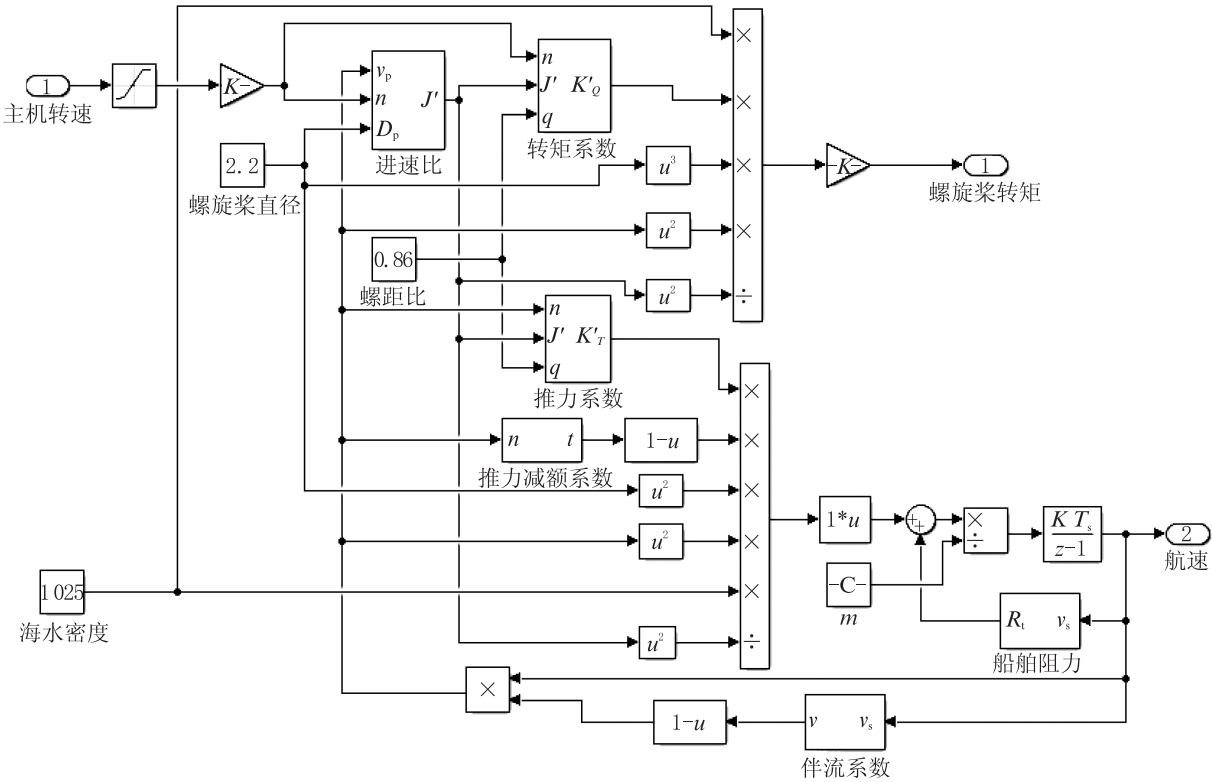


图 2 四象限船-桨模型图

图 2 中, T_s 为离散系统采样时间。图 3 中, $3s/2r$ 为 abc 系统到 $dq0$ 系统的坐标转换; inv_3s_2r

为 $dq0$ 系统到 abc 系统的坐标转换; AM_dq 为三相感应电动机仿真模型的封装; U_A 、 U_B 、 U_C 为 abc 系

负荷转矩为 0,使电机空载启动,防止电动机启动时的冲击电流影响电网;1—6 s 负荷分级加在电机上,使电机带负荷工作。图 10 为电机定子电流与时间的关系曲线。由图 10 可知,当电机空载启动时,定子电流瞬间达到 2 002.6 A,约为标定电流的 5.27 倍,0.2 s 时电流幅值为 125 A,大约为标定电流的 1/3;之后,随着螺旋桨负荷的逐级增加,电机定子电流也逐步增加,5.1 s 时定子电流幅值达到 536 A,此时电机最大线电流有效值 I_N 为 $536/\sqrt{2}\approx 379$ A,接近电机的标定电流,满足电机电流安全运行要求。

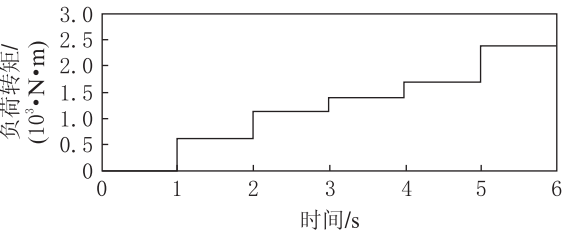


图 9 电机负荷转矩-时间曲线

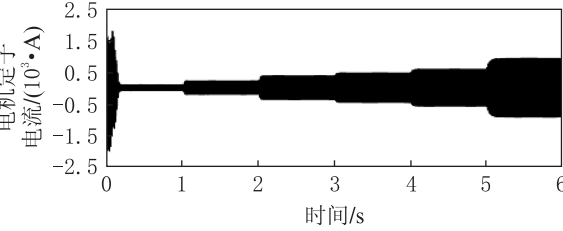


图 10 电机定子电流-时间曲线

图 11 为电磁转矩与时间的关系曲线。随着电机负荷的逐级加载,在0—1 s空载和不计摩擦转矩的情况下,开始时电磁转矩变化剧烈,随后电磁转矩降为 0,之后电机电磁转矩随着负荷转矩的变化而阶级增加,符合实际情况。图 12 是电机推进螺旋桨时船舶航速与时间曲线图。电机单独驱动船舶运行时,船舶快速启动,实船试航报告 23 s 船速达到稳定值 3.15 m/s,仿真结果 20 s 航速达到 3.09 m/s;而柴油机单独驱动时达到相同航速时需要 60 s。由此可见,电机驱动相对于柴油机驱动其加速响应快 66.6%,提高了船舶的机动性能,同时验证了电机启动的快速性,符合实际情况。

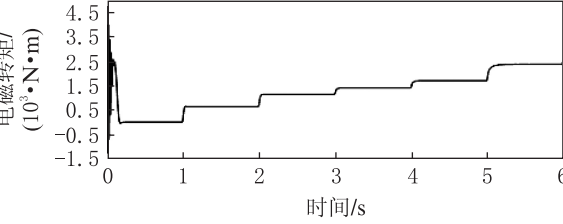


图 11 电磁转矩-时间曲线

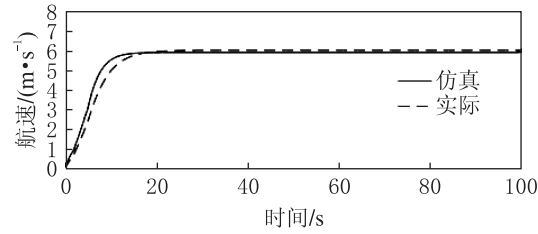


图 12 电机推进螺旋桨时船舶航速-时间曲线

仿真试验结果与实船试航报告对比如表 3 所示。

表 3 电机驱动仿真结果与实船试航报告对比

项目	参数	
	实船数据	仿真结果
总时间/s	100	100
启动时间/s	23	20
稳定航速/(m·s ⁻¹)	3.15	3.09

由表 3 可知,电机驱动船舶 100 s 后,仿真得到的稳定航速与实船试航报告存在 1.96% 的误差;仿真得到电机驱动船舶启动时间与实船数据存在 13.00% 的误差。其误差主要原因是缺少充足的实船数据。由于实际过程是个动态复杂变化的过程,实际考虑因素太多,会对建模造成不必要的麻烦,故在建模过程中对各数学模型进行简化和理想化的考虑。从仿真研究船舶动力特性的角度出发,其误差在允许的误差范围内。

结合图 7 和图 10,比较船舶航速达到 3.09 m/s 时的柴油机总耗油量与电机耗电量。在整个机动航行启动过程中柴油机耗油量约为 3.85 kg,按照目前柴油单价约为 7 800 元/吨,总耗资约为 30.03 元;按电机最大瞬时功率计算电机耗电量约为 23.8 kW·h,按目前电价 0.56 元/(千瓦·时),约为 13.33 元。未来几年柴油价格会有上升趋势,显然低速机动航行启动工况下运用 PTI 模式具有良好的经济性、动力性及节能环保的优势。

4 结论

- (1) 对于船舶进出港、狭窄区域等航行状况较复杂的航道,由于加减速频繁、操纵性要求高,故采用柴电混合动力船舶,让电机发挥其节能环保、机动性好、操纵性好的特性。
- (2) 在低负荷机动航行阶段,电机启动相对柴油机启动更节省成本,同时减少对化石燃料的依赖,具有节能环保的特点。
- (3) 低速航行时,电动机可以在柴油机无法达到的低速工况下稳定运行,使船舶获得更稳定的低速性能,便于靠岸或靠近其他目标。

参考文献：

[1] 张艺川,刘佳彬,周晓洁,等.柴电混合动力系统电力推进模式下离合器柔性接排启动轴系过程仿真研究[J].柴油机,2017,39(3):41-44.
ZHANG Y C, LIU J B, ZHOU X J, et al. Simulation study on the process of clutch soft jointing to actuating shafting on diesel-electric hybrid propulsion system in PTH mode [J]. Diesel Engine, 2017,39(3):41-44.

[2] TOR A J, TORSTEIN I B, EIRIK M, et al. Dynamic positioning system as dynamic energy storage on diesel-electric ships. [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6):3086-3091.

[3] VEKSLER A, JOHANSEN T A, SKJETNE R, et al. Thrust allocation with dynamic power consumption modulation for diesel-electric ships[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016,24(2):578-593.

[4] 张艺川,赵同宾,周晓洁,等.船舶柴电混合动力系统在电力助推模式下的性能仿真研究[J].柴油机,2015,37(3):29-32.
ZHANG Y C, ZHAO T B, ZHOU X J, et al. Simulation study on performance of diesel-electric hybrid propulsion system in booster mode[J]. Diesel Engine, 2015,37(3):29-32.

[5] 杨城,陈丹,朱钰.船用中速柴油机性能的优化研究[J].内燃机工程,2018,39(2):81-86.
YANG C, CHEN D, ZHU Y. Research on performance improvement of a marine medium speed diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018, 39(2):81-86.

[6] 崔秀兰,仇进生,练跃东.浅谈船舶动力系统现状及发展趋势[J].中国高新技术企业,2013,7(20):5-6.

[7] 沙峰,王永鼎,叶守建.金枪鱼延绳钓鱼船混合动力推进系统研究与分析[J].上海海洋大学学报,2014,23(2):279-283.
SHA F, WANG Y D, YE S J. Study and analysis on tuna longliner hybrid power system [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014,23(2):279-283.

[8] VÖLKER T. Hybrid propulsion concepts on ships[J]. Zeszyty Naukowe Akademii W Gdyni, 2013,79:66-76.

[9] 邓颖,王小红,刘波,等.9600HP 海洋油气增产作业船柴电混合推进系统设计[J].船海工程,2017,46(6):98-104.
DENG Y, WANG X H, LIU B, et al. Design of diesel-electric propulsion system for the 9600 HP well stimulation vessel[J]. Ship & Ocean Engineering, 2017,46(6):98-104.

[10] CHI H H, LI D P. Application of chebyshev polynomial to simulated modeling [J]. Journal of Marine Science and Application, 2006,5(4):38-41.

[11] HUA H D, MA N, MA J, et al. Robust intelligent control design for marine diesel engine [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013,18(6):660-666.

[12] ALTOSOLE M, CAMPORA U, MARTELLI M, et al. Performance decay analysis of a marine gas turbine propulsion system [J]. Journal of Ship Research, 2014,58(3):117-129.

[13] LI Z, YAN X, QIN L, et al. Model reference robust control for marine propulsion systems with model uncertainty caused by hull deformation [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2013,21(4):400-409.

[14] FREDERICK C B, PHILIP S D, SUSAN L S. The future of electrical and computer engineering education [J]. IEEE Transactions on Education, 2003, 46(4):467-476.

[15] LI R, WALLANCE A K, SPEC R. Two-axis model development of cage-rotor brushless doubly-fed machines[J]. IEEE Transactions Energy Conversion, 1991, 6(3):453-460.

[16] 刘勇.船舶典型电动机仿真研究[D].大连:大连海事大学,2017.

[17] 杨江.吊舱式电力推进系统的建模与仿真[D].武汉:武汉理工大学,2011.

[18] LI D P, WANG Z Y, CHI H H. Chebyshev fitting way and error analysis for propeller atlas across four quadrants[J]. Journal of Marine Science and Application, 2002,1(1):52-59.

中国内燃机学会银行账号变更申明

由于学会办公地址变更,即日起银行账号信息变更,特此申明。

自 2018 年 5 月 11 日起中国内燃机学会银行账号变更如下:

户 名:中国内燃机学会

账 号:03411400040031831

开 户 行:中国农业银行上海马桥支行

特此告之,给您带来的不便,敬请谅解!

中国内燃机学会

2018 年 5 月 11 日