

新一代沿海电动船舶设计开发与运用分析

俞东旭 俞英 俞司思 郑丽 王补法
平湖市华海造船有限公司, 中国·浙江 平湖 314000

摘要: 新型沿海电动渡船, 对于促进当地经济的发展和旅游资源的开发利用具有重要的意义。常规柴油船舶大多难以满足船舶舒适、环保的基本要求。新型沿海电动渡船提供了一种全新的技术方案和解决路径, 对中国沿海船舶节能减碳、技术创新和高质量发展起到了良好的促进作用。

关键词: 新能源; 船舶; 直翼舵桨; 设计开发

Analysis of the Design, Development and Application of a New Generation of Coastal Electric Ships

Dongxu Yu Ying Yu Sisi Yu Li Zheng Bufa Wang
Pinghu Huahai Shipbuilding Co., Ltd., Pinghu, Zhejiang, 314000, China

Abstract: The new coastal electric ferry is of great significance in promoting local economic development and the development and utilization of tourism resources. Most conventional diesel vessels are unable to meet the basic requirements of comfort and environmental protection for ships. The new coastal electric ferry provides a new technological solution and solution path, which has played a good role in promoting energy conservation, carbon reduction, technological innovation, and high-quality development of coastal ships in China.

Keywords: new energy; ships; straight wing rudder propellers; design and development

1 概述

新型沿海电动渡船, 属于公共渡轮服务系统, 是岛屿间交通的组成部分, 主要用途为岛际间乡民日常生活水路交通, 兼顾海上观光旅游, 对于促进当地经济的发展和旅游资源的开发利用具有重要的意义。常规船舶大多采用由柴油机及齿轮箱带动螺旋桨推进, 通过改变舵叶来控制船舶方向, 一般在排放、振动、噪声等方面难以满足船舶舒适、环保的基本要求。新型沿海电动渡船采用发电机组、驱动柜、控制箱、推进电机、直翼舵桨推进装置的电力推进系统, 获得了比螺旋桨更高的推进效率和节能效果, 并为改善中国目前沿海客渡船功率大、能耗高、污染严重、振动噪声大、舒适性差的问题提供了一种全新的技术方案和解决路径, 对中国沿海船舶节能减碳、技术创新和高质量发展起到了良好的促进作用, 市场前景广阔。

2 基本设计思路

2.1 系统设计

本船采用全电推进系统, 以锂电池组为核心能源载体, 结合超级电容实现功率动态补偿, 系统架构包含以下核心部件:

①高能密度锂电池组: 总容量 10500kWh, 额定电压 DC 1500V; 最大持续放电电流 4000A, 支持 2C 倍率放电;

SOC 工作范围 20%~95%, 配备液冷温控系统。

②永磁同步推进系统: 双电机驱动, 单机额定功率 2500kW, 过载能力 150% 持续 10 分钟, 全功率范围效率大于 96%。

③智能能量管理系统 (EMS): 采用多目标优化算法, 毫秒级动态响应, 支持数字孪生与云端协同控制。

2.2 结构设计

船体结构按照中国船级社《国内航行海船建造规范》(2018) 及其修改通报对沿海航区的要求进行设计, 结构尺寸按照船舶吃水在 1.25m 状态下进行计算, 采用主船体甲板为纵骨架式, 舷侧及船底为横骨架式; 上层主甲板室为横骨架式, 采用船用钢材焊接成型, 全船肋骨间距 550mm, 甲板、舷侧及船底骨架均进行有效的连接, 构成完整的刚性整体, 所有的纵向构件具有良好的连续性, 全船设置不大于 2 档肋距的强肋骨、强横梁, 与肋板连成一牢固的横向强框架, 此外在布置甲板舭装件、桅杆等处应作适当的局部加强。整船建造工艺流程如图 1 所示。

为了改善船上乘客的舒适性, 本项目在舱室的隔音及减振降噪方面, 除了从机电设备的选型和主辅机的安装方面考虑外, 在舱内装饰和螺旋桨的选取方面采取以下措施: 在机舱前壁和主机座涂 3109- II 型舰船用阻尼涂料, 使振动及噪声衰减加快, 达成减振降噪的效果。结构如图 2 所示。

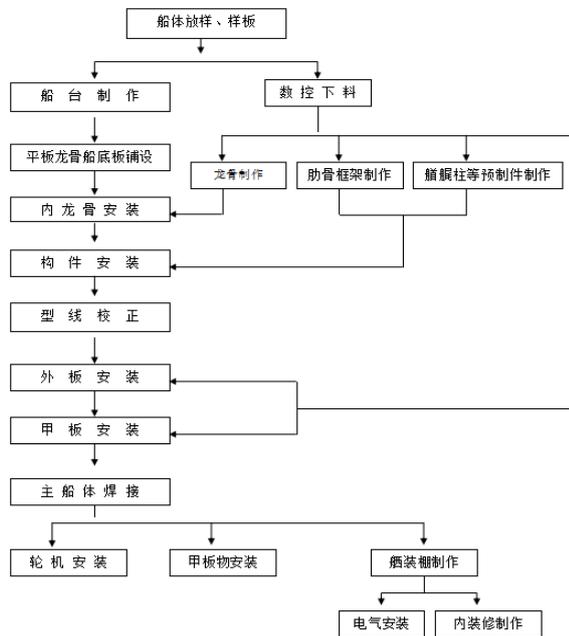


图 1 船舶建造工艺流程图

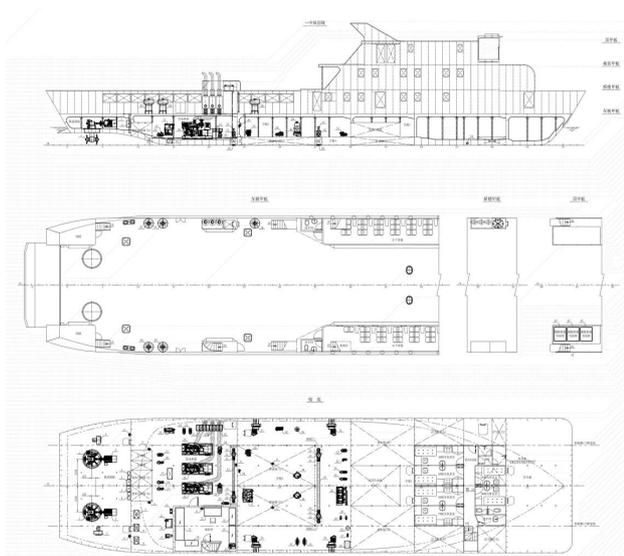


图 2 设计效果图

2.3 航行工况控制

2.3.1 功率分配模式

本船采用全电池推进系统，由三组高能量密度锂离子电池组构成主电源，每组电池额定容量为 3500kWh，总储能容量 10500kWh。系统配置两台 2.5MW 永磁同步推进电机，直流母线电压 1500V。配备智能能量管理系统 (EMS)，通过多级电力电子变换装置实现能量的优化分配。

在额定航行工况下，推进系统按照设计航速需求维持 $2 \times 2500\text{kW}$ 的持续功率输出。此时三组电池系统自动并网运行，共同承担推进负荷及全船用电需求：

推进系统： $2 \times 2500\text{kW}$ (含 5% 过载余量)。

船舶服务负荷：200kW (含导航、照明、空调等)。

辅助系统：150kW (含冷却泵、液压站等)。

第一，充电控制策略。

系统实时监测各电池组的荷电状态 (SOC)，当任意电池组 $\text{SOC} \leq 80\%$ 时，自动启动充电模式：

① 优先采用岸基充电：连接港口 10kV 高压充电桩，最大充电功率 3MW，充电电流按电池特性分阶段调节：恒流阶段：220A (SOC 0%~80%)；恒压阶段：自动调节 (SOC 80%~100%)。

② 航行中补充充电：通过光伏补充系统 (200kWp 太阳能板阵列) 和再生制动回收装置，最大可回收推进系统 15% 制动能量。

第二，负荷动态分配。

当三组电池系统并网运行时，EMS 根据实时负荷需求优化功率分配：

基础负荷分配：每组承担总负荷的 33.3%。

动态调节范围：单组可在 20%~50% 负荷率间智能调节。

特殊工况处理：突加负荷时启用超级电容缓冲系统 (500kW/30s)。

2.3.2 智能控制策略

第一，运行策略。

① 基础运行模式：

顺序启动两组电池系统，建立 1500V 直流母线，检测推进系统预加载状态，逐步加载至 60% 额定功率。

② 负荷判断机制：

当实时功率需求超过两组电池 85% 容量时：

$P_{\text{实时}} > 2 \times 2975\text{kW} \rightarrow$ 自动启动第三组电池。

$P_{\text{实时}} \leq 2 \times 2975\text{kW} \rightarrow$ 维持两组运行。

第二，充电管理策略。

① 多模式充电控制：

快速充电模式：220A 恒流充电 (SOC $\leq 80\%$)；

均衡充电模式：自动切换组间平衡电路；

维护充电模式：50A 浮充电流 (长期停泊)。

② 智能充电决策：

优先保证至少两组电池 $\text{SOC} \geq 30\%$ ，根据航行计划动态调整充电策略；异常状态时自动切换隔离故障电池组。

第三，安全保护机制。

单体电池：电压/温度监控 ($\pm 2\text{mV}$ 精度)；电池组级：绝缘监测 ($500\text{k}\Omega$ 阈值)；系统级：差动保护 (动作时间 $< 20\text{ms}$)。

第四，能效优化策略。

动态功率分配算法采用模型预测控制 (MPC) 优化电池组负荷分配：实时计算各电池组 SOH (健康状态)，自动优化充放电深度 (DOD)，智能调节循环工作次数。

3 系统优化与创新设计

3.1 新型直翼舵桨推进技术

主机通过输入轴、变速箱驱动中空轴和转动盘旋转，当桨叶在随转动盘公转时，桨叶受控于行星齿轮机构进行自

转,使桨叶公转至不同位置时与此位置水流流动的方向形成一定的冲角产生水动力并形成方向一致的推力,而当舵机通过行星齿轮机构改变桨叶的角度时,推力方向随之改变。

通过直翼舵桨实现 360° 无死角转向,降低了推进过程中的能量损失,改善了螺旋桨桨毂涡流问题,优化尾部设计,节省了传统推进装置对空间的高需求,提高了船舶整体设计的自由度。同时,直翼桨叶的几何设计便于加工制造,并减少传统螺旋桨复杂曲面加工带来的成本。舵桨一体化还降低了维护周期,简化了船舶生命周期管理。

直翼舵桨推进系统采用模块化集成设计,其动力传输链路由主机输出端延伸至水下推进单元,形成“输入轴—变速箱—中空轴—转动盘”四级机械传动体系。其中,中空轴采用高强度钛铝合金材料制造,内嵌行星齿轮组传动通道,外径与轴套间隙经过精密计算以控制流体边界层效应。转动盘采用蜂窝状轻量化结构设计,在保证结构强度的同时降低旋转惯量。

当桨叶随转动盘以角速度 ω 进行圆周运动时,通过行星齿轮组的相位控制,每个桨叶的自转角 θ 与公转位置 ϕ 形成函数关系 $\theta = f(\phi)$,确保在任何方位角下桨叶弦线与来流方向保持最佳攻角。CFD 仿真表明,这种运动方式可使桨叶升力系数 CL 提升 26.9%,阻力系数 CD 降低 13.7%,有效抑制传统螺旋桨常见的叶尖涡脱落现象。

3.2 全航速主动式直翼减摇技术

据直翼舵桨的工作原理和运动规律,建立数学模型,通过流体力学的计算,得到推力系数、扭矩系数和推进效率等直翼舵桨的关键参数。同时,针对直翼舵桨的运动规律和流场特性,需要确定合适的网格类型、计算模型和流场求解方法,以便对直翼舵桨的水动力进行计算仿真。

基于计算流体动力学 (CFD) 的全尺度船体阻力及运动响应技术,可模拟不同波浪条件和工况下船舶的流体动力学性能,为船舶设计提供精确的阻力预报和优化方案。采用实时波浪监测与动态调节的智能控制技术,依据波浪方向和船舶姿态自动调整直翼减摇的角度与频率,与传统减摇装置相比,直翼减摇技术不受航速的限制,在静止状态下通过主动式调节依然能够显著降低船舶摇摆。通过减少船舶摇摆降低阻力波动,从而提升航行效率,间接实现节能减排目标。

3.3 新型电力推进技术的技术

将动力电池与电力推进系统相结合,形成低排放、高效率的绿色船舶动力系统。采用人工智能 (AI) 算法与物联网 (IoT) 系统,实现推进、减摇、导航的全自动化协调控制。通过船舶状态传感器与环境感知系统,实时调节推进和减摇参数,提高航行安全性和舒适性。

短期预测模块:结合 AIS 航路数据与气象预报,采用 LSTM 神经网络预测未来 15 分钟负荷需求。实时优化模块:建立混合整数规划模型,以等效燃油消耗最小化为目标,动态调整发电机组运行台数。安全容错模块:设置三级负荷优

先级,在故障时 0.5s 内完成关键负载的 UPS 切换。

航行时,通过发电机组向主配电屏供电,由主配电屏经驱动柜和舵桨控制柜为推进电机及舵桨提供电能,实现推进及方向控制,同时通过厂用变压器为日用负载提供电能。本系统配备了控制系统,可以实现全船能量综合管理、推进控制和监测报警功能,大大提高了船舶的自动化水平。

4 主要技术参数

项目产品已完成开发并获得中国船级社入级证书,现已投入运行,用户反映使用情况良好。依托新能源动力和先进推进技术:主要技术指标包括:

- ① 载荷能力大于 500 吨;
- ② 相对传统的柴油机—螺旋桨动力系统船舶,在同等条件下船舶动力配置减少 20% 以上;
- ③ 船舶有效空间利用率提高 15% 以上能耗降低 20% 以上;
- ④ 船舶主要舱室的振动及噪声降低 20DB 以上;
- ⑤ 碳排放及船舶污染物减少 20% 以上;
- ⑥ 与现有船舶及减摇装置相比,船舶在零航速时可减小横摇 30% 以上,在全航速时减小横摇 20% 以上;
- ⑦ SOP 估计误差小于 5%,电池堆温差小于 5°C。

5 结论

按示范船项目在中国 2000 艘沿海客渡船及类似船舶上推广应用、每艘船平均装机功率 200kW、主机单位油耗 200g/kWh、每艘船舶运行 300 天/年、每天平均运行 12 小时计,每年消耗燃油为:2000 艘 \times 200kW \times 200 g/kWh \times 300 天 \times 12h=28.8 万吨。按照本船比普通船舶平均节能 15% 计算,上述船舶每年可节约 4.32 万吨燃油,大幅减少船舶直接营运成本。

参考文献:

- [1] 彭树林,陈诚,孟昂.纯电动船换电风险与对策——以“中远海运绿水01”轮为例[J].世界海运,2024,47(9):15-19.
- [2] 胡方珍,顾蓓,张慧虹.内河纯电动船标准现状及标准化工作建议[J].船舶标准化工程师,2024,57(4):20-27.
- [3] 黄新星.基于电动船锂电池组的远程监控系统设计[J].船电技术,2024,44(3):32-35.
- [4] 曾鸣.纯电推进内河电动船能源消耗的实船验证[J].节能,2023,42(12):5-7.
- [5] 周兴,匡恒,汪敏,等.基于纯电动船的直流选择性保护研究[J].船电技术,2023,43(4):17-19.
- [6] 饶慧,罗肖锋,刘安,等.电动船三元锂电池舱与磷酸铁锂电池舱灭火对比试验研究[J].中国船检,2022(9):72-77.

作者简介:俞东旭,高级经济师。

基金项目:浙江省科技计划:新型沿海电动船舶关键技术与应用示范(项目编号:2023C01245)。