

船舶新能源动力系统集成与优化配置研究

王永亮

中交海洋建设开发有限公司 天津 300457

摘要: 全球“双碳”战略推进及IMO对船舶温室气体排放要求趋严,使传统化石燃料船舶动力系统面临转型压力。新能源动力系统是船舶绿色低碳发展的关键,其集成与优化配置成研究热点。本文梳理了锂电池、氢燃料电池等主流船舶新能源动力技术,分析其能效、安全性等优劣势。构建了涵盖能量管理策略等多核心内容的船舶新能源动力系统集成多维度框架。针对系统配置优化,提出基于多目标优化模型的方法,综合考虑全生命周期成本等约束条件,用智能优化算法求解。结合内河客船等典型场景案例分析,验证了方法有效性。结果表明,科学合理的集成与优化配置可提升船舶能效、降低成本、减少环境影响,为绿色船舶设计与建造提供支撑。

关键词: 船舶; 新能源; 动力系统; 系统集成; 优化配置; 多目标优化; 绿色航运

引言

航运业是全球贸易重要支柱,承担约九成国际贸易运输量,但传统船舶依赖重油等燃料,燃烧产生大量污染物,威胁气候与空气质量。国际海事组织(IMO)于2018年通过《IMO温室气体减排初步战略》,明确提出到2050年全球航运业温室气体年排放量较2008年减少至少50%,并力争在本世纪内实现零排放。2023年,IMO进一步强化目标,提出到2030年碳强度降低40%,2040年降低70%,并力争在2050年前后实现净零排放。在此背景下,发展清洁、高效、低碳的船舶新能源动力系统成为必然^[1]。近年来,锂电池等多种新能源技术在船舶领域获探索应用,但单一能源技术难满足不同船舶综合要求。因此,多种新能源技术高效集成与最优配置成为关键问题。本文旨在系统研究船舶新能源动力系统集成方法与优化配置策略,先综述比较主流技术,再构建理论框架、建立多目标优化配置模型,最后通过典型案例验证,为绿色船舶设计提供方法论支持。

1 船舶新能源动力技术综述

1.1 锂电池系统

锂电池凭借高能量密度、高效率、零排放(使用阶段)及快速响应等优势,已成为短途、低速船舶(如内河渡轮、港口作业船)的主流选择。当前主流技术为磷酸铁锂(LFP)和三元锂电池。其局限性在于能量密度仍远低于化石燃料,导致续航能力受限,且存在热失控风险,对电池管理系统(BMS)和热管理要求极高。

1.2 氢燃料电池系统

氢燃料电池通过氢氧电化学反应直接发电,产物仅为水,真正实现零碳排放(若使用绿氢)。其能量转换效率高(40%~60%),噪音低,适合中长途船舶。但氢

气的储存(高压气态或低温液态)成本高、体积能量密度低,且加氢基础设施匮乏,安全性挑战大。目前多用于示范项目,如挪威“MFHydra”渡轮。

1.3 液化天然气(LNG)

LNG作为过渡性清洁能源,可减少约20%~25%的CO₂排放、近100%的SO_x和PM排放,以及85%~90%的NO_x排放。技术成熟,基础设施相对完善,已在LNG动力集装箱船、散货船等领域广泛应用^[2]。但其仍为化石燃料,无法实现碳中和,且存在甲烷逃逸(CH₄为强温室气体)问题。

1.4 绿色甲醇与氨燃料

绿色甲醇(由可再生能源制取)和氨(绿氨)被视为中长期零碳燃料的重要选项。甲醇常温常压下为液体,储运便利,可与现有燃油系统兼容改造;氨不含碳,燃烧不产生CO₂,但有毒性,燃烧技术尚不成熟,NO_x排放控制难度大。两者均处于商业化初期,需解决燃料生产、加注、安全标准等产业链问题。

1.5 混合动力系统

面对单一能源技术的局限性,混合动力系统通过多能源协同,成为当前最具实用价值的技术路径。典型的“柴-电”混合系统在低负荷工况(如进出港、锚泊)使用电池供电,高负荷时启动柴油机或LNG主机,实现“削峰填谷”,显著提升整体能效。更先进的“燃料电池-电池”混合系统则结合了燃料电池的持续供能能力与电池的瞬时功率响应优势,适用于中长途客滚船或科考船。混合动力的核心在于能量管理策略的智能化,通过实时优化各能源单元的功率分配,在满足推进需求的同时最小化燃料消耗与排放。实践表明,合理设计的混合动力系统可降低燃油消耗15%~30%,延长主发动机寿

命, 并提升船舶运行灵活性。

2 船舶新能源动力系统集成框架

2.1 系统拓扑结构

系统拓扑结构决定了能量流的路径与控制逻辑, 是集成设计的物理基础。并联式结构中, 内燃机与电动机均可直接驱动推进轴, 机械连接简单, 传动效率高, 适用于功率需求稳定、工况变化少的船舶, 如部分拖轮。然而, 其控制策略复杂, 需精确协调两动力源的扭矩输出, 避免相互干扰。串联式结构则将内燃机或燃料电池仅作为发电单元, 电能经变频器驱动电动机推进, 实现了动力源与推进器的解耦, 控制灵活性高, 特别适合负载波动大的船舶(如渔船、科考船)。但能量经多次转换(机械→电→机械), 整体效率略低于并联系统。混联式结构通过行星齿轮或离合器实现功率分流, 兼具并联的高效率与串联的灵活性, 是汽车混合动力的主流方案, 但在船舶中因结构复杂、成本高昂而应用较少。选择何种拓扑, 需综合权衡船舶任务剖面、空间布局、成本预算及维护便利性, 而非简单追求技术先进性。

2.2 能量管理策略(EMS)

能量管理策略是新能源动力系统的“智能中枢”, 其性能直接决定系统能效与排放水平。早期系统多采用基于规则的策略, 如设定电池荷电状态(SOC)阈值, 低于某值启动发动机充电, 高于某值切换至纯电模式。此类策略逻辑简单、鲁棒性强, 但缺乏全局优化能力, 难以适应复杂多变的航行工况。随着计算能力提升, 基于优化理论的策略逐渐兴起。动态规划(DP)可离线求解全局最优控制序列, 但计算量大, 难以在线应用; 模型预测控制(MPC)则通过滚动优化, 在有限时域内预测未来负载并实时调整控制量, 兼顾最优性与实时性, 已成为高端船舶的主流选择^[3]。近年来, 强化学习(RL)等数据驱动方法展现出强大潜力, 其通过与环境交互自主学习最优策略, 无需精确系统模型, 能适应未知工况与设备老化, 代表了未来智能能量管理的发展方向。无论采用何种策略, 其核心目标都是在满足推进需求的前提下, 实现能量流的最优分配, 平衡效率、寿命与排放。

2.3 关键设备选型与接口标准化

系统集成成功不仅依赖于顶层架构, 更取决于关键设备的精准选型与无缝对接。主推进电机需匹配船舶的推力-转速特性, 永磁同步电机因高效率、高功率密度成为主流; 变频器则需具备高动态响应与故障容错能力。储能系统(如锂电池)的容量与功率需根据典型航次的能量需求与峰值功率确定, 避免“大马拉小车”或

“力不从心”。燃料储罐的设计需兼顾安全性与空间利用率, 如LNG储罐需采用双层真空绝热结构, 氨储罐需配备泄漏吸收与中和系统。更为关键的是, 推动设备接口的标准化——包括机械安装尺寸、电气接口协议(如CAN总线、Modbus)、通信数据格式等——是实现模块化设计、缩短建造周期、降低维护成本的基础。国际船级社(如DNV、CCS)已开始制定相关指南, 但行业统一标准仍需加快建立。

3 新能源动力系统优化配置模型

3.1 问题描述

船舶新能源动力系统的配置本质上是一个多约束、多目标的决策问题。设计者需在有限的船体空间与重量配额内, 确定各类能源组件(如电池容量、燃料电池额定功率、燃料储罐体积等)的规格与数量, 以同时满足性能、经济、环保与安全等多重目标。这一过程不能仅凭经验估算, 而需建立严谨的数学模型, 量化各目标间的权衡关系。

3.2 多目标优化模型构建

3.2.1 定义决策变量:

$x = [E_{bat}, P_{fc}, V_{fuel}, \dots]^T$ (电池容量、燃料电池额定功率、燃料体积等)

3.2.2 目标函数(需最小化)

(1) 全生命周期成本(LCC)

综合考虑初始投资、燃料/电力采购、维护保养及设备残值:

$$LCC = C_{cap} + C_{op} + C_{main} - C_{res}$$

其中, C_{cap} 为初始投资成本, C_{op} 为燃料与电力运营成本, C_{main} 为维护成本, C_{res} 为残值。

(2) 碳排放强度(CEI)

反映单位运输量的碳足迹, 是衡量环境绩效的关键指标:

$$CEI = \frac{\sum(E_i \cdot EF_i)}{D}$$

其中, E_i 为第*i*种能源消耗量, EF_i 为其碳排放因子, D 为年运输量(吨·海里)。

(3) 系统可靠性指标

系统可靠性可通过平均无故障时间(MTBF)或冗余度来表征。约束条件则严格限定于物理与法规边界:

功率平衡约束: $P_{demand}(t) = \sum P_{source}(t)$, 功率平衡确保任一时刻能源供给满足推进与辅机需求。

能量存储约束: $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$, 电池SOC需维持在安全区间(如20%–90%)以延长寿命。

空间与重量限制: $\sum V_i \leq V_{avail}, \sum m_i \leq m_{avail}$, 总设备

体积与重量不得超过船体预留空间。

法规合规性：满足IMO、船级社等安全与排放标准。

3.3 求解算法

由于目标函数非线性、非凸，且存在多个Pareto最优解（即无法在不损害某一目标的前提下改进另一目标），传统单目标优化方法不再适用。本文采用非支配排序遗传算法II（NSGA-II），一种经典的多目标进化算法。该算法通过模拟自然选择与遗传变异，在解空间中并行搜索，利用快速非支配排序与拥挤度计算维持种群多样性，最终输出一组分布均匀的Pareto最优解集^[4]。决策者可根据实际偏好（如更重经济性或更重环保性）从中选择最终方案。NSGA-II的鲁棒性与高效性已在众多工程优化问题中得到验证，适用于本文所构建的复杂船舶配置模型。

4 案例分析

4.1 案例一：内河电动客船

以长江某航线100座电动客船为例，日航程50公里，运行8小时。纯电池方案配置1.2MWh磷酸铁锂电池，利用夜间谷电充电，日均电费约800元，LCC较传统柴油船低15%，且运行阶段零排放。而柴-电混合方案虽续航更长，但需保留柴油机与油箱，初始投资增加30%，且年均碳排放达120吨。在充电设施完善、航程固定的内河场景下，纯电方案在经济与环保上均具压倒性优势，验证了“场景适配”原则的重要性。

4.2 案例二：近海混合动力渔船

某500总吨近海拖网渔船作业模式复杂：低速巡航耗能低，但拖网作业需瞬时高功率（峰值达2MW）。配置1.5MWLNG双燃料主机与600kWh锂电池的混合系统，通过MPC能量管理策略，在巡航时由LNG主机发电并为电池充电，拖网时电池与主机联合供电，有效避免主机长期低效运行。仿真结果显示，年燃油消耗降低18%，NO_x排放减少32%，同时电池缓冲作用显著降低主机磨损，延长大修周期。

4.3 案例三：远洋集装箱船（10000TEU）

针对跨太平洋航线的大型集装箱船，对比LNG、绿色甲醇与氨燃料三种方案。考虑2035年绿色燃料成本下降情景，绿色甲醇方案虽初始投资高20%，但LCC与LNG持平，且CEI降低85%；氨方案虽理论零碳，但因燃烧技术不成熟、安全冗余设计复杂，导致投资成本高40%，且船员培训与港口准入存在不确定性。分析表明，在技术成熟度与供应链保障双重约束下，绿色甲醇是2035–2050年间远洋船舶最可行的零碳路径。

5 挑战与展望

尽管前景广阔，船舶新能源动力系统仍面临基础设施缺失、标准体系滞后、关键技术瓶颈与经济性压力等多重挑战。未来研究应聚焦于高安全性固态电池、高效氨/氢燃烧器、智能数字孪生平台等方向，并推动“船-港-能”一体化生态构建，实现从单船优化到系统协同的跃升。

6 结语

本文系统研究了船舶新能源动力系统的集成与优化配置问题。研究表明，不同新能源技术各有适用场景，混合动力是当前最具可行性的过渡方案。通过构建多目标优化模型并结合智能算法，可在成本、排放与可靠性之间实现科学权衡。案例分析验证了所提方法的有效性，为不同类型船舶的绿色动力选型提供了决策依据。未来，随着技术进步、成本下降与政策驱动，船舶新能源动力系统将加速普及，为全球航运业实现碳中和目标奠定坚实基础。

参考文献

- [1]周勇.新能源船舶动力系统发展研究[J].船舶物资与市场,2025,33(06):60-62.
- [2]杨小江.新能源动力船舶推广应用的可行性研究[J].航海,2024,(05):36-38.
- [3]蒲路森.船舶新能源动力系统现状与发展趋势[J].船舶物资与市场,2024,32(01):100-102.
- [4]马丹.船舶清洁能源动力装置与系统发展分析[J].中国船检,2022,(01):63-69.