

船舶节能改造与能效提升方案

于建勋

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘要:当前全球积极推进气候治理,航运行业减排已成必然趋势,各类船舶低碳管控规则落地执行,叠加欧盟多项区域管控举措不断加码,远洋船舶减排与合规压力持续加大。结合远洋船舶航程长、载重高、运行工况稳定的运行特征,本文围绕减阻、增效、换源、智管四大方向搭建一体化船舶综合改造体系。文中逐一分析球鼻艏优化、长效防污漆、空气润滑等减阻技术,永磁轴带发电、旋筒风帆等增效手段,双燃料改造、生物燃料调和等能源替换方案的落地方式与应用范围。实践验证,多项技术组合运用后,船舶整体能效可提升15%—25%。这套改造思路可帮助航运企业缓解运营压力,削减运营开支、盘活船舶价值,也为行业逐步实现低碳运营目标提供了可落地的技术参考。

关键词:远洋船舶;节能减排;双燃料改装;风力辅助推进;能效智能化管理

引言

目前,全球航运每年碳排放量规模庞大,行业低碳发展已是必然趋势。受减排目标与市场规则推动,航运绿色发展有较多选择方向,行业整体加速向低能耗、清洁化方向迈进。国内船队也在加快绿色升级步伐,除布局新型清洁能源船舶外,受新船建造周期久、投入成本高、技术选择存在不确定性等因素影响,对现役船舶开展节能改造,成为当下兼顾成本与实效的主流方式。远洋船舶航线与动力运行状态稳定,十分适合开展规模化节能优化。文中结合一线工程实测数据、设备实际应用经验与行业现行技术标准,梳理形成一套实操性强、效果可核验、全程可追踪的能效优化体系,依托成熟技术方案助力现役船队降低能耗、提升运行效率,为航运领域低碳升级提供实用技术参考。

1 船舶节能改造的核心技术体系

1.1 动力系统的全方位优化

动力系统作为船舶核心装置,其运行状态决定整船能耗水平,主要优化聚焦主机、辅机、轴带发电、余热回收四大方向,实现能源梯次利用与高效转化。针对主机升级,按船型差异化施策:小型船舶直接换装低能耗、低排放新机,同步控油耗、减排污;大型船舶重点改良燃烧室、燃油喷射及增压器配套结构,提升燃烧效能。老旧主机可通过升级增压器、调校喷油泵、更换气缸油等手段恢复热效率,长期营运船舶还可提前预留接口,适配LNG、甲醇、氨等清洁能源后续改装。辅机能耗居高不下,轴带发电是主流节能方案,依托主机剩余扭矩供电,技术成熟可靠。550kW、750kW设备施工周期均为17天,投入资金分别为320万元、380万元,节油率达4%、5%,投资回收周期约3年,可有效削减远洋船

舶辅机与侧推能耗,结合智能电网还能优化电力分配,提升电站运转效率。船舶主机燃油约30%至40%转化为废热,配套75kW有机朗肯循环余热发电设备,可将废热再生为电能。该设备工期32天、造价150万元,节油率1.5%,回收期约4年,航行时稳定发电65-75kW,减少辅助锅炉燃油消耗,与轴带发电形成协同,充分释放船舶节能空间。

1.2 推进系统升级与风力辅助推进

船舶推进系统可加装节能附体优化水动力,结合CFD流场仿真优化螺旋桨进流效果。本项目配备前置导管、桨毂消涡鳍、割桨等设备,回收螺旋桨尾流能量,提升推进效能。该改造施工简单,单船工期5-7天,投入约160万元,可降低5%推进功率,投资回收期1.5年,落地快、收益显著。风力辅助推进采用旋筒风帆,借助马格努斯效应提供推力,适用于中澳、东南亚等风况优良的固定航线^[2]。单船布设2至3组3.5m×24m风帆,施工周期25-30天。船舶满载时节油5.85%—6.8%,压载工况节油3.93%—8.3%。

1.3 船体与线型减阻优化

船体阻力是船舶动力能耗的核心诱因,依托减阻优化提升船舶能效,成本投入少、落地周期短、长期效益显著,是船舶节能改造的关键方向。空气润滑作为成熟主流减阻手段,通过在船底布设气流形成连续气泡层,弱化船身与海水的摩擦阻力。该技术适配范围广,在船底平整、船宽偏大、吃水适中、航速稳定的船舶上效果优异,多用于大型散货船、超大型油轮、万箱级集装箱船等远洋船舶,最佳运行工况为航速12-20节、吃水5-12米,且航行海域海况平缓。此项改造可配合船舶坞修实施,施工周期10至15天,仅在船底局部加装布气装

置,不改动原有船体线型。配套供气设备可布置在机舱或甲板区域,无需加装大型储水设施,不会占用货舱空间、影响载货量,项目投资回本周期约3-5年。球鼻艏优化是老旧船舶短期能效提升的关键水动力改造措施,通过CFD数值模拟对原有球鼻艏形状、长度、吃水深度和线型进行重新设计,使其与船舶实际营运航速、载况更匹配,有效减小艏部兴波阻力和涡流阻力,降低航行总阻力为进一步提升节能成效。业内多采用组合式减阻方案,将空气润滑、有机硅低阻防污漆、球鼻艏优化结合使用。防污漆降低基础摩擦阻力,球鼻艏改造削减兴波阻力,再叠加空气润滑技术,综合减阻幅度可达12%~22%,既能显著提升航行能效,也可优化船舶碳强度指标,是当前高性价比的综合优化方式^[1]。

1.4 能源回收与可再生能源的综合利用

作为提升船舶综合能效的重要补充手段,能源回收与可再生能源的利用正逐渐从“概念展示”走向“实际标配”。能源回收与可再生能源综合利用是船舶节能的重要辅助方式。船舶主辅机运行产生的大量废热可高效回收,用于生活用水加热、燃油预热等场景,有效削减船舶锅炉及辅助设备的额外能耗,减少能源浪费。太阳能光伏技术广泛应用于船舶领域,光伏设备可灵活铺设在甲板及上层建筑空余区域,为船舶照明、导航辅助等低压设备供电。该技术安装简便、运行稳定、运维成本低,且不占用货舱核心作业空间,是船舶清洁电力供给的优质方式。

1.5 船用生物燃料的在线调和系统

船用生物燃料在线调和系统有效突破了生物燃料的应用局限。生物燃料全生命周期碳排放量远低于传统化石燃料,是航运低碳转型过渡期的关键替代燃料,但储存易分层、易氧化变质的特性,长期制约其规模化推广。而船载在线调和系统可在分油机前端,完成B100生物燃料与传统燃油的实时动态配比,实现即用即调的作业模式。系统依托V-N法燃油流量计量技术,保障燃料混合比例精准可控,还能结合船舶CII评级标准灵活调整配比,适配B24、B30等不同规格需求,精准降低船舶碳排放,满足行业合规要求。

1.6 能源结构转型与双燃料改装

能源结构转型以双燃料改装为核心,是航运深度脱碳的关键路径,主流技术涵盖LNG、甲醇、氨燃料三大路线。

LNG双燃料技术,可削减20%—25%的二氧化碳排放,基本根除硫化物与颗粒物排放,氮氧化物排放降幅可达75%—90%。改装主要包含加装C型燃料罐、气

体阀组单元、双壁管及泄漏探测系统,改装周期3至4个月,单船投资成本较高。

甲醇双燃料系统无甲烷逃逸隐患,燃料储存、加注便捷,配套设施完善,是现阶段主流过渡技术。现有已完工项目分船型差异化改造:1,动力系统双燃料升级。20000TEU系列1台主机+2台副机全部改造为甲醇/柴油双燃料机型;13800TEU系列1台主机+4台副机同步升级,搭载智能燃料切换系统,航行中可无缝切换柴油、甲醇两种燃料模式。2,全新甲醇燃料储运供给系统。改造增设大容量甲醇储罐(单船总容积约1万立方米),配套双壁防爆输送管路、燃料预处理单元;全船加装惰化保护、实时泄漏监测、通风联锁、ESD紧急切断全套安全系统,机舱、燃料仓区域电气设备全部防爆升级,满足低闪点燃料国际安全规范。3,船体结构与甲板优化。对尾部甲板抬高重构、货舱局部结构改造,平衡甲醇舱占用空间,通过精细化布局基本不损失原有载箱量;同步完成管系贯通、特种耐腐涂装、自动化控制系统软硬件联调,解决新旧动力系统软件兼容难题。

氨燃料作为零碳清洁能源,长期发展前景广阔,目前仍处于商业化初期,需重点攻克燃料毒性、设备材料相容性两大核心问题。

1.7 能效的智能化管控

智能能效管控系统是船舶节能体系的核心载体,可统筹船上各类设备,让整体能效维持在最佳状态。这套系统整合了航线航速规划、船体纵倾调节、船岸数据互通、CII指标实时核算与风险提示等实用功能,还能配合风帆、轴带发电机、主发动机等节能装置联动运转,改变以往设备单独工作的模式。结合风向、光照等现场环境变化,工作人员可依托系统调整主机运转负荷与光伏储能方案,多项节能手段同步发力,切实提高船舶运行的综合能效。

2 分阶段实施路径规划

想要平衡投资与减排效益,建议船东采用三步走策略,分阶段有序开展船舶改造工作。

船舶能效提升按短期、中期、长期分三阶段推进。

短期(0—3年)重点开展轴带发电机加装、水动力附体改造、减阻涂层施工及能效智能系统落地应用,该方案投入少、工期短、技术稳定,回本周期仅1-3年,可快速提升船舶能效,适配EEXI、CII合规要求,是老旧船改造的优选方案。

中期(3—7年)在短期改造成果基础上,完成旋筒风帆加装、余热发电设备安装,并投用生物燃料在线调和装置,通过风力辅助、废热回收及低碳燃料协同进一

步挖掘节能空间,稳固 CII 优良等级,合规应对欧盟相关航运管控规则。

长期(7年以上)聚焦深度脱碳,推进甲醇氨双燃料改造并加装船用碳捕集装置,对标 2040 至 2050 年深度减排规划,实现船舶全面脱碳,年碳捕集量可达 9600 吨,保障船队长期合规运行,项目投资回收期约为七年。

3 综合效能分析

3.1 合规效益

船舶完成改造后,可完全适配各类国际海事监管规则,彻底规避船舶长期获评 D、E 低效等级引发的处罚、限航及退市风险。有效保障船舶全球航线运营、各港口挂靠通行的合规性,筑牢船舶常态化远洋作业的合规基础。

3.2 经济效益

中小型航运企业选用轴带发电、水动力附体、减阻涂层,风帆,废热回收,生物燃料调和等节能技术,大型航运企业选用双燃料改造及加装船用碳捕集装置,投入产出比优异。多项技术协同应用可提升船舶综合能效 15%—25%,在高油价、高碳价的行业发展趋势下,能大幅压降船舶燃油消耗与碳税成本,切实增强船舶营运收益与市场核心竞争力。

3.3 环境与资产效益

改造可大幅削减船舶 CO₂、硫氧化物、氮氧化物及颗粒物排放,减轻海陆环境污染负荷,贴合全球低碳发展与碳中和战略,塑造企业绿色航运品牌。高效船舶更易获取绿色租约与信贷资源,在二手交易、船舶租赁市场中溢价优势显著,可有效保值抗贬值,稳固企业资产价值。

4 风险评估与应对措施

4.1 技术风险

船舶绿色节能改造存在多项技术隐患,主要包括新增节能设备与船舶原有运行系统适配性较差,替代燃料系统运行工况复杂,易出现低温脆性损伤、管路渗漏、燃气堆积等安全问题,同时改造施工可能破坏船体原有结构,干扰船舶稳性参数。针对上述问题,改造施工前期需完成流体仿真分析、船体结构强度验算及船舶稳性核算,全套改造方案需提交船级社审核,获批后方可施工^[3]。替代燃料系统施工严格遵循 IGF 规则与 CCS 相关规范,配套安装双壁管路、可燃气体监测、紧急切断装置及水幕防护等多重安全防护设施。

4.2 施工与工期风险

改造工程存在船坞周期紧张易引发工期延误、施工

现场多工种交叉作业、安全管控难度大、核心设备供货滞后等问题。项目组需编制专项施工进度方案,科学分布各施工工序,采用模块化预制施工模式,同步结合船舶常规坞修作业开展改造施工。严格落实动火、高空、受限空间等高危作业的审批许可制度,规范现场施工流程。针对关键设备,提前开展采购、预制组装及出厂调试工作,最大限度压缩船舶现场施工时长,保障工期合规可控。

4.3 经济与投资风险

改造投入成本较高、投资回收周期偏长,燃油、碳价市场波动会直接影响项目收益,且部分船舶船龄偏大,存在投资回报不达预期的风险。项目实施采取分阶段投入模式,优先落地性价比、回收周期短的改造项目。主动申报老旧船舶更新专项补贴,对接绿色金融扶持政策,降低项目资金投入压力。搭建船舶能效动态监测体系,实现改造成效量化、可核查,保障投资收益稳定。

4.4 运营与管理风险

改造后新增的双燃料、风帆等设备,对船员操作能力提出更高要求,船员实操技能、应急处置经验不足,且配套维保体系不完善,易导致设备故障频发。需针对性开展船员专项实操培训,覆盖设备并网运行、智能控制、燃料切换及泄漏应急处置等内容。编制标准化设备操作规程与应急处置预案,明确报警响应、紧急停机等关键流程。搭建专业化设备维保机制,定期校验安全探测、紧急切断等核心装置,保障设备长期稳定运行。

结语

综上所述,船舶节能减碳涉及方方面面,是环环相扣的系统性工作,离不开实用技术、实测数据与标准化落地。船东可结合自身船队情况分步推进:先依靠轴带发电、减阻工艺完成短期合规提效,再借助风力助航、生物燃料持续优化能效,长远则依托双燃料、零碳燃料迈向深度脱碳。坚守安全与效益底线,扎实推进绿色改造,才能让航运企业走稳可持续发展之路。

参考文献

- [1] 王强,李海涛.船舶空气润滑减阻系统在散货船上的应用研究[J].船海工程,2024,53(2): 45-50.
- [2] 刘洋,张伟.旋筒风帆辅助推进系统在集装箱船上的能效分析[J].上海海事大学学报,2023,44(3): 78-85.
- [3] 交通运输部水运科学研究院.国际航运碳强度指标(CII)合规策略与技术路径[R].2024.