

基于碳强度指标（CII）下的船舶改造策略分析

龙 哲

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘 要：随着国际海事组织（IMO）碳强度指标（CII）的强制实施，航运业面临迫切的减排压力。本文以CII合规为核心目标，结合市场常见改造策略，包括安装节能设备、优化流体动力性能、升级推进系统、使用替代燃料等，系统分析各种策略的原理和特点，为船东和运营商提供决策参考。

关键字：碳强度指标；节能设备；流体动力性能；推进系统；替代燃料

引言

《MARPOL公约》附则VI的修正案于2022年11月1日生效。在2018年IMO减少船舶温室气体排放的初步战略框架下制定的这些技术和操作修正案要求船舶在短期内提高能源效率，从而减少温室气体排放。从2023年1月1日起，所有船舶都必须计算其现有船舶达到的能效指数（attained EEXI），以衡量其能效，并开始收集数据以报告其年度营运碳强度指标（CII）和CII评级，要求到2030年将所有船舶的碳强度比2008年基线降低40%。根据船舶的CII，其碳强度将被评为A、B、C、D或E，其中A为最佳。该评级表示主要优等、次要优等、中等、次要劣等或劣等性能水平。船舶CII评级会随着时间推移不断降低以及愈加严格，连续三年被评为D级或一年被评为E级的船舶，将必须提交一份改造计划，说明如何实现C级或以上的规定指数。鼓励行政部门、港口当局和其他利益相关者酌情为被评为A或B的船舶提供奖励。

CII计算公式为： $Attained\ CII = M/W$ ，其中M为排放的CO₂总质量，是指某一给定日历年内船上消耗的所有燃油产生的CO₂排放总质量；W为运输功，是指船舶的载运能力与给定日历年内航行的距离的乘积。

CII机制对航运业带来了挑战，为了满足CII监管要求并避免处罚，船东必须专注于降低船舶的碳强度。虽然船舶的行驶距离受到商业控制，但可以通过多种措施来提高其评级，如安装节能设备、优化流体动力性能、升级推进系统、使用替代燃料等方式。

由于航运公司船队规模较大，存在船龄和船型之间的差异，无法采用统一的改造策略，需要灵活使用各种措施，满足CII合规要求。

1 策略分类

1.1 安装节能设备

安装节能设备对于提高船舶效率至关重要，这些设备可以减少燃料消耗和CO₂排放，使其成为合规的重要工

具，如转子帆、硬质风帆、船舶岸电系统、LED照明等。

1.2 优化流体动力性能

优化船舶流体动力性能，可以减少燃料消耗和CO₂排放，常用结构改装的方式实现，如球鼻艏改装、加装挡风装置等。

1.3 升级推进系统

升级推进系统是提高船舶效率和降低碳强度的另一种有效方法，如螺旋桨优化、导管、导流罩、混合动力和电力推进、轴带发电机、废气再循环、余热回收系统等。

1.4 使用替代燃料

使用替代低碳燃料是降低碳强度的长期解决方案，如采用LNG、甲醇、氨和氢等。

2 安装节能设备

2.1 转子帆

（1）工作原理。转子帆是一种利用风力辅助推进的节能装置，其核心是通过马格努斯效应产生推力，减少主机负荷，从而降低燃料消耗与碳排放。马格努斯效应是指高速旋转的圆柱体在气流中产生垂直于风向的力。当船舶航行时，转子帆旋转通常由电机驱动旋转，与自然风相互作用，产生向前或侧向推力。

（2）节能减排效果。单台转子帆可节省燃料5-15%，多台组合安装的节能潜力可达20%以上。船舶可直接利用风能进行推进，减少对化石燃料依赖，电力驱动转子旋转的能耗仅占推力收益的10-20%，符合IMO 2050年碳中和目标，运营成本较低。

（3）难点与挑战。转子帆对甲板空间影响较大，可能影响货物装卸或船舶稳性。改造工程量较大，需安装筒体基座和加强等结构。

（4）应用建议。低速散货船与油轮，航速较慢，甲板空间充裕，稳性调整灵活。

2.2 岸电系统

（1）工作原理。岸电系统，指船舶靠港期间关闭船

载辅助发电机,转而接入港口电网电力,以满足船舶停泊期间的用电需求,其核心是通过替代船用燃油发电,减少港口区域的碳排放与污染物排放。

(2) 节能减排效果。环境效益突出,使用岸电系统可以消除港口区域硫氧化物、氮氧化物和颗粒物污染,改善空气质量。符合IMO《港口国控制》及欧盟“Fit for 55”等法规要求,避免罚款或运营限制。

(3) 难点与挑战。岸电系统对港口基建要求较高,另外全球岸电标准不统一,船舶需适配多港口设备,增加改造成本。另外,部分港口电网容量不足,无法满足大型船舶高功率需求,如邮轮等。

(4) 应用建议。邮轮、集装箱、大型散货船。

3 优化流体动力性能

3.1 球鼻艏改装

(1) 工作原理。球鼻艏是船首前端的凸起结构,通过改变船体周围的流场分布,减少航行时产生的兴波阻力,从而提高推进效率。其核心原理包括:

波系干扰——球鼻艏产生的波浪与船体主波系形成相位差,相互抵消,减少波浪能量损失。

流线优化——调整船首水流分布,降低船体前部的湍流和压差阻力。

(2) 节能减排效果。针对高速或中高速船舶,如集装箱船、LNG船等,节能效果优于其他局部改装,可以降低主机负荷,减少机械磨损,同时帮助船舶满足IMO的EEXI和CII要求,避免因排放超标被限制运营。老旧船可以通过球鼻艏改装进行流动动力性能优化。

(3) 难点与挑战。球鼻艏的形状、尺寸需与船舶航速、载重、航线海况严格匹配,设计不当可能导致低速时阻力增加,适航性下降。另外船舶艏部线型复杂,改装施工难度较大。

(4) 应用建议。高速船舶,如集装箱船、LNG船、滚装船等;以及长期在稳定载重和航速下运营的固定航线船舶如班轮等。

3.2 挡风装置加装

(1) 工作原理。挡风装置是通过优化船舶上层建筑或货物堆垛区域的空气动力学设计,减少航行中风阻力的节能技术。其核心原理包括:

气流引导——通过挡风板、导流罩或流线型结构,改变气流方向,降低船体迎风面的压力差,减少湍流。

阻力系数优化——针对集装箱船、滚装船等高甲板船舶,遮挡货物或上层建筑的迎风面积,降低整体风阻系数。

协同效应——与船体线型优化结合,改善全船流体

力学性能,减少主机负荷。

(2) 节能减排效果。结构简单、安装灵活,尤其适合甲板高度大、受风面积广的船舶,如集装箱船、汽车运输船、滚装船等。但节能效果有限。风阻占总阻力比例较低,整体节能潜力弱于转子帆、球鼻艏等核心节能技术。

(3) 难点与挑战。节能效果依赖风速和风向,逆风航行时效果显著,顺风时可能因遮挡自然风力适得其反。

低风速区域节能收益微乎其微。

另外挡风结构可能影响货物装卸、船员视野或设备操作。

(4) 应用建议。主要适用于集装箱船,甲板集装箱形成高风阻区域,可加装挡风装置降低风阻。

4 升级推进系统

4.1 导流罩&导管

(1) 工作原理。导流罩安装在螺旋桨毂后方,通过重新引导螺旋桨尾流中的旋转能量,减少涡流损失,提升推进效率,通常可提高2-5%;另外可抑制空泡现象,降低振动和噪音。

导管是围绕螺旋桨的环形结构,加速或调整水流方向,增加螺旋桨推力,尤其适用于低速重载船舶,主要分加速导管(加速水流)和减速导管(优化流场均匀性)。

(2) 节能减排效果。导流罩可降低燃料消耗3-8%,导管在油轮和散货船等低速船中节能效果可达10-15%。直接减少CO₂排放,帮助满足IMO的碳强度指标(CII)和EEXI要求。

另外,可以减少空泡腐蚀,延长螺旋桨寿命。降低振动噪音,改善船员舒适性。通常无需大幅改动船体,适合现有船舶改装。

(3) 难点与挑战。船舶尾部结构线型较大,安装定位比较困难,需制定精准的施工工艺。导管结构复杂,易受生物附着影响,需定期清理。

(4) 适用性分析。导流罩适合现有船舶改装,尤其是螺旋桨效率较低的老旧船舶;导管适合航速低于15节的低速船舶。

4.2 轴带发电机

(1) 工作原理。轴带发电机是一种集成于船舶主推进轴系的发电装置,利用主机的富余功率发电,替代传统的辅助柴油发电机。其核心原理为动力耦合,主机驱动螺旋桨时,通过齿轮箱或变频器分出一部分轴功率驱动发电机,供应船舶日常用电。

(2) 节能减排效果。直接利用主机富余功率,避免辅机低效运行,综合能源利用率提高15%以上。减少辅机运行时间,节省柴油消耗,延长辅机维护周期。每减少1

吨辅机燃油消耗,可减排CO₂约3.17吨。

(3) 难点与挑战。轴带发电机依赖主机工况,主机低负荷运行时,富余功率不足,需切换回辅机供电。另外设计安装难度较大,需严格匹配主机功率曲线与电力需求,精确安装,避免轴系过载或供电不稳定,影响主机安全。

(4) 应用建议。主机功率比高,巡航时间长,富余功率充足的船舶。

5 使用替代燃料

5.1 工作原理

通过LNG、甲醇、氨、氢等燃料替代传统重油或船用柴油,直接减少燃烧阶段的碳排放和污染物排放,需对船舶的主机、发电机、燃料供给系统、燃料储存舱、控制系统等进行改造。

(1) LNG

燃烧方式:LNG主要成分为甲烷,在改造后的双燃料发动机中,燃烧生成CO₂和水,硫含量极低。

技术路径:需低温(-162℃)储存于C型或薄膜型液

舱,通过气化后输送至双燃料发动机。

(2) 甲醇

燃烧方式:可直接用于改造后的甲醇双燃料发动机,含氧特性促进充分燃烧,减少颗粒物生成。

技术路径:液态常温储存,需新造或改造甲醇舱,通过燃料供给系统传输至发动机。

(3) 氨

燃烧方式:燃烧产生氮气和水,但可能生成NO_x。

技术路径:液态储存(-33℃或加压),需专用发动机和尾气处理系统。

(4) 氢

燃烧方式:燃料电池发电或内燃机燃烧,仅排放水蒸气。

技术路径:液态(-253℃)或高压气态储存,储运成本高。

5.2 节能减排效果

燃料类型	CO ₂ 减排	硫氧化物(SO _x)	氮氧化物(NO _x)	颗粒物(PM)	全生命周期减排(绿燃料)
LNG	20-25%	近零	减少20-30%	减少90%	10-15%(考虑甲烷逃逸)
甲醇	灰甲醇:与传统燃料持平 绿甲醇:80-95%	近零	减少30-50%	减少90%	绿甲醇:80-95%
氨	零排放	近零	可能增加	近零	绿氨:90-100%
氢	零排放	近零	近零	近零	绿氢:95-100%

5.3 难点与挑战

(1) LNG:甲烷逃逸,未燃烧的甲烷温室效应为CO₂的28倍,低温储存系统维护复杂。

(2) 甲醇:能量密度低,仅柴油的45%,需双倍燃料舱容,绿甲醇产能不足。

(3) 氨:毒性高,有泄露风险、燃烧稳定性差,需开发专用发动机及NO_x后处理技术。

(4) 氢:储运成本极高。

另外,相对其他减少碳排放的改造策略,通过对船舶的主机、发电机、燃料供给系统、燃料储存舱、控制系统等进行改造,实现替代燃料应用,改造费用高昂。

5.4 应用建议

船东应结合航线、船型及政策风向选择燃料组合,同时关注燃料生产、储运和标准的全球协同进展,综合考虑。

6 结论

在IMO碳强度指标(CII)的强制约束下,航运业需通过多元改造策略实现减排目标。短期可优先实施低成本、快见效的措施,如安装节能装置(转子帆、岸电系统等)、优化流体动力性能(球鼻艏改装、挡风装置加

装等)、升级推进系统(安装导流罩&导管、轴带发电机等)。

替代燃料是航运业脱碳的核心路径,但不同燃料的成熟度与经济性差异显著。LNG是当前最可行的过渡方案,适合减排压力大且资金充足的船东;甲醇凭借易用性在中短期窗口占据优势,但依赖绿甲醇产能突破;氨虽长期潜力最大,但需解决技术和安全瓶颈,短期内以试点为主;氢的储运成本极高,还需要进一步技术突破,降低使用成本。

船东可结合船型、航线及政策动态,采用“节能技改+燃料转型”组合策略,并关注碳税激励与标准统一。未来,数字化管理与多技术协同将成为航运脱碳的核心驱动力,推动行业向2050碳中和目标稳步迈进。

参考文献

- [1]船舶营运碳强度评估和船舶能效管理计划第III部分编制与验证指南.中国船级社.2022
- [2]“双碳”目标下我国船舶减排技术创新知识图谱分析[J].董岗;管敏,交通运输系统工程与信息.2022,第4期
- [3]考虑碳排放政策的港航企业减排策略研究[J].梁晶;张霖;刘禹轩,交通运输系统工程与信息.2023,第1期