

船舶减排技术的现状与发展趋势

曲保智¹, 杨溢², 田宇²

(1. 招商局集团发展研究中心, 广东 深圳 518067; 2. 招商局科技创新发展研究院, 北京 100029)

摘要: 绿色供应链和船舶减排技术越来越受到全球海运业的重视。本文着重探讨了最具潜力的氢能源的发展现状, 总结了发动机和航线运营使用的减排技术并且提供了日本和全球最大航运公司马士基集团的减排经验和计划。长期来看, 航运燃料的最佳选择是氢, 但其应用在国内外均处于研究阶段。短期来看, 甲醇可能是实现减排目标的最佳替代性燃料, 近年来甲醇发动机减排技术有了诸多的完善和提高, 且其只要求对现有发动机进行改造而非完全替换。

关键词: 碳中和; 清洁能源; 减排技术

中图分类号: U677 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 03—0018—05

在 2018 年, 国际海事组织 (IMO) 通过了全球温室气体减排的战略。该战略希望将 2030 和 2050 年的全球海运二氧化碳排放量分别降低到 2008 年的 60% 和 30%。为了达成上述目标, IMO 主要对于以下两个方面进行了审议和制订: 1. 对于新造船, 提高船舶能效设计指数 (EEDI) 以降低船舶碳排放强度; 2. 对于现有运营船舶, 需要提升运营能和技术能效提升两个方面来实现碳减排。并且在未来 IMO 可能会推出针对现有船舶的强制性措施。因此各国海运企业正在为此投入大量的人力、物力和财力, 以期能及时实现碳减排目标来规避未来可能被实行的碳税制度。在可以预见的未来, 海运与环保的关系会更为紧密, 全球海运企业一定会加大对于绿色供应链和船舶减排技术研发的投资。

1 氢燃料电池在船舶上应用的前景

氢气是一种零碳排放的清洁替代燃料。因其产物只有水, 是最理想的船用新能源之一。并且它具有来源广泛和燃烧热值高的特点。

1.1 船用储氢技术

目前, 国际上对于利用氢能的研究正处于快速发展期。但是氢能的储存技术, 尤其是高密度储氢技术还不成熟。当前的氢气存储研发方向主要包括超高压气态储氢、液化储氢、金属氢化物储氢和液体有机化合物储氢。整体来看, 技术正从低储氢密度向高储氢密度发展。现阶段我国 35MPa 高压储氢瓶技术标准已十分成熟并且已经应用于陆上氢燃料电池汽车。因此对于船舶的氢能应用, 首先采用 35MPa 高压气瓶储氢方式是一种可行的方案。对于 70MPa 级高压气瓶的应用来说, 我国即将迈入商业应用阶段。国外则已成功商用。但高

压储氢技术的缺点是储氢密度较低, 因此船舶会面临燃料续航力不足的问题。未来船舶储氢将向能量密度更高的液化储氢方向发展, 因此金属氢化物储氢、液体有机化合物储氢等其他高密度储氢技术均是潜在的船用储氢方式, 也是未来船舶行业大规模应用氢能急需打破的技术瓶颈。

1.2 船用加氢技术

目前车用加氢设备主要使用快速加氢枪, 其技术已经非常成熟, 加注时间一般不超过 10 分钟。对于船舶加氢来说, 其加注量非常大并且持续时间远高于车辆, 因此陆用加氢枪并不能满足船舶加氢的需求。船舶加氢更加需要可靠的加注连接方式和船岸之间需要紧急切断的联动功能。此外, 汽车加氢时, 由于氢气使用安全标准问题, 驾驶员需要关闭发动机并下车才能开始加注氢气。然而船舶在码头进行燃料加注时一般不允许船舶断电, 因此如何保障船舶氢燃料加注操作的安全性, 也是目前急需解决的问题。

1.3 船用燃料电池

目前, 燃料电池主要分为以质子交换膜 (PEM) 为代表的低温燃料电池, 以及以熔融碳酸盐和固体氧化物为代表的高温燃料电池。尽管 PEM 燃料电池技术已十分成熟, 行业正在向产业化、规模化方向发展, 但是高温燃料电池具有高功率、高效率、氢气纯度要求低等优势, 因此其更适合在船舶上应用, 是未来大型船舶应用的发展方向。总体来看, 氢燃料电池车用技术标准与工程经验已经基本完善, 其在船舶的应用可以借鉴部分经验, 然而由于船舶营运条件与车用环境条件有很大不同并且氢燃料电池不能使用传统的内燃机推进理念, 因此许多技术障碍还需要攻破。此外与车用燃料电池不同的

是，车载电池本身通风环境较好，而船用燃料电池需要布置在密闭环境中，因而需要更好的防爆设计。企业不得不去改变传统车用设计，转而遵循固定式燃料电池发电系统的设计理念。

国际上一些国家的船用燃料电池技术研发开展得较早，早在 2003 年就开展了船用氢燃料电池系统研究测试项目。许多老牌技术企业在整个船舶价值链中都占有优势，尤其是在船舶大功率燃料电池系统研发及应用方面保持世界领先。

国内的燃料电池船舶研究起步较晚，在动力系统认证和整船方面直至近期才迎来实质性的突破。2021 年 1 月，武汉众宇动力系列燃料电池系统获得由中国船级社颁发的中国首张船用燃料电池产品型式认可证书。随后在 2 月初，由大连海事大学建造的“蠡湖”号燃料电池游艇顺利通过试航，该船长度为 13.9m，由大连化物所开发的 70kW 氢燃料电池电堆和 86kWh 的锂电池组成混合动力，设计船速 18km/h，续航 180km，可载乘员 10 人。

1.4 我国水上氢能产业发展提速

当前，打造绿色供应链并完成减碳目标已成为我国推动水运行业绿色健康发展的重要动力。比如中国船舶集团设立的“绿色珠江”氢燃料电池示范船舶重大科技专项已于 2019 年底获得中国船级社 (CCS) 颁发的我国首艘氢燃料试点船舶设计方案的原理认可证书。该船将采用氢燃料电池作为船舶主动力并辅以锂电池组进行调峰补偿。并且该船舶还载有 35MPa 高压氢气瓶组储存氢气燃料，续航力约为 140 公里。

2020 年 6 月，CCS 公布了“船舶氢燃料储存及应用技术”的研究结果，这次新指南增加了对高压气瓶储氢技术在船舶上的应用的研究，同时也对氢燃料加注技术、船用氢气管路连接方式、燃料电池处所安全防护技术开展了深入分析，解决了船舶运营条件与车用环境条件的差异性，解决了氢能在船舶应用上的安全性问题。此外，CCS 还研究两种高密度储氢技术（液体有机化合物储氢和金属氢化物储氢）在船舶上的应用，在指南中提出了船舶储存、布置、脱氢、材料等方面的技术要求建议，为后续开展高密度储氢技术研究奠定了基础。

此外 CCS 还受交通运输部海事局的委托开展了氢燃料船舶应用技术的专项研究工作。研究课题聚焦在业界关注的重点，主要涵盖了 7 大方面的研究内容，包括

船用燃料电池动力系统专项研究验证，船用储氢和加氢系统专项研究验证，船用氢气管路连接方式专项研究验证，船用燃料电池及其处所安全防护专项研究验证，船舶氢燃料加注方式、安全操作规程和监管方式研究，氢燃料电池动力船舶技术标准分析和氢燃料电池动力船舶设计方案风险评估分析。这些研究成果毫无疑问地将在未来进一步推广船舶氢燃料在我国的应用。

2 发动机减排技术

随着 IMO 通过了减排战略，近年来，发动机减排技术已经成为发动机改进的重要目标。

2.1 降低发动机排放的技术

(1) 发动机可以使用共轨压力大于 200MPa 的高压共轨燃油喷射可以使柴油雾化成更细小的颗粒，从而使发动机的燃烧过程变得快速且充分，进而减少颗粒物和碳烟的排放。

(2) 使用更先进得增压器及增压系统，比如使用大增压器效率大于 70%，增压压力 >0.5MPa 的增压器可以提高可燃气体的密度进而使得更多燃料可以充分燃烧，提高功率比，降低废气排放。

2.2 超低排放船舶柴油机研究进展

目前欧洲 43 家单位正在合作研发船舶超低排放燃烧发动机，项目旨在研发出可以大幅降低船用发动机耗油量，进而减少尾气和固体颗粒排放，提高发动机燃烧效率并保证发动机的安全可用性的技术。如果该项目进展顺利，那么研究成果应该可以大幅度降低船用发动机的油耗进而减少二氧化碳排放并增加发动机生命周期和减少维护成本。该项目结合了多种先进科学技术的研发。比如尝试使用各种极限参数来检验发动机的热力学表现，引入了先进燃烧概念，使用多级智能涡轮增压技术以及复合式热发动机技术。同时尝试减少发动机排放和使用先进的尾气处理技术并安装更先进的发动机监控传感器以及研发自适应控制智能发动机等技术。

2.3 替代性燃料要求发动机进行改造

虽然替代性燃料可能需要专门的船用发动机和存储技术，但这些燃料变型中有许多会与船上技术兼容，因为在大多数情况下仅需要对现有发动机进行改造而不需要完全替换现有发动机。挪威船级社 2020 年对发动机技术系统在整个船队的分布进行了建模，结果显示双燃料（甲醇和氨气）发动机和燃料系统（双燃料甲醇内

燃机和双燃料氨气内燃机)是最有前景的解决方案,预计到本世纪中叶,许多船舶将改装成甲醇或氨气发动机和燃料系统,主要因素是甲醇和氨气发动机和燃料系统具有燃料价格低和发动机改造成本较低的优势,同时这些燃料在船上的存储成本要低于其他燃料(如氢气)。不过氨气发动机和燃料系统目前还不够成熟,还有重大的技术和安全挑战需要去面对和解决。

3 船舶运营的节能减排技术

除去上述替代性燃料和船舶发动机的改进,对船舶的运营进行优化也可以取得明显的减排效果,在一些情况下,节能效果甚至可以高达50%。

3.1 设计与使用高效螺旋桨

使用现代高效螺旋桨不仅可以降低油耗并且不需要增加脉动压力水平,甚至可以不改变螺旋桨主尺度。因此设计使用高效螺旋桨可以成为实现碳减排的一个重要抓手。

在叶数以及直径的情况下,可采用以下方法来升发动机效率:增加转速;减小桨叶面积或改变叶片形状;通过修改径向螺距分布来优化载荷分布;采用唇形后倾叶梢概念。尽管改变螺旋桨设计可以增加发动效率并降低油耗,不过应该值得注意的是柴油机的负荷限制范围,如果超出限制范围则会得不偿失。

3.2 航速优化、航线优化及纵倾优化

对船舶的航速进行优化是指将航速作为变量,通过已经获得的风浪和洋流等参数去建立数学模型,然后计算得出这些参数对油耗的影响系数,最后通过动态优化得到最佳节能航速曲线。目前已有根据上述理论而研发出的最佳航速控制系统,实际应用测试显示节能效果最多可达3%。

船舶的航线优化是指通过选择航线克服风浪和洋流阻力来实现节能。这种节能措施是比较常用的节能措施之一并且市场上已有公司提供航线优化系统。Force Technology公司研发的SeaPlanner已经应用多年并且其节能效果可达2%。航运公司可以根据此软件提供的建议来合理安排节能策略。

此外航运公司还可以考虑对风浪和洋流等参数进行仿真和建模,然后将其对纵倾的实时影响纳入模型,这样就可以实现船舶的动态控制。在这个过程中,纵倾可以理解为航速、船舶吃水、水动力、载重、螺旋桨推

力、舵角甚至风流态势的函数,然后通过动态优化就可以开发出更为直观的可视化平台,进而构建出易于操作的纵倾动态控制系统。

3.3 航程性能监控分析

上述介绍了多种可以实现节能减排的手段,但是船舶运输是一个复杂的系统工程,因此如果能从整体能效出发来对系统的节能技术进行协调整合才能达到最优规划、最优控制、减少油耗并最终实现节能减排的目的。

近年来国际上的节能技术开始对生产全过程进行综合优化和监测。因此有一些综合节能系统开始在市场上出现。这些航行性能监控分析系统整合了船舶的五大性能因数:功率、船型、螺旋桨、燃油消耗率和燃油消耗量。他们通过传感器来采集船舶本身的各种性能数据以及风浪和洋流数据,然后使用数据进行数学建模,最终实现数据的可视化,在操作过程中船员可以看到实时准确的航速和主机功率等参数。目前Eniram公司开发的清污分析平台,其可以根据长期的船体污损数据,来交叉对比分析在不同海域船舶运行的性能数据。通过这些数据可以建立不同航线和航段、相似船舶的船体污损数据库,这些数据库可以被用来分析污染趋势、船舶的敏感性、船舶在不同海域的油耗、船体污损的发展趋势以及提醒是否需要船体清污维护。此外它还可以对船舶的短期和长期性能进行分析,最终制定船体清污时间表和船舶节能方案。Eniram公司的产品已经在实船上得到应用,多次的实船检验证明该项节能可达5%。

4 日本经验借鉴:航运减排计划

2020年5月,日本土地、基础设施、运输和旅游部(MLIT,以下简称“日本运输部”)与研究机构和公共机构合作,制定了零排放国际航路路线图,汇总了零排放船舶实用化的进度表,根据进度表,面向完全不排放二氧化碳的氢、氨燃料实用化,到2024年,开发出专用的发动机、涡轮和燃料箱;2026年,在连接国内港口的内航船舶上进行实证试验。日本国土交通省和海事界希望推进对于使用氢、氨等新燃料船舶的开发,力争到2028年实现商业航运。

这份日本的零排放国际航路路线图,重点向业界展示了由MLIT、日本船舶技术研究协会和日本财团共同起草的四个新型“零排放生态船舶”设计概念——氢燃料船(C-ZERO Japan H₂)、氨燃料船(C-ZERO Japan

NH₃)、船上二氧化碳捕获船(C-ZERO Japan Capture)和超高效液化天然气燃料船(C-ZERO Japan LNG&Wind)。据介绍,上述四个新型“零排放生态船舶”或将实现减少90%以上的温室气体排放量(与2008年排放量相比),而且为建造零排放的2万TEU型集装箱船或8万载重吨级散货船提供了技术可行性。为满足IMO的严格环保法规,几乎所有的航运企业都在尝试低碳环保的替代燃料。

4.1 氢燃料船(C-ZERO Japan H₂)

氢燃料船项目计划开发设计两种不同船型和尺寸的液化氢燃料船舶,包括2万TEU型集装箱船和8万载重吨级散货船。这些设计基于以下假设:一是液化氢用于船用燃料时,可在包括欧洲、中东、澳大利亚、日本和南美洲的五座主要港口加注;二是2万TEU型集装箱船和8万载重吨级散货船的单程巡航航程,分别为11500海里和7000海里;三是主机采用双燃料往复式发动机。在进行概念设计时,须重点解决氢燃料发动机和燃料供应系统、燃料箱升级、热保护系统和防止氢气泄漏等技术问题。

4.2 氨燃料船(C-ZERO Japan NH₃)

氨燃料船项目以澳大利亚航线上的8万载重吨级散货船为模板进行概念设计,主机采用通过甲醇、液化石油气或其他液体燃料作为引燃燃料的双燃料往复式发动机。鉴于氨燃料的阻燃性,发动机将配备一个引燃燃油喷射阀来控制点火。与同类型常规船舶相比,氨燃料船预计可减少91.9%的二氧化碳排放量。但在进行概念设计时,同样存在一些技术问题须解决:一是氨的毒性和其他特性风险,需控制氨气泄漏;二是在紧急情况发生时向大气中排放的措施;三是氮氧化物和一氧化二氮的排放等。

4.3 船上二氧化碳捕获船(C-ZERO Japan Capture)

船上二氧化碳捕获船项目的目标,是设计研发一种配备船上二氧化碳捕获系统的2万TEU型集装箱船。该型船舶将使用可以甲醇为燃料的双燃料往复式发动机作为主机,配备吸收二氧化碳的液体胺和二氧化碳存储系统,预计可捕获85.7%的二氧化碳排放量,并有可能随着技术发展,捕获90%以上的二氧化碳排放量。待船上二氧化碳捕获船设计完成并进行商业运营后,将被投放至远东-西北欧航线。

4.4 超高效液化天然气燃料船(C-ZERO Japan LNG &

Wind)

超高效液化天然气燃料船项目是结合液化天然气燃料(LNG)和其他技术而开发的概念,设计模型同样包括2万TEU型集装箱船和8万载重吨级散货船,预计将使船舶能效较2008年提高80%以上。超高效液化天然气燃料船计划装备混合对旋螺旋桨,同时改进船型、优化速度、船体大型化,采用电力推进、LNG燃料和其他创新节能技术应用(如风力推进系统和空气润滑系统)。根据船舶能效设计指数(EEDI)计算的话,超高效液化天然气燃料船将比常规同型船舶的平均效率提高86%。相对而言,在超高效液化天然气燃料船设计中存在的技术挑战被认为相对较少,因为其是基于现有的节能技术而出现的船舶。但是,仍有必要修订IMO的有关规则和准则,以便为这类船舶的实际应用提供一个良好的环境。

2019年,日本朝日油船、商船三井、三菱商事、船舶经纪公司、东京电力公司、出光兴产和东京海上日动火灾保险公司共同组建了“E5联盟”,旨在通过各种有效的举措建立远洋航运基础设施服务,帮助日本企业开发、实现零排放船舶的目标并使其尽快投入商用。2020年12月,日本商船三井在名古屋港运营的一艘拖船首次使用生物燃料完成试运行。这艘拖船所采用的生物柴油燃料由Euglena位于横滨的生物喷气柴油生产示范工厂提供,以绿虫藻和废气食用油为原料,可在不改变内燃机的情况下用于船舶柴油机。这种燃料不含硫,燃烧过程中的温室气体排放也低于化石燃料。2022年3月份,由“E5联盟”成员研发制造的全球首艘零排放电力驱动油船(由大量锂离子电池供电)将进入市场,而这也为日本的零排放国际航运路线图提供了可见的现实基础。不久前,包括日本JEF钢铁、日挥株式会社和商船三井在内的九家公司在“日本碳捕获与再利用研究小组”内又成立了一个工作组,探索将甲烷化用于零排放船舶燃料的可行性,研究潜在的甲烷化燃料回收供应链,以用于助力航运业减排。

5 企业实践:马士基集团的减排计划

为了应对全球减碳的需求,全球最大的航运公司马士基集团宣布将于2023年启用以甲醇为燃料的支线集装箱船舶。并且力图使马士基未来所有新建船舶都使用清洁燃料并且向他们的客户给出多个碳中和产品的选

择，激励燃料供应商扩大新型清洁燃料的生产。同时马士基还希望在未来的三年内解决氨气和酒精燃料的安全性问题，并在三年内订购使用这些替代燃料的船舶。对马士基来说，脱碳的主要动力来自客户要求供应商的供应链更环保、发展更可持续。在马士基 200 个大客户中，约有一半对供应链已经设定或正在设定零碳目标。

马士基甲醇支线集装箱船舶设计运力约为 2000TEU，将部署在区域航线网络中。马士基计划使用甲醇或生物甲醇来为该船舶提供动力。目前，全球大约有十几艘化学品运输船使用甲醇燃料，但使用的是由煤或天然气制成的传统甲醇。马士基的新集装箱船将是第一艘专门使用绿色甲醇的商船，所面临的最大挑战是找到足够的绿色甲醇来按计划投运零碳货轮，因为生产绿色甲醇的成本极高，目前其总产量仍然微不足道（据国际可再生能源署的数据，目前每年约 22 万吨），即使全部用于运输，也不到该行业年燃料消耗量的 1%。相比之下，传统的甲醇应用广泛，使用化石燃料制造成本相对较低。在中国制造商的推动下，全球产量在过去十年几乎翻了一番，达到每年 1 亿多公吨。假如要使绿色甲醇供应达到规模，监管者将需要为二氧化碳排放确定较高的价格，或采取类似措施激励（或迫使）企业购买更清洁的燃料。可再生电力项目必须继续成倍增长，而碳捕获技术将需要大幅扩大规模以降低自身成本。而且，尽管甲醇与石油燃料相似，但它的化学性质不同，航运业需要在世界各地的港口为甲醇建造特定的燃料基础设施。

航运业在未来实现碳中和需要多个行业的合作、创新、测试和运营协同。马士基正在推进多种碳中和燃料的应用探索，在未来较长时间内，多种燃料解决方案将并存。马士基宣布，未来几年的绝大部分投资都将用于开发“碳中和燃料”，包括甲醇、生物甲烷和氨。甲醇作为油基燃料的替代品，只需对船舶的发动机和燃料系统进行相对较小的改动，也很容易储存在船上，不像电池或氢罐占用太多的货舱空间，被认为是短期内货船燃料的最佳选择。长期来看，航运燃料的最佳可能是氨和氢，但这两种零碳燃料仍然处于商业应用开发的早期阶段。

6 结论

我国相关航运公司需要高度关注国家碳达峰碳中和

和 3060 战略部署以及 IMO 等国际组织的有关政策动向，深入研究制定应对策略。应尽快摸清船队情况底数，为后续选择运营能效指标、重点船型以及船队建设和更替等，提前做好策划与安排。在现有船舶技术能效方面，建议对船队不同船型对 EEDI 的满足情况进行识别，对主力船型和较难满足 EEDI 要求的船型进行重点关注。对于船队中可通过降低功率来满足 EEDI 要求的船舶，可及早考虑在降低功率后，对其航线及经营的影响；对降功率仍不能实现 EEDI 要求的船舶，应提前考虑论证相应的节能技术手段提早对船期及进坞时间进行安排。

对于新造船，在船队更新和中长期规划时应考虑 IMO 相关战略及政策对使用传统燃料提出的挑战以及低碳（无碳）燃料技术的发展和趋势。建议相关设计单位和产品厂商积极开展新船型储备，针对国际上加快并提前实施 EEDI 要求的趋势，提前进行船队更新的战略部署，优先考虑能够满足 EEDI 削减 40%–50% 的高能效新船型 / 或考虑能够直接满足无碳排放的新能源船型储备。

参考文献：

- [1] 孟晓东, 袁章新. 营运船舶节能减排技术进展 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2014, 37(1): 35–38.
- [2] 王思佳. CCS 助力氢能上船提速 [J]. 中国船检, 2020(9): 15–18.
- [3] 李洋. 凛冬散去, 船市或开启修复性行情 [J]. 珠江水运, 2021(4): 35.
- [4] 薛龙玉. “后浪”来袭 [J]. 中国船检, 2021(1): 21–25.
- [5] 冯明志. 船舶柴油机减排新形势与技术发展 [J]. 上海造船, 2009(4): 34–37, 41.
- [6] 黄雪娇. 基于阴极电位控制理论的船舶节能减排技术研究 [D]. 辽宁: 大连海事大学, 2012.

