



航运低碳发展展望2021



目录

一	多重驱动下的航运减排政策法规动向	3
	（一）全球绿色低碳转型背景下中国行动展现大国担当	3
	（二）国际海事组织积极主导下航运减排战略稳步推进	4
	（三）国际航运温室气体减排进程中多方呼吁加快行动	7
二	多措并举的船舶减排之路	9
	（一）能效技术措施将贯穿始终	9
	（二）船用清洁燃料担当减排C位	10
	（三）动力装置与系统多元化发展	14
	（四）碳捕捉、利用与封存，“明日之星”潜力可期	16
三	多维视角下的航运减排当下与未来	18
	（一）风云激荡：减排方向的不确定性与减排目标和路径的不确定性交织相伴	18
	（二）重装出发：零碳清洁燃料将在2030年前后实现商业化应用	19
	（三）负重前行：低碳和零碳燃料应用过程中的挑战不容忽视	19
	（四）场景为王：不同的航运领域需要量身定制的最佳方案	20
	（五）持续驱动：脱碳过程中经济性因素的考量不可或缺	20
	（六）携手同心：各相关方协同联动才是实现航运减排目标的正确路径	21

一 多重驱动下的航运减排政策法规动向

（一）全球绿色低碳转型背景下中国行动展现大国担当

2015年6月30日，中国向联合国气候变化框架公约秘书处提交了应对气候变化国家自主贡献文件《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》，提出了2020年后强化应对气候变化行动目标以及实现目标的路径和政策措施。2020年9月22日，中国国家主席习近平首次在第75届联合国大会上郑重承诺，将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

2021年9月22日，中共中央、国务院印发了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（简称《意见》），《意见》对碳达峰碳中和这项重大工作进行了系统谋划、总体部署。2021年10月24日，国务院印发了《2030年前碳达峰行动方案》（简称《方案》），《方案》聚焦2030年前碳达峰目标，对阶段性目标进行了进一步细化。到2025年，非化石能源消费比重达到20%左右，单位国内生产总值能源消耗比2020年下降13.5%，单位国内生产总值二氧化碳排放比2020年下降18%，为实现碳达峰奠定坚实基础。到2030年，非化石能源消费比重达到25%左右，单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降65%以上，顺利实现2030年前碳达峰目标。

《方案》提出将碳达峰贯穿于经济社会发展全过程和各方面，重点实施“碳达峰十大行动”，其中明确提出交通运输绿色低碳行动：推动运输工具装备低碳转型，到2030年，当年新增新能源、清洁能源动力的交通工具比例达到40%左右，营运交通工具单位换算周转量碳排放强度比2020年下降9.5%左右；构建绿色高效交通运输体系，“十四五”期间，集装箱铁水联运量年均增长15%以上，到2030年，城区常住人口100万以上的城市绿色出行比例不低于70%；加快绿色交通基础设施建设，有序推进充电桩、配套电网、加注（气）站、加氢站等基础设施建设，提升城市公共交通基础设施水平。



在《意见》的指引下，按照《方案》的规划，中国将在国家重点研发计划中设立碳达峰碳中和关键技术研究与示范等重点专项，开展低碳零碳负碳关键核心技术攻关，推动低碳零碳负碳技术装备研发取得突破性进展；在水路交通运输领域，将提高船舶能效标准，开展低碳/零碳能源水上应用试点，并在政策、资金、技术等方面对试点给予支持，推动新能源、清洁能源、非粮食原料先进生物液体燃料和可再生合成燃料等在船上应用。

《意见》为国内航运碳减排指明了方向。我们认为，面向碳达峰目标，国内船舶减碳路径应以“节约优先”为导向，加强船舶通过应用能效措施实现节能减排，并重点推进LNG燃料和电池动力的应用。面向碳中和目标，总体上应遵循“安全降碳”原则，相信业界会在2030年之前针对氢、氨等零碳燃料开展一定规模的试点应用，建立技术储备、积累风险防范经验，为探索面向碳中和目标的安全降碳路径奠定基础。

（二）国际海事组织积极主导下航运减排战略稳步推进

《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》以及《巴黎协定》为全球应对气候变化提供了法律基石和行动指南。其中，航运领域应对气候变化的具体行动由国际海事组织（IMO）按照《联合国气候变化框架公约》及相关协定的总体目标、基本原则和政策框架开展谈判和制定。

1997年，IMO启动了国际海运温室气体减排议题讨论，随后陆续出台了相应的控制措施和技术标准。2016年，在IMO第70届海上环境保护委员会（MEPC）上，IMO通过了船舶温室气体减排战略路线图，初步确定了温室气体减排“三步走”战略实施时间表。按照路线图设定，IMO在2018年的MEPC 72通过了船舶温室气体减排初步战略，目标为：到2030年，全球海运每单位运输活动的平均二氧化碳排放与2008年相比至少降低40%，并努力争取到2050年降低70%。国际海运温室气体排放尽快达到峰值，到2050年，温室气体年度总排放量与2008年相比至少减少50%，并努力通过愿景中提出的与《巴黎协定》温控目标一致的减排路径逐步消除海运温室气体排放。为实现这一减排目标，初步战略提出了相应的短期、中期和长期措施。





1. 短期措施制定逐步尘埃落定

短期措施是要求IMO在2018年和2023年之间最终确定的措施，旨在实现IMO 2030年减排目标。

对照目标，IMO从2019年开启了对现有船舶温室气体减排措施的审议，并在今年6月举行的MEPC 76上通过了关于现有船舶能效的法定要求：自2023年起，所有适用船舶既要满足技术能效（EEXI）要求，还要满足营运能效（CII）要求，并需对船舶按照年度营运能效进行分级（A-E级）。

为了便于规则落地实施，MEPC 76还通过了EEXI和CII计算验证相关技术导则。考虑到目前关于EEXI和CII的技术验证方面仍存在一定的不确定性，IMO在MEPC 76会后启动通信工作组开展对与现有船能效实施相关的其他配套程序、指南的审议和修订工作。这项工作将在2022年完成。

针对新造船的能效要求，2019年，IMO在MEPC 74会后成立了专门的通信工作组，开始对船舶能效设计指数（EEDI）第四阶段（Phase 4）进行讨论和制定，审议引入EEDI Phase 4的可行性及其对IMO温室气体减排战略的影响。工作组向MEPC 75和MEPC 76分别提交了中期报告和最终报告，但是受疫情及会议安排的影响，对该议题的审议被推迟至本年度11月召开的MEPC 77上进行。



此外，在2021年9月召开的温室气体委员会第9届会议（ISWG-GHG 9）上，IMO提出了针对包括CH₄和N₂O多种温室气体在内的燃料全生命周期温室气体/碳强度评估导则草案，首次提出针对燃料全生命周期的评估框架，并首次将航运温室气体相关要求的范围扩大至CO₂以外。根据会议讨论结论，这一议题将交由11月召开的MEPC 77进一步审议。

2. 中长期措施制定尚待共识

中期措施是要求IMO在2023年至2030年之间最终确定并达成一致的措施。中期措施分为直接减少船舶温室气体排放的措施和帮助减少船舶温室气体排放的措施，主要包括：

- (1) 有效采用替代性低碳燃料和零碳燃料的实施方案；
- (2) 新造船和现有船舶的营运能效措施；
- (3) 激励温室气体减排的新型/创新型减排机制。

长期措施是要求IMO在2030年以后最终确定和达成的措施。主要包括两项：

- (1) 大力开发和提供零碳或非化石燃料，以实现下半世纪的航运脱碳；
- (2) 鼓励和推动其他适合的新型/创新型减排机制的普遍应用。

在众多的中长期措施中，通过市场机制控制温室气体排放应对气候变化是航运推动低碳经济转型的重要政策工具。同时，市场机制也因其重要的经济属性成为众多中长期措施中的谈判和讨论焦点。目前在讨论的市场机制方案主要有：

(1) 温室气体税（碳税）：对国际航行船舶每年按燃料实际消耗或温室气体实际排放量来进行无差别强制征收温室气体税。

(2) 碳强度分级及罚款机制：在现有营运碳强度或燃料全生命周期碳强度核算及分级机制基础上，对碳强度高于当年基线一定比例的船舶引入罚款机制。

(3) 全球航运碳交易：参照现有的“总量控制与交易 (Cap-and-Trade)”模式建立全球航运业市场交易机制，即设置国际航运业温室气体排放总量上限，参与碳市场的航运企业每年按照其实际排放量，以拍卖或其他分配的方式获得并清缴相应的碳配额。

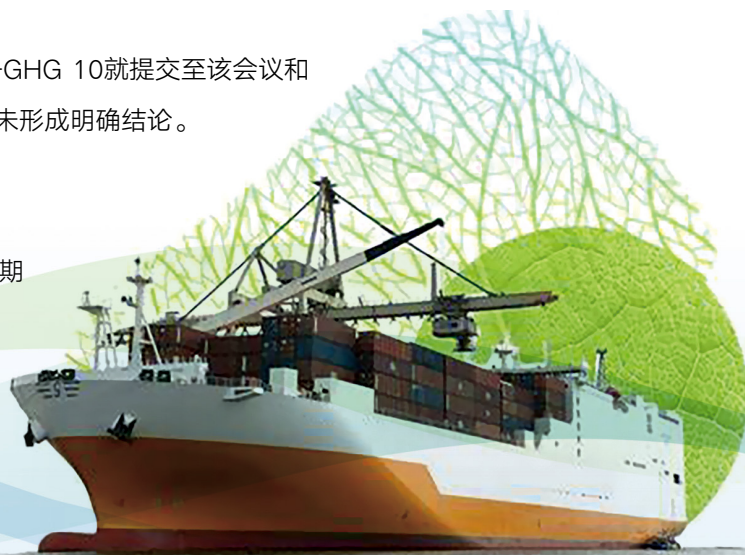
不同的市场机制方案有其不同的特质和优劣势，关于市场机制的最终答案将会对行业脱碳带来方向性的影响。因此，对市场机制的审议成为中长期措施制定中最大的不确定因素。

在今年中召开的MEPC 76上，IMO批准了针对中长期措施的审议工作计划。计划分三个阶段实施：第一阶段（2021年春到2022年春），整理并初步审议各方所建议的措施；第二阶段（2022年春到2023年春），进一步评估和遴选中长期措施；第三阶段，完成措施的最终审议，具体时间将在IMO制定最终战略时确定。

按照这一工作计划，2021年10月底召开的ISWG-GHG 10就提交至该会议和MEPC 76的市场机制相关提案进行了统一审议，但尚未形成明确结论。

3. 未来规则制定走向初见端倪

目前IMO已经基本完成短期措施的制定，包括短期技术性措施和国家行动计划等政治性措施，同时也已开启制定燃料全生命周期评估（LCA）导则和市场机制方案以促进替代燃料使用等中长期措



施的制定。在欧盟等相关提案的推动下，IMO航运温室气体减排要求的制定进程正在加快。目前已经推出了航运燃料全生命周期评估导则的草案文本并确定了基本的计算原则和方法，在ISWG-GHG 10审议的不同市场机制方案中，也都提及了对燃料全生命周期排放的核算问题。可以预见，将技术措施、营运措施和市场机制融为一体的“燃料温室气体排放强度限制”和“温室气体排放总量控制与交易”联合要求框架将为未来航运温室气体减排措施方案构建新的体系。

与此同时，IMO温室气体减排初步战略目标的调整，将是各相关方围绕全球气候治理的主导权、确保技术优势和可持续发展等方面的又一场角力。航运业采用替代燃料/能源是实现温室气体初步排放战略的关键，相应的机制应能促进新能源技术的研发和应用。从欧盟新立法以及行业协会和巨头的主张来看，IMO目前提出的温室气体减排初步战略还可能会被进一步向前推进。作为IMO温室气体减排方面的纲领性要求，温室气体减排初步战略的修订将对航运业产生巨大影响。

（三）国际航运温室气体减排进程中多方呼吁加快行动

当前，联合国、部分国家、非政府组织和区域性组织纷纷呼吁加快国际航运业温室气体减排步伐。

2021年10月，联合国秘书长古特雷斯在第二届联合国全球可持续交通大会开幕视频致辞中，特别呼吁让零排放船舶成为默认的选择，并在2030年前投入市场，到2050年前实现航运零排放。

美国、英国、挪威、哥斯达黎加、欧盟27个成员国、基里巴斯、马绍尔群岛和所罗门群岛等主管当局向IMO提出了2050年国际航运业实现温室气体零排放的目标。这些提案将在2021年11月下旬召开的MEPC 77上重点讨论。

非政府组织方面，零碳联盟在2021年9月召开的联合国大会期间发起“航运去碳化行动呼吁（Call to Action for Shipping Decarbonization）”，提出2030年前部署商业上可行的零排放船舶、2050年实现航运业净零碳排放等目标。目前共有160多家公司/组织签署该“行动呼吁”。零碳联盟已在第26届联合国气候变化大会（COP 26）之前将“行动呼吁”发给各国政府，促请各国政府在2023年IMO通过温室气体减排最终战略时设定净零排放目标。国际航运公会（ICS）等国际行业组织向IMO提交了对全球航运企业征收碳税的提案，提议设立50亿美元的低碳/零碳技术研发基金。同时，ICS向IMO提议制定2050年航运业净零排放的目标。国际船级社协会（IACS）等其他国际组织也在加快对国际航运业去碳化方面的研究，有针对性地制定相应的战略和工作路线图。

特别需要关注的是，区域性立法带来的影响不容小觑。2021年7月14日，欧盟委员会正式发布一揽子立法与政策提案（“Fit for 55”）。其中，有2个提案与航运业关系最密切，即“欧盟排放交易体系（EU ETS）指令”和“欧盟海运燃料（FuelEU Maritime）条例”。

欧盟排放交易体系指令修订草案拟将航运业纳入现有EU ETS，并为适用范围内的5000总吨以上船舶设置三年过渡期（2023-2025年），参与碳市场的航运企业每年按照其实际排放量的20%、45%、70%的比例清缴碳配额，2026年起需完成100%履约。未能清缴足够配额的公司及旗下船舶将面临罚款、滞留、

驱逐、禁入等处罚。该草案将加快IMO 温室气体减排中期措施的审议进程，并更加凸显碳排放交易在市场机制中的位置。该指令修订草案如获欧盟通过，预计将有12400-15000艘船舶和2000-2500家公司受到影响，约占全球船队规模的38%，其中50%的公司位于第三国。中国、印度、日本、新加坡、韩国、美国、英国等12个国家受到的影响最大，赴欧航线运输成本和公司的管理成本将大幅增加。

欧盟海运燃料条例（简称“条例”）拟限制抵达、停留、驶离欧盟成员国港口的船舶使用能源的温室气体（GHG）强度，并强制在港船舶使用岸电或零排放技术。该条例适用的5000总吨以上船舶使用能源的年平均GHG强度限值将以2020年海运GHG强度参考值为基线，按如下比例分阶段加速折减：

- 2025年1月1日起：-2%；
- 2030年1月1日起：-6%；
- 2035年1月1日起：-13%；
- 2040年1月1日起：-26%；
- 2045年1月1日起：-59%；
- 2050年1月1日起：-75%。

条例还规定，自2030年1月1日起，除特殊情形外，停靠欧盟成员国港口的集装箱船和客船所有用能必须来自岸电。

根据该条例，船舶可通过余额转移或联合池（pool）的灵活方式实现合规。未持有有效的欧盟燃料（FuelEU）符合证书的船舶将面临罚款、滞留、驱逐、禁入等处罚。该条例对IMO立法进程、国内外航运业、国际贸易影响的广度和深度都将超过EU ETS指令。首先，条例对船用燃料全生命周期GHG强度立法在海运业尚属首次，或将引发连锁反应。其次，严格的GHG强度限值和连接岸电要求将影响船东对新造船的选择，同时还会影响到船用燃料生产和供应环节，对整个船用能源价值链产生颠覆性的深远影响。此外，这一条例的颁布实施还可能会进一步推动航运公司联营模式的发展，通过联合池合规、降低空载航程、提高船舶利用率等手段提升经济效益，从而改变现有航运业的运营模式。

综上所述，在有关方面的影响、推进和推动下，IMO预计将制定更具雄心的政策措施，这将对IMO温室气体减排最终战略的制定和未来航运业减排路线图、时间表产生重大而深远的影响。



二 多措并举的船舶减排之路

在IMO温室气体减排初步战略及相关各方的积极推动下，航运业温室气体减排在能效措施、清洁燃料、动力装置与系统、碳捕捉、利用与封存等方面对可行的技术路径进行了可贵的探索，积累了丰富的数据资源和成功经验。

（一）能效技术措施将贯穿始终

能效措施主要包括技术能效措施和营运能效措施两大类。

技术能效措施可通过降低船舶阻力、提高推进装置效率等方面技术应用，提高船舶整体能效水平、减少燃料消耗和排放，主要包括型线优化、船舶轻量化、气膜减阻、涂层减阻、高效推进装置、水动力节能装置等技术。

其中，船舶轻量化是诸多技术能效措施中的重要一项，主要可从结构设计、制造工艺、轻质材料等三方面综合考虑。结构设计方面，需要在保证船体结构安全的前提下尽量减轻船体重量，做到“材尽其用”；制





造工艺方面，包括先进焊接技术、冲压成型等技术工艺的应用；轻质材料方面，包括高强度合金或高性能轻质材料在船舶建造中的应用。

技术能效措施具有相对较高的减排潜力，但投资成本也较高，应用的对象主要是新造船，且不同技术能效措施适用的船型也存在差异。目前，型线优化、高效螺旋桨等已成为常规技术手段，但不能保证中大型散货船和油船满足EEDI第三阶段的要求，应用气膜减阻、风力助推等具有显著节能减排效果的创新能效技术，是可行的解决方案之一。

营运能效措施可在船舶营运过程中从操作管理层面提高船舶能效水平，从而减少船舶的燃料消耗及排放，主要包括航速优化、纵倾优化、货物操作优化、设备管理优化等措施。营运能效措施涉及营运操作方面的改进和优化，无须较大的系统设备投资。从降低燃料成本的角度出发，现有船更倾向于选择营运能效措施。

在航运推进能源低碳转型过程中，行业可继续深入开展技术能效与营运能效措施研究，通过技术能效措施与营运能效措施应用相结合的方式，进一步强化温室气体减排效果。总体而言，无论是技术能效措施还是营运能效措施，实船应用后能够达到的实际减排效果都会受船型、船舶尺度、营运工况、船舶状况等多种因素影响，碳减排潜力难以满足中长期的减排目标。尽管如此，从减少燃料消耗、提高经济性的角度出发，船舶应用能效技术的需求将贯穿始终。

（二）船用清洁燃料担当减排C位

近年来，业界围绕各种低碳、零碳燃料开展了不同程度的研究及实践，为航运业实现温室气体减排目标提供了多种可能的方向。然而，船舶燃料低碳转型是一项长期性、复杂性的系统工程，对清洁燃料应用前景的研判，需要综合考虑多方面因素：

1. 航运业处于能源产业链下游的使用终端，依赖于上游能源产业的供应能力；

2. 清洁燃料在船上的应用与加注、储供、动力等环节的技术成熟度相关联；
3. 根据含碳量的不同及制备工艺不同，清洁燃料的温室气体减排潜力存在差异，环境适应性不尽相同；
4. 船用清洁燃料的发展应有较为完备的技术法规支撑，做到严控风险、确保安全；
5. 船用燃料的低碳转型应考虑经济成本可接受，主要包括初始投资成本和营运成本。

基于此，针对液化天然气（LNG）、甲醇、生物柴油、氢、氨等清洁燃料，从可获得性、经济性、技术成熟度、环保特性、政策法规等方面对其船用适应性进行了不同时期的综合分析和研判，分析情况见图1-图3。

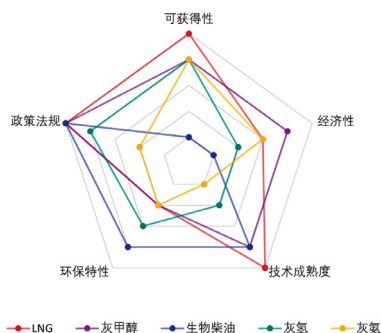


图1 清洁燃料船用适应性综合分析 (2021年)

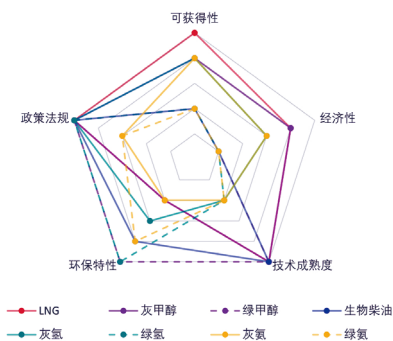


图2 清洁燃料船用适应性综合分析 (2025年)

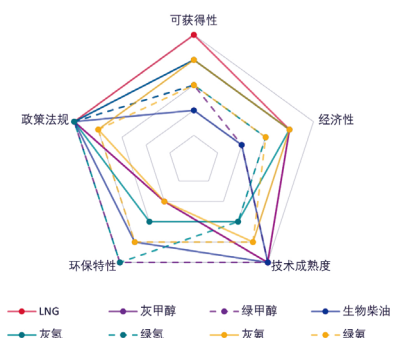


图3 清洁燃料船用适应性综合分析 (2030年)

综合上述5方面因素，当前优选的船用清洁燃料依次为LNG、甲醇、生物柴油、氢和氨燃料。鉴于产业链上游绿色燃料的生产尚未形成规模，当前难以大范围推广使用。未来随着绿色燃料制备技术和清洁燃料船上应用技术的逐步成熟，绿色甲醇由于其更为优异的环保特性，预计将超过LNG成为最具竞争力的清洁燃料。待技术逐渐成熟和产业链配套逐步完善，各项成本将进一步降低，绿氢和绿氨的潜力逐步被释放后，预计将会大规模推广应用。

1. LNG燃料

与其他替代燃料相比，目前LNG燃料具有技术成熟度高、法规完备性好、能量密度高等优点，正迅速成为船用燃料的主要青睐对象。近几年，以LNG作为主燃料的双燃料动力船舶呈现爆发式增长，据相关机构统

计预测，2021年LNG动力船订单已接近总吨位30%，2025年全球手持订单中LNG动力船超过60%。目前，LNG双燃料动力船舶的应用船型已覆盖油船、集装箱船、散货船、邮轮和客渡船等主要船型，国内应用水域已覆盖沿海、长江、珠江和京杭运河等主要水域。

未来一个时期，随着全球船舶动力技术朝着低碳、零碳方向发展，向新燃料的过渡将基于船舶的更换和船队的扩张，这意味着船队完全转向可再生零碳燃料尚需经历过渡阶段，而这期间LNG作为替代燃料无疑将扮演重要角色。从世界范围来看，LNG动力船舶发展引起了各国重视，在新建船舶和燃料补给基础设施方面都投入较大，LNG产业链和水上应用供应链逐渐成熟，但整体发展还面临一些挑战，主要包括：

(1) LNG中含有碳元素对二氧化碳减排贡献度有限，使用过程中甲烷逃逸会对温室气体排放带来的一定影响。国际气体燃料动力船协会（SGMF）最新报告结论表明，通过技术改进升级使得甲烷逃逸降至最低水平，LNG作为船舶燃料的全生命周期减少温室气体排放最高可达24%；

(2) LNG价格不稳定，不同季节不同地区LNG气源供应不稳定，价格波动较大，缺乏合理的定价机制和供应体系，导致船东难以形成稳定预期。

2. 甲醇燃料

甲醇作为全球大宗化学品之一，具有产业链成熟、产能充足、储运方便、环境友好等优势，且作为内燃机燃料应用已有近50年历史，在目前节能减碳的大背景下，正得到航运业的广泛关注，已有相关航运巨头将甲醇燃料作为实现航运中长期减碳目标的重点发展方向。甲醇制备方面，利用煤、天然气、焦炉气等原料制备化石基甲醇的技术已经非常成熟，但如需从全生命周期角度考虑燃料碳排放，化石基甲醇不能满足未来碳减排目标，应大力发展电合成绿色甲醇和生物质甲醇。安全性方面，甲醇燃料在船上应用会带来燃爆、毒性、腐蚀/溶胀等风险，但基于风险评估制定的船舶安全技术标准，可以从泄漏探测、人员防护、材料选择、消防等方面采取措施并合理地控制风险，保证船舶安全。大气污染物排放方面，甲醇发动机具有良好的NO_x和SO_x排放性能，但也存在潜在的甲醇、甲醛等非常规排放问题，需要进一步研究和评估。技术成熟度方面，虽然船用甲醇燃料供应系统、船用甲醇发动机目前实船应用经验不足且市场可用产品选择不多，但在工业界甲醇燃料动力系统涉及到的加注、储存方面目前技术成熟，经验丰富，船用系统、产品的开发可借鉴工业界的经验。规范法规方面，国际上已制定《甲醇/乙醇燃料船舶安全暂行指南》，国内即将出台相关法规和指南，船舶设计、建造和检验的技术标准障碍有望快速解决。但就实际而言，仍需考虑甲醇价格、燃料舱容积等因素对经济性、船舶布置的影响，同时还需加强船用甲醇燃料加注设施建设，完善相关监管要求等。

3. 生物柴油

目前，受到业界关注且在实船上有一定应用经验的生物柴油主要是脂肪酸甲酯（FAME）和氢化植物油（HVO）。FAME在氧化稳定性、腐蚀性、低温流动性等方面还存在一定问题，目前船用燃料油国际标准（ISO 8217）仅允许在规定体积比例内（7%）与船用柴油（MGO）掺混使用。HVO理化性质与MGO类

似，满足ISO 8217关于馏分型燃料油的标准，无需与石化柴油调和便可在现有柴油机和基础设施中兼容使用。从全生命周期角度看，生物柴油的温室气体排放量主要取决于其生产原料和生产工艺。从经济性方面看，生物柴油的价格受生物质原料供应、生产转化工艺等因素影响较大，造成价格较高。同时，能源作物及其残余物等植物类生物原料的供应量和价格可能存在季节性波动，餐厨废油等油脂类生物质原料的供应量较为有限，这些因素均会造成生物柴油价格较高且存在较大波动。从转化工艺方面看，加氢处理的成本比酯化反应高，所以在生物质原料相同的前提下，HVO的价格高于FAME。

4. 氢燃料

氢是一种绿色、清洁、高效、来源广泛的二次能源，其在船应用目前仍处于起步阶段，从长远来看，氢燃料是航运业零排放解决方案的重点发展方向。业界正围绕氢燃料在内河和近海船舶上的应用开展试点研究，相关船用规范标准、技术装备、基础设施等正在逐步建立、发展和完善。从全生命周期温室气体排放来看，未来的制氢方式将从化石能源转向可再生能源制取。从经济性角度出发，目前终端氢气价格昂贵，但随着氢能市场规模的扩大、技术的成熟，氢燃料成本未来将持续降低。储氢技术方面，现阶段内河和近海船舶主要采用陆上应用较为成熟的高压储氢技术，未来为满足国际远洋航行船舶的续航里程需求，尚需进一步发展能量密度更高的储氢技术，包括液氢、金属氢化物、液体有机化合物储氢和在线重整制氢等技术。

5. 氨燃料

氨是未来零碳解决方案的重要发展方向之一。作为一种重要的化工原料，氨属于定价透明的全球商品，有着丰富的工业使用经验，生产、运输、交易市场相当成熟。从燃料角度考虑，氨不含碳，其能量密度与甲醇相当，是氢的2倍，且氨易于液化，较为安全，便于储存和运输，是一种理想的能量来源。

但氨作为燃料应用经验极少，燃烧性能较差，直接作为燃料燃烧存在自燃温度高、火焰速度低、可燃极限差、蒸发比热高等问题，且仍会产生氮氧化物排放。因此氨作为内燃机燃料需掺入其他助燃剂混烧，技术成熟度较低，尚无实际使用的案例。氨燃料电池几乎不产生有害气体和温室气体，但其功率密度较低，不能满足船舶应用需要，目前仍处在研发试验阶段。在现有国际法规框架下，由于氨具有毒性，尚无相关技术法规支持氨燃料的船舶应用。在安全性方面，氨具有毒性、腐蚀性、可燃性等特点，船上应用时在储存系统、供应系统、加注设施以及发动机等方面均需特别的防护措施，应采取独特的系统设计、开展额外的专业培训和制定完善的标准指南降低氨在船端应用产生的事故风险。

除此之外，从燃料使用的全生命周期角度看，现行的合成氨工艺仍会导致大量碳排放。通过使用氨燃料减少碳排放的前提是开发基于可再生能源的合成氨工艺，实现氨的廉价、高效、绿色制备。

就目前而言，氨虽是理想的能量载体，但氨燃料的利用仍处于研究阶段，作为船舶燃料也缺乏相关技术标准支撑。进一步突破氨燃料船舶应用技术瓶颈，建立完整的供应链，形成健全的政策法规，是实现氨燃料船舶实际运营的关键所在。



（三）动力装置与系统多元化发展

清洁燃料的发展与动力装置的发展相辅相成，面向船舶应用清洁燃料的发展需求，船舶动力装置与系统呈现出多元化的发展趋势，除内燃机外，燃料电池、锂电池、混合动力系统等新型动力装置与系统在船上的应用越来越多。

1. 内燃机

天然气发动机主要有高压和低压两种技术路线，高压机型在热效率、燃料品质适应性、甲烷逃逸控制、功率范围等方面具有一定优势，低压机型在 NO_x 排放、供气系统复杂程度及成本等方面表现较好。总体而言，天然气发动机技术基本趋于成熟，规模化应用已成为可能，业界正在针对甲烷排放控制、动态特性优化等方面开展技术攻关。

甲醇-柴油双燃料低速二冲程发动机已有成熟产品，并在甲醇运输船上投入应用，基于柴油机改造的甲醇燃料中速机在国外车客渡轮上有一定应用经验，但仍有待进一步发展，业界正针对满足Tier III要求的 NO_x 排放控制方案，以及甲醇、甲醛等非常规排放控制开展技术研发。

氢-柴油双燃料内燃机在小型客船上已开展试点应用，兆瓦级氢-柴油双燃料中速机目前处于研发阶段，业界正在针对氢燃料点火能量低、火焰传播速度快、燃烧温度高等问题，重点突破氢燃料燃烧控制、 NO_x 排放控制等关键技术。

氨燃料内燃机的研发正在进行中，重点针对氨燃料燃烧特性差（自燃温度高、火焰传播速度慢、可燃极限范围窄等）及排放问题（ NO_x 、 N_2O ）研发解决方案。

2. 燃料电池

从现阶段已有燃料电池船舶应用来看，主流的几种燃料电池类型是：

- (1) 低工作温度（100℃左右）的质子交换膜燃料电池（PEMFC）；
- (2) 高工作温度（600-1000℃）的固体氧化物燃料电池（SOFC）和熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）；
- (3) 高温质子交换膜燃料电池（HT-PEMFC，工作温度约200℃）。

PEMFC对纯氢的依赖性较高，从近十余年燃料电池产业链的发展来看，大规模工业制氢已有数十年的历史，相当成熟，使得PEMFC有望在船舶领域形成一定规模应用，但高压氢气体积能量密度较低，因此主要局限在内河和近海应用，很难在长航程的远洋船舶上使用。而HT-PEMFC由于可以使用多种燃料，在一定程度上拓展了PEMFC的应用场景。但高温燃料电池可以直接采用LNG、甲醇、乙醇等易于储存的液态燃料，避免了对于氢气的依赖，大大减少了推广难度，且功率等级正在向兆瓦级突破，远期来看有望成为适用于远洋船舶的技术路线。

3. 锂电池

目前锂离子电池主要有：钴酸锂电池、三元锂电池（镍钴锰）、锰酸锂电池、磷酸铁锂电池和钛酸锂电池，不同的锂离子电池有不同电池性能。目前，能量密度和安全性是重点关注的两方面性能。

从能量密度考虑，锰酸锂电池与钛酸锂电池的能量密度限制了其在动力电池中的应用，磷酸铁锂电池和三元锂电池成为船舶动力电池的首选。单体三元锂电池能量密度高于磷酸铁锂电池，但三元锂电池系统需要钢制外壳和更复杂的冷却系统保护，因此组成系统后能量密度与磷酸铁锂相差不大。就理论能量密度而言，三元锂有更大的开发空间。从安全性考虑，三元锂电池由于正极材料特性，在使用过程中容易触发

热失控，热失控后释放的热量多，且会释放可燃有毒气体的同时释放大量氧气，更易燃易爆，造成安全隐患。而磷酸铁锂电池中的正极材料磷酸铁锂高温稳定，较难分解，在实际使用中具有耐高温、安全稳定性强、循环性能更好的优势。对于船舶而言，安全性能的优先度高于续航里程，现阶段磷酸铁锂电池更符合船舶安全发展的需要。

未来锂离子电池会以追求



高系统能量比为目标，相比传统锂离子电池，固态锂电池的安全性更好，能量密度更高、循环寿命更长，有望成为电池船舶的新选择。

4. 混合动力系统

随着储能技术的快速发展，基于锂电池、超级电容等储能装置与内燃机/燃料电池组成的混合动力系统应运而生。混合动力系统可根据不同工况的推进功率需求灵活选择运行模式，进而改善船舶能效和排放，对工况复杂多变的船舶有较好适应性。应用混合动力系统的船型目前以车客渡船、客船为主，少量内河货船、海工船舶及海洋科考船舶也有应用。相关实船应用案例表明，与燃油动力船舶相比，采用混合动力系统的船舶可实现节能减排约为15%。

5. 核动力系统

自上世纪50年代以来，基于压水堆技术的核动力系统在商船上开始应用，由于具有系统简单、结构紧凑、运行安全等特点，非常适合商船小空间和高货物载重量的设计要求，逐渐成为船用堆的主力堆型。

核动力系统船舶在核燃料供应方面并无大的障碍，在技术上也具有可行性，在减排环保性方面具有巨大优势，基本上可实现所有船舶大气污染物和温室气体零排放，但在经济性方面存在局限性，对大部分商船来说其经济性不乐观。另外，需要注意核动力船舶在安全性方面存在的较大风险，尽管成熟的技术可大大提高抵抗核泄漏和核污染危害的能力，但港口或海上的意外（如操作、维护失误）或有意行为（如恐怖袭击）引起的核泄漏事故是难以承受的安全隐患。随着核反应堆技术的安全性不断提高，以及港口监管措施逐步完善，核动力在功率要求较高的破冰船、挖泥船和超大型货船上将具有一定应用前景。

（四）碳捕捉、利用与封存，“明日之星”潜力可期

碳捕捉、利用与封存（CCUS）是指将CO₂从工业或相关排放源中分离后或直接加以利用或封存，以实现CO₂减排的工业过程。作为一项有望实现化石能源大规模低碳利用的战略技术，CCUS具有大幅度减少传统能源密集型产业整个生命周期内温室气体排放的潜力，是未来减少二氧化碳排放、保障能源安全、构建生态文明和实现可持续发展的重要手段，其大规模产业化实施主要取决于技术成熟度、经济可承受性、自然条件承载力及其与产业发展结合的可行性。

船舶CCUS系统一般由CO₂捕集、CO₂分离、CO₂液化存储和CO₂利用封存四部分组成。首先，尾气进入CO₂吸收塔与捕集吸收液发生接触，经脱碳洗涤后从塔顶排出。其次，捕集了CO₂的吸收液（富液）进入分离塔，在高温下气态CO₂从吸收液中析出，经降温、压缩、干燥、制冷后转化为液态储存在储罐中，而脱碳后的吸收液则经冷却换热后返回吸收塔中准备进行下一循环。最后，对储存的液态CO₂进行利用封存，可以在港口直接交给CO₂运输船，或运输到工厂中做为碱、醇等化工品的原料，或运输到海洋指定位置进行封存，也可以制成干冰投入海底封存。



相较于陆上，船舶应用CCUS受到尾气成份复杂、CO₂浓度较低、舱室空间有限、船上能源受限、运行环境恶劣等因素的限制，在安全性、技术性、经济性等方面存在更多挑战，如：CO₂捕集及存储装置占用空间大、CO₂储存管理安全要求高、设备投资及运行成本较高、配套岸基设施建设不足、减排贡献度评估与CO₂转移认证法规欠缺等，因而在船上的应用前景存在一定的不确定性。

综上所述,从当前船舶低碳技术应用现状和发展趋势来

看，船舶实现减排的技术措施多种多样。单个或多个能效技术的应用可有效提升船舶能效水平、减少碳排放，但面向中长期减碳目标，根本性的解决方案则是应用清洁燃料。目前有一定应用经验和发展潜力的船用清洁燃料主要包括LNG、甲醇、生物柴油、氢和氨，业界正在探索研发适用于上述清洁燃料的最佳动力装置。从全生命周期碳排放角度考虑，基于传统化石能源制取的甲醇、氢和氨仍会造成部分温室气体排放，未来将逐步转向可再生能源电合成和生物质制取途径，从源头上实现碳减排。

在清洁燃料和动力装置的选择方面，载重吨位较大、航程较长的船舶靠港频次低、燃料加注相对不便，需要使用能量密度较高的燃料和功率较大的动力装置，适用的清洁燃料主要为LNG、甲醇和氨燃料，相应的动力装置和系统为内燃机和燃料电池；载重吨位较小、航程较短的船舶靠港频次较高、燃料补给相对便利，对燃料能量密度和动力装置推进功率的要求相对较低，适用的清洁燃料主要为LNG、氢燃料，相应的动力装置与系统主要为内燃机、锂电池和燃料电池。

此外，需对碳捕捉、利用与封存技术保持高度关注，一旦该技术在船舶上得到成熟应用，将会对航运业低碳发展产生深刻影响。

三 多维视角下的航运减排当下与未来

（一）风云激荡：减排方向的不确定性与目标和路径的不确定性交织相伴

如前所述，国际海事组织、各国及区域性组织、海事领域其它行业和政府间组织，对于航运减碳的时间表和路线图尚未达成完全一致，但航运业需要加速实现碳减排的方向已经非常确定，而且时间表可能比原计划提前，减排强度也会更高。而在温室气体减排的路径方面，技术手段从船舶能效提升转向清洁替代燃料的方向也已经基本确定。

尽管在减排方向上基本达成一致，但各方在国际航运减排目标和路径方面的观点不尽相同甚至存在较大分歧，这就决定了在航运业通向净零排放的道路上将充满不确定性。

在政策法规制定层面，国际航运领域的不确定性主要表现在最终实现全球航运净零排放的时间表及各阶段的减排目标、船舶燃料全生命周期温室气体排放评估方法等方面，而且其中的部分政策法规对不同种类清洁燃料的应用前景有重大影响；相对而言，中国的国内航运领域二氧化碳减排的时间表和实施路径将会清晰而确定。

在市场机制层面，不确定性主要表现在全球性和地区性碳排放控制市场机制的覆盖范围和价格方面、实施以碳税为主导还是以碳交易为主导的市场机制方面、碳税或碳交易的价格及收取资金的分配和使用方式方面，各相关方目前还未能达成一致，或将会有较长时间的争论甚至博弈，从而给航运业相关方的经济性测算和收益预测带来较大不确定性，进而影响整个航运业脱碳进程和技术路线的选择。

在技术路径选择层面，不确定性主要表现为在可供选择的脱碳技术路径中，航运业完全可控的部分仅限



于船舶端的能效提升技术、碳捕捉和储存技术。单纯依靠能效提升技术不能达成净零排放的目标，而排放端的碳捕捉和储存技术则因为其技术不成熟、实施成本高、小型化困难、船上操作复杂、岸基接收困难等应用障碍短期内难以解决，因此不能作为现阶段航运业通向净零排放的首选技术路径。船舶端技术路径的不确定性也在于碳捕捉和储存技术的未来发展，如果能够实现成本可控的船舶端应用，则将对船舶脱碳技术路径和船舶燃料端的相关产业有重大影响。相比较而言，燃料端的脱碳技术路径清晰而明确，但其不确定性在于航运业无法决定化工和能源领域绿色燃料的制备工艺和生产供应布局，从而使得替代燃料的供应和技术路径的选择陷入“蛋-鸡之问”的困扰。

在航运业实现净零排放的道路上，政策法规、市场机制、技术路径将相互影响、相互促进，其中政策法规无疑是最有决定性的因素。我们提请业界的各利益相关方密切关注政策法规制定的动向，并积极贡献观点和解决方案，使得最终制定的政策法规最大限度顾及不同国家、地区和各相关方的实际情况和利益，使减排目标和配套措施既有雄心，又可持续。

（二）重装出发：零碳清洁燃料将在2030年前后实现商业化应用

我们的研究分析显示，2030年对于航运业温室气体减排而言可能是一个重要的时间节点。主要基于以下三个判断：

1. 众多地区性和行业组织倡议的实现航运业净零排放的时间点均指向2050年，按照船舶平均营运寿命20年计算，2030年前后，零碳清洁燃料需要在新建船舶上实现商业化应用。
2. 清洁船用燃料，尤其是电制低碳或零碳燃料实现规模化和可持续供应的时间点将在2030年前后；
3. 清洁替代燃料船舶应用技术成熟并全面实现规模化和工程化应用的时间点也将在2030年前后。

因此，我们认为，2030年既是航运领域实现规模化零碳运营的起始点，也将是航运业加速脱碳的起始点。可以预期，届时将有新的法规类强制性政策和碳交易、碳税等市场性政策配合，加速国际航运业温室气体减排进程。

（三）负重前行：低碳和零碳燃料应用过程中的挑战不容忽视

实现清洁燃料在航运业规模化应用的最大挑战，来自燃料的可获得性。尽管部分替代燃料（如甲醇、氨等）作为化工产品的规模化生产和储运、分销已经非常成熟，但航运减碳政策中对全生命周期碳强度的关注，需要供应采用绿色制备工艺生产的清洁燃料。与国际航运业所需的亿吨级的燃料消耗量相比，目前绿色制备工艺生产的电制燃料仍在百万吨级的规模，远不能满足需求；而生物质绿色燃料的规划产量，相较于航运业的需求，更是杯水车薪。低碳和零碳燃料的可获得性和可持续性，是规模化应用和实现减碳目标的瓶颈问题。

在船舶端，现阶段可供航运业选择的低碳和零碳替代燃料主要有LNG、甲醇、氨、氢等四种，与常规燃

油相比，替代燃料多数具有更易燃爆、生物毒性、材料兼容性有特殊要求等特点，部分燃料还需要低温甚至极低温度围护系统储存，这些都对燃料的安全加注、储存、使用等构成挑战。

在船舶经营端，航运公司除需要应对燃料的供应和使用等中观和微观层面的经营性和技术性问题的以外，还要面对在全球经济和社会实现脱碳的进程中和实现碳中和以后，国际间和各国国内水运的货物种类、物流方向、运输总量会发生何种变化等战略性问题。航运业在进行中长期发展规划时，宏观视角有助于减少决策性和方向性风险。

（四）场景为王：不同的航运领域需要量身定制的最佳方案

低碳和零碳替代燃料在燃料特性、经济性、可获得性等方面的显著差异，决定了其最佳应用场景将有较大不同，不存在赢者通吃的单一解决方案。

对于远洋和近海航运而言，燃料的可获得性、体积能量密度和燃料储存条件将是最重要的考量因素。近期可选方案主要有LNG、甲醇、氨等燃料，在氢的高能量密度储存问题解决后，中远期氢燃料将成为具有竞争力的方案之一。

对于近岸和内河航运而言，燃料的储存和补给等相对容易实现，因此基于零碳燃料的动力方案选项会更加易于实施。现阶段国内船舶围绕LNG、甲醇、电池动力、氢、氨等其他清洁能源的应用开展了不同程度的研究和实践，但尚未就船舶能源的低碳发展形成明确路径。相比较而言，现阶段的电池动力，尤其是可换电的电池动力方案，以及近中期可能形成技术突破的燃料电池方案，将会是比较有竞争力的零碳航运方案选项之一。

（五）持续驱动：脱碳过程中经济性因素的考量不可或缺

低碳和零碳清洁燃料相较于常规化石燃料而言，其理化特性特殊、制备工艺特殊复杂，其生产端和应用端的成本都将显著高于化石燃料。目前其生产规模和使用经济性远低于常规燃油，并且预计将持续较长一段时间。

在船舶应用端，清洁替代燃料的体积能量密度均明显偏低，在相同续航力的情景下，加大的燃料舱将占据一部分载货空间，进而对载货重量和运营经济性有不可忽略的影响。据模型测算，载重吨为85,000吨的巴拿马型散货船因使用氨燃料导致的货舱容积损失约为10%，载货重量损失大约为10,000吨，对船舶运营收益有不可忽略的影响。在这方面，远洋中小尺度船舶的替代燃料舱布置更具挑战性。实际上，燃料舱的布置对于船舶设计和建造是最具有挑战性的技术问题之一。

在燃料生产端，绿氢是生产其它清洁燃料的主要原料，但仅能通过可再生能源生产的电力电解水来制备，其制备成本高企、规模受限，因此绿色替代燃料的生产规模普遍较小，成本较高。清洁燃料的价格和船舶运营方对燃料成本接受程度将成为航运脱碳的主要影响因素之一。

不论是在燃料成本还是运营收益方面，低碳和零碳燃料的应用都可能对航运业的盈利能力造成负面影响，单纯依靠航运企业的社会责任感和法规等强制性政策驱动，脱碳进程将很难持续。因此，政策法规的制定方、替代燃料的供应方、船舶和设备的制造方、船舶运营方等，均需要将经济性方面的可持续性作为选择航运脱碳路径过程中的重要考量因素。

（六）携手同心：各相关方协同联动才是实现航运减排目标的正确路径

航运业要实现减排目标，涉及到上游燃料生产和供应，中游船舶和设备制造、下游船舶运营的全产业链诸多环节，其中关键性环节就包括：IMO和国际地区层面减排法规政策的制定者、负责绿色燃料生产的化工或能源企业、负责燃料储运和加注的燃料供应企业、负责动力装置等关键设备供应的船用设备生产企业、船舶设计和建造方、提供配套设施和加注能力的港口、提供风险管理和安全技术标准的船级社、执行运营安全监管的海事主管机关等，缺少其中任何一个环节，清洁燃料的应用就不可实现或不可持续。这就需要整个产业链上的各相关方打破“蛋-鸡之问”的困扰，早日解决低碳和零碳燃料规模化应用过程中的诸多瓶颈和障碍。更需要各个国家和地区秉承“命运共同体”的理念，以坚定、积极、互信的姿态同心协力，在政策法规制定、市场机制构建等方面协调立场，明确目标和路径，为实现航运业温室气体净零排放的宏大目标和美好愿景携手前行。

总之，低碳减排已成为当前人类社会面临的共同挑战。碳达峰、碳中和是广泛而深刻的经济社会系统性变革。航运业作为世界贸易的领头羊和服务全球贸易发展的基础力量，也将不可避免地融入到这场变革中。航运绿色低碳发展事关各相关方的共同利益，也关系行业发展的未来。我们必须采取果断迅速有效的行动。同时，航运减排是一项系统工程，不仅需要先行者的引领，还需要相关各方紧密配合、全程协同、步调一致，拿出切实可行的措施和手段，拿出实实在在的创新成果，推动航运减排不断取得新成效，为全球应对气候变化、推动能源转型的努力作出积极贡献。





 **中国船级社**

地址：北京市东直门南大街 9 号船检大厦

电话：+86 10 58112538

传真：+86 10 58112837

网址：www.ccs.org.cn

2021.11

