

编者按

交通运输部水运科学研究院环保与节能技术研究中心彭传圣总工程师是《柴油机》编辑部持续关注的一位专家，他长期致力于水运领域的绿色发展。本刊曾有幸在2018年对彭总工进行专访，专访内容主要聚焦船机排放，我国实施船舶排放控制区的相关情况以及当时大热的硫排放等问题。近年来，彭总工主要致力于水运行业环保相关政策与法规的制定与实施，同时关注国内外相关技术的发展，深度参与了国内多项船舶减排项目，尤其是对时下热点“双碳”问题颇有研究。时隔4年，我们再次向彭总工发出邀约，邀请其与《柴油机》的读者们分享一下他在航运业实现“低碳、零碳”目标，以及未来航运业的技术发展方向等方面的看法与观点。



彭传圣

交通运输部水运科学研究院环保与节能技术研究中心总工程师

航运业的“双碳”之路该如何走？ 未来业界还应关注什么？

《柴油机》：彭总工，您好。感谢您接受本刊的采访。作为航运业的技术和政策专家，您如何解读目前大热的“低碳、零碳”概念？可否请您介绍一下国内外碳排放政策、法规、技术发展的最新动态？成本与市场因素在其中起了多大的作用？

彭传圣：联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）不定期发表总结气候变化信息的系列评估报告（assessment report, AR）。每份报告的决策者摘要反映了对主题的最新认识，并以非专业人士易于理解的方式编写。报告包含的信息包括气候变化及其成因、气候变化可能产生的影响、有关对策等，且这些信息全面涵盖科学、技术和社会等各方面。第1份评估报告AR1发表于1990年，为此，联合国大会于1992年5月9日通过了《联合国气候变化框

架公约》（United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC，以下简称《公约》），1994年3月21日《公约》生效。《公约》具有法律约束力，终极目标是将大气温室气体维持在一个稳定的水平，在该水平上人类活动对气候系统的危险干扰不会发生。后续的AR报告不断明确气候变化与人类活动的关系，2021年发布的AR6第一工作组报告《气候变化2021：自然科学基础》以科学的证据证明：最近的气候变化是广泛的、迅速的、加剧的，是数千年来前所未有的；除非立即、迅速、大规模地减少温室气体排放，否则将全球升温限制在1.5℃以内将是遥不可及的；无可争辩的是，人类活动正在引起气候变化，使热浪、暴雨、干旱等极端气候事件更加频繁和严重；我们未来将经历的气候取决于我们现在的决定。目前大热的“低碳、

零碳”概念源于人类对气候变化及其原因的科学研究。

碳减排与人们对气候变化的认识程度，碳减排责任分担的公平性，应对和适应气候变化的技术发展及技术应用成本等密切相关，《公约》的重要原则之一是“共同但有区别的责任”原则，《公约》对发达国家和发展中国家规定的义务以及履行义务的程序有所区别。《公约》要求：发达国家作为温室气体的排放大户，采取具体措施限制温室气体的排放，并向发展中国家提供资金以支付他们履行公约义务所需的费用；发展中国家只须提供温室气体源与温室气体汇的国家清单，制订并执行含有关于温室气体源与汇方面措施的方案，不承担有法律约束力的限控义务。发达国家与发展中国家存在分歧，导致难以达成共识或者虽然达成共识但难以实际施行，比如2007年制定的“巴厘岛路线图”，提出发展中国家要在可持续发展框架下，在发达国家履行向发展中国家提供足够的技术、资金和能力建设支持的承诺的前提下，采取适当的国内减缓行动，但是发达国家一直没有有效履行相应支持承诺。

鉴于人类活动的碳排放主要来自化石能源的使用，业界正在努力减少化石能源使用，推动新能源和清洁能源的开发和利用以及发展碳捕获、利用与封存技术，其中新能源和清洁能源的开发和利用已取得了令人瞩目的技术进步。随着新能源和清洁能源开发和应用技术的进步，部分领域应用新能源和清洁能源的技术不断成熟、成本大幅度下降，具备了推广应用的技术经济可行性，比如：电动汽车、电动港口机械、电动港作拖轮和旅游船舶等；在国家经济激励政策下，风力光伏发电以及氢燃料电池动力重型货车等具备了试点示范应用的可行性。

《柴油机》：内河船、近海船和远洋船面临的“减碳”压力不一样，采取的技术手段也会存在差异，请问目前看来，针对不同的船型与航行区域，您推荐的技术路径分别是什么？我知道您也在关注港口的“减碳”，这方面可否也请您大致介绍一下最新的进展？

彭传圣：根据我掌握的信息分析，鉴于目前国

内内河和沿海船舶存在大型化的趋势，而航运企业规模普遍较小，不少是以家庭为经营主体，讲究经济效益，尽量保持船舶高装载率，减少运营成本的同时提高了船舶能效水平，故过去20年船舶碳排放强度逐年大幅度下降。国内内河和沿海水运的碳排放历史上出现过峰值，即使未来水运发展按照预测的较增长速度增长，只要碳排放强度保持逐年小幅度下降，未来碳排放将不会超过历史峰值。因此，国内内河和沿海水运碳减排应致力于追求“碳中和”而不是采取临时的过渡性措施减少碳排放。鉴于新能源的特点和碳减排能力，我认为：我国内河和沿海小型船舶应以动力电池或者氢燃料电池作为脱碳路径；沿海大型船舶和远洋船舶应将使用甲醇或氨作为脱碳路径，从更加长远的角度考虑，使用氢燃料电池是方向，届时将以甲醇和氨作为氢载体。航运发展除了碳减排外，还将面临总体成本最小化，环境保护要求越来越严苛，海洋生物多样性保护使得降低船舶航行噪声的要求已提上日程等方面的压力，因此须综合考虑。

港口脱碳比航运容易，主要采取港口机械和港作船舶电气化以及港口与新能源融合发展的脱碳路径。目前，我国动力电池技术以及充电技术的发展已经使得大多数当前使用化石能源的港口机械，包括集装箱卡车、空箱堆高机、自卸车、装载机及额定起重量3t及以下的叉车等，具备了采用动力电池驱动的技术经济可行性。连云港港2021年8月16日交付试运行的我国首艘纯电动拖轮云港电拖一号的应用实践也证明，3000kW甚至更大型的港作拖轮使用电力驱动具备经济技术可行性。天津港在推进港口与能源行业融合发展方面进行了探索，按照C段智能化集装箱码头运营期能源自洽进行清洁能源供应系统规划设计，建成了全球首个100%使用电能、电能100%为风电光伏发电系统提供的绿电、绿电100%自产自足的零碳码头。

《柴油机》：我国正致力于打造交通与海洋强国，在当下全球海运低碳可持续发展的大背景下，我国如何利用这个环保治理体系变革的契机，积极发挥引领作用？基于我国的具体国情，中国是否会形成具有特色的航运脱碳“中国方案”？

彭传圣：在我国，力争2030年前实现碳达峰和努力争取2060年前实现碳中和的目标非常明确。在倡导构建人类命运共同体、促进全球治理体系变革的大背景下，我国在打造交通与海洋强国的过程中，有必要也有条件在促进航运低碳发展方面发挥引领作用。我的观点是“国际航运低碳可持续发展任重道远，但是中国可以大有作为”。在我国推动低碳发展的目的是利用技术优势突破资源劣势，而在新能源及清洁能源的开发和应用方面我国具有先发优势，并可凭借巨大的市场规模，快速推动技术不断成熟进步。目前我国在乘用车和货运车辆电动化方面的优势已经很明显，国家激励氢燃料电池重型货车发展的政策将推动我国在氢燃料生产、运输、储存、供应和使用技术等方面的发展与成熟。一旦这一技术在陆上运输领域发展成熟，将自然而然扫清将其应用于小型船舶的障碍，并可逐渐应用到中型船舶上，从而为应用到大型船舶上创造条件。我国在大气污染治理以及船舶排放控制区的建设实践表明借助我国“集中力量办大事”的优势，可以形成“中国方案”供其他国家借鉴。我相信我国有能力、有动力为全球航运脱碳提供“中国智慧”和“中国方案”。

《柴油机》：LNG目前是很有争议的一种燃料，去年世界银行已经非常明确地反对以LNG作为未来“减碳”的理想燃料，但国内外支持LNG的声音也很多。您对此怎么看？

彭传圣：一种燃料是否是清洁燃料取决于燃料的物理化学性质、使用方法以及环保追求的目标，在追求减少一次性排放硫氧化物和颗粒物的时代，LNG作为内燃机燃料，因为几乎没有一次性硫氧化物和颗粒物的排放而被认定为清洁能源。

事实上，造成空气污染的颗粒物和臭氧等还有二次来源，内燃机排放的氮氧化物是二次生成颗粒物和臭氧的前体物，随着环境空气质量管理水平的提高，硫氧化物排放控制已达到一定水平（体现在“十二五”“十三五”期间均设立了“二氧化硫排放总量”控制约束性指标，而“十四五”期间已经不再提及该指标）。《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》在“着力打好臭氧污染防治

攻坚战”中明确要求“到2025年，挥发性有机物、氮氧化物排放总量比2020年分别下降10%以上，臭氧浓度增长趋势得到有效遏制，实现细颗粒物和臭氧协同控制”。

LNG作为内燃机燃料在充分发挥能源热效率和减少氮氧化物排放之间存在矛盾。高温燃烧有利于发挥LNG的热效率，但是难以控制空气燃料的比例，会导致氮氧化物排放强度超过燃油发动机；低温燃烧有利于控制氮氧化物，但是LNG难以充分燃烧，导致热效率下降。此外，LNG双燃料发动机或LNG气体发动机在使用LNG的过程中难以避免甲烷逃逸，不完全燃烧和逃逸到大气中的甲烷100年的温升潜势是二氧化碳的28倍（参见IMO第4版航运温室气体排放报告GHG4中的数据）。

以船用双燃料发动机为例：GHG4给出的奥托循环双燃料中速发动机单位功率LNG的消耗量为 $156 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，甲烷逃逸量为 $5.5 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，通常认为船用发动机使用LNG取代燃油最多可以减少20%的二氧化碳排放，基于LNG和船用柴油的二氧化碳排放因子分别为2.750和3.206，推算燃油船用中速发动机单位功率二氧化碳当量排放量达到 $156 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h}) \times 2.750/80\% = 536.250 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ；而奥托循环双燃料中速发动机单位功率二氧化碳当量排放量为 $[156 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h}) - 5.5 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})] \times 2.750 + 5.5 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h}) \times 28 = 567.875 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，可见后者产生的温室效应反而高于前者。国内最近对多台双燃料发动机的甲烷逃逸量进行了台架和实船检测，结果表明低压双燃料四冲程发动机的平均甲烷逃逸量达到 $6.9 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

2020年国外研究机构发表的报告表明：奥托循环发动机在使用LNG的情况下，如果考虑温室气体20年的温升潜势，其全生命周期温室气体排放量比使用船用轻柴油的二冲程柴油发动机高20%，比使用船用轻柴油的四冲程柴油发动机高48%；如果考虑温室气体100年的温升潜势，四冲程发动机使用LNG会比使用船用燃油排放更多的温室气体，二冲程发动机使用LNG比使用船用燃油仅减少4%的温室气体排放；狄塞尔循环发动机在使用LNG

的情况下，表现较好，二冲程和四冲程发动机的温室气体排放都比燃油发动机低，考虑温室气体20年和100年的温升潜势，分别减少了9%和15%。目前，因为甲烷逃逸更严重的奥托循环发动机购买和操作成本较低，其销量比狄塞尔循环发动机更好，大多数在役或订购的LNG动力船舶都选用奥托循环发动机。

中国国内船东在使用LNG作为船用动力时，更多看中的是其经济性，又因为担心LNG与船用燃油的相对价格变化，以及在LNG供应紧张的冬季船用LNG供应保障成问题，习惯选用双燃料发动机（小型船舶大多选用国产双燃料发动机），这就导致实际减少碳排放有限甚至不减少碳排放。

2015年在我的建议下，交通运输部停止支持既不节能也不减排的使用混烧机的船舶改造，但是因为交通运输部在2013年发布过《交通运输部关于推进水运行业应用液化天然气的指导意见》，在政策惯性下，没有完全停止对使用双燃料发动机或者气体机的LNG动力船舶的支持。最近几年我多次建议交通运输部，认可现有改造或建造LNG动力船舶项目以及建设船舶LNG加注站的项目为减污降碳项目，但是不鼓励或支持新的类似项目，以便既保持政策的连续性，又避免导致更多的无效投入。2021年底在为国务院办公厅拟定“绿色低碳交通基础设施建设情况、存在问题及对策建议”提供技术支持的过程中，我提出国家不应再支持港口LNG加注设施建设的书面意见。

此外，我们知道在我国利用“气代煤”发电，可以将发电的度电碳排放降低52.5%，远比船舶“气代油”的“最多减少20%碳排放”更加有效，为什么要将大量依靠进口的天然气使用在须投入大量成本才能使用且使用之后又不能有效减碳的领域呢？

《柴油机》：碳捕获、利用与封存是应对全球气候变化的关键技术之一，受到世界各国的高度重视。请问目前国内外的技术发展到什么程度了？该技术适合哪些企业或船舶使用？

彭传圣：碳减排的途径包括源头治理、过程控

制和末端处理。源头治理和过程控制在一定程度上与减少污染物排放相协同，但是效果有限。碳捕获、利用与封存属于碳减排特有的末端处理措施，如果没有碳捕获、利用与封存很难实现碳中和的气候治理目标。因此，碳捕获、利用与封存得到各国高度重视，也成为国家减碳技术发展的重要组成部分。目前，在不少国家碳捕获、利用与封存貌似变得越来越商业化和有竞争力，但是实际应用碳捕获、利用与封存的技术还很少。据报道，截至2022年9月，在建的商业碳捕获、利用与封存项目的总容量约为每年2.497亿t二氧化碳。我国已经发布了10多项促进碳捕获、利用与封存的国家政策和指导意见，比如国务院发布的《2030年前碳达峰行动方案》，将探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范作为推动钢铁行业碳达峰的要求，将二氧化碳捕集利用与封存作为强化应用基础研究的重点，将低成本二氧化碳捕集利用与封存和建设全流程、集成化、规模化二氧化碳捕集利用与封存示范项目分别作为加快先进适用技术研发和推广应用的内容，将二氧化碳捕集利用与封存科研合作和技术交流作为开展绿色经贸、技术与金融国际合作的内容。

我认为碳捕获、利用与封存技术是碳达峰和碳中和的基础性、共性技术，科技部“战略性科技创新合作”重点专项2022年度联合研发与示范项目可能从开展国际合作的角度考虑，设立“船舶二氧化碳高效捕集、存储关键技术及装备联合研发”项目，实际上我认为航运业不是适合实施有效和经济的碳捕获、利用与封存技术的领域，船舶难以成为实施有效和经济的碳捕获、利用与封存技术的载体。

Maersk Mc-Kinney Moller 零碳航运中心的研究表明：碳捕获在技术上是可行的，预计在2030年达到商业可用性；额外的碳捕获能源需求会导致更高的总燃料消耗，最多可增加45%；碳捕获的潜在应用显示，该技术在新造船上有最大的应用前景，因为改造船舶成本很高，而且有可能须要进行重大改造；由于初始投资较高，部分碳捕获通常会导致较高的减排成本，在大型油轮上应用船上碳捕获技

术有效果，而小型散货船面临的挑战最大。这也从侧面说明船舶普遍使用碳捕获、利用与封存技术不具有可行性。

《柴油机》：除了“碳”，目前航运业还有哪些值得我们关注的关键词？或者未来航运业的发展重点会是什么？

彭传圣：水运的重要特点之一在于其低成本，绿色和安全又是基本要求，如何协调水运成本与绿色和安全发展要求是水运发展面临的永恒主题。我更加关注绿色发展，我觉得这方面未来航运业将面

临减少碳排放、控制污染物排放和降低船舶航运噪声的挑战。国际海事组织航运减排最终战略预计在2023年最终确定，届时航运零排放的时间很可能会提前到2050年。船舶减排大气和水污染物的要求将不断严苛。为保护生物多样性，对减排船舶噪声的要求已经提上IMO的议事日程。因此，我们在推动航运低碳发展或者说确定航运脱碳路径的过程中，须充分统筹考虑航运低排放、低污染、低噪声以及安全性和经济性等要求。

（高荃 供稿）