

上海市船舶与海洋工程学会 2019 年学术年会轮机专场论文专栏

船舶温室气体减排对主机的影响分析

夏建光, 余志利

(沪东重机有限公司, 上海 200129)

摘要: 介绍了航运业温室气体排放现状, 以及针对脱碳目标的主要减排措施: 技术性减排措施、营运性减排措施及基于市场的减排措施。分析了以上各类减排措施对船舶主机的影响。在综合分析 IMO 船舶温室气体减排法规及相关减排技术对我国船舶主机、相关零部件技术发展, 供应链建设以及复合型人才培养等方面的影响的基础上提出了发展建议。

关键词: 温室气体; 排放; 主机; 船舶

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)02-0001-07

Analysis of the Influence of Marine Greenhouse Gas Emissions Reduction on Main Engines

Xia Jianguang, Yu Zhili

(Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129)

Abstract: The status of greenhouse gas (GHG) emissions in shipping industry is introduced, as well as the main emissions reduction methods to meet with the de-carbon goal, including technical emissions reduction methods, and the reduction methods from the aspects of operation and market. The influence of these emissions reduction methods on marine main engines are analyzed. Based on comprehensive analysis of the influence of IMO marine GHG reduction legislation and relative emissions reduction technologies on marine main engine manufacturing, technology development of relative components, establishment of supply chains and training of inter-disciplinary talents in China, the development suggestions are given.

Key words: greenhouse gas; emission; main engine; vessel

0 引言

2018 年 4 月 9~13 日在伦敦召开了国际海事组织 (IMO) 海上环境保护委员会 (MEPC) 第 72 届会议, 会议以第 MEPC.304 (72) 号决议通过了《IMO 船舶温室气体减排初步战略》^[1]。该战略提出: 到 2050 年, 全球航运业碳排放量要比 2008 年减少 50%, 并推动国际航运业尽快减排, 努力逐步实现零碳排放的目标。这是全球航运业向国际社会传递出航运业加快向低碳转型的强有力信号。

1 海运温室气体排放现状及减排措施

1.1 海运温室气体主要来源

海运温室气体主要包括二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、氧化亚氮 (N₂O)、氢氟碳化合物 (HFCs)、全氟化碳 (PFCs)、六氟化硫 (SF₆) 以及其他相关物质 (NO_x、NMVOC、CO、PM、SO_x)^[2]。

根据国际海事组织 IMO《2014 年第三次温室气体研究》报告的数据: CO₂ 是海运温室气体的主要成分, 约占整个海运温室气体排放的 97%^[3]。油轮、散货轮和集装箱船是 CO₂ 排放大户。

收稿日期: 2019-10-11

作者简介: 夏建光(1985—), 工程师, 主要研究方向为双燃料发动机及发动机数字化与智能化技术, xjg@hbm.com.cn。

船舶货物、制冷剂等产生的温室气体排放相对很少，而船舶废气是船舶温室气体排放的主要来源。船舶废气主要由船舶主机、辅机及锅炉燃料燃烧产生，其中大部分废气来源于主机，辅机以及锅炉产生的碳排放量较少。主机碳排放受到主机类型、燃料类型、船舶类型、航速、吃水及环境等因素的影响较大。

1.2 海运温室气体排放现状

国际海事组织 IMO《2014 年第三次温室气体研究》^[3] 报告指出：2012 年，全球船舶约排放 949 百万吨 CO₂，约占全球排放总量的 2.7%，相当于全球第六大碳排放国的排放量；其中，国际航运排放 796 百万吨 CO₂，约占全球排放总量的 2.2%。基于二氧化碳当量（CO₂e）的全球船舶排放 972 百万吨 CO₂，约占全球排放总量的 2.5%，其中，国际航运排放 816 百万吨 CO₂，约占全球排放总量的 2.1%。

航运被公认为是最高效的运输方式，受未来经济增长的驱动，海运需求预计将持续增长。根据《联合国 2018 海运述评》的预测数据，2018 ~ 2023

年，世界海运贸易将以平均每年 3.8% 的速度增长^[4]。尽管监管和市场驱动效率显著提高，但根据预测，如果不采取任何减排措施以遏制航运温室气体排放的上升趋势，则随着全球贸易的增长，未来几十年，海运 CO₂ 排放量仍将显著增加，至 2050 年海运温室气体排放量可能会比当前增长 50% ~ 250%，占全球温室气体排放总量的比例可能上升至 17%。

1.3 海运温室气体减排措施及效果

目前，船舶温室气体减排措施主要包括技术性减排措施、营运性减排措施和基于市场的减排措施^[5]。

技术性减排措施包括：船体线型优化、气膜减阻、推进装置及螺旋桨优化（对转桨、导流管做优化，降低伴流分数，改善进流等）、发动机效率提高、使用岸电、余热回收、使用新能源和替代燃料等。这些技术性措施从根本上减少船舶温室气体排放，是目前阶段实现温室气体减排的主要手段^[6]。从表 1 来看，部分船型必须通过多种措施才能达到相关减排要求。

表 1 技术改进措施和运营优化措施对船舶温室气体减排效果评估

措施类型	措施内容	CO ₂ 减排量	联合减排量	联合减排量
技术措施 (新船)	设计原理, 设计速度, 装载能力	2% ~ 50% +	10% ~ 50% +	25% ~ 75% +
	船壳及上层结构	2% ~ 20%		
	动力与推进系统	5% ~ 15%		
	低碳燃料	5% ~ 15% *		
	可再生能源	1% ~ 10%		
	废气处理	0%		
运营措施	船队管理、物流和激励	5% ~ 50% +	10% ~ 50% +	
	管理、物流和激励	1% ~ 10%		
	能源管理	1% ~ 10%		

注：+ 为结合减速措施时的减排效果；* 为基于使用液化天然气 LNG 的减排效果（数据来源：Second IMO GHG Study）。

1.4 各减排措施的平均边际成本对比

船舶整体设计确定船舶的尺寸和大小、船体结构、材料选择以及最终船舶在满载和压载工况下的性能特征。依次，这些因素影响着燃料的使用及相应的 CO₂ 排放。图 1 显示了 2030 年各减排措施的平均边际减排成本。可以明显看出：许多具成本效益的措施都是可操作性措施。

2 技术性减排措施对主机的影响

技术性减排措施仅适用于新船，只激励设计改进，而不是操作改进。

技术性减排措施的本质是提高能源利用效率。随着科技的发展，MAN-ES、WinGD 两大主机设计

商和相关零部件厂家都开发了许多新的功能和产品。新型智能控制系统能使燃油喷射反应更灵活，燃烧更充分，从而优化主机在各种负荷下的性能，以提高能源利用效率，达到减排的目的。

2.1 降功率对主机的影响分析

能效设计指数（EEDI）是指一艘船舶的 CO₂ 排放量与运货量之间的关系，该指数越低，船舶越节能环保。

近年来，船舶在恶劣海况转速受限，通过转速禁区（BSR）时间过长的相关案例不断增多。出于安全的考虑，有些港口当局会禁止这些出现过加速问题的船舶进入。

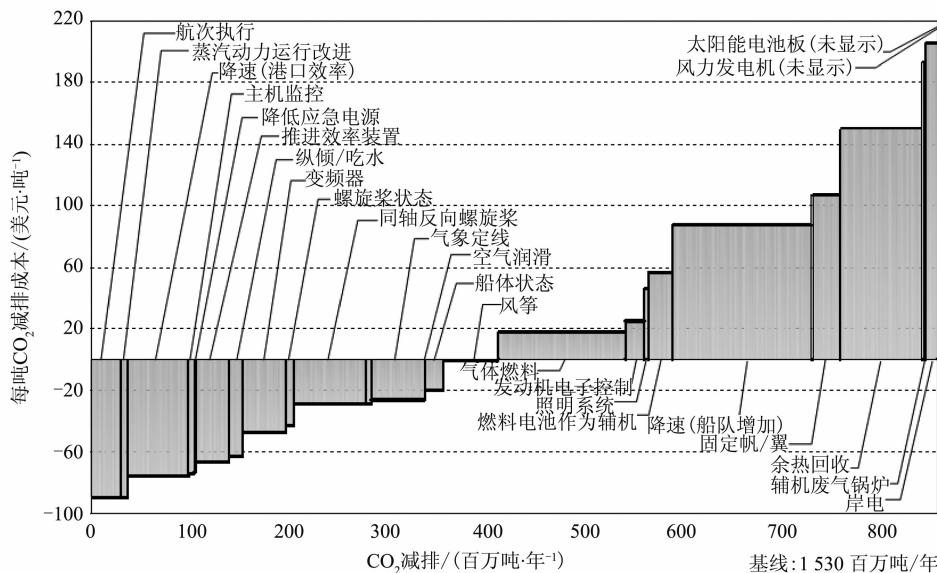


图 1 2030 年船队每项减排措施的平均边际减排成本（数据来源^[7]）

对于新造船来说，采用降功率主机能显著降低 EEDI，因此，新船设计中选用主机的最大持续功率不断降低，这节省了燃油，对 EEDI 的影响是积极的，降低了温室气体排放。但另一方面，船舶加速性能可能降低，在遇到恶劣海况或螺旋桨重载工况时，主机转速可能受限，无法满足船舶的操纵或快速航行要求，从而影响船舶安全。从表 2 可知，相关轻桨裕度的推荐值在加大。

表 2 各机构推荐的轻桨裕度

机构	年限	轻桨裕度
MAN-ES	1999 年以前	2.5% ~ 5%
MAN-ES	1999 年 ~ 2014 年	2.5% ~ 7%
MAN-ES	2015 年	4% ~ 10% ^[8]
WinGD	2015 年	保持 4% ~ 7% 不变 ^[9]
国际拖曳水池会议 (ITTC)	2008 年	5% ~ 7% ^[10]

2.1.1 提高船舶加速性主机方面解决方案

MAN-ES 在新版本的主机上采用了一项新技术——动态扭矩限制功能（Dynamic Limiter Function, DLF），来提高主机自身的扭矩限制功率，暂时解决主机无法快速越过 BSR 的问题。这项技术已经集成在主机控制系统（ECS）中，但根本的解决途径还是提高轻桨裕度。

MAN-ES 推出的 Dot 5 主机通过优化低负荷性能提高低负荷工况下的燃烧用空气量，进而提高输出功率和扭矩，一定程度上能解决或部分缓解主机重载工况下的加速问题^[11]。

WinGD 没有提出类似方案是因为 WinGD 主机采用高压共轨技术，其本身的扭矩限制功率较大。

螺旋桨轻桨裕度对船舶和主机的性能有重要影

响，不仅影响船舶的作业效率和油耗，还影响船舶和主机的安全运营。随着船舶降功率趋势日益加快，业界沿用已久的 3% ~ 5% 的轻桨裕度已难以满足实际运营需要^[12]。从根源上来分析，主机无法输出预定功率、油耗增加及无法快速跨越 BSR 等问题很可能均与轻桨裕度有关。对于经常在恶劣海况下航行的船舶，应适当提高轻桨裕度。

2.1.2 通过转速禁区时间

基于主机和轴系的不同，在某些转速区间内的扭振可能会超过法规的限制值，长时间在该区间内运行会导致主机和轴系受损，因此根据轴系计算报告，设置一个转速禁区。以防止主机和轴系受损。轻桨裕度过小，将导致主机无法通过或无法快速通过 BSR，对主机和轴系造成损伤。相比之下，轻桨裕度较大者就有足够的功率裕度来保证主机快速越过 BSR。

鉴于目前情况，船级社已密切关注。如 LR 要求事先提供通过转速禁区的时间，并在试航时测试对比验证。通常认为该时间应低于 30 s，但不高于 60 s 也可被接受。

而 DNV GL 于 2018 年 7 月发布的修订规范（RU-SHIP 第 4 部分，第 2 章，第 2 节 扭转振动）^[13]中提出了两个主要要求：

（1）通过 BSR 的最长时间（设计和试验验证）。规范中给出了该时间的计算公式，其中时间按应力比成指数减少。DNV GL 以 25 年使用寿命和每周 10 次通行作为开发基础，开发出有过盈连接或多段弧法兰设计，且应力比为 85% 的轴系，其允许通过时间为 26 s。

(2) BSR 上限功率裕度 (设计)。根据CIMAC 的推荐, BSR 的上限要求有 10% 的功率裕度, 这背后的主要原因也是避免在试航时验证通过 BSR 时间时发生问题。

根据轴系扭转振动计算分析可知: 采用如表 3 方法可以使 BSR 向低速区移动, 这将提高转速禁区的功率裕度, 但受制于制造成本的影响。前期设计阶段一般不会考虑采取这些方案快速通过 BSR, 而一旦船舶完工投入运营, 这些方案也难以实现。表 3 对提高 BSR 功率裕度的方法进行了对比分析。

表 3 提高 BSR 功率裕度的方法对比

方法	评估
提高主机飞轮惯量	成本相对较小
提高主机调频轮惯量 (若主机须配置调频轮)	成本相对较小
提高螺旋桨惯量	
采用扭矩减振器或改变扭振减振器型号	成本较大
采用强度更高的中间轴 (如合金钢)	成本较大 (若选择抗拉强度值大于 800 N/mm^2 , 且供应商少)
调整轴系柔度 (主要为减小中间轴的直径)	
增加轴系长度	受机舱布置限制, 调整范围有限
采用更多缸数的主机	受制机舱布置, 初始投入和后期成本均增加

对于已完工的船舶, 若要提高轻桨裕度, 合理打磨部分螺旋桨叶片是一种可行、有效的方法。有计算表明: 螺旋桨随边切割, 轻桨裕度能够提高 2% ~ 4%^[14]。

综上所述, 通过设计进一步降功率的空间已经不大。

2.2 LNG 燃料

2000 年以后, MAN-ES、WinGD 相继开发了以 LNG 为燃料的双燃料发运机, 如 MAN-ES 的 ME-GI 系列、WinGD 的 X-DF 系列。2018 年, 在推出 X-DF 的第 5 个年头, WinGD 公司迎来了第 100 台 X-DF 订单。如今 ME-GI 和 X-DF 累计订单均已经超过 250 台。

长远来看, 温室气体排放要求会更趋严格, 很有可能压制原油船市场发展, 带动 LNG 运输船市场发展。为实现全球气温控制目标, 未来市场减排机制 (很可能是碳税) 势在必行。尽管化石燃料尤其是原油的开采成本仍可能保持低位, 但由于碳税的存在将使其使用成本提高, 从而可能抑制原油

的需求量。预计 2030 年后, 全球原油需求量将见顶; 如果各国环保政策更趋严格, 全球原油需求量见顶可能会提前, 对原油船队需求的降低, 将压制原油船新造市场。未来清洁能源的使用势在必行, 在风能、太阳能、核能或氢能源等清洁能源技术尚未完全成熟之前, 天然气将是很好的过渡期能源, 也即 LNG 的需求将在较长时间内保持增长, 这将推动 LNG 船新造市场的发展。

在绿色环保法规不断严格, LNG 加注基础设施逐渐完善的推动下, LNG 动力主机订单持续增加。根据联合国《2017 海运述评的数据》: 2002 ~ 2013 年, 能够使用 LNG 的新造船舶比例 (以总吨衡量) 相对稳定在 2% 左右, 但这个比例在 2014 年、2015 年和 2016 年分别升至 5.8%、4.3% 和 5.3%。在考虑全球新造船整体订单少的情况下, 这种趋势变得特别明显, 如图 2 所示。

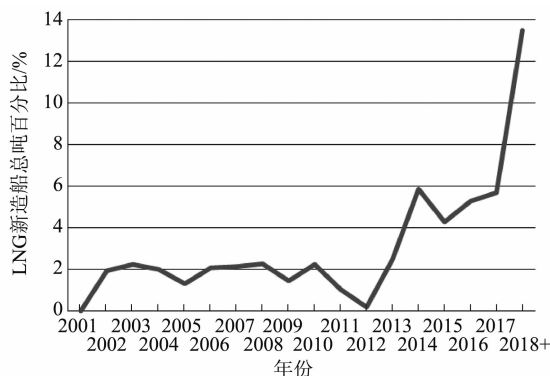


图 2 2001 年 ~ 2018 年使用液化天然气的
新造船舶比例 (总吨百分比)^[16]

注 1: 贸发会议秘书处根据克拉克森公司的数据统计。新造船舶数据截至 2017 年 1 月 1 日的现有船队和订单。

注 2: 1 000 总吨及以上的动力型远洋船舶, 2001 ~ 2016 年期间交付的总吨中, 6% 没有燃料类型信息; 2017 年及之后订造的总吨中, 20% 没有燃料类型信息。

2.2.1 WinGD X-DF 双燃料主机

温室气体排放量按 CO_2 当量排放量计量。在所有相关的化石燃料中, LNG 产生的 CO_2 排放量最低; 然而, 其释放的未燃烧甲烷 (CH_4 , 也即甲烷逃逸) 也是温室气体。而 CH_4 的温室效应是 CO_2 的 25 ~ 30 倍。

在比较燃用 LNG 的 X-DF 发动机与使用其它燃料的推进系统的温室气体性能时, 必须综合两个方面: LNG 在燃烧过程中排放的 CO_2 减少 30%; CH_4 是构成总碳氢化合物 (THC) 排放量的一部分, 也是一个重要的温室气体。不管发动机的冲程和尺寸如何, 每台发动机都有未燃烧的 THC 排放。 CH_4 从气体供应到发动机, 构成 THC 或 CH_4 排放

的一部分, 通常称为甲烷逃逸。X-DF 发动机的加权平均 THC 排放量非常低, 在 $2.0 \sim 3.0 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 之间 (基于缸径为 $50 \sim 72 \text{ cm}$ 的发动机), 为同类产品中 THC 排放性能最好的。在测量的总 THC 排放量中, CH_4 通常占 80%。X-DF 发动机的 CH_4 逃逸介于 $1.6 \sim 2.4 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 之间^[13]。

WinGD X-DF 主机总的温室气体排放减少了 15% ~ 20%, 其排放性能较传统柴油发动机有明显改善。X-DF 发动机技术将在向无碳未来过渡过程中发挥重要作用。

与此同时, 有多家船厂宣布: VLCC、超大集装箱船在采用 X-DF 主机后, EEDI 达到第三阶段要求。

2.2.2 MAN-ES ME-GI 双燃料主机

由于高压供气系统的初始投资成本及后续维护成本很高, 且无法直接满足 Tier III 排放法规, 存在高压压缩能量损耗, 因此市场前景不被看好。

2.3 甲醇、乙烷和液化石油气 (LPG)

目前, 全球采用甲醇、乙烷、LPG 为主机燃料的相应甲醇、乙烷、LPG 运输船数量都很少, 运营中的均不超过 10 艘, 其中甲醇燃料的最多, 7 艘在运营, 4 艘在建, 远远小于以 LNG 为燃料的船舶。

甲醇是清洁能源之一, 是一种可生物降解、清洁燃烧的船用燃料。它最大优势是能够显著减少颗粒、 SO_x 和 NO_x 等有害气体排放。与 LNG 相比, 甲醇最大的优势在于不须要低温储存和绝热, 因而燃料舱的设计和建造相对简单, 成本大大降低。

但甲醇燃料的另外一面也须特别关注。从存储空间上看, 相比重油, 甲醇的热值较低、密度较小, 甲醇燃料舱的体积近似为燃油舱的 2 倍, 比 LNG 燃料舱大 20% 左右, 因此须设计更大的空间用于存储甲醇燃料^[17]。对于同等尺寸的船舶, 更大的燃料舱意味着货舱损失, 进而影响船舶营运收益。

从安全性来看, 甲醇的闪点为 $12 \text{ }^\circ\text{C}$, 是一种低闪点的液体燃料, 不符合船用燃油闪点不低于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的要求。因此, 船舶使用甲醇燃料须满足《气体或低闪点燃料船舶国际安全规则》(IGF 规则); 同时, 相关船级社对甲醇燃料船的技术标准存在较多差异。另外, 甲醇毒性相对更大, 须对燃料储存和供给环节进行特殊设计。

MAN-ES 开发的 ME-LGI 双燃料发动机采用双壁设计, 并且所有泄漏都在双壁环形空间中进行监测和收集。日前, 瑞典船舶管理公司 Marinvest 公司旗下首批使用甲醇双燃 ME-LGI 发动机为推进动力的 2 艘船舶均通过了 10 000 h 运行试验。同时,

该公司还宣布, 其 ME-LGI 组合船队已依靠甲醇累计运行了 50 000 h, 积累了大量运行经验。由此可见, 甲醇发动机技术也在日渐成熟。

甲醇和 LPG 运输船已经在海上运营多年, 随着全球 LPG 基础设施的发展, 正在建造更多的液化石油气油轮。由于船上已经有可行、方便和经济的燃料, 利用一小部分货物为船只提供动力是有意义的。甲醇虽然是全球五大化工产品之一, 理论上可以通过现有的全球基础设施在全球范围内供应, 但燃料来源、基础配套设施、法规不完善仍是全面推广的障碍。

总之, 甲醇是一种很有前途的替代燃料, 甲醇发动机作为新的选择方向, 从理论及技术来看是可行的, 但要实现大规模商业应用, 仍然有很长的路要走。

2.4 新能源

使用新型能源可以大幅降低船舶碳排放, 如采用风力、太阳能、氢能、电力等, 可为船上的日常生活提供动力。

目前来看, 电力驱动还只能应用于近海航线船舶, 且无法应用于大型船舶。随着高能量密度水平的电池达到商业化应用, 且价格合理, 预计混合系统和电力推进船舶的市场份额将快速上升, 但这在未来 5 年难以实现。风力船舶已经在多个国家建成并试验。氢能源远洋商船仍未出现。由于公众对核安全问题的担忧, 核能在未来 10 ~ 20 年内仍不可能大量用作商用船舶动力。另外, 这些方案成本均较高, 都存在船型和航行距离的限制, 相关法规仍有待完善, 难以达到实用水平, 应用于远洋商船仍需时日。

2.5 未来燃料

马士基负责人表示, 目前基于化石燃料技术实现的效率提升只能将碳排放量保持在当前水平, 并不会显著减少或消除碳排放, 实现航运业脱碳的唯一途径是完全使用新型碳中和燃料及供应链。

到 2050 年, 化石液化天然气将须逐步被非化石液化天然气、生物液化天然气 (目前已有少量供应) 和大量液化天然气 (这些液化天然气将通过使用太阳能和风能剩余电力的 CO_2 中性“发电”工厂生产) 所取代。由图 3 可知, 生物替代燃料的全链条碳排放具有明显的优势, 具有很大的潜力。

未来, 可能会出现更多潜在的解决方案, 先驱者们可能会遇到各种无法预料的技术问题, 但经过技术更新换代, 作为商船推进动力主要来源的内燃机将在 2050 年及以后继续发挥主要作用。

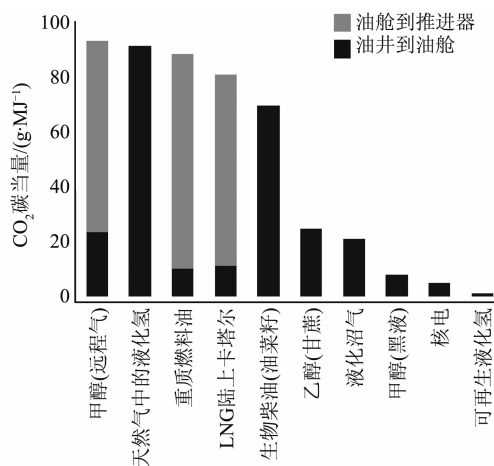


图3 替代燃料从油井到推进器的温室气体排放量比较^[18]
(数据来源: DNV GL 2025 技术展望)

2.6 增压器技术

发动机涡轮增压技术,如二级涡轮增压和相继涡轮增压技术的发展,也有助于实现降低温室气体排放的目标。

二级涡轮增压技术不是一种新技术,其已经在四冲程船用发动机中得到广泛应用。然而,在二冲程主机中,由于安装复杂且成本高昂,尚未广泛应用。随着法规的变化以及硬件和燃料成本的变化,此类系统的初始投资成本回收时间可能会逐步缩小到合理的范围。

相断增压技术是指:主机在低负荷运行时,切断一台涡轮增压器,这样会增强扫气压力和发动机效率,在相同的 NO_x 排放水平下大大降低燃油消耗,促进 CO_2 减排。

2.7 废气旁通技术

为了提高低负荷时增压器的效率,降低油耗,增加了废气旁通系统,使一部分废气在增压器前旁通掉。一般可分成二种形式:不可调节开度废气旁通阀;可调节开度废气旁通阀。

根据主机设定的最小和最大废气旁通阀允许开度和船厂蒸汽压力值,自动调整废气旁通阀开度,让部分废气不经过增压器做功直接进入锅炉,提高蒸发量,满足冬季蒸汽使用要求,减少燃油锅炉的开启时间,节省油耗。在冬季部分负荷时,综合油耗能降低 $2 \sim 6 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

3 营运性减排措施对主机的影响

相对于技术性减排措施,营运性减排措施所需要的投资相对较小,对于现有船舶更具有可行性。

3.1 减速

《2014 年 IMO 第三次温室气体研究报告》^[3] 中

曾指出:“2007 ~ 2012 年期间,船舶航运业普遍实行低速航行。相对于设计速度,海上航速平均降低了 12%, 平均每日燃料消耗量减少了 27%”。但同时也指出:“船舶航速的降低和燃料消耗量的减少与能效的提高不成正比,因为降低航速后,相同数量的运输工作将需要更多的船舶(或在海上航行更长时间)来完成”。且减速后可能增加港口等待时间,增加成本,货物可能转向并不比航运节能环保的陆运。因此,必须对这一措施的可行性进行详细的审议和分析;还必须考虑低速运行可能带来的负面影响,如振动加剧、燃烧室和排气系统积炭等问题。

3.2 智能化对营运减排的影响

整个产业链效率的提升也是未来的发展趋势,基于云计算、物联网、人工智能等技术发展的智能船舶可能是众多选项中的一个。智能船舶可以方便地根据海洋和气象数据,对航线进行优化,在整个航程中实时设计并优化航路和航速,以减少燃油消耗,节省航行成本,降低 CO_2 排放。

得益于大数据及人工智能技术的发展,发动机数字专家系统已经得到很大进步。如 MAN-ES 的能效管理系统 (EMS, Energy Management System) 系统、WinGD 的集成数字专家系统 (WiDE, WinGD Integrated Digital Expert), 它们都由数据采集、监测系统及智能诊断系统组成,可以从主机上采集各种信号,并优化数据的可视化,既可在船上显示,也可以在岸基显示。智能诊断系统可以使用这个数据库执行发动机诊断分析,建立发动机的数字孪生体,测量发动机的实际工作性能,并分析量化船上发动机性能与台架最佳性能之间的偏差,给出问题的根本原因分析,提供优化和操作建议。支持中心也可以定期提供有关机器健康状况的报告以指导船舶主机维护,减少意外停机。另外,主机设计方、建造方、船东及岸基技术中心都可以进行远程支持协作。近年来不断增多的海事 VAST 装置、港口 WIFI 为这种数据连接提供了可能。

如今,主机智能燃烧控制系统已经成为船用低速柴油机的标准配置。该系统可根据主机最初的工厂台架性能数据,自动平衡所有气缸的压缩压力和发火压力,使每个缸均匀发火燃烧,降低了发动机的整体扭转振动;系统还有防止潜在的手动误操作功能。智能燃烧控制功能开启后,在主机全负荷范围内,燃油消耗降低最高可达 $1 \sim 2.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 减少了 CO_2 排放。

总之,主机智能数字专家系统能够及时优化发

动机的性能, 确保主机时刻处于最优工作状态, 减少计划外停机; 使视情维护成为可能, 节省燃油消耗成本, 为营运性减排提供了新的支承。

4 基于市场的减排措施对主机的影响

基于市场的减排措施本身并不能提高能源利用效率, 降低排放, 但有利于提高航运业各个环节节能减排的积极性, 是其它减排措施的有益补充。据报道, 目前市场上的双燃料及新能源主机订单, 背后都有相关基金或政府的政策支持。

以双燃料主机为例, 其试车所需的供气系统建设周期长、成本高昂, 前期进入该领域的主机厂商无法预料到市场上会出现超大功率双燃料主机, 更无法预测高压、低压双燃料机哪个会成为主导, 且不同燃料对供气系统的要求不同, 因此投资决策非常艰难。同时, 受制于政府有关环境、安全等政策, 建设双燃料供气系统的批复也比较难获得, 即使获得批复, 建设规模和使用规模也受到多种限制, 可能无法满足市场多样化及快速增加的需求。

如果未来 LNG 成为船舶主要燃料, 国内主机厂商新建或扩容供气系统势在必行, 若建立相关基金或出台相关产业引导政策, 将有利于提高我国在 LNG 船舶配套产业链的竞争优势。

以 MAN-ES 的 LNG (高压气态喷射和目前正在开发的低压喷射)、乙烷 (高压气态喷射)、甲醇 (液态喷射)、LPG (液态喷射) 双燃料主机为例, 其燃料的进机喷射压力、温度等都不尽相同, 若要建设同时满足这几种燃料的供气系统, 复杂度、难度及成本均很高。若只是预留接口, 部分设备共用, 将来建设时, 相关的手续亦非常繁杂, 给按期交付带来众多不利影响。目前, 只有一批 LPG 船主机正在由国内主机厂配套。前几年 MAN-ES 系列双燃料主机订单基本被日韩垄断, 他们建立了很高的壁垒, 特别是该双燃料主机的关键零部件, 国内配套能力很弱, 几乎全被日韩控制, 这也给国内主机厂突破和发展带来了很大的竞争压力。

船舶行业是竞争性行业, 如果仅仅依靠政府或外部作用推广某一新产品是很难的, 一旦扶持终止, 新产品能走多远会存在诸多疑虑。因此, 还是须政府、设计院所、船厂、主机厂、配套厂商等相关方协调推进, 探索技术与市场的最佳组合路径。

5 结语

IMO 通过船舶温室气体减排初步战略向国际

社会展示了航运业应对气候变化的坚定决心。我国作为《MARPOL 73/78 公约》和《联合国气候变化框架公约》的缔约国, 发展中国家控制温室气体效应的倡导国, 积极响应 IMO 船舶温室气体减排初步战略是义不容辞的责任和义务。但是, 我们必须正视初步战略对我国船舶主机行业可能带来的影响, 尽早深入研究各种减排措施, 为实施减排做充分的准备。加强船舶研发设计、制造、运营、检验、主机及其它各配套单位的通力合作, 在挑战中寻找方向、突破点和机遇。积极推进 LNG 主机及相关关键零部件、技术和供应链建设。加强智能船、智能主机的研发, 为营运减排提供强有力的支承。提前加强关键供应链的建设和相关复合型人才的培养。

参考文献

- [1] Marine Environment Protection Committee. Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships [R]. 2018.
- [2] Lloyd's Register of Shipping (LR). Marine exhaust emissions research programme [R]. Lloyd's Register Engineering Services, UK, London, 1995.
- [3] SMITH T W P, JALKANEN J P, ANDERSON B A, et al. Third IMO greenhouse gas study 2014 [R]. 2015.
- [4] UNCTAD. Review of Maritime Transport 2018 [M]. United Nations Publication, 2018.
- [5] 张爽, 张硕慧, 李义良. 船舶温室气体减排措施及对我国的影响分析 [J]. 中国航海, 2010, 33 (3): 69-72.
- [6] SHIZHI Y. EEDI index assessment and GHG emission reduction measures [J]. 中国船检, 2011, 173 (10): 5914-7.
- [7] EIDE M S, LONGVA T, HOFFMANN P, et al. Future cost scenarios for reduction of ship CO₂ emissions [J]. Maritime Policy & Management, 2010, 38 (1): 11-37.
- [8] MAN Market Update Note. Light running margin (LRM) [R]. Augsburg, Germany: MAN Diesel & Turbo, 2015.
- [9] WinGD_ TIN-001. Light running margin [R]. 2015.
- [10] ITTC. Testing and extrapolation methods, propulsion, performance, predicting powering margins: Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-03-01.5 [R]. 2008.
- [11] MAN Market Update Note. Enhanced torque reserve for MAN B&W S and G-type engines for adequate ship acceleration [R]. Augsburg, Germany: MAN Diesel & Turbo, 2015.
- [12] 吴小平. 船舶螺旋桨轻转裕度探讨 [J]. 船舶与海洋工程, 2017 (5): 64-67.

(下转第 20 页)

漏量占比计算值与平台试验值接近；三维流固耦合计算由于考虑的是偶件在极限变形情况下的泄漏量占比，因此其数值比平台试验值要大。

表 9 偶件泄漏量占循环油量比值对比

方法		柱塞偶件泄漏 占比/%	针阀偶件泄漏 占比/%
一维计算模型	冷态	0.15	0.003
	热态	0.03	0.13
平台试验	冷态	0.06	0.12
	热态	0.06	0.16
三维流固耦合计算		3.21	0.92

4 结 论

通过对燃油系统的一维流动计算、两对重要偶件的三维流固耦合计算及平台测试对比分析，得到如下结论：

(1) 一维冷、热态模型计算得到的偶件燃油泄漏量占循环油量的比值 $\leq 0.16\%$ 。

(2) 三维流固耦合计算表明：偶件间隙变形量增大会导致燃油经间隙的泄漏成倍数增加，但由于机械

式燃油喷射系统工作模式为间歇式加压，最大变形量下间隙泄漏量占循环油量的比值也不超过 5%。

(3) 冷、热态模式下的平台试验结果表明：偶件泄漏量占循环油量的比值 $\leq 0.22\%$ 。

综上，三种方法得到的喷油泵和喷油器偶件的燃油泄漏量占循环油量的比值均非常小，说明偶件间隙并非是影响机械式燃油系统喷射特性的主要因素。

参考文献

- [1] 王钧效, 陆家祥, 王桂华, 等. 柴油机燃油物性参数的研究 [J]. 内燃机学报, 2001, 4 (19): 507-510.
- [2] 仇滔, 刘兴华. 电控单体泵供油系统仿真研究 [J]. 车用发动机, 2005 (2): 23-25.
- [3] LINO P, MAIONE B, RIZZO A. Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines [J]. Applied Mathematical Modelling, 2007 (31): 1770-1784.
- [4] 贾锡印, 李晓波. 柴油机燃油喷射及调节 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002.
- [5] 王钧效, 陆家祥, 王桂华, 等. 柴油机燃油物性参数的研究 [J]. 内燃机学报, 2001, 4 (19): 507-510.
- [6] 仇滔, 刘兴华. 电控单体泵供油系统仿真研究 [J]. 车用发动机, 2005 (2): 23-25.
- [7] LINO P, MAIONE B, RIZZO A. Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines [J]. Applied Mathematical Modelling, 2007 (31): 1770-1784.
- [8] 贾锡印, 李晓波. 柴油机燃油喷射及调节 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002.
- [9] 王钧效, 陆家祥, 王桂华, 等. 柴油机燃油物性参数的研究 [J]. 内燃机学报, 2001, 4 (19): 507-510.
- [10] 仇滔, 刘兴华. 电控单体泵供油系统仿真研究 [J]. 车用发动机, 2005 (2): 23-25.
- [11] LINO P, MAIONE B, RIZZO A. Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines [J]. Applied Mathematical Modelling, 2007 (31): 1770-1784.
- [12] 贾锡印, 李晓波. 柴油机燃油喷射及调节 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002.
- [13] DNV GL. DNV GL rules: Ships (RU-SHIP), document: DNV GL-RU-SHIP-Pt4Ch2 [R]. 2015.
- [14] 惠磊. 船舶加速性问题及解决方案研究 [J]. 珠江水运, 2016 (16): 92-94.
- [15] UNCTAD. Review of Maritime Transport 2017 [M]. United Nations Publication, 2017.
- [16] Win GD. GHG emissions reduction through X-DF engines [EB/OL]. <https://www.wingd.com/en/documents/general/brochures/environmental-technologies/>
- [17] 甘少炜, 雷伟, 周国强. 甲醇: 未来船用燃料 [J]. 中国船检, 2016 (8): 90-94.
- [18] DNV GL. 2025 技术展望 [R]. 2016.

(上接第 7 页)