

上海市船舶与海洋工程学会 2020 年学术年会轮机专场论文专栏

船舶港航减排技术研究

郭晟江

(上海船舶研究设计院, 上海 201203)

摘要: 以某滚装渡船为对象分析不同推进动力技术在港航减排方面的效果。重点关注进出港航行时的推进动力源, 分析采用 PTO、PTI 和船用电池等不同配置时的减排环保收益和投资回报等, 并拓展加入不同航线行程占比和不同进出港时间两个分析因素。分析结果表明: 虽然电池技术减排效果明显, 但目前比较经济的方式是在已装备 PTO 的船舶上增加 PTI 配置。

关键词: 船舶; 港航; 减排; 船用电池; 推进动力

中图分类号: U664.81, TK421+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)03-0006-04

Research on Marine Emission Reduction Technology During Port-Navigation

Guo Shengjiang

(Shanghai Merchant Ship Design & Research Institute, Shanghai 201203)

Abstract: Based on a Ro-Ro ship, the port-navigation emission reduction effect with different propulsion technologies was analyzed, with the focus on the propulsion source when the ship is arriving and departing the port. The emission reduction and return on invest were studied when using different technologies with PTO, PTI and marine battery. Two more factors, the ratio of different navigation routes and different arriving-departing port time were also analyzed. The analysis results show that, though marine battery achieves obvious emission reduction, the more economic way is to add PTI to a ship equipped with PTO.

Key words: ship; port-navigation; emission reduction; marine battery; propulsion power

0 引言

2016 年 1 月 1 日起, 中国船舶排放控制区对船舶排放的 SO_x 实施控制。2018 年 6 月发布通知, 扩大船舶排放控制区; 同时新增 NO_x 排放控制要求, 须满足 C1、C2 排放要求。

2020 年 1 月 1 日起, EEDI phase 2 开始实施。

2021 年 1 月 1 日起, 波罗的海和北海成为新的 NO_x 排放控制区。

由此可见, 全球对船舶空气污染排放限制的要求呈日趋严格趋势。与此同时, 替代燃料, 如生物燃料、LNG 和船用电池等的发展已成为航运界关注的重点。

DNV GL 首次发布了“ENERGY TRANSITION OUTLOOK 2018”(ETO, 能源变革预测 2018), 全

面展示了 DNV GL 对全球 2050 年前能源消耗和转换方面发展趋势的预测, 特别提到石油燃料被替代是不可逆转的。

挪威政府从 2015 年起在其国内沿海开始实施“绿色航运计划”研究项目, 目的是在未来不断增长的绿色技术和解决方案需求的国际市场上占得先机, 提高挪威的竞争力和促进就业。其中, 纯电力、油电混合动力等方面的电池应用是绿色航运计划的重要研究内容。

各船级社也纷纷发布有关电池应用的指南, 以指导业内实施电池在船安装与维护。如:

• RINA 在规范中明确了电池应用的细则要求, 并可提供 Battery Powered (nnn [kWh]) * 入级符号。其中“Battery Power”代表电池动力, nnn 代表数字。

· ABS 于 2017 年发布了混合动力推进指南，并可提供 ESS-LiBATTERY（锂电池能量储存系统）入级符号。

· CCS 于 2019 年 6 月发布了混合动力船舶检验指南，并可提供 Hybrid Ship（混合动力船）入级符号。

西门子作为全球电气工业巨头，在直流电力推进和电池应用方面有丰富的经验。其电池能量管理系统已应用在拖轮“Edda Frende”、客滚船“Scandlines”、平台供应船（PSV）等项目上。

船东在船用电池应用方面也有很多积极举措。马士基航运公司近日宣布在旗下的“马士基-开普敦”轮上试用集装箱式 600（kW·h）船舶电池储能系统，在减少二氧化碳排放的同时，提高船舶性能和海上航行可靠性。国内也将在上海长兴岛与横沙岛间建造一型纯电力客渡船，其动力源为超大型电容装置。

作为船舶设计者，一方面须关注这些趋势，另一方面还须考虑新技术对船舶设计的影响，如不同船型、不同用途、不同航行特点的船舶对于新技术的适用性，尤其是排放控制的回报。

本文以某火车渡船作为分析对象，首先从采用减排技术配置后的环保收益^[1]、投资回报等方面入手分析，然后拓展至对不同航线行程时间占比、不同进出港时间方面进行分析。希望据此能对船用电池在降低排放方面的表现有所阐明，给船东应用船用电池提供借鉴。

1 正常航线时不同推进方案的减排分析

1.1 基础配置

该型船为双机双桨、尾推进方式，满足 Tier III 排放要求。主推进系统采用低速柴油机驱动可调螺距螺旋桨的方式。船东预留了轴发（PTO）安装空间。

主机（M/E）和主发（A/E）的基本参数见表 1。

表 1 主机和主发基本参数

主机		主发	
型号	6S35ME-B9.5 EcoEGR	型号	7L23/30H&8L23/30H
SMCR/kW	4 800	容量/kWe	1 164 × 2 + 1 330 × 1
Tier III 技术	EcoEGR	Tier III 技术	LP SCR
数量/台	2	数量/台	3

1.2 减排技术配置

为提升该船减排能力，在基础配置的基础上增

加 PTO、PTI 和电池供电，其中，电池供电可满足一定的推进需求，尤其是进出港时。这些配置可分别带来以下益处。

· PTO：基于主机相比主发较低的单位功率油耗率，降低排放量。

· PTI：基于仅主发运行工况下相对较低的电站负荷，降低排放量。

· 电池供电：基于电力推进不消耗燃料，不产生废气排放，降低排放量。

1.3 基本信息

该船有关航行、推进、电站、充电的基本信息见表 2。

表 2 船舶航行、推进、电站充电等基本信息

基本信息	Mobile 港口 航道（A1）	墨西哥湾 航线（A2）	Coatzacoalcos 港口航道（A3）
航程/n mile	20	830	4
航速/kn	8	12.6	8
航行时间/h	2.5	65.9	0.5
推进所需功率/kW	1 000	3 800	1 000
PTO 电站负荷/kW	1 557	1 557	1 557
PTI 电站负荷/kW	1 058	—	1 058
电池电站负荷/kW	950	—	950
电池容量/(kW·h)	5 750	—	1 150
电池充电时间/h	—	2	—
电池充电功耗/kW	—	1 200	—
每年航程次数/次	104		

1.4 推进方案定义

共定义了 4 个推进方案，各方案的基本情况见表 3。

表 3 推进方案

方案名称	方案描述
方案 1	主推进系统增加 PTO 功能装置；航行、进出港均采用 PTO。
方案 2	主推进系统增加 PTO、PTI 功能装置；航行采用 PTO，进出港采用 PTI。
方案 3	主推进系统增加 PTO、PTI 和电池功能装置；A1 港口进出港采用 PTI，航行采用 PTO，A3 港口进出港采用电池；A3 港口进港用电池可由 A1 港口岸电或航行时充电。
方案 4	主推进系统增加 PTO、PTI 和电池功能装置；航行采用 PTO，进出港采用电池；A1 港口出港用电池由 A1 港口岸电充电；A3 港口进港用电池由航行时充电。

各方案的配置与功耗见表 4。

表 4 各推进方案功耗

航区	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4	
	配置	功耗/kW	配置	功耗/kW	配置	功耗 kW	配置	功耗/kW
A1	PTO (M/E)	2 557	PTI (A/E)	2 058	PTI (A/E)	2 058	BATT	5 750
A2	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357
A3	PTO (M/E)	2 557	PTI (A/E)	2 058	BATT	1 150	BATT	1 150

由表 4 可知, 方案 4 的 A1 进出港工况航程时间长, 故电池功耗最大。

1.5 各方案油耗和排放比较

各方案单航程的油耗、CO₂、NO_x 及 HC 排放量见表 5。可以看出: 方案 4 的油耗量最低, 相应的, CO₂ 等排放量也最少。

表 5 各推进方案油耗和排放

油耗及排放	航区	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
油耗/t	A1	1.20	1.02	1.02	0.00
	A2	62.18	62.18	62.39	62.39
	A3	0.24	0.20	0	0
	合计	63.62	63.40	63.41	62.39
CO ₂ 排放量/t	A1	3.82	3.24	3.24	0.00
	A2	197.91	197.91	198.58	198.58
	A3	0.76	0.65	0	0
	合计	202.50	201.80	201.83	198.58
NO _x 排放量/kg	A1	20.97	11.88	11.88	0.00
	A2	1 157.45	1 157.45	1 161.39	1 161.39
	A3	4.19	2.38	0	0
	合计	1 182.61	1 171.71	1 173.27	1 161.39
HC 排放量/kg	A1	2.30	1.85	1.85	0.00
	A2	127.04	127.04	127.47	127.47
	A3	0.46	0.37	0	0
	合计	129.80	129.26	129.32	127.47

考虑初投资、年营运情况等因素, 以方案 1 为基准, 各方案的排放及综合经济评估见表 6。

通过分析可知: 方案 2 采用 PTI 方式, 可在 10 年内收回初投资, 而采用电池的方案 3 和方案 4, 则在船舶营运寿命期内无法收回初投资。

2 主航线时间占比不同时不同推进方案的减排分析

在正常航线的分析中, 由于主航线时间占比超过 95%, 采用方案 2、方案 3 和方案 4 后所获得的减排收益在整个营运周期内不明显, 回报时间非常长。以下对不同的主航线时间占比对减排收益的影响进行分析。基于正常航线的基础配置和减排技术配置, A 港口航道航行时间 (A1) 和 B 港口航道

航行时间 (A3) 均取 1.5 h, 考虑主航线时间占比分别为 25%、50% 和 75%。

表 6 各推进方案排放及综合经济数据 (与方案 1 相比)

对比项	方案 2	方案 3	方案 4
初投资/美元	100 000	847 500	3 837 500
营运航程数/(次·y ⁻¹)	104		
油耗/(t·y ⁻¹)	-22.7	-21.9	-127.8
CO ₂ 排放量/(t·y ⁻¹)	-72.2	-69.7	-406.9
NO _x 排放量/(kg·y ⁻¹)	-1 133.5	-971.4	-2 207.4
HC 排放量/(kg·y ⁻¹)	-56.0	-49.6	-242.3
MGO 价格/(美元·t ⁻¹)	600		
燃料费用/(美元·y ⁻¹)	-13 614.0	-13 133.0	-76 701.0
初投资/燃料费用	7.3	64.5	50.0
船舶营运时间/y	30		
预计商贷利率/%	0.05		
营运费/美元	-408 420	-393 990	-2 301 030
营运净值/美元	-219 745	-211 981	-1 238 036
预期回报时间/y	9.38	回报时间过长	回报时间过长

2.1 方案定义

共设计 5 个推进方案, 其中, 方案 1 ~ 方案 4 同 1.4 节, 增加方案 5, 如下。

方案 5: 主推进系统增加 PTO、PTI 和电池功能装置; A1 港口出港用电池由 A1 港口岸电充电, 航行采用 PTO, A3 港口进港采用 PTI; A3 港口出港用电池由 A3 港口岸电充电, 航行采用 PTO, A1 港口进港采用 PTI。

各方案的配置与功耗见表 7。由表 7 可知, A1 和 A3 航行时间相同后, 电池功耗也一样。

2.2 各方案数据比较

不同航线时间占比下各方案的油耗和排放降低率, 以及投资、回报的比较见表 8。

由表 8 可知: 主航线占比时间为 25% 时油耗和排放降低率最大; 随着主航线占比时间的增加, 降低率随之下降。其中, 方案 5 的主航线占比时间为 25%, 效果最明显。方案 2 的初投资最少, 回报时间最短。方案 3、方案 4 和方案 5 的初投资相同, 但回报时间方案 5 相对较短, 其中又以主航线占比时间为 25% 时最短。

表 7 不同主航线时间的推进方案功耗

航区	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5	
	配置	功耗/kW	配置	功耗/kW	配置	功耗/kW	配置	功耗/kW	配置	功耗/kW
A1	PTO (M/E)	2 557	PTI (A/E)	2 058	PTI (A/E)	2 058	BATT	3 500	BATT	3 500
A2	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357
A3	PTO (M/E)	2 557	PTI (A/E)	2 058	BATT	3 500	BATT	3 500	PTI (A/E)	2 058

表 8 不同主航线时间下各推进方案相关数据（与方案 1 相比）

对比项	方案 2			方案 3			方案 4			方案 5		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
油耗降低率/%	9.1	5.1	2.2	5.0	2.1	0.1	30.6	16.4	6.2	34.2	18.4	7.1
CO ₂ 排放降低率/%	9.1	5.1	2.2	5.0	2.1	0.1	30.6	16.4	6.2	34.2	18.4	7.1
NO _x 排放降低率/%	25.5	13.9	6.0	12.3	6.7	2.9	28.9	15.8	6.8	42.2	23.1	9.9
HC 排放降低率/%	11.5	6.3	2.7	5.3	2.9	1.2	28.9	15.8	6.8	35.2	19.2	8.2
初投资/万美元	10.0			237.5			237.5			237.5		
回报时间/y	1.63	1.63	1.63	—	—	—	16.04	17.03	20.95	13.62	14.32	16.91

3 进出港航行时间不同时不同推进方案的减排分析

本节对进出港时间的长短对减排收益的影响进行分析。基于正常航线的基础配置和减排技术配置，主航线航行时间设定为 3 h，改变 A 港口航道航行时

间（A1）和 B 港口航道航行时间（A3），即进出港航行时间分别设定为 0.5 h、1.0 h 和 1.5 h。

3.1 方案定义

方案定义同 2.1 节。各方案的配置与功耗见表 9。由表 9 可知，随着进出港航行时间的增加，电池功耗也随之增加，这也影响了电池初投资费用。

表 9 不同进出港航行时间下各推进方案功耗

航区	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5	
	配置	功耗/kW	配置	功耗/kW	配置	功耗/kW	配置	功耗/kW	配置	功耗/kW
A1	PTO (M/E)	2 557	PTI (A/E)	2 058	PTI (A/E)	2 058	BATT	1 150 (2 550) [3 500]	BATT	1 150 (2 550) [3 500]
A2	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357	PTO (M/E)	5 357
A3	PTO (M/E)	2 557	PTI (A/E)	2 058	BATT	1 150 (2 550) [3 500]	BATT	1 150 (2 550) [3 500]	PTI (A/E)	2 058

注：表中（）、[] 内功耗分别为进出港航行时间为 1 h、1.5 h 时的电池功耗。

3.2 各方案数据比较

不同进出港航行时间下各方案的油耗和排放降

低率，以及投资、回报的比较见表 10。

表 10 不同进出港航行时间下各推进方案的相关数据（与方案 1 相比）

对比项	方案 2			方案 3			方案 4			方案 5		
	0.5 h	1.0 h	1.5 h	0.5 h	1.0 h	1.5 h	0.5 h	1.0 h	1.5 h	0.5 h	1.0 h	1.5 h
油耗降低率/%	2.2	3.8	5.1	0.6	1.4	2.1	6.7	12.1	16.4	7.0	13.4	18.4
CO ₂ 排放降低率/%	2.2	3.8	5.1	0.6	1.4	2.1	6.7	12.1	16.4	7.0	13.4	18.4
NO _x 排放降低率/%	5.9	10.4	13.9	3.4	5.2	6.7	7.3	12.1	15.8	9.8	17.2	23.1
HC 排放降低率/%	2.7	4.7	6.3	1.8	2.4	2.9	7.3	12.1	15.8	8.2	14.4	19.2
初投资/万美元	10.0	10.0	10.0	88.0	159.5	237.5	88.0	159.5	237.5	88.0	159.5	237.5
回报时间/y	5.34	2.49	1.63	—	—	—	21.86	17.53	17.03	20.13	15.06	14.32

（下转第 26 页）

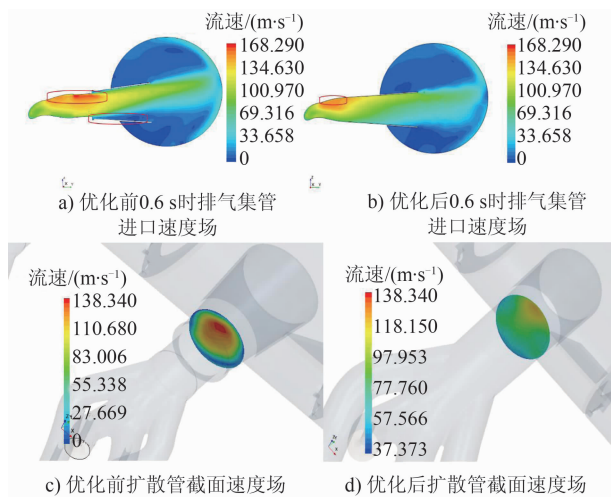


图 7 设计优化前后排气集管进口速度场对比

以上验证表明：大排进口流道形状和扩散管的设计对排气集管的性能有至关重要的影响；结合

(上接第 9 页)

由表 10 可知：进出港航行时间为 1.5 h 时，油耗和排放降低率最大；随着进出港航行时间的减少，降低率随之下降。其中，方案 5 进出港航行时间为 1.5 h 的减排效果最明显。方案 2 的初投资最少，回报时间最短。方案 3、方案 4 和方案 5 的初投资各不相同，随着进出港航行时间的增加，初投资相应增加；但回报时间方案 5 相对较短，其中又以进出港航行时间为 1.5 h 时的回报时间最短。

4 结语

通过上述对各推进方案在不同主航行时间和进出港航行时间的表现分析，可以总结出以下几点。

(1) 受电池容量的限制，目前的电池技术尚不适用于给长途远洋航行货船提供动力，只能在船舶

CFD 分析进行的优化设计使排气集管性能得到大幅提高。

4 结论

本文基于 CFD 分析，发现原始排气集管设计存在不足，对此进行优化设计。优化后的排气集管进口截面速度均匀性从 0.76 提升至 0.93，出口质量流量增加 1.3%，压力损失减小 8 400 Pa。排气集管性能得到明显提高。

将 CFD 模拟计算技术应用于柴油机排气集管设计，能够可视化分析气流在管道内部的流动情况，可在很大程度上为排气系统的优化设计提供理论指导，大大缩短设计开发周期，提高研发的成功率。

进出港航行时替代主机给船舶提供推进动力；

(2) 短途航行船舶采用电池技术提供推进动力，其减排收益、回报时间等效果明显；

(3) 采用电池技术提供推进动力，航行时间越长，其减排收益、回报时间等效果越明显；

(4) 虽然采用电池技术在减排方面可以收到较大收益，但就目前而言比较经济的方式是：在已装备 PTO 的船上增加 PTI 功能（即方案 2），其投资回报效果最佳，同时还能获得较好的减排收益。

参考文献

- [1] 随丛标. 现有电池技术不适用于货船的减排需求 [J]. 船舶推进与辅助机械, 2019 (8/9): 50-53.