

文章编号:1671-1637(2022)04-0028-19

绿色集装箱港口节能减排策略综述

彭云¹, 李相达¹, 王文渊¹, 任莉²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海洋大学
机械与动力工程学院, 辽宁 大连 116300)

摘要:综述了绿色集装箱港口节能减排策略,总结了国内外针对在港船舶、场桥、集卡与岸桥节能减排的措施与减排效果量化方面的研究成果,提出了未来的研究方向。研究结果表明:船用替代燃料(包括液化天然气、生物燃料、新能源)减排效果明显,针对替代燃料动力船应用困难问题,未来可重点研究替代燃料配套设施建设时序、补贴政策确定等问题;船舶采用岸电技术依据各地区碳排放系数不同可减少48.0%~70.0%的船舶在泊CO₂排放,考虑岸电设施使用率低等问题,港口岸电定价、船舶与码头配套设施改造时序等问题成为未来研究重点;降低船速可减少8.0%~20.0%的船舶在港CO₂排放;降低船舶非生产等待时间及辅助作业时间,并不能显著降低船舶在港CO₂排放,后续还可进一步研究如何通过港口资源合理调度等方式减少船舶在港等待时间;设立硫排放控制区可减少33.0%~34.6%的SO₂排放,还可继续研究排放控制区对船舶运营与港口运营的影响;场桥、集卡与岸桥节能减排措施主要为设备改造及优化调度,未来可继续研究既有设施设备节能改造时序,并分析在港船舶与装卸设备各减排措施集成下的综合减排效果;新能源供电系统在港口中的应用尚处于起步阶段,未来可研究港口新能源电力系统设计方法,构建清洁低碳的港口能源体系。

关键词:水路运输;绿色港口;集装箱港口;节能减排;岸电;新能源

中图分类号:U691 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.04.003

Review on energy saving and emission reduction strategies of green container ports

PENG Yun¹, LI Xiang-da¹, WANG Wen-yuan¹, REN Li²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116300, Liaoning, China)

Abstract: The energy saving and emission reduction strategies of green container ports were reviewed, the research achievements of the measures and effect quantification for energy saving and emission reduction in terms of ships, yard cranes, trucks, and quay cranes were summarized, and the future research directions were proposed. Research results show that marine alternative fuels, including liquefied natural gas (LNG), biofuels, and renewable energy show great potential in emission reduction. In terms of difficulties in the application of ships powered by alternative fuels, future research can be carried out to analyze the construction time sequence of

收稿日期:2022-03-31

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2600200)

作者简介:彭云(1988-),女,辽宁铁岭人,大连理工大学副教授,工学博士,从事绿色及生态型港口规划研究。

通讯作者:任莉(1973-),女,辽宁沈阳人,大连海洋大学副教授,工学博士。

引用格式:彭云,李相达,王文渊,等.绿色集装箱港口节能减排策略综述[J].交通运输工程学报,2022,22(4):28-46.

Citation:PENG Yun, LI Xiang-da, WANG Wen-yuan, et al. Review on energy saving and emission reduction strategies of green container ports[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(4): 28-46.

supporting facilities by alternative fuels and the determination of subsidy policies. On the basis of different emission coefficients of different regions, CO₂ emissions of ships can be reduced by 48.0%-70.0% by applying shore power technologies. In view of the low utilization rate of shore power facilities, the pricing of shore power and the time sequence of retrofitting ship and port supporting facilities will become the focus of future research. Reducing ship speed can reduce 8.0%-20.0% CO₂ emission from ships at port. The CO₂ emissions of ships at port cannot be significantly cut by shortening unproductive waiting time and auxiliary operation time of ships, and how to reduce the waiting time of ships at port by reasonable scheduling of port resources can be studied in the future. SO₂ emission of ships can be cut by 33.0%-34.6% by setting up sulfur emission control areas, and research on the impact of emission control areas on ship operation and port operation can be carried out. Energy saving and emission reduction measures for yard cranes, trucks, and quay cranes mainly concentrate on equipment transformation and scheduling optimization, and research can be conducted on the time sequence of retrofitting existing facilities and equipments for energy saving, and the comprehensive emission reduction effect under the integration of various emission reduction measures of ships and loading/unloading equipments at port. The application of new energy supply system at port is still in its infancy, and the design method of new energy system can be studied to build a clean and low-carbon port energy system in future. 5 tabs, 4 figs, 130 refs.

Key words: waterway transportation; green port; container port; energy saving and emission reduction; shore power; new energy

Author resumes: PENG Yun(1988-), female, associate professor, PhD, yun_peng@dlut.edu.cn; REN Li(1973-), female, associate professor, PhD, renli@dlou.edu.cn.

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2021YFB2600200)

0 引言

建设“安全便捷、智慧绿色、经济高效、支撑有力、世界先进”的世界一流港口是贯彻落实《交通强国建设纲要》、服务国家重大战略的重要支撑。随着集装箱港口业务量的提升,港口能耗和污染排放日益增加^[1]。如何建设以资源节约、环境友好、低能耗、低污染为特征的绿色集装箱港口已成为世界一流港口建设的首要任务之一,研究集装箱港口节能减排策略已成为建设和发展绿色集装箱港口的迫切需求。

在绿色港口提出之初,并没有统一的定义与标准,相关学者对于绿色港口的概念定义进行了广泛的讨论,如王昊宇^[2]提出绿色港口,即在港口的全生命周期内,最大限度地节约资源,保护环境,减少污染,为水运提供适用和高效的使用空间;陈晓峰等^[3]指出绿色港口是在环境影响和经济利益之间取得一个可以接受的平衡;Trozzi等^[4]提出绿色港口是一种可持续发展的港口,不仅满足环境要求,而且提高了其社会经济利益。随着近些年《交通运输节能环保“十三五”发展规划》《深入推进绿色港口建设行动

方案(2018—2022年)(征求意见稿)》等港口绿色发展系列文件的出台,绿色港口的概念与发展道路愈发清晰。在2020年7月出台的《绿色港口等级评价指南》中,中国首次提出了绿色港口的定义:绿色港口是在生产运营和服务过程中,贯彻绿色发展理念,积极履行法律责任和社会责任,综合采取节约资源和能源、保护环境和生态、应对气候变化的技术和管理措施,达到了绿色港口等级评价要求的港口及码头。

港口的生产运营阶段历时最久,总排放量最大,总污染最严重。集装箱港口的运营阶段,包括船舶进出港作业、码头前沿作业、堆场作业、大门作业^[5-6]等复杂生产作业系统的各个环节,涉及船舶、岸桥、场桥、集卡等能耗和排放源。为此,本文重点综述集装箱港口运营阶段的节能减排策略,针对生产作业系统各个环节,考虑绿色港口政策、港口调度与管理、资源合理利用、港口节能减排技术等方面,推进建设环境友好、生态保护、资源节约的绿色集装箱港口。

有关绿色集装箱港口节能减排的研究主要包括3个阶段。第1阶段主要针对概念的提出^[7]、政策

的制定与实施^[8]、评价体系的构建^[9-11]等进行研究;第2阶段从技术手段和运营管理等方面,提出绿色集装箱港口的节能减排策略,例如:船用燃料替代^[12-13]、岸电系统设计与配置^[14-16]、调整船舶航速^[17-18]、场桥“油改电”^[19-20]、集卡“油改电”^[21]、设备优化配置与调度^[22-24]、设置排放控制区^[25-27]等;第3阶段从优化港口能源结构角度,推广清洁能源(如液化天然气^[28]、海洋能^[29-30]等)的应用,构建清洁低碳的港口能源体系。

然而,上述研究大多针对港口单一减排措施进行分析,未能总结集装箱港口节能减排策略的研究现状与发展趋势。鉴于此,本文整理国内外绿色集装箱港口节能减排策略相关研究,分别对在港船舶、岸桥、场桥、集卡的节能减排策略进行综述,总结研究现状及存在的问题,提出未来研究方向与发展趋势,为建设绿色、生态型港口提供参考。

1 文献统计分析

本文以2009年1月至2022年6月为时间跨度,在Web of Science(WOS)数据库与中国知网(CNKI)数据库等进行检索,统计分析相关文献的发表时间与数量。

1.1 文献检索

为保证相关文献检索的准确性和全面性、避免文献漏检和误检,需选取能全面描述、准确揭示绿色集装箱港口节能减排策略相关信息的检索词。为此,本文按以下4个步骤对绿色集装箱港口节能减排策略的相关检索词进行确定。

步骤1:初选检索词。在“绿色集装箱港口节能

减排策略研究综述”文献检索中,“green container terminal”“fuel saving”与“emission mitigation”能够表达检索主题,由此,作为初始检索词进行文献检索。

步骤2:扩充检索词范围。查验第1步检索结果,确认与该研究相关的主要期刊与文献是否出现在检索结果中,并依据检索结果中出现的篇名、摘要、关键字、章节名或全文中能表达该研究主题的专业名词术语扩充检索词范围,如“green port strategy”“alternative fuel”“cold ironing”与“energy consumption”等。

步骤3:选择不相关检索词。依扩充后的检索词进行检索并查询检索结果,筛选与该研究综述不相关的文献与研究领域,确定不相关检索词,如“automated control”及“telecommunication”等,并更新检索词结构。

步骤4:重复迭代步骤2、3,直到检索结果能全面准确地符合该研究综述的主题要求。

1.2 文献计量分析

通过在WOS数据库和CNKI数据库进行检索,分别检索到相关文献946、636篇。对检索到的中英文文献逐一阅读并进一步筛选,初步筛选出的文献应满足以下2个标准:(1)文献的主题研究领域必须与本文的关注领域相一致,如港口运营、船舶工程、燃料等相关研究领域,自动控制领域、物理、材料、生物等研究领域的文章应被排除;(2)文献类型应仅包含学术研究类型,用于获取经验证的研究成果,如期刊论文、学位论文、会议论文等。通过将初步检索得到的文献题目、摘要与筛选标准进行比对检验,得出关于绿色集装箱港口节能减排策略的相关文献390篇,如图1所示,其中2022年数据仅包

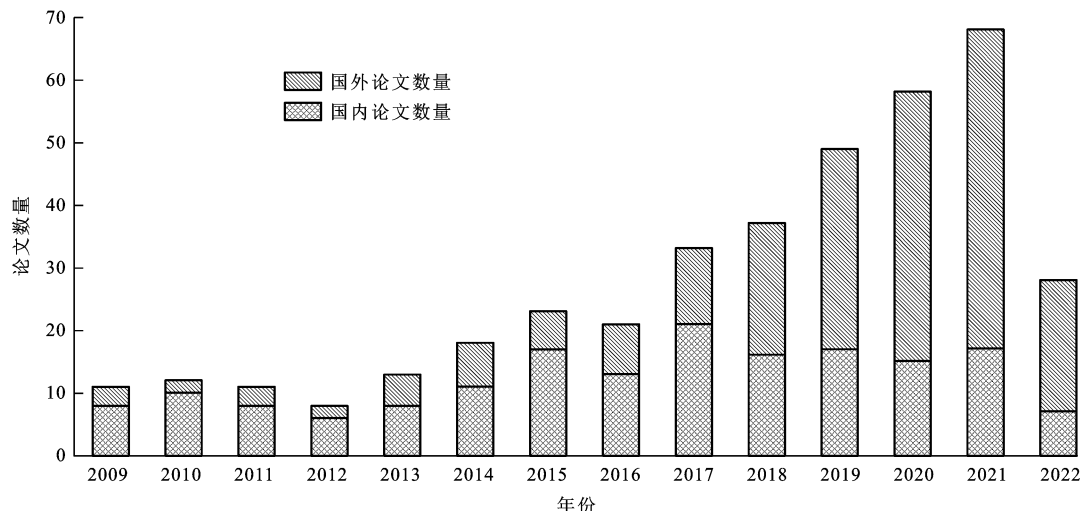


图1 2009~2022年绿色集装箱港口相关文献数量统计

Fig. 1 Quantitative statistics of literatures on green container port from 2009 to 2022

含1~6月。由图1可知:绿色集装箱港口节能减排策略相关文献自2009~2021年大致呈现上升趋势,且2021年的相关文献数量比2009年提高了5倍,绿色集装箱港口越来越受到学者们的关注。

进一步阅读390篇相关文献的全文,以评估文献的综述价值。为此设置3个评价标准:文献是否明确减排对象与研究方法,如公式计算、仿真分析等;文献是否对减排措施与其减排效果进行论述及量化分析;筛选关于船舶、岸桥、场桥、集卡节能减排以外的文献,包括绿色港口概念性介绍与定性讨论、港口集疏运系统节能减排措施、港口规划与建设阶

段节能减排措施等文献。经过进一步的评价与筛选,得到具有综述意义的国内外学术论文101篇,其中,在港船舶节能减排策略共63篇,场桥节能减排策略共14篇,集卡节能减排策略共9篇,岸桥节能减排策略共15篇(注:部分论文研究多个对象的节能减排策略,可重复使用)。

结合集装箱港口运营阶段及港口生产作业系统各个环节,将所有具有综述价值的文献分为在港船舶节能减排策略、场桥节能减排策略、集卡节能减排策略以及岸桥节能减排策略四方面,不同研究方向的文献分布如图2所示。

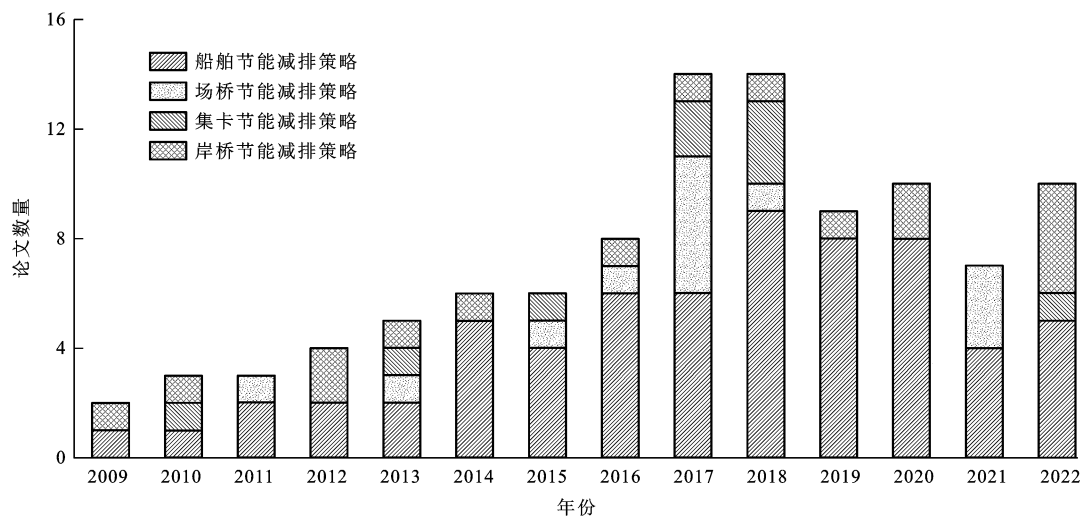


图2 不同研究方向的文献分布

Fig. 2 Distribution of literatures in different research aspects

图3为本文综述内容的概述。考虑船舶在港排放占港口排放的55.0%~77.0%^[31],为此,本文首先综述在港船舶节能减排策略,包括替代燃料、替代能源、运营策略优化与硫排放控制区;其次,综述港口装卸设备和运输设备的节能减排策略,包括场桥节能减排策略,分为场桥设备改造与场桥优化调度;集卡节能减排策略,分为集卡设备改造与集卡优化调度;岸桥节能减排策略,分为岸桥设备改造、岸桥优化调度与调整岸桥用电负荷峰值。

2 在港船舶节能减排策略

船用燃料主要包括重油、船用轻柴油与船用重柴油。根据第3次国际海事组织温室气体研究报告^[32],船用燃料消耗为 2.92×10^9 t(重油 2.28×10^9 t、船用重柴油 0.64×10^9 t),带来污染物排放量:硫氧化物(SO_x) 1.02×10^7 t、氮氧化物(NO_x) 1.90×10^7 t和颗粒物(PM) 1.40×10^6 t。尽管船舶在港排放占航运排放总量的比例很小,却是港口排放的主要来源

(约占55.0%~77.0%)^[31]。为此,国内外学者针对在港船舶节能减排策略进行了研究,包括使用替代燃料及能源、优化船舶运营策略、设置排放控制区等。在港船舶节能减排策略文献分布情况如图4所示。

2.1 替代燃料

2.1.1 LNG

液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)作为一种清洁高效的能源得到越来越多国家和地区的重视^[33-35]。国内外学者对LNG作为船用燃料的节能减排效果进行深入研究。Bouman等^[36]综述了船舶减排技术的相关研究,得出LNG相比传统船用燃油可降低 CO_2 排放5.0%~30.0%,且主要集中在25%左右;Gilbert等^[12]考虑船舶燃油切换系统设计,基于路线图方法研究LNG在船舶中的应用,结果表明:LNG作为船用燃料可减少 CO_2 排放10.0%;罗婷婷^[34]分别对比普通燃油、低硫燃油与LNG的排放情况,得出LNG作为船用燃料可降低碳排放23.8%~25.9%和氮排放75.0%~83.0%,并且实

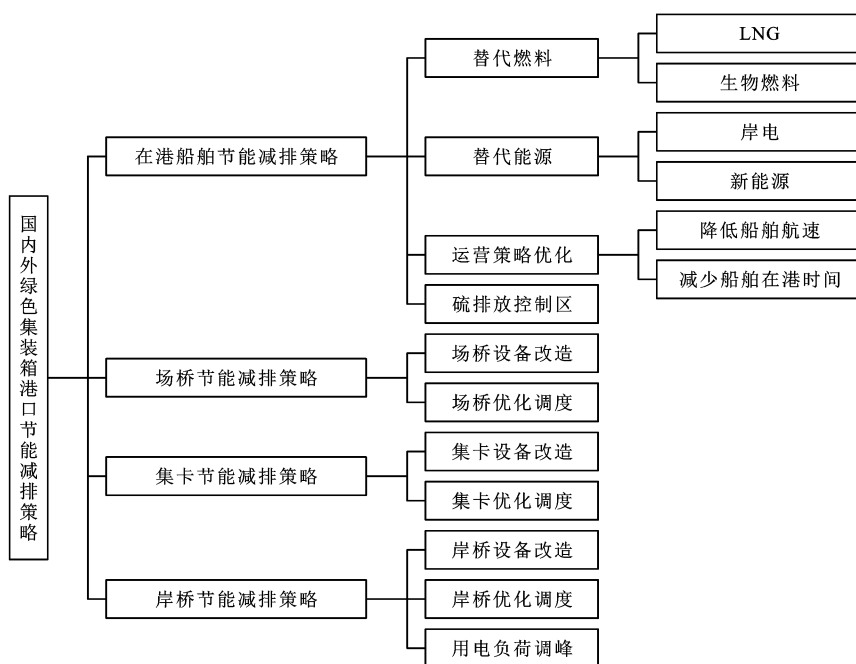


图3 综述内容

Fig. 3 Overview components

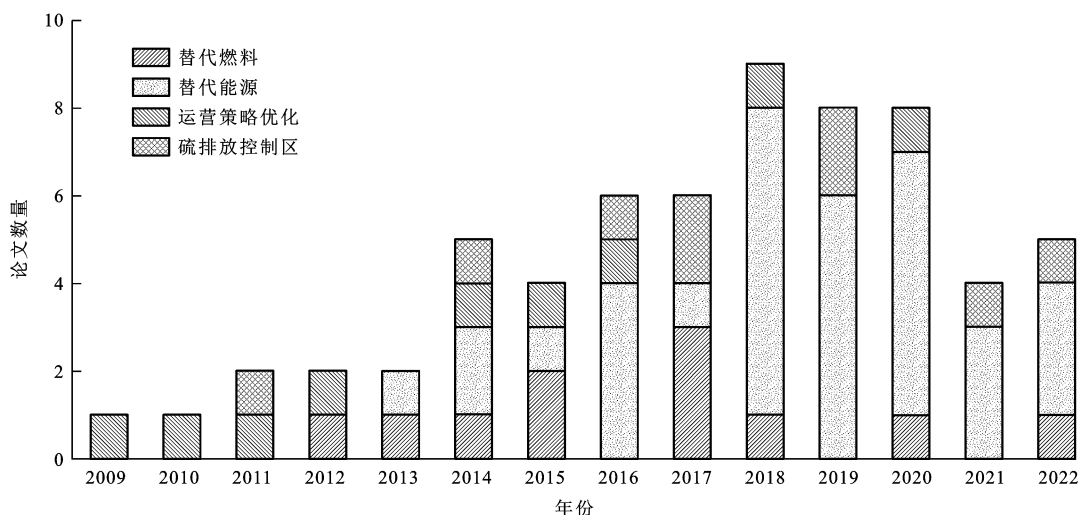


图4 在港船舶节能减排策略文献分布

Fig. 4 Distribution of literatures on energy saving and emission reduction strategies for ships at port

现硫和PM的零排放;Wang等^[37]提出了一个三层规划模型来求解船舶使用LNG作为燃料的政府补贴优化问题,该模型将政府、港口和船舶层面的决策进行整合,以最大化社会效益以及政府的净利润。

然而,LNG存在燃烧不充分、容易发生泄漏等问题,造成的温室效应远高于LNG作为船用燃料时对CO₂的减排效果。Styhre等^[13]指出以20年为测量基准,LNG泄漏产生的温室效应是LNG作为船用燃料减排效果的86倍,以100年为测量基准,LNG泄漏产生的温室效应是减排效果的34倍;Attah等^[38]在考虑船舶能效设计指标与双燃料柴油

电力推进系统的基础上,提出当LNG未充分燃烧时,温室气体排放指数会升高1.15倍,因此,需对LNG单燃料和LNG柴油双燃料船用天然气发动机、配套船舶设计制造、储罐、控制系统等进行技术改造和改良,减少LNG未充分燃烧造成的温室效应^[34,39]。

截至2018年3月,中国已建成LNG燃料动力船舶279艘^[33]。然而,在LNG燃料动力船舶推广应用中遇到了诸多障碍,例如,运营成本高,LNG燃料价格竞争力不足,配套基础设施滞后,技术规范不完善等。为充分发挥LNG作为绿色能源的优势,应加大LNG动力船舶政策支持及资金补贴力

度、加快基础设施建设、完善水上加注站布局,完善码头、安全区域评审标准等^[34-35]。

2.1.2 生物燃料

生物燃料具有无硫排放、极少量颗粒物排放等优势,在船舶交通行业逐渐得到应用和推广。Philipp 等^[40]对液化沼气的应用效果及前景进行了分析,发现液化沼气生命周期内的温室气体排放量更低,替代柴油作为船舶燃料可减少全生命周期温室气体排放量 75%;Eide 等^[41]对生物燃料应用现状及生物燃料价格进行分析,得出生物柴油和粗植物油是最具前景的船用生物燃料,相比船用柴油可减少 CO₂ 排放 19.0%~38.0%;Bouman 等^[36]运用统计分析的方法总结了 2009~2015 年国内外关于生物燃料在船舶中的应用研究现状,得出生物燃料相比传统船用燃料可减少 CO₂ 排放 25.0%~84.0%,其中甲酯、甲醇、混合生物柴油类生物燃料可降低 CO₂ 排放 70.0%~80.0%;Vleugel 等^[42]以鹿特丹港某集装箱码头为例,指出在 2033 年码头年

吞吐量达到 9.36×10^6 TEU 时,替代船用柴油可减少船舶航行和靠泊阶段 CO₂ 排放 2.45×10^4 t,减少 NO_x 排放 707 t,减少 PM₁₀ 排放 9.6 t。

然而,由于生物燃料使用特性复杂,技术成熟度低与经济原因,目前还很难被广泛使用。例如,Eide 等^[41]指出,生物燃料的不稳定性、腐蚀性以及对环境的负面影响是使用生物燃料所面对的主要挑战;Mander 等^[43]指出目前有限的可用性和较高的处理与维护成本(油箱与过滤器清洁)是船舶使用生物燃料时面临的实际问题。

现阶段多为在船上对多种生物燃料混合物进行测试^[44-46]。为充分发挥生物燃料减排的优势,需对传统船舶柴油发动机的设计与制造工艺进行改良和升级,布置安全、适当的生物柴油燃料储存和加注装置。此外,燃料系统和生物柴油燃料机器的调试、试验和维护应满足安全性、可用性和可靠性要求。

整理并总结归纳替代燃料领域相关文献,包括研究内容、研究对象、研究方法、减排效果等,如表 1 所示。

表 1 在港船舶节能减排策略研究汇总(替代燃料)

Table 1 Research summary on strategies of energy saving and emission reduction for ships at port (alternative fuels)

替代燃料	研究方法	研究对象	减排效果		参考文献
			CO ₂	NO _x	
LNG	统计	船队	23.8%~25.9%	75.0%~83.0%	罗婷婷(2018) ^[34]
	文献综述	船队	5.0%~30.0%	未提及	Bouman 等(2017) ^[36]
	公式计算	船队	10.0%	未提及	Gilbert 等(2014) ^[12]
生物燃料	仿真	鹿特丹港	2.45×10^4 t	707 t	Vleugel 等(2015) ^[42]
	统计	船队	19.0%~38.0%	未提及	Eide 等(2014) ^[41]
	文献综述	船队	25.0%~84.0%	未提及	Bouman 等(2017) ^[36]

2.2 替代能源

2.2.1 岸电

船舶在泊时通常采用柴油辅机供电,而辅机在工作时向空气中大量排放 CO、NO_x 和 SO_x 等污染物,同时,船舶产生的噪声也会对环境造成污染^[47-48]。此外,能源紧缺造成的国际原油价格的不断攀升也使得在泊船舶使用燃油发电的成本不断升高^[49]。为有效解决这一问题,船舶在泊作业采用岸电技术,以减少码头污染物排放。

在泊船舶使用岸电具有极大的环境效益。洛杉矶港和上海市交通委员会(原上海港)通过推动在泊船舶使用岸电,降低了 2 个港口的气体排放^[50]。Sciberras 等^[51]以欧洲港口为例,考虑岸电布置的多种形式,得出当船舶使用岸电时,可减少在泊船舶 CO₂ 排放 40.0%,当采用 LNG 发电的岸电设备时可显著降低港口硫和 PM 的排放;Peng 等^[15]对集装箱

码头配备岸电的经济效益和环境效益进行分析,得出在考虑直接排放的情况下,船舶使用岸电可实现在泊船舶零排放;Zis 等^[52]以欧洲不同海域(地中海、北海、英吉利海峡等)的港口为例,考虑在不同海域 CO₂、SO₂、NO_x 排放系数分别取 0.299~0.901、0~2.10、0.31~1.30 kg·kWh⁻¹,从全生命周期角度,量化了船舶使用岸电等减排措施的环境效益,研究结果表明:使用岸电可实现在泊船舶 CO₂ 减排 48.0%~70.0%、SO₂ 减排 3.0%~60.0%和 NO_x 减排 40.0%~60.0%;此外,Peng^[53]以连云港港一艘船舶的实测数据为依据,统计分析得出使用岸电每年可减少约 437 t 的船用燃料消耗;Sifakis 等^[54]以希腊米洛斯岛港口为背景,研究了结合氢能储存技术的混合可再生能源系统与岸电系统实施的技术经济效益,结果表明:应用岸电系统可使港口能源使用成本降低 41.3%。

然而,港口配置岸电成本较大,根据 Stora Enso 数据得出,船舶与港口岸电设备改造的投资成本分别为 23.6 和 58.9 万美元。此外,船方使用岸电费用较高,造成船方使用岸电的积极性较弱。为提升港口配置岸电的积极性,部分国家与地区采取一系列经济激励措施来推广岸电的发展。例如,2003 年,欧盟允许成员国免除或减少岸电税费;自 2011 年以来,中国交通部先后向港口和船舶公司给予岸电补贴^[15-16];此外,瑞典和德国部分港口已获得岸电税费降低批准。学术界亦对岸电建设补贴政策进行研究,例如,为合理制定岸电部署方案中政府补贴计划,Wu^[55]等通过建立多阶段模型刻画政府、集装箱港口和航运公司之间的相关关系,并运用特制的标记算法进行求解。为对岸电补贴结构框架进行优化以实现减排补贴效率的最大化,Wang 等^[56]通过建立模型对岸电建设补贴及运营补贴结构进行了分析,通过选取上海港进行实例分析,最终得到最佳补贴效率;Li 等^[57]关注于政府补贴下由港口和航运公司组成的两级海运供应链,探讨了岸电补贴机制及其影响,运用博弈论确定了最优政府补贴强度和补贴削减点,利用系统动力学方法、最优响应函数分析了政府补贴效率、信息不对称、多博弈决策周期不一致等实际问题的影响;Dai 等^[58]提出了考虑环境和技术经济因素的投资经济可行性评估框架,并以上海港为例进行了案例研究;周海英等^[59]从供应链视角出发构建了港口与船舶减排决策博弈模型,研究了政府补贴对港口与船舶减排的影响,得出当补贴较高时,港航供应链应采用岸电技术,然而港口与船舶的总排放高于低硫油的总排放。

港区供电与船舶用电电力特征不匹配也是制约岸电发展的重要因素^[60]。为了实现船舶与岸电电力系统统一,国际电工委员会/国际标准化组织/电气和电子工程师协会标准化联合会于 2012 年发布了 IEC/ISO/IEEE 80005-1 文件,规定船舶与岸电之间电压与电流的匹配关系。此后,相关学者对船舶-岸电电力系统标准化进一步研究,以确保系统安全可靠运行,主要研究包括:保护装置和控制策略^[61]、大功率连接转换器设备^[61-62]、电缆设计^[53]。

考虑船舶随机到港,如何合理配置岸电容量是推广岸电技术面临的关键问题,岸电容量配置过小会影响减排效果,配置过大会造成资源浪费^[63]。为此,Peng 等^[15-16]对该问题进行了深入研究:考虑船舶随机到港与岸电供给耦合关系,以系统总成本与船舶碳排放最小为目标,构建船舶-岸电电力系统混合整数

规划模型,运用仿真优化方法求解模型,确定岸电系统最优容量,并分析岸电价格对系统经济效益和环境效益的影响,得出当电价为 $0.15 \$ \cdot \text{kWh}^{-1}$,碳排放与总成本呈负相关关系,当电价为 $0.30 \$ \cdot \text{kWh}^{-1}$,碳排放与总成本正相关;进一步,Peng 等^[15-16]将泊位分配问题与岸电配置问题相结合,最小化安装和使用岸电系统的总成本,同时最大程度地减少空气污染和减少温室气体排放,建立多目标协同优化模型,运用多目标粒子群算法进行求解,最终通过基于偏好的决策方法得到最优泊位分配与岸电配置决策。考虑到港口岸电设备的不足以及管理制度不完善造成的船舶延误,进而引发船舶加速行驶带来的过度排放从而抵消岸电设施的减排效果,Dai 等^[64]通过建立排放计算模型量化了岸电的环境潜力并研究相关延迟对 CO_2 减排的影响,结果表明,由于发电效率的限制,停靠在泊位的集装箱船只能承受很短的延误,过长的延误会导致集装箱船 CO_2 过量排放。

然而在推广岸电使用的同时,也存在许多不足,如岸电设施合理容量配置问题、全国各省市港口电价不统一引起的岸电经济效益不均衡以及岸电系统检测制度不协调等。为充分发挥船舶使用岸电的环境效益,应联合各相关部门共同制定覆盖设计-建设-使用-维护全生命周期的岸电技术标准,确保向船舶供电的安全性;在容量配置方面,应综合考虑船舶到港不确定性、岸电系统经济效益与环境效益等;在成本控制方面,应完善岸电服务费政策,推动降低岸电使用成本。

2.2.2 新能源

为降低港口对所在城市及周边地区的环境污染,合理利用港口地理优势,加速引进绿色新能源,推进港口能源结构优化已成为港口发展的必然趋势。世界多个港口已提出新能源利用的发展倡议,通过新能源供电满足港口电力需求,以推动港口可持续发展。例如,西班牙 Ribadeo 港口通过建造海洋能发电站来实现港口用能的自给自足^[29];热那亚港务局制定港口能源环境计划,以推进新能源利用,提高港区能源效率^[65]。

有关集装箱船舶新能源供电系统的研究较少,多数文献针对油船和货船进行研究^[29]。Lan 等^[66]以投资成本、燃料成本和 CO_2 排放最小为目标,提出船舶光伏/柴油/储能混合动力系统的优化配置确定方法;Tang 等^[67]以船方总成本最小为目标,提出船舶能量管理优化模型和控制方法,提高绿色船舶

在泊作业运行效率 and 安全性;Yuan 等^[68]提出太阳能/柴油混合动力船舶的设计方案,并与柴油驱动船舶对比分析其环境效益,得出当太阳能占比分别为 6.4%、13.4%与 18.8%时,船舶在港燃油消耗可分别减少 1.58%、2.35%与 1.78%,CO₂ 排放可减少 0.86%、3.85%与 4.88%;Tang 等^[69]以船舶新能源供电系统期望电力成本最小为优化目标,运用混合整数规划模型设计在泊船舶光伏/储能/柴油/岸电混合能源系统;Kumar 等^[70]考虑船舶与港区电网电压、频率、功率等技术参数,设计港区智能电网优化模型,以实现对未来混合动力船舶供电。为进一步提高船舶中混合动力技术的性能,Kalikatzarakis 等^[71]通过结合分支定界及凸优化方法,建立并求解了一个混合整数非线性优化问题,实时确定了 3 个或 3 个以上不同电源之间的最佳功率分配。

针对新能源供电系统在港口的应用,Yigit 等^[72]提出了一种新的港口电能管理策略,并应用 MATLAB 软件对 5 种场景进行了仿真分析,以分析电能管理策略对港口经济及环境的影响,分析结果表明,智能电网基础设施的能源管理策略可提供显著的环境及经济效益;Raileanu 等^[73]考虑风能在康斯坦塔港的应用,通过结合港区用电需求及碳排放要求,对港口周边的风力条件进行了分析;Seddiek 等^[74]提出风力涡轮机和燃料电池组合系统是绿色港口能源系统的最佳选择,研究表明通过使用燃料电池和海上风力涡轮机,每年将减少港区 CO₂、NO_x 和 CO 排放量分别为 32 176.0、53.2 和 8.3 t;结合卡塔尔纳港附近区域的可再生能源储备,Gutierrez-Romero 等^[75]运用蒙特卡洛程序对靠泊船舶功率及能量需求的可变性进行了评估,最终对太阳能、海上风能在港口的应用前景进行了评价,考虑到港口交通的未来需求,研究认为太阳能及海上风能可以提供能源支持,同时每年可以减少船舶 CO₂ 排放超 1.0×10^4 t;Sadek 等^[76]以埃及亚历山大港为例,探究了风力涡轮机和燃料电池组合系统的应用效果,计算结果表明,使用燃料电池和海上风力涡轮机作为绿色能源将分别减少 CO₂、NO_x 和 CO 每年 80 441、20 814 和 133 025 t 的排放量;Ahamad 等^[77]以丹麦哥本哈根海港为例,设计风能/光伏/储能/电网/转换器混合能源系统,并运用 HOMER 仿真软件研究系统各组分的最优配置;Wang 等^[78]提出了一个两阶段最优框架来解决海港混合可再生能源系统的优化设计问题,研究以最小化投资成本为目标,确定了不同子系统最佳装机容量,

最大限度地降低了运行成本;Misra 等^[79]设计含可再生能源与储能技术的港区微电网,优化港口能源管理方案,得出储能系统能够满足港口总电力需求的 60%;黄逸文等^[80]在分析港口物流系统用能特点的基础上,以最小化购能成本、弃风弃光成本、碳排放成本以及船舶物流成本在内的运营总成本为目标,构建了港口物流-能源耦合系统协同优化模型,研究了岸桥分配数量以及船舶在港状态对港口能源需求及排放的影响;Fang 等^[81]以风光互补的港口能源系统为研究对象,构建了港口能源调配与设备用能规划协同优化模型,开发了基于迭代凸松弛和凸近似的可扩展分解方法求解模型,并以实际港口为依托验证了协同调度模型在提高港口能效方面的效果。

然而,新能源供电系统在港口上的应用尚处于起步阶段。在能源规划方面,应结合自然条件和港口能源需求,提升太阳能、风能、地热能、生物能等新能源的应用比例,降低新能源发电成本,构建清洁低碳的港口能源体系;在新能源供电系统安全性方面,应保证新能源供电供应充足,保证供电机组的持续运作,并配备足够的备用发电机组、储能设备等配套设施。

整理并总结归纳替代能源领域相关文献,包括研究内容、研究对象、研究方法、减排效果等,如表 2 所示。

2.3 运营策略优化

2.3.1 降低船舶航速

海港船舶需通过港内航道进出港口,且船舶在航道中行驶具有航行历时长、交通组织复杂等特点,例如盘锦港荣兴港区东作业区航道全长为 28.74 km,船舶通航历时在 2 h 左右。此外,船舶在航道中航行是靠主机发电,而船舶靠泊作业是靠辅机发电,主机发电功率远大于辅机发电功率。船舶在航道内航行的污染排放占船舶在港总排放比重较大,约为 70%^[6],减少船舶航行能耗与排放对于减少港区排放具有重要意义。船舶在港内航道航行,其航速虽受操纵舵效等因素的约束,然而船舶航速不是确切的定值,仍在一定范围之内,因此,可优化船舶航速来降低港区排放。

船舶在航道中行驶具有船舶耗油量与航速近似呈立方关系,降低航速成为船舶节能减排最为有效的措施之一^[6,82]。Chang 等^[83]提出了 4 种船舶减速方案以分析减速过程对运行效率的影响,研究表明最佳减速方案是一个动态过程,其很大程度取决于租船费率和燃料价格;为确定降低船速等干预措施

表 2 在港船舶节能减排策略研究汇总(替代能源)

Table 2 Research summary on strategies of energy saving and emission reduction for ships at port (alternative energy)

替代能源	研究方法	研究对象	减排效果			参考文献
			CO ₂	SO ₂	NO _x	
岸电	实测数据分析	洛杉矶港	未提及	未提及	1.7 t·艘 ⁻¹	Cannon 等(2015) ^[50]
	公式计算	洛杉矶港、汉堡港等	48.0%~70.0%	3.0%~60.0%	40.0%~60.0%	Zis 等(2014) ^[52]
	实测数据分析	上海港等	未提及	8.1 g·kWh ⁻¹	11.9 g·kWh ⁻¹	Peng 等(2016) ^[53]
	公式计算	欧洲港口	40.0%	未提及	未提及	Sciberras 等(2016) ^[51]
新能源	仿真	巴西港口	90.0%	72.0%	99.0%	Yigit 等(2018) ^[72]
		日本港口	23.0%	未提及	85.0%	
		土耳其港口	33.0%	未提及	92.0%	
		英国港口	49.0%	16.0%	91.0%	
		印度港口	未提及	未提及	90.0%	

对船舶商业运营的影响,Smith^[84]提出了一个船舶速度与能源效率关系的理论建模框架,可以用于考察技术和经济间的交互关系,并模拟在可预见的未来场景下的商业最佳方案,提高船舶的能源效率,减少碳排放;为对船舶不同航段的速度进行优化以节约燃料消耗,Fagerholt 等^[85]将船舶到达时间离散化处理,将问题转换为有向无环图上的最短路径问题,并运用非线性规划求解器进行求解,证实了最短路径方法的优越性和在航运路线上节省燃料的潜力;Du 等^[17]在保证码头服务水平的基础上以船舶排放最小为目标,运用优化模型求解船舶在航道中的最优航速,得出在最优航速下,平均每艘船舶可减少油耗约 8~14 kg;Kao 等^[86]将海洋地理信息系统、模糊划分理论与空间数据挖掘方法相结合,提出了集装箱船进港最佳速度的计算方法,并以基隆港为例进行计算,建议船舶进港航速为 7~8 kn;Chang 等^[18]以高雄港某集装箱码头为例,基于活动模型量化船舶在不同减排措施下的燃料消耗和污染排放,结果表明:船舶速度由 25 kn 降低到 12 kn 时,CO₂ 排放减少了约 41.0%;Peng 等^[6]以北方某集装箱码头为例,得出当船舶航速由 24 kn 降低至 8 kn 时,船舶在航道中的 CO₂ 排放降低约 48.4%,船舶在港 CO₂ 排放降低约 37.5%。

2.3.2 减少船舶在港时间

船舶在港时间包括锚地待泊时间、进出港航行时间、辅助作业时间以及装卸作业时间等。减少船舶在港时间是在执行相同运输量情况下减少船舶污染排放的另一种有效手段。然而,较少学者对该问题进行研究。Johnson 等^[87]通过研究北欧港口的定量运营数据,得出通过优化船舶在航道中的航行速度来减少船舶在港非生产性等待时间 1~4 h,可将船舶

在航道中的燃油消耗降低 2.0%~8.0%;Peng 等^[6]运用仿真方法研究船舶辅助作业时间对船舶排放的影响,得出当辅助作业时间由 6 h 降低至 2 h,船舶在泊 CO₂ 排放减少 22.1%,船舶在港 CO₂ 排放(包括船舶在锚地排放、航道航行排放以及在泊作业排放)减少约 6.0%。

整理并总结归纳运营策略优化领域相关文献,包括研究内容、研究对象、研究方法、减排效果等,如表 3 所示。

2.4 硫排放控制区

面对日益严重的船舶大气污染,国际海事组织、相关国家和地区在港口、航线密集、船舶通航密度大的海域采用立法的形式控制船舶大气污染物的排放。国际海事组织大会采纳 MARPOL 公约 1997 年议定书及其相关的 6 个决议案,附则 VI 对于船舶废气中的 SO_x 排放含量作了限制,规定排放控制区内船用燃油硫含量不高于 0.1% m/m(2015 年),控制区外不高于 0.5% m/m(2020 年);同时,设定了硫排放控制区,现共有波罗地海、北海、北美、美国加勒比海四大排放区域^[88-89]。为分析燃料控制法案对船舶排放的影响,Lack 等^[90]对一艘大型远洋集装箱船舶排放的废气和颗粒物进行了采样分析,数据表明,当该船进入加利福尼亚沿海管制区时,通过替换低硫燃料并降低船速,其颗粒有机物的排放系数下降了 70%;王坚等^[91]在编制厦门船舶控制区大气污染物排放清单基础上,应用 AERMOD 模型研究了港区污染物减排对港口环境质量的提升效果以评估船舶控制区大气污染物减排成效,结果表明在控制区内,SO₂ 减排 34.6%,CO 减排 28.9%,PM₁₀ 减排 17.4%、PM_{2.5} 减排 26.2%、NO_x 减排 8.5%;Ye 等^[92]同时考虑港口岸电与排放控制区对船舶能耗及排放的

表 3 在港船舶节能减排策略研究汇总(运营策略优化)

Table 3 Research summary on strategies of energy saving and emission reduction for ships at port (optimization of operation strategies)

具体措施	研究方法	研究对象	减排效果				参考文献
			燃料/能源	CO ₂	SO ₂	NO _x	
降低船舶航速	仿真	洛杉矶港,汉堡港等	未提及	8.0%~20.0%	9.0%~40.0%	9.0%~17.0%	Zis 等(2014) ^[52]
	公式计算	克拉克森航运数据库	未提及	41.0%~52.4%	未提及	未提及	Chang 等(2014) ^[83]
	公式计算	船队	未提及	54.4%	未提及	未提及	Smith 等(2012) ^[84]
	数据分析	波士顿港等	未提及	19.4%	未提及	未提及	Fagerholt 等(2010) ^[85]
	仿真	美国港口	未提及	30.0%~70.0%	未提及	未提及	Corbett 等(2009) ^[82]
	优化	天津港	8~14 kg·艘 ⁻¹	未提及	未提及	未提及	Du 等(2011) ^[17]
	公式计算	高雄港	未提及	41.0%	未提及	未提及	Chang 等(2016) ^[18]
	仿真	阿尔及利亚港	未提及	48.4%	未提及	未提及	Peng 等(2018) ^[6]
减少船舶在港时间	仿真	阿尔及利亚港	未提及	6.0%	未提及	未提及	Peng 等(2018) ^[24]
	公式计算	北欧港口	2.0%~8.0%	未提及	未提及	未提及	Johnson 等(2015) ^[87]

影响,建立了船舶路径与燃料库存决策的优化模型,并以中国沿海运输船舶为研究对象进行分析,得出在强制使用港口岸电的情况下,船舶将在排放控制区行驶更长的距离以降低总成本,从而引起 SO₂ 排放增加 2.8%。

与国外发达港口城市相比,我国港口船舶污染控制不论从法律法规还是管理技术、控制水平方面均存在较大的差距。2015 年,中国设立环渤海(京津冀)、长三角、珠三角水域船舶排放控制区,于 2018 年进一步扩大地理范围,并严加控制排放要求,以降低船舶 SO_x、NO_x、PM 和挥发性有机物等污染物的排放^[93-94]。为满足控制区域内对污染物的排放要求,船舶进入控制区采取的一般措施为安装废气清理系统,使用低硫燃料油、燃料电池、生物柴油、液化天然气等^[95-96]。通过实施船舶节能减排系列措施,2018 年中国环渤海(京津冀)、长三角、珠三角排放控制区的船舶 SO_x、PM 排放相比 2015 年分别下降 33.0%和 22.0%。

然而,推广实施排放控制区也遇到了诸多问题:提高了航运企业燃油支出费用,增加了柴油机及其附属设备的故障率及维修成本,降低了船舶动力设备的可靠性等,因此,未来研究在考虑控制区减排优势的同时,还应兼顾控制区对船舶营运成本等经济因素的影响^[89,97]。

根据在港船舶节能减排策略相关文献的整理与总结,现有文献多通过仿真、公式计算、数据分析等方法量化节能减排效果,船舶采用不同减排措施的减排效果存在较大差异。其中,船用燃料采用 LNG 可减少 CO₂ 排放 5.0%~30.0%,且主要集中在 25%,采用不同的生物燃料可减少 CO₂ 排放 19.0%~84.0%

(甲酯、甲醇、混合生物柴油可降低 CO₂ 排放 70.0%~80.0%),使用新能源,可减少 CO₂ 排放 23.0%~90.0%(依据各地区碳排放系数)、NO_x 排放 90.0%左右;船舶采用岸电技术,可减少船舶在泊 CO₂ 排放 48.0%~70.0%(依据各地区碳排放系数);通过降低船速,可减少船舶在航道 CO₂ 排放 41.0%~54.4%,减少船舶在港 CO₂ 排放 8.0%~20.0%;通过减少船舶在港时间 1~4 h,可减少船舶在港 CO₂ 排放 2.0%~8.0%;当设立硫排放控制区时,可减少 SO₂ 排放 33.0%~34.6%。

根据上述分析,为进一步提高 LNG、生物燃料等替代措施的减排效果,尚应考虑不同类型的燃料,完善混合燃料动力船舶设计,降低替代燃料费用;为进一步提高船舶使用岸电效率,应综合考虑船方、港口、政府三者之间的效益,推进船舶与港口岸电设备的建设与改造,并优化岸电服务费等运营成本;新能源供电系统在港口中的应用尚处于起步阶段,未来研究应考虑港口电力需求与新能源电力供给不确定性,完善新能源电力系统优化设计方法,优化配置新能源设施设备,实现港区电力系统安全、可靠运行;有关船舶运营策略优化的研究较少,未来研究应深入挖掘船舶作业过程,优化船舶与港口资源组织调度,减少船舶非生产作业等待时间进而减少船舶在港时间;排放控制区对船舶硫排放的控制标准日益提高,未来研究应分析控制区对船舶营运成本等经济因素的影响。

3 场桥节能减排策略

轮胎式龙门起重机(Rubber-Tyred Gantry, RTG)以其机动灵活的优点,成为中国集装箱码头

堆场主要的装卸设备。近年来,伴随燃油成本逐年增长及国家节能减排标准提高,RTG 升级改造为电力驱动轮胎式龙门起重机(Electrical Rubber-Tyred Gantry, ERTG)。此外,轨道式龙门起重机(Rail-Mounted Gantry, RMG)因其节能、降耗、减噪等方面的优势在自动化集装箱码头得到广泛应用。场桥设备改造,优化设备调度,减少场桥非工作作业时间是场桥节能减排的重要措施。

3.1 场桥设备改造

RTG 油改电是场桥节能减排最主要的技术之一。纪天平^[98]介绍了作业堆场内滑触线供电系统组成、集电小车自动控制方式及龙门吊电气系统进行油改电电气改造方法,通过加装集电自动控制系统可有效减少转场时间,提高生产效率,降低能源损耗;Yang 等^[19]以高雄港某集装箱码头为例,运用公式计算与统计分析的方法,对比 RTG 和 ERTG 能耗和碳排放,得出 ERTG 可节能 86.6%,减少 CO₂ 排放 67.8%;Geerlings 等^[20]以鹿特丹港口为例,运用碳足迹分析法,分析码头设备(包括岸桥、场桥、集卡等)油改电技术的环境效益,得出油改电技术可减少 CO₂ 排放 20.0%,提高工作效率 20.0%;Ding 等^[99]研究了场桥油改电的投资决策问题,并以最小化投资成本和运营成本为目标,将问题建模为整数规划模型,并开发了改进走廊法求解模型,结果表明购置 3 台电力驱动场桥并实现 18 台场桥油改电可减少 CO₂ 排放 25%。

此外,将储能设备应用于 RTG 可进一步实现 RTG 节能减排^[100]。超级电容器^[101-102]、电池组^[103]、飞轮储能^[104-105]等储能设备可将 RTG 吊具下吊过程中的势能存储起来,用于 RTG 提升和水平作业,以达到节能减排效果。研究表明,柴油发电机与飞轮储能设备组合使用可节省燃油 30.0%以上^[105],与超级电容器组合使用的混合动力系统可降低能耗 35.0%^[104]。Papaioannou 等^[106]以费利克斯托港为例,通过实测 RTG 吊具在水平作业、提升作业、下吊作业与 RTG 沿轨道运动过程中的能耗相关数据,经公式计算得出场桥安装储能设备每年可减少燃料消耗 32.6 m³,减少 CO₂ 排放 0.81×10^4 t;Antonelli 等^[102]针对内燃机/发电机/储能系统组成的 RTG 混合能源管理系统进行试验,得出混合能源系统可降低燃料消耗 20.0%~60.0%。

RMG 以电力驱动,较 RTG 更具节能减排潜力。为进一步提升 RMG 的节能减排效果,严俊等^[107]针对其照明系统改造进行研究,得出安装节能照明系

统可使每台 RMG 每年耗电量减少 8 935.2 kWh。

3.2 场桥优化调度

场桥优化调度是场桥节能减排的另一种有效措施。He 等^[22]以作业高效和设备节能均衡为目标,运用混合整数规划模型研究场桥调度问题,结果表明优化调度可减少场桥燃料消耗 25.6%;Sha 等^[23]在考虑场桥移动距离、转弯距离及调度规则的基础上,建立场桥调度整数规划模型,以实现场桥总能耗的最小化;Peng 等^[24]运用系统仿真的方法研究场桥配置对港口排放的影响,得出合理配置岸桥、场桥、集卡可减少 CO₂ 排放 21.3%;Chang 等^[108]在分析设备能耗与作业关系的基础上,建立岸桥-场桥-集卡节能调度优化模型,以实现港口节能减排;崔维伟等^[109]考虑场桥不同运行状态下单位时间电量需求差异以及峰值电量实时约束,建立了以总能耗最小化为目标的多场桥调度问题的混合整数规划数学模型,可以保证堆场中场桥在满足既有电量约束的前提下最小化所有场桥的总能耗且提供了一种可以降低港口峰值电量成本的有效方法;Chen 等^[110]研究了同时考虑 CO₂ 排放与任务延迟的场桥优化调度问题,并将该问题建模为带软时间窗的选择性车辆路径混合整数线性规划模型,开发了基于分支定界算法的列生成方法求解模型,得出当 CO₂ 排放成本由 0 增加到 1 \$ · kg⁻¹ 时,CO₂ 排放减少 82.12%。

整理并总结归纳场桥节能减排策略相关文献,包括研究内容、研究对象、研究方法、减排效果等,如表 4 所示。

根据场桥节能减排策略相关文献的整理与总结,现有文献多通过仿真等方法量化节能减排效果,场桥设备改造依据混合储能设备不同,可减少燃料消耗 20.0%~60.0%,减少 CO₂ 直接排放 40.0%以上,减少全生命周期 CO₂ 排放 20.0%。未来研究应分析场桥设备装卸作业与储能设备储能机理的耦合关系,提高储能设备的储能效率,并针对场桥与岸桥、集卡等联合调度的节能减排效果进行研究;此外,尚需量化场桥不同节能减排策略的 NO_x 与 SO_x 减排效果。

4 集卡节能减排策略

集卡主要分为港内集卡(内卡)和港外集卡(外卡)。传统集卡为燃油驱动。为推进绿色港口建设,集装箱港口实施并推行集卡油改电和油改气设备改造方案。随着自动化集装箱码头的发展,自动导引

表 4 场桥节能减排策略汇总

Table 4 Research summary on strategies of energy saving and emission reduction for yard cranes

研究内容		研究方法	研究对象	减排效果		参考文献
减排策略	具体措施			燃料/能源	CO ₂	
设备改造	油改电	统计分析	高雄港	86.6%	67.8%	Yang 等(2013) ^[19]
		碳足迹分析	鹿特丹港	未提及	20.0%	Geerlings 等(2010) ^[20]
	储能设备	实测数据分析	费利克斯托港	33 m ³	0.8×10 ⁴ t	Papaioannou 等(2017) ^[106]
		仿真	混合动力式 RTG	30.0%~35.0%	未提及	Flynn 等(2008) ^[104] , Tan 等(2017) ^[105]
		仿真	场桥(含储能设备)	20.0%~60.0%	未提及	Antonelli 等(2017) ^[102]
	照明系统改造	试验	上海港	8 935.2 kWh	未提及	严俊等(2014) ^[107]
优化调度	设备配置 与调度	仿真优化	华东某集装箱码头	25.6%	未提及	He 等(2015) ^[22]
		仿真	阿尔及利亚港	未提及	21.3%	Peng 等(2018) ^[24]

车(Automated Guided Vehicle, AGV)取代传统内卡。除技术手段外,还可通过运营管理实现集卡的节能减排,例如集卡优化调度,优化外集卡到港规律,提高内集卡作业效率与减少集卡在港等待时间。

4.1 集卡设备改造

集卡油改电是国内外集装箱港口集卡节能减排的重要举措。国内外学者针对电力驱动集卡的环境效益进行了大量研究。Peng 等^[24]以北方某集装箱码头为例,运用系统仿真的方法研究传统集卡与 AGV 的能耗与污染排放,结果表明:AGV 相比传统集卡减少 CO₂ 排放 13.6%;Schmidt 等^[21]以汉堡港某集装箱码头为例,基于仿真优化的方法研究使用 AGV 的经济和环境效益,结果表明 AGV 相比传统集卡可节约燃料成本 24.1%~33.9%;Zhang 等^[111]以港口水平运输系统为研究对象,以最小化运输系统的购置成本、租赁成本以及运营成本为目标,构建了绿色港口集卡改造与配置优化模型,并开发了基于拉格朗日松弛算法的增强 Benders 分解方法进行求解,结果表明当运输任务由 6.0×10⁵ TEU 增加到 8.0×10⁵ TEU 时,集卡改造数量由 4 辆增加到 20 辆。

集卡油改气为港口节能减排的另一种有效措施。宁波港域自启动内集卡油改气项目后,截至 2017 年底已完成 570 辆内集卡的改造,每年每辆集卡可减少 CO₂ 排放 25 t,节约成本近 10 万元^[112]。此外,在欧盟启动“Green Cranes”项目的背景下,欧洲港口对 LNG 牵引车环境效益进行评估,预计 CO₂ 排放将减少 16.0%。

4.2 集卡优化调度

集卡优化调度是实现港口节能减排的重要途径。Esmer 等^[113]以某集装箱港口为例,运用系统仿

真的方法研究堆场集卡最优配置,以实现港口的绿色、节能要求;Li 等^[114]运用系统仿真的方法研究集卡最优调度与管理,减少集卡排队等待时间,进而减少集卡碳排放;Chen 等^[115]以集卡到达数量与在港等待时间为优化目标,运用排队论与数学规划方法研究集卡到港规律对污染排放的影响,研究表明:在不同 Pareto 前沿面下的集卡到港规律每年可减少港口 CO₂ 排放 58.8~63.9 t,减少 NO_x 排放 1.2~13.1 t;Schulte 等^[116]运用数学规划方法优化集卡预约到港模型以减少港口空载集卡 CO₂ 排放;Peng 等^[24]运用仿真方法研究集卡最优配置问题,得出当岸桥与集卡比例达到最优时,可减少 CO₂ 排放 22.8%。

整理并总结归纳集卡节能减排策略相关文献,包括研究内容、研究对象、研究方法、减排效果等,如表 5 所示。

根据集卡节能减排策略相关文献的整理与总结,现有文献多通过仿真等方法量化集卡节能减排效果,各减排策略可减少集卡 CO₂ 排放约 13.6%~27.5%。未来研究应针对传统集卡改造成为无人驾驶集卡、自动化导引小车等自动化设备的经济与技术可行性进行研究,并针对泊位、岸桥与集卡联合调度的节能减排效果进行分析;此外,尚需量化集卡不同节能减排策略的 NO_x 与 SO_x 减排效果。

5 岸桥节能减排策略

岸桥能源驱动方式主要为电力^[118]。提高岸桥能源效率与应用储能设备是岸桥设备改造的主要手段,可减少岸桥能耗、降低排放。此外,岸桥优化调度与调整岸桥用电负荷峰值等运营优化管理也是岸桥节能减排的重要措施。

表 5 集卡节能减排策略汇总

Table 5 Research summary on strategies of energy saving and emission reduction for container trucks

研究内容		研究方法	研究对象	减排效果			参考文献
减排策略	具体措施			燃料/能源	CO ₂	NO _x	
设备改造	油改电	仿真	阿尔及利亚港	未提及	13.6%	未提及	Peng 等(2018) ^[24]
		仿真	高雄港	未提及	27.5%	未提及	Yang(2017) ^[117]
	油改气	实测数据分析	宁波港	未提及	25.0 t	未提及	陶学宗等(2018) ^[112]
优化调度	到港规律优化	双目标优化	纽约和新泽西港	未提及	58.8~63.9 t	1.2~13.1 t	Chen 等(2013) ^[115]
	优化配置	仿真	阿尔及利亚港	未提及	22.8%	未提及	Peng 等(2018) ^[24]

5.1 岸桥设备改造

针对岸桥设备改造,主要集中于提高岸桥能源效率。谷长华等^[119]以大连港各集装箱码头为例,研究岸桥空调机节能运转线路、功率驱动单元风扇运转方式及 LED 灯等改造方案,并对各改造方案节能降耗效益进行评估;Khanh^[120]对岸桥交/直流驱动方式进行研究,得出采用直流电技术能降低岸桥用电峰值和平均能耗。利用飞轮储能设备与超级电容组成的混合动力系统将岸桥下吊过程中的势能转换成电能并进行存储,可降低岸桥峰值功率 72.7%^[120]。此外,起重机用节能装置、新型串联式双吊臂吊具均能起到节能降耗的作用^[121]。

5.2 岸桥优化调度

岸桥优化调度可实现岸桥的节能减排。Chang 等^[122]以岸桥能耗最小化为目标,建立泊位分配与岸桥调度优化模型,求解得出泊位-岸桥最优分配策略;Wang 等^[123]以所有任务的总完成延迟和所有岸桥的总运行成本最小为目标,建立双目标整数规划模型,通过运用启发式算法进行求解,最终得到岸桥优化配置方案;考虑船舶到港时间以及集装箱装卸作业量的不确定性,Zhen 等^[124]以最小化作业成本及碳排放为目标建立了两阶段随机规划模型,并运用基于重心法的求解方法进行求解;Wang 等^[125]在满足碳排放约束前提下建立岸桥配置优化模型,研究碳排放约束对优化结果的影响;Liu 等^[126]以最小化卸船过程中 CO₂ 排放为目标,依据排队理论建立岸桥分配模型,运用解析方法求解模型;张煜等^[127]以天津港北疆 C 段自动化集装箱码头为背景,以最小化岸桥和自动化集卡的总能耗为目标构建了集装箱码头装卸作业设备的集成调度模型,研究岸桥与自动化集卡优化调度对码头能耗的影响;Yu 等^[128]在考虑泊位属性及分时电价的基础上,以最小化船舶使用岸电成本、船舶离港延迟以及排放成本为目标,构建了糅合泊位与岸桥联合分配的船舶使用岸电多目标优化模型,开发了基

于启发式的快速求解算法进行求解,得出与单目标优化结果相比,多目标优化结果可降低船舶排放成本 51.44%;Kenan^[129]在考虑碳税及碳交易的基础上,以最小化船舶排放、岸桥排放、运营成本为目标,建立了岸桥分配及调度多目标优化模型,在船舶与岸桥的组合数据集下进行模型求解,得出当岸桥配置数量由 2 增加到 3 时,船舶与岸桥总排放降低 24%。

5.3 调整岸桥用电负荷峰值

岸桥是集装箱港口用电量最大的设备之一。调整岸桥用电负荷峰值不仅能够节省高峰用电电费,还能降低港口最大能源消耗,利于港口能源供需平衡。然而用电负荷调峰技术多见于城市电力系统,针对岸桥用电负荷峰值调整的研究尚处于起步阶段^[100]。Iris 等^[100]对港口节能措施、技术、管理等方面进行综述,得出对码头设备用电负荷进行“削峰减谷”能有效降低码头能耗;Geerlings 等^[130]通过改变岸桥作业策略,研究岸桥同时起吊次数对岸桥用电负荷峰值的影响,得出在配置 6 台岸桥的情况下,同时起吊 5 次的耗电量比起吊 6 次降低 11.1%,然而,集装箱装卸时间增加 0.03%,等待时间增加 5.5 s,因此,调整岸桥用电负荷峰值能减少最大能源消耗,但会增加装卸作业时间和设备等待时间,降低岸桥作业效率。

设备改造、岸桥优化调度与调整岸桥用电负荷峰值是岸桥节能减排的重要措施。设备改造技术多集中于增加储能设备,岸桥电力系统改造,提高岸桥能源效率等方面;在岸桥优化调度方面,尚需考虑船舶随机到港等不确定因素,构建泊位分配与岸桥动态调度的联合优化模型来减少岸桥排放;调整岸桥用电负荷峰值虽然能够减少最大能源消耗量,但需考虑岸桥节能与生产效率之间的均衡。

6 结 语

(1)船用燃料采用 LNG 可减少 CO₂ 排放 5.0%~30.0%,且主要集中在 25%,采用不同类型的生物

燃料可减少 CO_2 排放 19.0%~84.0%,其中,甲酯、甲醇、混合生物柴油类生物燃料可降低 CO_2 排放 70.0%~80.0%,使用新能源,可减少 CO_2 排放 23.0%~90.0%(依据各地区碳排放系数)、 NO_x 排放 90%左右,减排效果明显。针对替代燃料动力船应用困难问题,未来可重点研究替代燃料配套设施建设时序、补贴政策确定等问题。

(2)船舶采用岸电技术,可减少船舶在泊 CO_2 排放 48.0%~70.0%(依据各地区碳排放系数)。后续可进一步研究港口岸电标准及用电安全、港口岸电定价、船用接电装置与码头配套设施改造时序、不同吨级船舶岸电使用策略等问题,协调港方、船方、政府部门及电力部门利益,推动靠港船舶使用岸电,逐年提高岸电设施的使用率。

(3)降低船速(由 24~25 kn 减少到 8~12 kn),可减少船舶在航道 CO_2 排放 41.0%~54.4%,减少船舶在港 CO_2 排放 8.0%~20.0%;减少船舶在港时间 1~4 h,可减少船舶在港 CO_2 排放 2.0%~8.0%。后续可进一步研究考虑港口经济效益和环境效益均衡下船舶最优航速的确定方法,以及如何通过泊位分配、岸桥调度、场桥调度等方式减少船舶在港等待时间。

(4)设立硫排放控制区可减少 SO_2 排放 33.0%~34.6%。后续可进一步研究排放控制区对船舶航行轨迹、船舶运营成本及港口运营的影响,以及根据现有排放控制结果,如何从地理范围、控制要求等角度制定合理的船舶排放控制区方案,以实现船舶减排目标。

(5)场桥设备改造依据混合储能设备不同,可减少燃料消耗 20.0%~60.0%,减少 CO_2 直接排放 40.0%以上,减少全生命周期 CO_2 排放 20.0%;集卡采用节能减排技术可减少 CO_2 排放约 13.6%~27.5%;设备改造、岸桥优化调度与调整岸桥用电负荷峰值是岸桥节能减排的重要措施。后续可进一步研究既有工艺、设施设备节能改造时序问题,推广应用绿色照明、港口储能等节能新技术。

(6)新能源供电系统在港口中的应用尚处于起步阶段,后续可进一步考虑结合自然条件和港口能源需求,推进光伏发电、风光互补供电系统、太阳能供热供电等新能源技术在港口用电上的应用,完善港口新能源电力系统优化设计方法,构建清洁低碳的港口能源体系。

(7)港口船舶采用替代燃料(LNG、生物燃料)技术可有效降低船舶在港排放,然而,混合动力船设

计及改造是推广替代燃料使用的技术壁垒;港口船舶采用岸电技术可极大降低船舶在泊直接排放,岸电技术逐步推广且趋于成熟,然而船方与港方设备改造成本、岸电价格是影响岸电使用效率的主要因素;此外,基于全生命周期排放,岸电技术的减排效果与各区域的排放系数有很大关联,当岸电排放系数大于船舶燃料的排放系数,采用岸电技术并不会起到节能减排效果。可见,采用清洁能源技术,例如海上风能、太阳能等,才能从根本上降低港口的污染排放。然而,港口采用新能源技术需改造港口电力系统,且新能源发电具有间歇性、随机性等特性,将新能源电力系统与传统电力系统融合成为港口多能互补能源结构的技术难度较大。港口生产运营优化不需较大的成本投入即可实现港口的节能减排,然而,如何将理论研究得出的调度优化结果应用于港口实践是工业界亟待解决的问题。

参考文献:

References:

- [1] CHEN Ji-hong, ZHENG Tian-xiao, GARG A, et al. Alternative maritime power application as a green port strategy: barriers in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 213: 825-837.
- [2] 王昊宇. 大连港绿色港口评价体系研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
WANG Hao-yu. Construction of assessment framework for green port taken Dalian as a case study[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [3] 陈晓峰, 徐金环. 二十一世纪的港口——绿色之港[J]. *港工技术*, 2002(2): 6-8.
CHEN Xiao-feng, XU Jin-huan. A green port: port of the 21st century[J]. *Port Engineering Technology*, 2002(2): 6-8. (in Chinese)
- [4] TROZZI C, VACCARO R. Environmental impact of port activities[C]//BREBBIA C A, OLIVELLA J. *Maritime Engineering and Ports II*. Southampton: WIT Press, 2000: 151-161.
- [5] 常祎妹, 朱晓宁, 王力. 集装箱码头集成调度研究综述[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(1): 136-146.
CHANG Yi-mei, ZHU Xiao-ning, WANG Li. Review on integrated scheduling of container terminals[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(1): 136-146. (in Chinese)
- [6] PENG Yun, LI Xiang-da, WANG Wen-yuan, et al. A simulation-based research on carbon emission mitigation strategies for green container terminals[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 163: 288-298.
- [7] HE Ying, JI Yi-jun. Discussion on green port construction of Tianjin Port[C]//IACSIT Press. 2010 International Conference on Biology, Environment and Chemistry. Singapore: IACSIT

- Press, 2011: 467-469.
- [8] CHANG C C, WANG C M. Evaluating the effects of green port policy: case study of Kaohsiung Harbor in Taiwan[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012, 17(3): 185-189.
- [9] 卢 勇. 绿色港口评价体系研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- LU Yong. Study on the assessment framework for green port[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- [10] 陈姝灵. 上海港绿色港口评价研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- CHEN Shu-ling. The research onevaluation of green port in Shanghai Port[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016. (in Chinese)
- [11] 耿东耀, 文 豪, 张德文, 等. 集装箱绿色装卸工艺综合评价指标体系的研究[J]. *起重运输机械*, 2014(4): 64-67.
- GENG Dong-yao, WEN Hao, ZHANG De-wen, et al. Study on comprehensive evaluation index system of container green handling technology[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2014(4): 64-67. (in Chinese)
- [12] GILBERT P, BOWS-LARKIN A, MANDER S, et al. Technologies for the high seas: meeting the climate challenge[J]. *Carbon Management*, 2014, 5(4): 447-461.
- [13] STYHRE L, WINNES H, BLACK J, et al. Greenhouse gas emissions from ships in ports—case studies in four continents[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 54: 212-224.
- [14] PAUL D, PETERSON K, CHAVDARIAN P R. Designing cold ironing power systems: electrical safety during ship berthing[J]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2014, 20(3): 24-32.
- [15] PENG Yun, LI Xiang-da, WANG Wen-yuan, et al. A method for determining the allocation strategy of on-shore power supply from a green container terminal perspective[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2019, 167: 158-175.
- [16] PENG Yun, LI Xiang-da, WANG Wen-yuan, et al. A method for determining the required power capacity of an on-shore power system considering uncertainties of arriving ships[J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4524.
- [17] DU Yu-quan, CHEN Qiu-shuang, QUAN Xiong-wen, et al. Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011, 47(6): 1021-1037.
- [18] CHANG C C, JHANG C W. Reducing speed and fuel transfer of the green flag incentive program in Kaohsiung Port Taiwan[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, 46: 1-10.
- [19] YANG Y C, CHANG W M. Impacts of electric rubber-tired gantries on green port performance[J]. *Research in Transportation Business and Management*, 2013, 8: 67-76.
- [20] GEERLINGS H, VAN DUIN R. A new method for assessing CO₂-emissions from container terminals: a promising approach applied in Rotterdam[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(6/7): 657-666.
- [21] SCHMIDT J, MEYER-BARLAG C, EISEL M, et al. Using battery-electric AGVs in container terminals—assessing the potential and optimizing the economic viability[J]. *Research in Transportation Business and Management*, 2015, 17: 99-111.
- [22] HE Jun-liang, HUANG You-fang, YAN Wei. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(1): 59-75.
- [23] SHA Mei, ZHANG Tao, LAN Ying, et al. Scheduling optimization of yard cranes with minimal energy consumption at container terminals[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 113: 704-713.
- [24] PENG Yun, WANG Wen-yuan, LIU Ke, et al. The impact of the allocation of facilities on reducing carbon emissions from a green container terminal perspective[J]. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1813.
- [25] ASTRÖM S, YARAMENKA K, WINNES H, et al. The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 59: 223-236.
- [26] CHEN Lin-ying, YIP T L, MOU J M. Provision of emission control area and the impact on shipping route choice and ship emissions[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 58: 280-291.
- [27] NIKOPOULOU Z. Incremental costs for reduction of air pollution from ships: a case study on North European emission control area[J]. *Maritime Policy and Management*, 2017, 44(8): 1056-1077.
- [28] MARTÍNEZ-MOYA J, VAZQUEZ-PAJA B, GIMENEZ MALDONADO J A, et al. Energy efficiency and CO₂ emissions of port container terminal equipment: evidence from the port of Valencia[J]. *Energy Policy*, 2019, 131: 312-319.
- [29] LI Xiang-da, PENG Yun, WANG Wen-yuan, et al. A method for optimizing installation capacity and operation strategy of a hybrid renewable energy system with offshore wind energy for a green container terminal[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106125.
- [30] LI Li, ZHU Jia-dong, YE Guan-qiong, et al. Development of green ports with the consideration of coastal wave energy[J]. *Sustainability*, 2018, 10(11): 4270.
- [31] HULSKOTTE J H J, VAN DER GON H A C D. Fuel consumption and associated emissions from seagoing ships at berth derived from an on-board survey[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(9): 1229-1236.
- [32] International Maritime Organization. Third IMO GHG study 2014—executive summary and final report[R]. London: International Maritime Organization (IMO), 2014.
- [33] 罗明汉, 莫斌珍, 黄钦文. LNG 燃料动力船舶发展前景[J]. *中国船检*, 2019(1): 58-62.

- LUO Ming-han, MO Bin-zhen, HUANG Qin-wen. Prospects for LNG ships[J]. China Ship Survey, 2019(1): 58-62. (in Chinese)
- [34] 罗婷婷. LNG 动力船舶发展现状与趋势[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(9): 100-101.
- LUO Ting-ting. Development status and trend of LNG-powered ships[J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2018, 38(9): 100-101. (in Chinese)
- [35] 李 斌. LNG 作为船舶代用燃料的应用分析[J]. 世界海运, 2012, 35(1): 14-16.
- LI Bin. Application analysis of LNG as ship alternative fuel[J]. World Shipping, 2012, 35(1): 14-16.
- [36] BOUMAN E A, LINDSTAD E, RIALLAND A I, et al. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—a review[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 52: 408-421.
- [37] WANG Shuai-an, QI Jing-wen, LAPORTE G. Governmental subsidy plan modeling and optimization for liquefied natural gas as fuel for maritime transportation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 155: 304-321.
- [38] ATTAH E E, BUCKNALL R. An analysis of the energy efficiency of LNG ships powering options using the EEDI[J]. Ocean Engineering, 2015, 110: 62-74.
- [39] 王 欣, 周庆飞, 李彦军. 船舶新能源供电应用技术分析[J]. 硅谷, 2014(4): 103, 93.
- WANG Xin, ZHOU Qing-fei, LI Yan-jun. Application technology analysis of ship new energy power supply[J]. Silicon Valley, 2014(4): 103, 93. (in Chinese)
- [40] PHILIPP R. Blockchain for LBG maritime energy contracting and value chain management: a green shipping business model for seaports[J]. Environmental and Climate Technologies, 2020, 24(3): 329-349.
- [41] EIDE M S, CHRYSSAKIS C, ENDRESEN Ø. CO₂ abatement potential towards 2050 for shipping, including alternative fuels[J]. Carbon Management, 2013, 4(3): 275-289.
- [42] VLEUGEL J M, BAL F. Cleaner fuels to reduce emissions of CO₂, NO_x and PM₁₀ by container ships: a solution or a pandora's box? [J]. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2015, 199: 195-206.
- [43] MANDER S, WALSH C, GILBERT P, et al. Decarbonizing the UK energy system and the implications for UK shipping[J]. Carbon Management, 2012, 3(6): 601-614.
- [44] 娄喜艳, 丁锦平. 生物质能源发展现状及应用前景[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2017, 29(2): 12-14.
- LOU Xi-yan, DING Jin-ping. Biomass energy development present situation and application prospect [J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2017, 29(2): 12-14. (in Chinese)
- [45] 谭志文. 新能源在船舶上的应用进展及前景[J]. 海洋科学前沿, 2018, 5(2): 67-71.
- TAN Zhi-wen. Application progress and prospect of new energy on ships[J]. Advances in Marine Sciences, 2018, 5(2): 67-71. (in Chinese)
- [46] 刘 强, 史国强. B20 生物柴油调合燃料在海洋船舶上的试用研究[J]. 中国酿造, 2013, 32(增 1): 74-76, 81.
- LIU Qiang, SHI Guo-qiang. Trial of the B20 biodiesel blend fuel on ocean ship[J]. China Brewing, 2013, 32(S1): 74-76, 81. (in Chinese)
- [47] 李建科, 王金全, 金伟一, 等. 船舶岸电系统研究综述[J]. 船电技术, 2010, 30(10): 12-15.
- LI Jian-ke, WANG Jin-quan, JIN Wei-yi, et al. A review of shore power system [J]. Marine Electric and Electronic Engineering, 2010, 30(10): 12-15. (in Chinese)
- [48] 闻 铭. 港口船舶岸电的研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- WEN Ming. Research and application on the port shore-to-ship power supply[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [49] 贾石岩. 船舶使用岸电对温室气体排放的控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- JIA Shi-yan. Study of reduction of GHG emission from ships by shore power [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009. (in Chinese)
- [50] CANNON C, GAO Y, WUNDER L. Port of Los Angeles-Shanghai municipal transportation commission ecopartnership on shore power[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2015, 7: 041507.
- [51] SCIBERRAS E A, ZAHAWI B, ATKINSON D, et al. Cold ironing and onshore generation for airborne emission reductions in ports [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2016, 230(1): 67-82.
- [52] ZIS T, NORTH R J, ANGELOUDIS P, et al. Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports [J]. Maritime Economics and Logistics, 2014, 16(4): 371-398.
- [53] PENG Chuan-sheng. Application of shore power for ocean going vessels at berth in China [C]//SEEIE. 2016 International Conference on Sustainable Energy, Environment and Information Engineering. Netherlands: Atlantis Press, 2016: 1-15.
- [54] SIFAKIS N, VICHOS E, SMARAGDAKIS A, et al. Introducing the cold-ironing technique and a hydrogen-based hybrid renewable energy system into ports [J]. International Journal of Energy Research, 2022, DOI: 10.1002/er.8059.
- [55] WU Ling-xiao, WANG Shuai-an. The shore power deployment problem for maritime transportation [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 135: 101883.
- [56] WANG Yu-bing, DING Wen-yi, DAI Lei, et al. How would government subsidize the port on shore side electricity usage improvement? [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123893.
- [57] LI Xiao-dong, KUANG Hai-bo, HU Yan. Using system

- dynamics and game model to estimate optimal subsidy in shore power technology[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 116310-116320.
- [58] DAI Lei, HU Hao, WANG Zhao-jing, et al. An environmental and techno-economic analysis of shore side electricity[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 75: 223-235.
- [59] 周海英, 张文静. 绿色港口建设下港口与船舶减排决策研究[J]. *科技管理研究*, 2022, 42(7): 205-214.
- ZHOU Hai-ying, ZHANG Wen-jing. Research on emission reduction decisions of port and ship under the construction of green ports[J]. *Science and Technology Management Research*, 2022, 42(7): 205-214. (in Chinese)
- [60] COPPOLA T, FANTAUZZI M, LAURIA D, et al. A sustainable electrical interface to mitigate emissions due to power supply in ports[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 816-823.
- [61] TARNAPOWICS D. Synchronization of national grid network with the electricity ships network in the "shore to ship" system[J]. *Management Systems in Production Engineering*, 2013, 3(11): 9-13.
- [62] WINKEL R, WEDDIGE U, JOHNSEN D, et al. Shore side electricity in Europe: potential and environmental benefits[J]. *Energy Policy*, 2016, 88: 584-593.
- [63] PENG Yun, DONG Meng, LI Xiang-da, et al. Cooperative optimization of shore power allocation and berth allocation: a balance between cost and environmental benefit[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123816.
- [64] DAI Lei, HU Hao, WANG Zhao-jing. Is shore side electricity greener? An environmental analysis and policy implications[J]. *Energy Policy*, 2020, 137: 111144.
- [65] ACCIARO M, GHIARA H, CUSANO M I. Energy management in seaports: a new role for port authorities[J]. *Energy Policy*, 2014, 71(3): 4-12.
- [66] LAN Hai, WEN Shu-li, HONG Ying-yi, et al. Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system[J]. *Applied Energy*, 2015, 158: 26-34.
- [67] TANG Ruo-li, LI Xin, LAI Jin-gang. A novel optimal energy-management strategy for a maritime hybrid energy system based on large-scale global optimization[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 254-264.
- [68] YUAN Yu-peng, WANG Ji-xiang, YAN Xin-ping, et al. A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship[J]. *Energy*, 2018, 165: 965-978.
- [69] TANG Ruo-li, WU Zhou, LI Xin. Optimal operation of photovoltaic/battery/diesel/cold-ironing hybrid energy system for maritime application[J]. *Energy*, 2018, 162: 697-714.
- [70] KUMAR J, KUMPULAINEN L, KAUHANIEMI K. Technical design aspects of harbour area grid for shore to ship power: state of the art and future solutions[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2019, 104: 840-852.
- [71] KALIKATZARAKIS M, GEERTSMA R D, BOONEN E J, et al. Ship energy management for hybrid propulsion and power supply with shore charging[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 76: 133-154.
- [72] YIGIT K, ACARKAN B. A new electrical energy management approach for ships using mixed energy sources to ensure sustainable port cities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 40: 126-135.
- [73] RAILEANU A B, ONEA F, RUSU E. Implementation of offshore wind turbines to reduce air pollution in coastal areas—case study constanta harbour in the black sea[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(8): 550.
- [74] SEDDIEK I S. Application of renewable energy technologies for eco-friendly sea ports[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2020, 15(9): 953-962.
- [75] GUTIERREZ-ROMERO J E, ESTEVE-PÉREZ J, ZAMORA B. Implementing onshore power supply from renewable energy sources for requirements of ships at berth [J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113883.
- [76] SADEK I, ELGOHARY M. Assessment of renewable energy supply for green ports with a case study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(5): 5547-5558.
- [77] AHAMAD N B, OTHMAN M, VASQUEZ J C, et al. Optimal sizing and performance evaluation of a renewable energy based microgrid in future seaports[C]//IEEE. 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). New York: IEEE, 2018: 1043-1048.
- [78] WANG Wen-yuan, PENG Yun, LI Xiang-da, et al. A two-stage framework for the optimal design of a hybrid renewable energy system for port application[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 191: 106555.
- [79] MISRA A, VENKATARAMANI G, GOWRISHANKAR S, et al. Renewable energy based smart microgrids—a pathway to green port development[J]. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 2017, 37(2): 17-32.
- [80] 黄逸文, 黄文焘, 卫 卫, 等. 大型海港综合能源系统物流-能量协同优化调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211093.
- HUANG Yi-wen, HUANG Wen-tao, WEI Wei, et al. Logistics-energy collaborative optimization scheduling method for large seaport integrated energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211093. (in Chinese)
- [81] FANG Si-dun, WANG Chen-xu, LIAO Rui-jin, et al. Optimal power scheduling of seaport microgrids with flexible logistic loads[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2022, DOI: 10.1049/rpg2.1240.
- [82] CORBETT J J, WANG Hai-feng, WINEBRAKE J J. The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, 14(8): 593-598.
- [83] CHANG C C, WANG C M. Evaluating the effects of speed

- reduce for shipping costs and CO₂ emission[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 31: 110-115.
- [84] SMITH T W P. Technical energy efficiency, its interaction with optimal operating speeds and the implications for the management of shipping's carbon emissions [J]. *Carbon Management*, 2012, 3(6): 589-600.
- [85] FAGERHOLT K, LAPORTE G, NORSTAD I. Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2010, 61(3): 523-529.
- [86] KAO Sheng-long, LIN Jia-lin, TU Meng-ru. Utilizing the fuzzy IoT to reduce Green Harbor emissions[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01844-z>
- [87] JOHNSON H, STYHRE L. Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 71: 167-178.
- [88] OKADA A. Benefit, cost, and size of an emission control area: a simulation approach for spatial relationships [J]. *Maritime Policy and Management*, 2019, 46(5): 565-584.
- [89] CULLINANE K, BERGQVIST R. Emission control areas and their impact on maritime transport[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 28: 1-5.
- [90] LACK D A, CAPP A C D, LANGRIDGE J, et al. Impact of fuel quality regulation and speed reductions on shipping emissions: implications for climate and air quality [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(20): 9052-9060.
- [91] 王坚,黄 屋,陈森阳,等. 厦门船舶控制区(绿色港口)大气污染物减排成效评估[J]. *海峡科学*, 2021(1): 22-28.
- WANG Jian, HUANG Zhi, CHEN Sen-yang, et al. Evaluation on the effectiveness of air pollutant emission reduction in ship control area (green port) in Xiamen[J]. *Straits Science*, 2021(1): 22-28. (in Chinese)
- [92] YE G, ZHOU J, YIN W, et al. Are shore power and emission control area policies always effective together for pollutant emission reduction?—An analysis of their joint impacts at the post-pandemic era [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2022, 224: 106182.
- [93] WAN Zheng, ZHANG Qiang, XU Zhi-ping, et al. Impact of emission control areas on atmospheric pollutant emissions from major ocean-going ships entering the Shanghai Port, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 142: 525-532.
- [94] QIN Ze-ru, YIN Jing-bo, CAO Zhi-qiang. Evaluation of effects of ship emissions control areas case study of Shanghai Port in China[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 2611(1): 50-55.
- [95] 闫 伟. 船舶“排放控制区”的划定及应对分析[J]. *广东交通职业技术学院学报*, 2016, 15(4): 44-46, 64.
- YAN Wei. Delineation of ECA and corresponding measures[J]. *Journal of Guangdong Communication Polytechnic*, 2016, 15(4): 44-46, 64. (in Chinese)
- [96] 刘新亮. 船舶排放控制区(ECA)与船舶进入ECA区域的措施[J]. *珠江水运*, 2017(5): 57-58.
- LIU Xin-liang. Vessel emission control zone (ECA) and measures for vessels entering ECA zone [J]. *Pearl River Water Transport*, 2017(5): 57-58. (in Chinese)
- [97] CHANG Y T, PARK H, LEE S, et al. Have emission control areas (ECAs) harmed port efficiency in Europe? [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 58: 39-53.
- [98] 纪天平. 龙门吊油改电项目电力电气设计[J]. *设备管理与维修*, 2020(11): 83-85.
- JI Tian-ping. Electric power design of gantry crane oil-to-electricity project [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2020(11): 83-85. (in Chinese)
- [99] DING Yi, YANG Yang, HEILIG L, et al. Deployment and retrofit strategy for rubber-tyred gantry cranes considering carbon emissions[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2021, 161: 107645.
- [100] IRISÇ, LAM J S L. A review of energy efficiency in ports: operational strategies, technologies and energy management systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 112: 170-182.
- [101] KIM S M, SUL S K. Control of rubber tyred gantry crane with energy storage based on supercapacitor bank[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, 21(5): 1420-1427.
- [102] ANTONELLI M, CERAULO M, DESIDERI U, et al. Hybridization of rubber tired gantry (RTG) cranes [J]. *Journal of Energy Storage*, 2017, 12: 186-195.
- [103] NIU Wang-qiang, HUANG Xi-xia, YUAN Feng, et al. Sizing of energy system of a hybrid lithium battery RTG crane[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(10): 7837-7844.
- [104] FLYNN M M, MCMULLEN P, SOLIS O. Saving energy using flywheels[J]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2008, 14(6): 69-76.
- [105] TAN K H, YAP F F. Reducing fuel consumption using flywheel battery technology for rubber tyred gantry cranes in container terminals [J]. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2017, 5(7): 15-33.
- [106] PAPAIOANNOU V, PIETROSANTI S, HOLDERBAUM W, et al. Analysis of energy usage for RTG cranes [J]. *Energy*, 2017, 125: 337-344.
- [107] 严 俊,陈振宇. 自动化无人空箱堆场轨道式龙门起重机节能照明系统改造[J]. *集装箱化*, 2014(9): 11-13.
- YAN Jun, CHEN Zhen-yu. Renovation of energy-saving lighting system for track gantry crane in automatic unmanned empty box stacking yard [J]. *Containerization*, 2014(9): 11-13. (in Chinese)
- [108] CHANG Dao-fang, FANG Ting, HE Jun-liang, et al. Defining scheduling problems for key resources in energy-

- efficient port service systems[J]. Scientific Programming, 2016, 2016: 7053962.
- [109] 崔维伟, 镇 璐. 峰值电量约束下的场桥能耗最小化问题研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(2): 358-369.
- CUI Wei-wei, ZHEN Lu. Minimizing the total energy consumption of yard crane under the peak demand constraint[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2021, 41(2): 358-369. (in Chinese)
- [110] CHEN Su-min, ZENG Qing-cheng. Carbon-efficient scheduling problem of electric rubber-tyred gantry cranes in a container terminal[J]. Engineering Optimization, 2021, DOI: 10.1080/0305215X.2021.1972293.
- [111] ZHANG Qian, WANG Shuai-an, ZHEN Lu. Yard truck retrofitting and deployment for hazardous material transportation in green ports [J]. Annals of Operations Research, 2022, DOI: 10.1007/s10479-021-04507-0.
- [112] 陶学宗, 张秀芝. 宁波港域内集卡“油改气”减排节支效果评价[J]. 集装箱化, 2018(11): 1-3.
- TAO Xue-zong, ZHANG Xiu-zhi. Effectiveness evaluation of reducing emission and saving expenditure of “oil to gas” in Ningbo Port area[J]. Containerization, 2018(11): 1-3. (in Chinese)
- [113] ESMER S, CETI I B, TUNA O. A simulation for optimum terminal truck number in a Turkish port based on lean and green concept [J]. The Asian Journal of Shipping and Logistics, 2010, 26(2): 277-296.
- [114] LI Na, CHEN Gang, GOVINDAR K, et al. Disruption management for truck appointment system at a container terminal: a green initiative[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 61: 261-273.
- [115] CHEN Gang, GOVINDAN K, GOLIAS M M, et al. Reducing truck emissions at container terminals in a low carbon economy: proposal of a queueing-based bi-objective model for optimizing truck arrival pattern[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2013, 55: 3-22.
- [116] SCHULTE F, LALLA-RUIZ E, GONZÁLEZ-RAMÍRES R G, et al. Reducing port-related empty truck emissions: a mathematical approach for truck appointments with collaboration[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 105: 195-212.
- [117] YANG Y C. Operating strategies of CO₂ reduction for a container terminal based on carbon footprint perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 472-480.
- [118] 彭 云. 不确定条件下低碳型港口资源优化配置研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- PENG Yun. The research on the optimal allocation of low-carbon seaport resources under uncertainties [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [119] 谷长华, 丛悦磊. 岸桥节能降耗技术改造[J]. 集装箱化, 2014, 25(6): 26-28.
- GU Chang-hua, CONG Yue-lei. Technical reform of energy saving and consumption reduction of quayside bridge [J]. Containerization, 2014, 25(6): 26-28. (in Chinese)
- [120] TRAN T K. Study of electrical usage and demand at the container terminal[D]. Melbourne: Deakin University, 2012.
- [121] XIAO Xin-yi, LU Shi-qing. Study on measurement of energy consumption for cranes and designing of energy saving device[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 159: 326-330.
- [122] CHANG Dao-fang, JIANG Zu-hua, YAN Wei, et al. Integrating berth allocation and quay crane assignments[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(6): 975-990.
- [123] WANG Ting-song, DU Yu-quan, FANG De-bin, et al. Berth allocation and quay crane assignment for the trade-off between service efficiency and operating cost considering carbon emission taxation[J]. Transportation Science, 2020, 54(5): 1307-1331.
- [124] ZHEN Lu, SUN Qian, ZHANG Wei, et al. Column generation for low carbon berth allocation under uncertainty[J]. Journal of the Operational Research Society, 2021, 72(10): 2225-2240.
- [125] WANG Wen-yuan, PENG Yun, TANG Guo-lei, et al. Influence of carbon emission constraint on container quay crane allocation [J]. Advanced Materials Research, 2013, 807-809: 936-940.
- [126] LIU Ding, GE Ying-en. Modeling assignment of quay cranes using queueing theory for minimizing CO₂ emission at a container terminal [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 61: 140-151.
- [127] 张 煜, 唐可心, 徐亚军, 等. 考虑能耗节约的集装箱码头装卸设备集成调度[J]. 计算机集成制造系统, 2022, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20220328.1708.015.html>.
- ZHANG Yu, TANG Ke-xin, XU Ya-jun, et al. Integrated scheduling of handling operations in container terminal with considering energy saving[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20220328.1708.015.html>. (in Chinese)
- [128] YU Jing-jing, VOß S, SONG Xiang-qun. Multi-objective optimization of daily use of shore side electricity integrated with quayside operation[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 351: 131406.
- [129] KENAN N, JEBALI A, DIABAT A. The integrated quay crane assignment and scheduling problems with carbon emissions considerations [J]. Computers and Industrial Engineering, 2022, 165: 107734.
- [130] GEERLINGS H, HEIJ R, VAN DUIN R. Opportunities for peak shaving the energy demand of ship-to-shore quay cranes at container terminals[J]. Journal of Shipping and Trade, 2018, 3: 3.