

面向碳中和的港口综合能源系统(一): 典型系统结构与关键问题

方斯顿¹, 赵常宏², 丁肇豪³, 张沈习^{4*}, 廖瑞金¹

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆市沙坪坝区 400044; 2. 香港中文大学信息工程系, 香港特别行政区 999077; 3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市昌平区 102206; 4. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市闵行区 200240)

Port Integrated Energy Systems Toward Carbon Neutrality (Part I): Typical Topology and Key Problems

FANG Sidun¹, ZHAO Changhong², DING Zhaohao³, ZHANG Shenxi^{4*}, LIAO Ruijin¹

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Information Engineering Department, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong SAR 999077, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 4. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Fully electrified seaports form a special integrated energy system with inherent tight “transportation-energy” coupling, and its management is the key route to the future green transportation. To clarify the development directions and explore the key effect in achieving “carbon neutrality” goal of maritime transportation systems, this paper reviews the current relevant literature, and summarizes the typical topology of port integrated energy system by analyzing the development trend and several representatives with different zones, energy policies and emission types. Then, this paper proposes several key problems of port integrated energy system. The review shows that, port integrated energy system is the result of port electrification, which provides a solid platform for “offshore-onshore energy integration”. However, with great potential in energy saving and emission reduction, “transportation-energy” coupling will bring some problems needed to be addressed, such as multiple energy flow coordination, transportation-energy coordinated model, and multi-agent management.

KEY WORDS: carbon neutrality; port integrated energy systems; typical topology; multiple energy flow integration;

基金项目: 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)开放课题(LAPS20013)。

Open Fund of State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Resources (NCEPU)(LAPS20013).

energy-transportation integration

摘要: 高度电气化的港口将形成“能源-交通”强耦合的港口综合能源系统, 其管理是实现未来绿色交通的关键途径。为厘清港口综合能源系统的发展路径, 探究港口综合能源发展在实现海洋交通“碳中和”目标过程中的关键作用, 该文调研相关文献, 分析代表性港口及港口能源系统发展历史, 从典型功能分区、排放政策法规及当前排放类型等角度总结港口综合能源系统的典型结构, 提出港口综合能源系统发展建设中的关键问题。结果表明, 港口综合能源系统是港口电气化发展的必然趋势, 亦为未来海-陆能源协同提供坚实平台, 但“能源-交通”深度融合在为港口带来巨大节能减排潜力的同时, 也将带来多能流融合、能源-交通融合建模、多利益主体管理等复杂问题等亟待解决的问题。

关键词: 碳中和; 港口综合能源系统; 典型结构; 多能流融合; 能源-交通融合

0 引言

海洋交通系统是连接海洋与陆地的重要纽带, 承担了世界近 85% 的物流任务。伴随着不断增长的海运需求, 2000—2015 年世界海运的能源消耗年均增长 1.6%^[1], 在带来巨大能源消费的同时, 产生约占世界总量 3%~5% 的碳排放, 15% 左右的氮硫氧化物排放^[2]。随着“碳中和”成为能源行业关注的热点, 海洋交通节能减排亦成为行业转型升级的关键

部分之一, 使经济性和环保性成为港口可持续发展的重要特征。

在“碳中和”背景下, 各能源部门需有效发掘自身潜力提高能源效率, 常用技术手段包括使用替代性的清洁能源和基于设备的能效提升技术。而作为重要的交通枢纽, 这些能效提升手段也将成为港口实现绿色发展的关键技术。2014 年 10 月, 欧盟议会签署行政命令, 要求欧盟的各海运部门在 2030 年前必须实现全行业新能源供能比例大于 27%, 能效水平提升大于 30%^[3]。在 2018 年发布的欧洲港口十大关键技术瓶颈中, 能效管理位列第 3 位^[4]。此外, 由于港口通常毗邻海滨城市, 港口的可持续发展还逐渐受到地方政策制定者的关注, 因为港口的能效管理不仅关乎地区的经济发展, 其能源消耗、气体排放、废物管理还将极大的影响地区环境^[5]。

21 世纪以来, 我国进出口贸易发展迅速。据统计, 2020 年我国进出口总额超过 30 万亿元, 占 GDP 比例超过 30%, 其中近 80% 由海运完成。截至 2020 年, 世界十大港口中我国独占七席。港口管理的能效评估研究亦是我国交通领域研究的重点内容, 包括泊位调度能效管理^[6]、岸桥/场桥能效管理^[7]和水-铁联运能效管理^[8]等。同时, 党和国家领导人高度重视港口发展, 习近平总书记多次亲临港口视察。交通运输部明确提出“绿色港口”建设需求。国家科技部明确提出“绿色港口建设与生态安全保障技术”、“水运船-港多能源融合及集成示范应用”重点研究方向。

在陆地能量系统中, 能效水平与能源流的生产、传输、存储、分配和转化关系密切, 并由此诞生了综合能源技术^[9]。伴随着以万物互联为基础的物联网发展, 近年来综合能源技术在各行业发展迅速, 其内涵已由创立之初的电-热联供演变为电、热、气、水耦合的复杂系统, 并随之发展出一套成体系的建模分析方法, 使其成为极具潜力的能源系统发展未来之路^[10]。近年来, 以交通电气化为背景的能源-交通融合发展进一步丰富了综合能源技术的内涵, 并衍生出能源-交通综合系统^[11]的研究。

目前, 在港口建设方面, 以岸电技术、电力推进船舶、电力驱动港口机械为代表的海洋交通电气化和以氢能/氨能为代表的零碳燃料技术促进港口与多类型能源网络深度融合, 已初步形成一类特殊的“海洋能源-交通综合系统”^[12-14]。与此同时, 多式联运的普及与冷链运输的快速发展又为港口

带来多样化的综合能源需求^[15-16]。

在此基础上, 本文针对“港口综合能源系统”开展文献综述, 分析港口综合能源发展过程中的关键问题, 可促进海洋交通系统能源利用提质增效, 为国家实现“碳中和”目标提供支撑。

1 港口能源系统发展历程与现状

1.1 本文研究对象

在海洋交通系统中, 港口与船舶是相互联系不可分割的联合体, 其相互协作是航运业的核心。因此港口类型和功能与所服务的船舶类型密切相关。文献[17]统计 2018、2019 年全球船队中货运船舶占比 94.3%, 这表明与之对应的货运港口也在港口类型中占据主要地位。因此, 本文以货运港口作为研究的主体对象。此外, 不同货运港口间的区别主要是货物类型不同。2020 年世界航运报告指出, 集装箱、液体货物和干散货是目前主要的物流服务类型, 占海洋交通运输任务的 95% 以上^[17], 而按功能可分为集装箱港口、散货港口等, 兼具多类型货物处理能力的港口称为多功能港口。本文主要讨论集装箱、散货和液货 3 类货物类型。

1.2 港口能源系统发展历程与现状

港口作为重要的交通枢纽与人类文明史相伴而生, 其发展与繁荣为人类的货物贸易、文化交流提供了重要的物质基础。20 世纪 60 年代以后, 随着商品贸易的繁荣, 港口亦开始革命性发展。20 世纪 80 年代开始, 集装箱贸易成为国际贸易的主要方式, 而海运则由于其低廉的成本成为交通运输的主要承担者, 并促进国际供应链的形成与发展。20 世纪 90 年代, 为进一步提高港口的运行管理水平, 集中式港口管理成为世界主要的港口运行模式, 即: 港口对港区的物流设备、转运车辆和附属设施进行统一投资、建设与管理, 并作为实体向各船东公司提供服务。2010 年以后, 港口及其附属设施对周围环境产生的影响逐步受到国际社会的重视, 能效管理问题也因此成为港口管理的热点问题^[18]。

多年以来, 港口能效管理的研究贡献主要来自交通领域, 即通过交通侧的调度管理提高系统运行效率, 从而提升港口能效, 主要研究包括通过泊位调度、泊位-岸桥联合调度、场桥调度、转运车辆调度、水-铁联运调度^[19]等交通管理方法提高港口运行效率。文献[20]从全要素生产的角度对港口减排措施进行研究。为匹配交通调度模型的离散特

征,这类研究通常简化能量侧的建模:假设单一物流操作消耗的能量/产生的排放气体为常数,从而实现港口能量侧的离散化建模,如文献[21]假设港口机械移动一个标准集装箱耗能 $4\text{kW}\cdot\text{h}/\text{次}$ 。

为进一步提高港口区域能效,在各类电力电子技术逐步成熟后,港口开始建设使用电力统一供能的港口微电网^[22-25],而原先各类主要由独立内燃机驱动的港口机械,如:岸桥/场桥等,亦逐步被电力化港机所取代^[26-27],使港口运行出现“交通-电力”耦合特性。文献[28]从设备角度提出港口机械电气化后的储能接入方案,研究结果表明储能系统接入可通过能量回馈减少港口机械70%的能耗。从系统角度。文献[29-30]针对高度电力化的港口进行研究,证明电力化对提升港口能效的效果显著。目前,德国汉堡港、基尔港,西班牙巴塞罗那港等均已提出发展计划,未来港口将作为独立的能源区域参与电力市场^[31-32]。目前,世界的主要港口的能源系统侧均已实现不同程度的电气化^[23],且不同用途、地区的港口系统结构差异较小,均具有配电网辐射性的典型结构。

近年来,电力化港口开始面临两类新的关键问题。第一,冷链运输的蓬勃发展使港口需要为冷链运输集装箱提供冷负荷,为港口带来“电-热”耦合问题。第二,新能源和零碳燃料进一步丰富了港口的能源类型,而多类型能源流的耦合、转化在为港口带来能效提升潜力的同时,亦对能源侧的控制管理提出更高要求。在此基础上,未来港口将同时具有“交通-电力”和“电-热”耦合特性并融合多类型能流,形成一类特殊的综合能源系统。因此有必要在考虑港口的运行特性后,提出港口综合能源系统当前面临的问题及未来发展方向,从而结合各类在陆地场景中得到广泛应用的综合能源技术为港口的节能减排和最终实现“碳中和目标”提供不竭动力。

1.3 典型港口功能分区

1.3.1 美国洛杉矶港

洛杉矶港(port of los angeles, LA),是美国第二大集装箱港,同时也是美国西海岸最大的港口。位于美国西南部加利福尼亚(California)州西南沿海圣佩德罗(San Pedro)湾的顶端,濒临太平洋的东侧,是包括集装箱、散杂货和液货集散的现代化多功能电气化港口,港口区域主要泊位信息如表1,港区功能分区如图1所示^[33]。

表1 洛杉矶港泊位信息

Table 1 Berths of port of Los Angeles

| 泊位类别 | 泊位 | 岸线长/m | 水深/m |
|------|----|-------|------|
| 散、杂货 | 15 | 3590 | 13.7 |
| 集装箱 | 36 | 5612 | 13.7 |
| 液货 | 14 | 3484 | 15.2 |

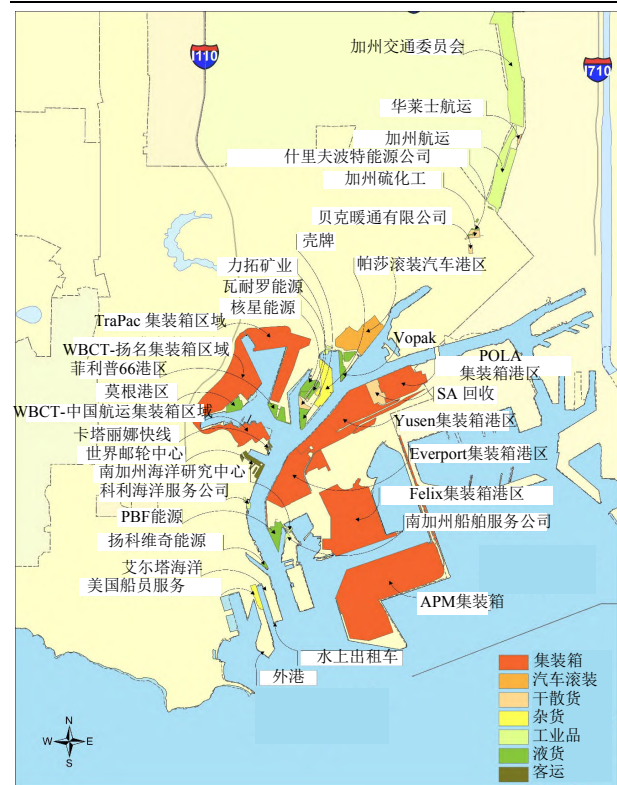


图1 洛杉矶港功能分区

Fig. 1 Layouts of port of Los Angeles

由图1可知,港口区域是以港口为核心,包含各类配套工厂、企业及科研机构的大型工业园区。随着港口电气化程度的持续提高,港口区域内部存在交通和能量的双重运行体系,是一种以“电力为核心,多种能流并存,交通与能量耦合运行”的“能源-交通综合系统”^[34]。

与此同时,洛杉矶港还是氢能源集卡可行性验证的先驱者,2020年洛杉矶共投运6辆完全由氢能源驱动的转运集卡^[35],这也为洛杉矶港口带来综合能源服务的需求。

1.3.2 新加坡裕廊港

新加坡裕廊港是2020年世界第二大货运港口,在2017年被中国洋山港超过之前一直是世界第一大货运港口^[36]。拥有布拉尼、吉宝、巴西班让、大士等11个港区,超过80个深水泊位,泊位沿线长度超过8.6km,包括超过1000台港口机械,2018年集装箱吞吐量超过3600万标准箱。

新加坡裕廊港在2015年开始实行“绿色停泊”

计划, 是首个推出绿色发展计划的世界主要港口。至 2020 年, 新加坡裕廊港已完全实现电气化, 所有类型的港机, 包括岸桥/场桥, 均使用电力进行驱动。混合动力的转运车辆已进行大规模使用, 并计划开展全电池驱动的转运车辆投运的可行性分析^[37]。

2016 年, 新加坡投资 3000 万新币在港口的存储货仓顶部建设光伏电站, 最高并网功率高达 9.8MW, 是世界上最大的港口光伏项目^[38]。基于新加坡地处热带的丰富光伏资源, 裕廊港还提出 2030 年实现“零碳港口”的宏伟目标。新加坡裕廊港的发展为新能源接入港口提供了良好的示范。

1.3.3 上海洋山港

位于杭州湾的上海洋山深水港由小洋山岛、洋山保税港区和东海大桥 3 部分组成, 首期于 2005 年 12 月 10 日投入使用。至 2017 年底, 上海洋山深水港四期开始运行, 使其成为全球单体规模最大的全自动码头。洋山港主要港区均已实现电气化运行, 部分港区已开始无人化作业。

相比于其他港口, 洋山港具有两大主要特点, 首要特点是承担大容量的化石燃料物流转运工作, 这部分功能主要位于东港区, 目前是远东最大的成品油中转基地, 规划建设 1900m 长的油品码头作业区, 设计储存成品油容量 270 万 m^3 。一期工程包括液化天然气接收站和海底输气干线, 建设规模为每年进口 300 万 t 液化天然气, 每年可向上海市区供应约 40 亿 m^3 , 二期预留 39.6 公顷土地进行扩展

建设。

第二个特点是包含大容量的集装箱处理能力, 这一功能主要在北港区和西港区。规划深水岸线 10km, 大小泊位 30 多个, 可装卸世界最大的超巴拿马型集装箱货轮, 全部建成后年吞吐能力可达 1300 万标箱以上。

1.3.4 重庆寸滩/果园港

重庆寸滩/果园港隶属于重庆港务物流集团有限公司, 是目前长江上游最大的港口, 国家一类口岸。港口的典型功能分区包括: 1) 岸桥: 用于船舶与港口间的集装箱装卸; 2) 堆场: 用于存放各类货物, 包括集装箱堆场和散货堆场; 3) 场桥: 用于堆场间货物转运; 4) 冷链区域: 存放冷链运输集装箱; 5) 联运铁路: 与水运配合的陆地运输系统。重庆“寸滩”港的电气化结构如图 2 所示。高度电气化的“寸滩”港通过外部电网引入两个港区变电站, 二次回路包含 10 和 0.4kV 两个运行电压等级。大型电气化港口机械、港口冷链集装箱区域均通过 10kV 母线接变压器后进行直接供电, 0.4kV 侧用于港口的各类控制设备。与此同时, 寸滩港主控室可实时获取港区内机械消耗的有功功率、无功功率及相应功率因素, 并可对冷链运输温度进行实时控制。综上可知, 重庆“寸滩”港通过电气化和冷链运输区域的发展, 电与热(冷链区域)耦合运行, 共同完成港口的各类交通物流任务, 已具有“港口综合能源系统”的雏形。

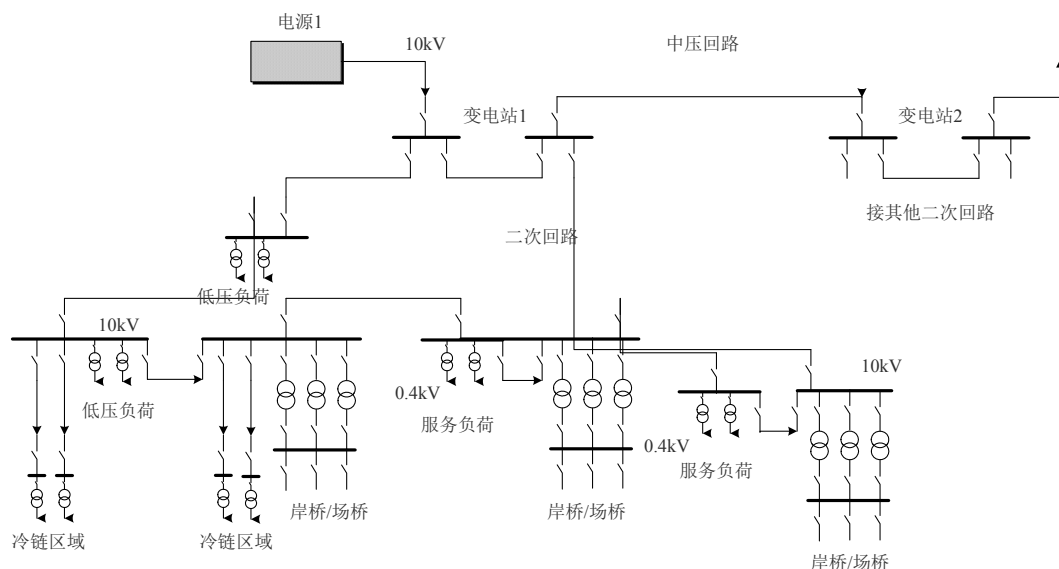


图 2 寸滩港电气结构

Fig. 2 Electrical diagram of cuntan port

1.4 发展趋势总结

结合以上港口实例, 港口区域已开始出现综合

能源服务需求, 主要发展趋势包括冷链运输与冷/热网络、新能源接入、燃料网络、电力网络等。

1) 冷链运输与冷/热网络。

冷链运输的需求来自一些对温度敏感的货物,包括各类肉类、蔬菜及一些精密仪器。联合国贸易发展署在2020年的世界航运报告中指出,冷链运输需求占世界总货运需求的1.5%,且长期保持高速增长,自2000年来年均增长20%^[39]。截至2019年,世界范围内80%的冷链运输需求通过冷链集装箱运输完成,即货物存放于具备自主温度控制能力的集装箱内,外界对其供电维持其内部温度。而剩余约20%需求由专用冷链运输船舶完成^[39],即货物直接存储于具备冷藏能力的船舱内,到达港口后转运至港口冷链区域进行存储。两类需求均要求港口需具备提供冷/热负荷的能力。

从规模上冷链运输需求在总体货运需求中占比较少,但长时间的温度控制却带来巨大的能源需求。据统计,冷链运输所消耗能源相当于洛杉矶港总能源需求的20%^[33]。在对冷链运输需求更旺盛的港口,如西班牙Valencia港,冷链运输能源需求占港口总需求45%,甚至高于港口机械37%的占比^[40]。随着发展中国家经济水平的不断进步,冷链运输需求将在未来几十年持续增长,从而为港口带来持续增加的冷/热负荷需求。作为航运未来发展的重要组成部分,可持续冷链运输已成为海洋交通领域的研究热点^[39]。

2) 新能源接入。

1.3.2节中新加坡裕廊港的港口光伏建设计划表明,新能源接入在未来港口区域节能减排并最终实现碳中和的过程中将发挥重要作用。事实上,由于地理优势,港口较内陆一般具有更丰富的新能源。风能、光伏、潮汐、地热等均在港口中得到应用。因此在未来的低碳甚至零碳港口中,新能源将会成为最重要的能量来源之一,从而让未来的港口综合能源系统成为典型的高比例可再生能源接入系统。而新能源的消纳,特别是考虑不确定性场景中的消纳,将成为未来港口运行的重要课题^[14,18,25,30,34]。

3) 燃料网络。

燃料网络一直是港口重要的基础设施。在我国一带一路的战略中,连接中国喀什和巴基斯坦瓜达尔港的原油管道和连接云南瑞丽和缅甸皎漂港的油气管道是确保我国能源安全的生命线。燃料通过船舶运输到港口并注入管道,通过“交通-管线”耦合的方式实现大规模能源的运输。1.3.3节中的上海洋山港即是具有大规模原油、液化天然气储存和

运输能力的港口。

近年来,随着“碳中和”目标成为全球共识,各类清洁燃料,如氢、氨等,将在未来大规模替代传统化石能源。因此在未来很长一段时间里,清洁燃料和化石能源网络将在港口区域内并存。多类型燃料具有不同的理化性质和管理方法,这对未来港口综合能源系统提出新的运行要求。

这里需指出的是,各类清洁燃料的制备一般与清洁能源,如风能、光伏高度相关。而是否在港口区域内制备将对港口能源系统产生重大影响。文献[41]以摩洛哥港为例,研究沙漠光伏制备氨直接应用于航运。而若清洁燃料不在港口区域内制备,其管理则类似于传统化石燃料。为区分这两类清洁燃料,本文将前者称为“生产型”清洁燃料,而后者称为“传输型”清洁燃料。

4) 电力网络。

港口电力网络的发展驱动力来自两方面。首先,如1.4节各类能源网络均通过电力网络实现耦合运行,随着多类型能源网络容量的不断扩大,亦将对电力网络的规划和运行带来重大影响。第二,交通电气化技术的发展使各类传统主要由化石燃料驱动的港口机械,如:岸桥、场桥、转运车辆等开始由电力驱动,这将为港口电力网络带来充电功率的需求,亦要求港口建设坚强的电力网络。

以上4部分是目前港口综合能源发展的内生动力,港口综合能源系统的未来研究需全面考虑以上发展趋势。

2 港口综合能源系统与海-陆能源协同

本节从典型排放法规入手,介绍港口综合能源发展的外在动力,并以德国汉堡氢能源港口的建设计划为例,分析未来港口综合能源系统的发展方向,总结港口综合能源系统的典型结构。最后,本节总结港口综合能源系统发展对未来海-陆能源协同的重要作用。

2.1 排放法规及现状

2.1.1 排放控制区域

作为交通枢纽,港口需为停靠船舶提供各类服务,而海洋交通运输长期依赖化石能源,因此港口区域各类排放强度一直备受关注。为控制港口区域各类排放,世界航运组织(international maritime organization, IMO)早在2011年便将波罗的海和北海地区列为排放控制区域(emission control areas,

ECAs), 而美国则在 2012 年将东西海岸同时列为排放控制区域。我国也在 2015 年将沿海地区及长江、珠江流域列为排放控制区域。2020 年, 国家主席习近平在联合国大会上提出“碳中和”国家战略, 作为交通系统组成部分, 未来港口的排放控制将面临更大的压力。因此在港口能源系统的供给侧和需求侧均亟需先进技术以降低港口区域的排放强度。

2.1.2 港口排放与碳中和

港口区域一般存在多类型排放, 根据洛杉矶港 2019 年年度报告^[33], 2005—2019 年港区规模以上设备总柴油微粒(diesel particulate matter, DPM)、氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)以及等效碳(CO₂e)排放, 2005—2019 年各排放量与 2005 年基准线及

圣佩德罗湾标准(海岸基准线)对比如图 3 所示^[33]。由图 3 可知, 2005—2019 年洛杉矶港区的 DPM, NO_x 和 SO_x 均有大幅度下降, 这与化石燃料燃烧技术的成熟以及低硫燃料的广泛使用高度相关。但相比之下, 洛杉矶港区的碳排放强度下降并不明显(<20%), 岸桥与场桥的碳排放强度甚至大幅度提升, 这与近年来世界集装箱货物运输需求剧增的现象高度相关, 这也表明港口的减排任务面临着巨大压力, 碳排放的控制已成为港口减排的首要任务。同样的, DPM、NO_x 和 SO_x 近年来呈现大幅度下降趋势, 均已满足圣佩德罗湾标准(海岸基准线)。而港口碳排放同比仅降低 15%, 这显然与交通系统实现碳中和的目标十分遥远。

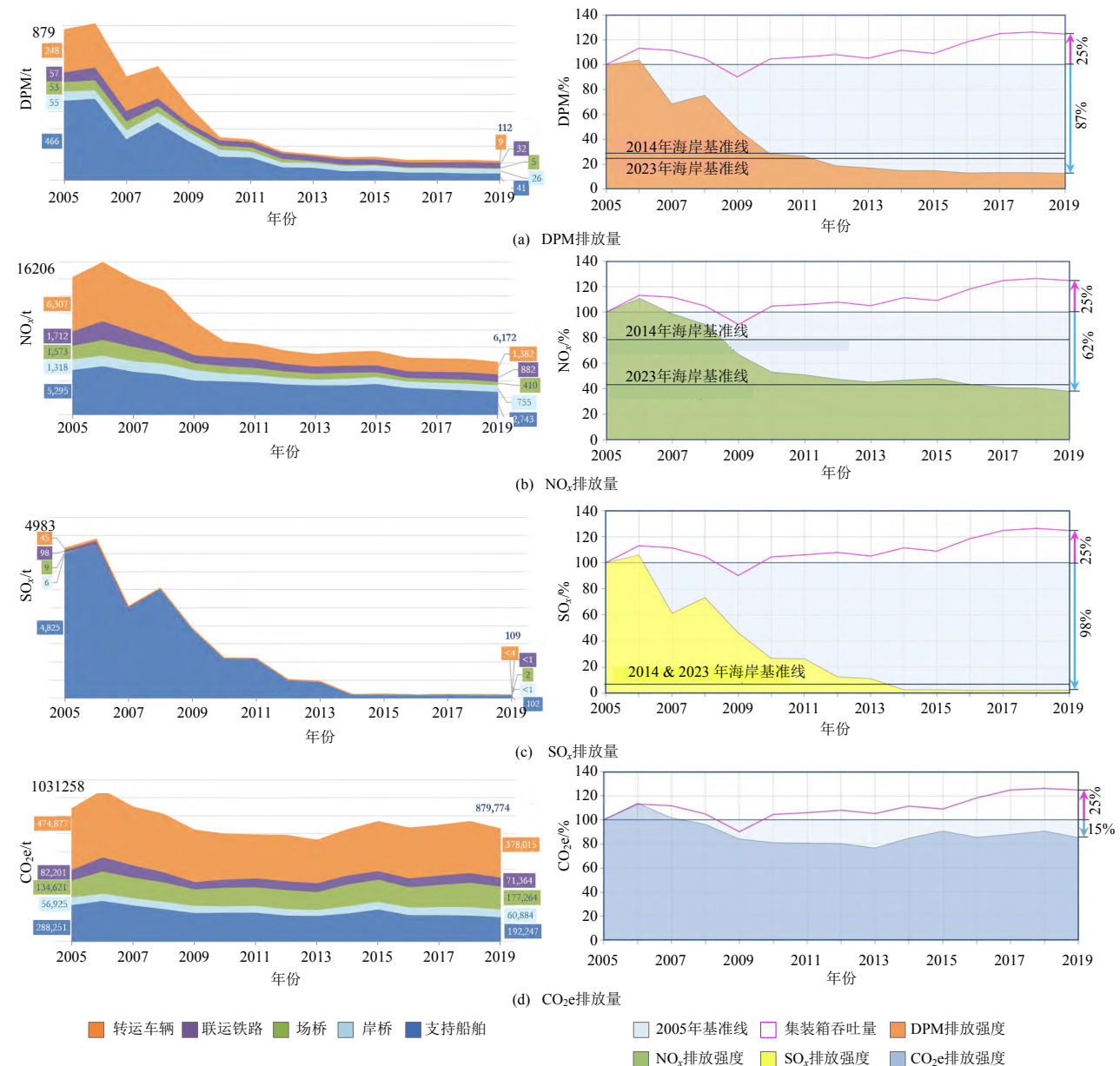


图 3 洛杉矶港排放情况
Fig. 3 Gas emissions of Los Angeles port

港区规模以上设备碳排放总量如图 3(d) 中所示。转运车辆、支持船舶、岸桥/场桥分别占据港区总排放的 42.9%、21.8% 和 27%，三者总计占据港口区域 91.7% 的碳排放。为实现港口区域的碳中和目标，这 3 类设备的碳排放必须大幅度降低。3 类中，岸桥/场桥的主要减排方式是电气化。研究表明，高度电气化的岸桥/场桥可通过能量回馈、安装储能系统等方式节省能源消耗^[40]。对转运车辆、支持船舶两类设备，电气化和清洁能源供能是目前两种可行思路，新加坡裕廊港、美国洛杉矶港均就其减排效果进行可行性测试^[35]。

2.2 港口综合能源系统

为应对如前文所述的港口排放问题，德国汉堡市已开始进行氢能源港口的建设计划。在这一计划中，汉堡将作为德国氢能源发展的未来基地。其主要建设思路是建设 60km 的纯氢网络并与现存的液化天然气网络联合运行，为汉堡区域内的大型工业提供绿色能源供应，并计划在莫尔堡建设大型电解

槽用以进行氢气制备。在未来的运行计划中，北部德国地区的风电规模将进一步扩展，无法并网的风电将制成氢气并通过航运网络在汉堡进行集散^[42]。结合以上发展趋势，未来港口将不再是单一的交通中心，也将成为能源中心汇聚各类能流，成为“能源-交通”中心，使港口综合能源系统成为未来发展不可逆转的潮流。

未来，逐步完善的港口电网将成为港口能源系统的主干网络，将承担各类港口机械、转运车辆的能量供给任务，同时将成为离岸新能源的富集点，并完成与主电网之间的电力交易。与此同时，以冷链运输为服务需求的热网和各类燃料管理、储存、传输的燃料网也将逐步融入港口电网中，形成“以电力为主导，多种能流并存，交通能源耦合运行的港口综合能源系统”。文献[34]在当前研究的基础上总结未来港口综合能源系统的总体结构，如图 4，包含以下 4 类主要网络，4 类网络在港口综合能源系统中针对特定目标协调运行。



图 4 港口综合能源系统

Fig. 4 Port integrated energy system

1) 电力网络：港口综合能源系统从主电网、风电场、光伏电站等获取电力，然后供给港口控制中心、转运汽车充电场、港机与岸电以及炼油与存储。

2) 热网络：电-热机组作为港口备用电源，在发出电力的同时，为港口冷链运输提供能量供给。

3) 燃料网络：接收从海运而来的燃料流，在炼油与存储区域进行加工、传输，并接入外部燃料传输网络。

4) 交通网络：接受来自海洋的货物，经过处理后接入陆地交通系统。

2.3 海-陆能源协同

地球上 71% 的面积是海洋，其中蕴含着丰富的能量与矿藏。文献[34]认为，当港口综合能源系统得到完全发展时，由于所处的地理环境，港口将成为海-陆能源系统的连接点，其交通-能量的耦合管理将成为实现海-陆能源协同的关键因素。本文由

此提出以港口综合能源系统为核心的海-陆能源协同运行框架，如图 5 所示。

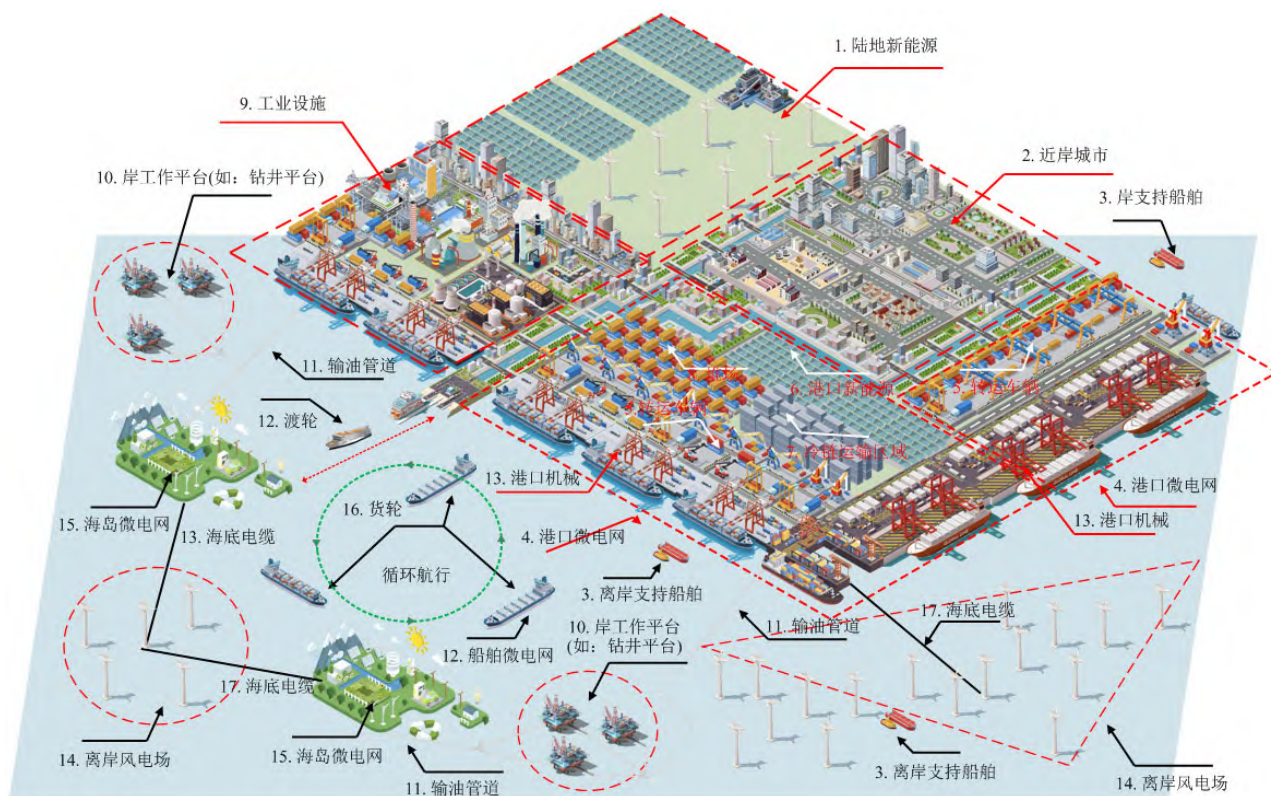


图 5 以港口综合能源为核心的海-陆能源协同

Fig. 5 Offshore-onshore energy integration with the core of seaport integrated energy system

图 5 中核心主要包括(2.近岸城市)、(4.港口微电网)、(10.离岸工作平台)、(12.船舶微电网)、(14.离岸风电场)和(15.海岛微电网)。

首先，(2.近岸城市)是未来海-陆能源协同的核心服务对象，主要功能包括消纳(1.陆地新能源)，为(9.工业设施)和(4.港口微电网)供能，提供(12.渡轮)往返于(15.海岛微电网)。

而(4.港口微电网)指港口高度电力化以后承担港口内部能量分配的电力网络，需要接受来自(2.近岸城市)的电力，并提供工业原料予(9.工业设施)。港口微电网本身也需消纳(6.港口新能源)，并为停靠(16.货轮)提供泊位和岸电服务，并分配(13.港口机械)承担物流任务。货物则通过(5.转运车辆)运送至(8.堆场)，冷链货物则存储于(7.冷链运输区)。

(10.离岸工作平台)包括海上钻井平台、工程建设船舶等，生产工业原料并通过(11.输油管道)与陆地或者(15.海岛微电网)相连，或者通过(16.货轮)进行物资转运。2021年6月21日，国家电网冀北公司乐亭 220kV 变电站开始向渤海湾 32-6 号油田群供电，标志着海-陆能源连接的进一步发展。

(14.离岸风电场)属于特殊的海洋工作平台，通过(17.海底电缆)与(4.港口微电网)、(2.近岸城市)或

(15.海岛微电网)相连。(3.离岸支持船舶)则用于维护各离岸工作平台。

(15.海岛微电网)指运行于海岛上的孤立微电网，(14.离岸风电场)可为其提供部分电力需求。海岛微电网的规模取决于海岛的面积，自然条件较好的海岛可能存在生态农业，海洋牧场等生产设施。海岛微电网可通过(16.货轮)与陆地交换物资，并通过(12.渡轮)满足居民出行需求。

从以上海-陆能源系统的运行框架中可知，港口综合能源系统从交通和能源侧实现陆地与海洋的双向联系，是整个系统的核心，其发展必将由于技术进步而具有更丰富的内涵。

3 港口综合能源系统特性

作为海-陆间的枢纽，港口综合能源系统在能源流和交通流两方面均与陆地应用有较大不同，本节针对这一问题对港口综合能源系统能源特性和交通特性两方面进行分析描述。

3.1 港口能源特性

一般而言，大型电力化港口能源通常包含四大类：来自上级电网的电力、本地可再生能源、传统化石能源和清洁能源。在港口实现碳中和的过程

中, 上级电网与本地电网的电力交换仍是港口能源的主要来源。但这部分研究内容与传统输电网-配电网之间的交互较为类似, 限于篇幅这里不再赘述。而化石能源作为当前港口区域的主要能量来源, 是港口区域碳排放的主要原因, 在实现碳中和的过程中需要用清洁燃料逐步取代。两者在未来很长一段时间内将在港口区域内共存运行, 这一过程归入 3.1.2 节清洁能源中进行介绍。

3.1.1 可再生能源

可再生能源通常指太阳能、风力、潮汐能、地热能、水能等能源。相比于传统化石能源, 可再生能源产生速度快, 且不产生气体排放, 是一种清洁能源^[43]。新能源接入与港口的可持续发展已在文献[23,44]中进行过详细讨论。在学术研究中, 文献[45-46]将新能源的渗透率作为港口的重要考核指标(key performance index, KPI)进行研究。

实际工程中, 越来越多的港口也开始使用可再生能源进行生产工作。美国休斯顿港利用 Spilman's island 规划光伏电站, 直接为港口区域供电^[47]。新加坡裕廊港提出“零碳港口”概念, 并在垃圾填埋岛上建设光伏电站, 供应裕廊港的能源需求, 年并网容量 1200 万 kW·h^[48]。在印度钦奈港, 光伏与风电机配合为集装箱区域供电^[49]。德国海事部门在发表于 2017 年的研究报告中强调新能源对于港口供电的重要作用, 汉堡港于 2017 年安装 27 台风电机组, 并网容量高达 40MW^[50], 同时汉堡港在货舱顶部安装光伏电池, 年并网容量 500MW·h^[51]。其他的可再生能源, 诸如潮汐能^[51-52]、波浪能^[53]以及地热能均在港口中开始应用。

图 6 所示为西班牙 Valencia 港利用海岸防波堤建设潮汐能发电的示意图, 防波堤长约 500m, 总装机容量 2.5MW^[54]。可再生能源接入港口后, 除直接在港区进行使用外, 欧盟绿色发展项目的研究报告设想将港口区域作为近岸地区可再生能源富集的节点, 并在电力市场中扮演独立售电公司的角色^[53]。这一设想在文献[22-25,55]进一步发展出“港口微电网”概念。文献[25]由此分析港口“能源-交通”耦合特性, 并提出港口微电网的三级控制方法。

3.1.2 清洁燃料

文献[1]中指出, 对化石能源, 特别是船用重油的过度依赖是航运业脱碳的主要障碍。因而凸显发展清洁燃料的重要性。在当前技术条件下的船用清洁燃料主要包括 3 类: 液化天然气、生物质燃料、

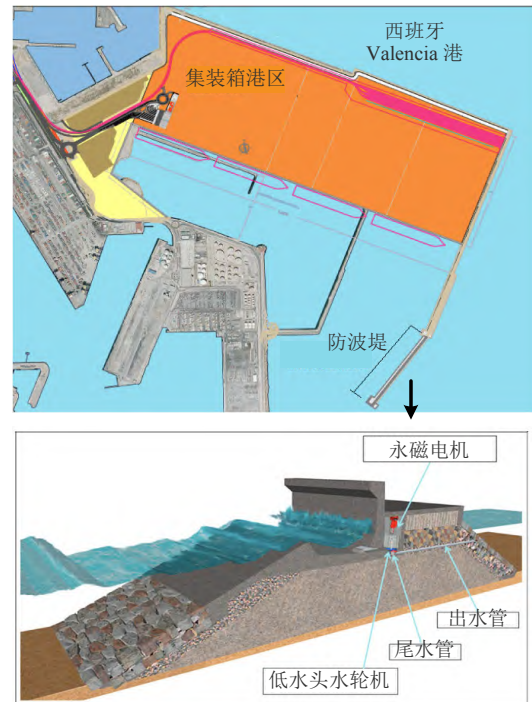


图 6 西班牙 Valencia 港潮汐能

Fig. 6 Tidal energy in Valencia port, Spain

氢气与氨气。

液化天然气是目前航运业已得到广泛使用的清洁燃料。2020 年 1 月 1 日开始执行的强制限硫令更是促进了液化天然气的使用, 并刺激了液化天然气运输业的蓬勃发展。据文献[1]中统计数据, 液化天然气的运输量自 2010 年起年均增长 7%, 远超其他国际大宗商品。这又刺激了液化天然气在港口的存储需求, 并延伸出港口液化天然气管理问题^[56]。

港口机械使用液化天然气源自 2008 年, 美国长滩港开始使用液化天然气驱动岸桥。同时欧盟开始实践将港口转运车辆改为液化天然气驱动, 并投入一批双燃料港机(可同时使用柴油和天然气)。对于液化天然气的减排效果, 文献[57]对整个港区的估计结果是 25%。在目前的港口中, 使用天然气的转运车辆已成为主要类型之一。与此同时, 使用生物质燃料混合柴油使用也是重要的发展趋势。荷兰鹿特丹港利用生物质燃料与柴油进行 3:7 的混合, 2016 年整个港区使用超过 480 万吨生物质燃料^[58], 其中绝大部分由港区通过废物回收进行制备。

液化天然气和生物质燃料相比于传统化石能源更加清洁, 但仍无法避免碳排放。因此仅依靠这一类清洁能源无法达成港口碳中和的目标, 这驱动了零碳燃料的发展, 即氢能和氨能。

氢能作为一种极具潜力的清洁燃料, 在学术和工业界都得到极大关注。在港口应用中, 文献[59]

介绍德国汉堡港和不来梅哈芬港的氢能源测试实验，该项目通过可再生能源制备氢气，并使用氢燃料电池驱动转运车辆。文献[53]分析氢能应用于港口拖船的可行性，并指出开发港口氢能源存储的必要性。此外，美国洛杉矶港和长滩港均推出氢能源转运车辆以降低碳排放^[60]。但到目前为止，氢能的制备效率和存储条件均较为苛刻，这限制了氢能的大规模使用。

目前，在船用替代燃料领域较全面的研究来自英国环保基金资助项目。该项目于 2019、2020 年连续发布研究报告“依靠阳光航行”^[41]和“零碳航行”^[61]。前者以摩洛哥及直布罗陀海峡为例，分析沙漠光伏制备氨气替代船用化石燃料的可行性，后者以中、南美洲为例从可再生能源分布、航运能源需求、燃料供应链及商业投资等 4 个角度全面分析氨、氢混合供应对航运减排的影响。研究报告同时指出，成熟的替代性零碳燃料需满足：1) 方便存储；2) 成熟供应链；3) 工业级制备这 3 方面优势。从这一角度，氨气的液化温度高，存储相比氢能简单，且是使用近百年的重要化工原料，具有成熟的供应链，工业级制备技术亦十分成熟，因此报告认为氨能是未来航运业脱碳的理想燃料。文献[62]指出仅我国过剩的氨产能即可降低天然气对外依存度 8%。

目前，美国、日本、中国、韩国等世界航运大国均已开始推进氨燃料的实用化^[63]。文献[62]对氨燃烧的研究现状进行综述，讨论纯氨、氨+氢和氨+碳氢燃料组合的燃烧/排放特性，并分析氨燃料在内燃机、燃气轮机和锅炉中的应用前景。2021 年，美国西北大学研究者提出高效的“氨-氢”转化方法，使氨有望成为一种“储氢”介质，进一步丰富了零碳燃料的使用途径^[64]。

为方便航运使用，一种零碳燃料制备的可行思路是在港区范围内通过可再生能源完成，然后利用港口的地理优势利用航运系统进行集散。因此港口区域的燃料流同时包括传统化石能源流和零碳燃料流。而后者由于耦合港口区域的能量计划而对经济性和环保特性具有显著影响。多类型燃料流的管理也因此成为港口综合能源系统相比其他陆地综合能源系统的显著区别。

3.2 港口交通特性

3.2.1 船舶岸电

船舶的动力系统一般分为主机和辅机两类，均

依靠燃烧化石燃料供应能量。当船舶停靠泊位时，主机一般处于关闭状态而使用辅机供应船舶的能源需求，因此在近岸地区产生大量排放。船舶岸电，即在船舶靠岸时通过线缆直接接入陆地电力系统，并直接使用陆地电力供应船舶负荷，从而消除船舶在停泊状态下的排放^[65]。

大型港口由于船舶停靠的时间较长，因此普遍提供岸电服务，如德国汉堡港、新加坡裕廊港、上海洋山港等。重庆寸滩/果园港作为内河港口，也可提供岸电服务。而岸电减排效果主要决定于所在地区电力的生产方式。文献[66]测算英国港口的岸电减排比例为 10%。而高雄港的效果为 57.16%^[67]。由于邮轮停靠时船舶上仍需要大量的电力及冷热负荷，且游客对服务负荷的质量具有更高要求，因此对岸电服务的需求更加迫切^[68]。文献[69]对挪威奥斯陆和法国的邮轮港口进行研究，由于挪威的水电较为丰富而法国以核电为主，两国邮轮港口的岸电设备可分别减少 99.5%和 85%的碳排放。

岸电设施推广的主要障碍包括技术和政策两方面。首先船舶接入岸电的方式、电压等级、频率要求均应有统一标准^[69]。同时，岸电接入导致的港口电网电能质量、谐波干扰等问题均需得到关注。而在政策方面，电力的市场化程度是制约岸电设施推广的关键因素。以我国为例，电力法规中明确电网公司是提供电力服务的主体，但岸电服务却由港口提供予停靠船舶，行业亟需岸电服务的政策法规。

同时需指出的是，船舶岸电设备实际上改变了传统船舶-港口间主要基于交通联系的协调运行模式，使船舶和港口间具有了交通和能量的双重联系^[25]。而近年来船舶的电气化发展方兴未艾^[70-72]，随着电气化船舶容量的逐步增加，岸电系统将不仅承担停泊状态下的船舶负荷，还可能需要满足船舶储能系统的充电需求。这使港口岸电系统的运行特性更加复杂，在实际运行中值得重点考虑。此外，当港口电网较为薄弱时，如在海岛型港口或者海洋工作平台港口中，其自身网络结构较薄弱，船舶可以作为“移动电厂”通过岸电系统对其进行支撑。中国西电集团已成功中标国内首个海上移动浮式燃气轮机联合循环电站设备项目，总容量 240MW^[73]。

3.2.2 电气化物流设备

物流设备是完成交通任务的工具，是港口管理中最重要设备。从 1.3 节可知，集装箱、干散货

和液货是货运港口需处理的3类重点货物。液货管理通常由管道传输系统完成,与多能流管理关系更密切,因此归入4.1节进行介绍。本节主要介绍岸桥、场桥、皮带传送系统及转运车辆等处理集装箱和干散货的电气化物流设备,如图7、8所示。



图7 主要港口机械类型

Fig. 7 Main types of port-side equipment

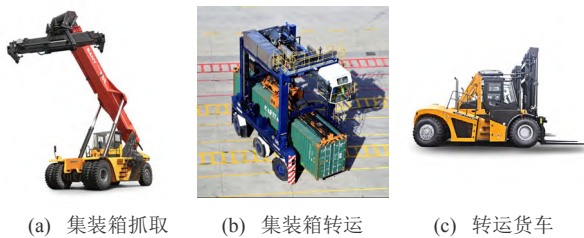


图8 主要转运车辆类型

Fig. 8 Main types of transferring vehicles

图7(a)所示岸桥(quay crane, QC)的主要功能是完全船舶和港口间的集装箱转运。图7(b)所示场桥(yard crane, YC)的主要功能是完成港口堆场间的集装箱转运。图7(c)所示的皮带传送系统(belt conveyor)用于处理干散货,如煤炭、化肥、木材等大宗商品。图8(a)用于集装箱抓取,以获取上层的集装箱。图8(b)用于集装箱转运,以进行集装箱的水平转运。图8(c)用于货物提升,以完成集装箱的堆叠。

对于YC,根据是否运行在固定轨道上,可分为轨道型(rail mounted gantry, RMG)和轮胎型(rubber-tire gantry, RTG)。RMG、RTG和QC的主要供能方式如表2所示^[40]。

从表2中可知,电力是目前最普适的港机供能方式,且具有效率高、易于实现自动化等特点。同时,电气化还可方便储能系统的接入,从而大幅度

表2 岸桥/场桥供能方式

| 设备 | QC | RMG | RTG |
|-----|----|-----|-----|
| 柴油 | √ | — | √ |
| 电力 | √ | √ | √ |
| 天然气 | — | — | √ |

降低港机的功率需求。文献[74]中使用超级电容器将QC的最大负荷由1211kW降低至330kW。文献[75]则从1500kW降低至150kW。而在YC方面,RTG由于没有固定在轨道上而使用轮胎驱动,通常比RMG具有更高的运行灵活性,在场桥调度中可承担多类型任务,但RMG则由于电力驱动而具有更高的能效。而电力化RTG(electrified RTG, E-RTG)则兼顾RTG的运行灵活性和RMG的高能效,已成为港机的主流设计趋势。已在各类海洋、内河港口取得实际应用,包括新加坡裕廊港^[40]、上海洋山港、重庆寸滩/果园港等。表3中给出RTG与E-RTG的单位能耗、使用成本和单位排放的对比^[40]。

表3 RTG与E-RTG能效对比

| 设备 | 能耗 | 价格/(\$/年) | 排放/(kg/箱) |
|-------|------------|-----------|-----------|
| RTG | 2.21L/次 | 64048 | 5.96 |
| E-RTG | 3.02kW·h/次 | 8621 | 1.92 |

从表3可得,E-RTG的能效远高于RTG,其运行成本仅为RTG的13%,碳排放仅有1/3。基于以上原因,港机电气化已成为未来港口的发展趋势,而融合各类电气化港口机械的港口能量管理模型将是下一步的研究重点。文献[76]首次将港口机械的能耗纳入港口能源系统的优化,研究表明可通过调度港口机械的工作时间提高港口的经济效益。文献[77]提出一种多层的港口能量管理方法,实现对各类港口机械的最优能效管理。这些研究均有效说明电气化港口机械能效管理的重要性,但到目前为止,尚无电气化港口机械多工况下的准确能耗模型。与此同时,由于电气化港口机械大量使用三相电机,所产生的三相不平衡现象可能对港口电网的运行造成影响,也是下一步研究的重点方向。

在港口运行中,传统车辆通常由化石能源驱动,因而带来大量的碳排放。在洛杉矶港2019年的碳排放数据中,转运车辆的碳排放约占港口总排放的42.9%。在2.1.2节已经介绍,为减少这部分碳排放,目前混合动力转运车辆^[78]、全电力转运车辆^[79]和清洁能源转运车辆^[80]已成为主要的设计趋势。研究表明,混合动力车辆可减少66%以上的碳

排放, 而全电力转运车辆可减少 90% 以上的碳排放^[40], 而清洁能源转运车辆的减排效果则取决于清洁能源的来源, 若清洁能源由完全由可再生能源制备, 其减排效果可达 90% 以上。

文献[81]提出采用港口区域内的可再生能源为电气化转运车辆供能的技术方案。文献[82]提出将转运车辆作为整体参与港口能量管理的可行性。以上研究均是提高港口转运车辆能效的可行思路。但目前的研究尚未精细化考虑车辆调度对港口能量侧的影响。

3.2.3 冷链运输

冷链运输是近年来兴起的一类运输方式, 主要完成生鲜类产品的运输。随着生活条件的不断提升, 冷链运输的需求发展迅速。据联合国贸易和发展会议统计, 2000—2020 年世界冷链运输行业保持了年均 20% 的增速^[2]。巨大的需求刺激了冷链运输船舶的发展, 世界冷链运输船队规模从 1990 年的 294000 标准箱增长为 2005 年的 1215000 标准箱, 并在 2012 年达到 3000000 标准箱的里程碑。这一发展也为港口运行提出新要求。

文献[83]指出在西班牙 Valencia 港, 冷链运输所消耗的能量已占到港口总能量需求的 45%, 已超过物流设备的 37% 成为港口区域的第一大负荷。图 9(a)、(b)和(c)分别给出冷链集装箱(可视为一种“移动冰箱”, 通过消耗能量维持内部温度), 冷链插头和港口冷链区域的实例。表 4 给出常见的冷链运输类型^[84]。

冷链运输集装箱通常分为两种类型。第一类冷



图 9 冷链运输

Fig. 9 Cold-chain logistic

表 4 冷链运输类型^[84]

Table 4 Typical cold-chain transportation^[84]

| 货物 | 温度/℃ | 变化范围/℃ |
|------------|---------|-------------|
| 深度冷冻: 海鲜 | -30~-28 | [-2, 2] |
| 冷冻: 鱼, 肉 | -20~-16 | [-2, 2] |
| 冷藏: 水果, 蔬菜 | -5~5 | [-0.5, 0.5] |
| 药物 | 2~8 | [-0.1, 0.1] |
| 香蕉 | 12~14 | [-0.2, 0.2] |
| 精密器件 | 18~21 | [-2, 2] |

链运输集装箱包含自主温度控制设备, 通过如图 9(b)所示的冷链插头供电进行温度控制; 第二类冷链运输集装箱无自主温度控制能力, 需港口外部接口进行温度控制^[84], 两者的占比通常为 8:2。为应对第二类冷链运输集装箱的冷负荷, 港口需建设热网络对冷链运输区域进行管理。

鉴于冷链区域日益成为港口的主要负荷, 港口需建立冷链区域的能耗模型, 并分析其对港口能量计划的影响。从港口总体能量管理的角度, 文献[77,85-86]将冷链运输集装箱能耗纳入港口的能效管理中。但截至目前, 学术界尚无研究将港口冷链区域统一纳入港口能量管理中。

4 港口综合能源系统关键问题

近年来, 陆地综合能源系统已成为研究热点, 在扩展与规划^[87], 系统优化运行^[88], 动态行为建模^[89]等方面均取得较多成果, 这些成果为港口综合能源系统的研究提供有力借鉴。作为一类特殊的综合能源系统, 在具有类似耦合建模方式的同时, 港口综合能源系统相比于陆地应用仍具有自身特色, 包括多能流融合、能源-交通融合、多利益主体协同和不确定性场景下系统运行特性, 这 4 点是构建港口综合能源系统模型的关键问题。

4.1 多能流融合

传统陆地综合能源系统包含电、热和气 3 部分网络, 而港口综合能源系统包含电、热和液体 3 部分网络。其中, 港口综合能源系统电、热网络的建模方式与陆地应用类似, 而液体网络则与陆地综合能源系统中的气网差异较大。

液体网络的引入是为应对港口区域的液体货物运输与分配, 包括原油、液化天然气等化石燃料或氨、氢等化工原料。这些液体按是否在港区内生产可分为两类: 传输型和生产型(具体特性可见 1.4 节)。传输型包括原油、液化天然气, 主要来源是通过船舶运输到港。生产型包括氨、氢等, 除部分经运输

而来,其余部分需在港口区域内进行制备。传输型不直接耦合港口能量侧,仅通过运维设备耗能与港口产生间接的能量关联,而生产型则耦合港口的能量管理方案,对港口能量侧具有较大影响。

对于传输型液体网络,图10以液化天然气的存储传输为例,介绍港口液体网络的运行方式^[90]。图10中存在两类运行方式:1)液化天然气卸装(船舶到港口);2)液化天然气传输(港口到外部传输系统)。在液化天然气卸装模式下,船舶装载的液化天然气通过蓝线输入存储设备,由于液化天然气的挥发特性,需通过设备进行气压平衡。在液化天然气传输模式下,设备同时抽取液化天然气和天然气,而天然气通过压缩机进行再液化,多余天然气通过燃烧设备处理。进而通过液泵进行传输,通过蒸发器将液化天然气转化为天然气然后进行外部网络传输。而对于生产型液体网络,除以上运行方式外,还需叠加能量流的转化过程,例如电解制氢或者制氨。这类模型可借鉴陆地应用中的P2G设备进行建模^[91]。此外,多类型能流融合还会带来时间尺度上的差异。如:热网络、燃料网络的传输动态慢于电网,因此从电网角度,热网络、燃料网络始终处于动态,有必要建立多时间尺度的多能流融合模型。文献[92]对这类多时间尺度建模问题进行研究,提出如表5的四阶段准稳态建模方法,将耦合能流按时间尺度分为若干阶段,在任一阶段融合相应时间尺度的设备模型。

一般而言,热网络规模较小,其水力变化相比于普通水力网络具有较小的时间尺度,因此在阶段1中仅考虑热网的水力模型,而气网/水力网络则在阶段2中考虑,时间尺度最长的温度动态则在阶段3中予以考虑。阶段4则作为阶段0的重复。而

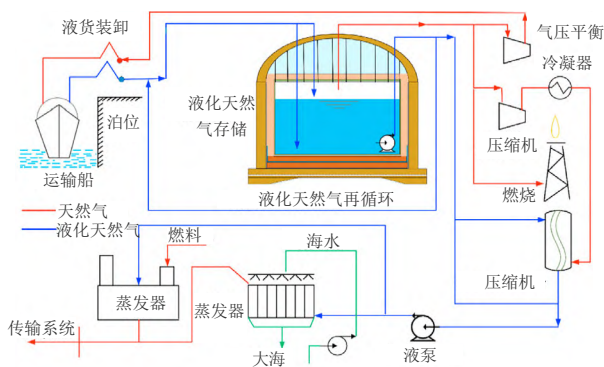


图10 液化天然气存储与传输^[90]
Fig. 10 Storage and transmission of liquefied natural gas^[90]

表5 多能流四阶段耦合模型

Table 5 Four-stage model of integrated energy flow

| 模型 | 潮流 | 耦合元件 | 气网水力 | 热网&换 热站水力 | 热网&换 热站热力 | 热负荷 |
|----|----|------|------|--------------|--------------|-----|
| 0 | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 1 | √ | √ | — | √ | — | — |
| 2 | √ | √ | √ | √ | — | — |
| 3 | √ | √ | √ | √ | √ | — |
| 4 | √ | √ | √ | √ | √ | — |

在港口综合能源系统中,化石能源和零碳燃料两类燃料流均具有挥发特性,因此具有“气-液耦合”特性。“气”和“液”两相的转化本身即具有多重的时间尺度,因此在表5所提出的四阶段模型中的第1阶段和第3阶段需进行“气-液”耦合建模,模型结构如图11所示的嵌套多时间尺度耦合能流模型。阶段1.1和1.2、3.1和3.2代表该阶段内的“气-液”转化。

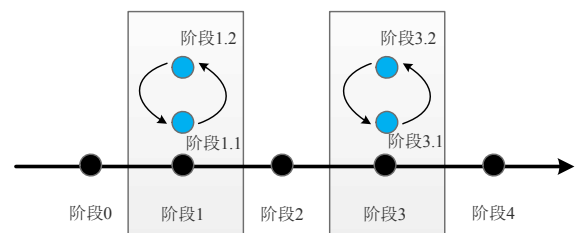


图11 嵌套多时间尺度耦合能流模型

Fig. 11 Integrated energy flow model with multi-stage and multiple timescales

4.2 能源-交通融合

作为重要的交通枢纽,港口是海洋与陆地交通系统连接的核心,其交通管理直接影响交通系统的运行效率。从船舶停泊开始,到船舶离港结束,港口需要完成的交通系统操作包括:

1) 泊位调度:当船舶靠泊港口时,港口为船舶分配泊位及停靠时长,需满足船长、吃水深度、泊位数、最大岸电功率、最大货物处理效率等运行约束^[93]。

2) 装卸调度:当泊位调度完成,船舶停靠结束后,港口需分配装卸设备进行货物装卸,其中岸桥用于集装箱装卸^[93],皮带传送系统用于干散货装卸^[94],液货通过专用管道转移入存储设备^[90]。运行约束包括货物总量、总处理时间等。

3) 货物转运:当货物从船舶转移到堆场后,为避免货物积压,需安排转运车辆将前方货物运输到后方堆场。这部分包括任务调度,最优路径和最优车队规模^[95]3类问题。

4) 堆场调度:货物经转运车辆运输至后方堆

场，再通过场桥转运实现货物的合理分配与存储。

5) 冷链管理：这类是特殊的堆场管理问题，针对如图 10 的冷链运输区域。而由于集装箱内部温度控制，这一问题包含电-热耦合约束。

6) 多式联运：港口是海洋交通与陆地运行的连接点，货物经港口处理后，需经过外部交通系统运输至下一站。这部分管理主要涉及“水路-铁路-公路”联合调度问题^[96]。

当港口完成高度电气化后，以上问题主要特性将演变为：泊位调度通过任一时刻港口的船舶停泊方案设定港口综合能源系统运行的能源需求。而港口综合能源系统同时需为完成装卸调度、货物转运和堆场调度 3 类问题的转运车辆提供充电服务及清洁能源服务。为保障货物的存储条件，冷链管理对港口的热网络运行设定运行约束，使港口具有“电-热”耦合的特性。多式联运中水路与铁路的货物切换由港口转运车辆完成，在铁路、水路双重运行约束下，港口需为转运车辆提供能量供给。

以上港口交通行为亦具有时间尺度上的差异。泊位调度和多式联运是港口与外部交通系统连接的纽带，在各类交通系统行为中具有最长的时间尺度，一般泊位调度需提前数天至一周进行排布，多式联运一般需提前数周至一个月进行排布。装卸调度、货物转运和堆场调度是港口管理的主要问题，时间尺度以天为单位。而冷链运输对货物的存储温度需进行精确控制，因此时间尺度最短，为小时级。

综合以上问题，高度电气化的港口综合能源系统中能源侧与交通侧深度耦合。以上问题均需进行能量化建模，明确交通物流操作和消耗综合能源服务之间的定量关系，并由此建立港口综合能源系统的能量管理模型，如图 12 所示。

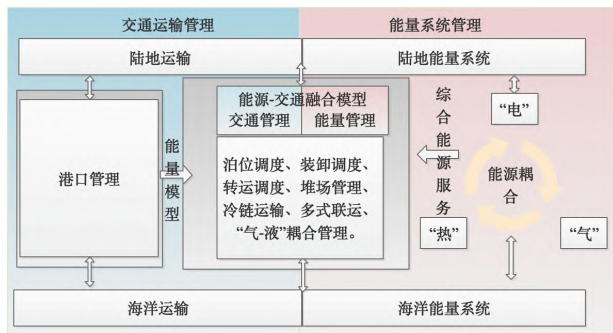


图 12 能源-交通融合模型

Fig. 12 Models of energy-transportation integration

4.3 多利益主体协调运行

鉴于港口对国民经济的重要作用，其运行一般

涉及多个利益主体，目前这一领域的研究主要来自交通领域。文献[1]提出港口管理一般包含 4 个主要利益主体：政策制定主体、港口运营者、船东和客户，其相互协调机制如图 13 所示。

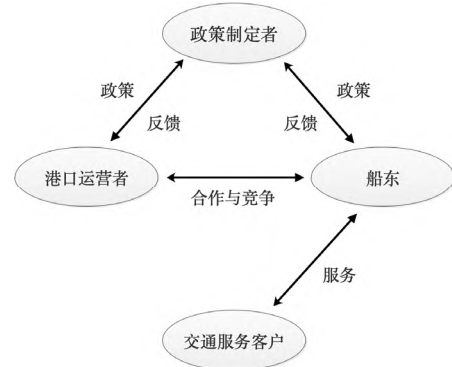


图 13 港口运营中的多利益主体

Fig. 13 Multiple stakeholders in port operation

对于利益主体间的具体协调行为，文献[97]以港口可持续发展为目标对港口运行的利益主体协调进行研究，通过分析现有港口运行方式将利益主体间的行为分为咨询、对话、参与、知识分享、合作，目标分为环境、社会、经济和一般目标。文献[98-101]分别以爱尔兰、印度尼西亚和比利时港口为例，介绍在环境保护指标、能源价格、交通运营效率等方面港口多利益主体的协调问题。以上研究和实践均表明多利益主体协调有利于实现航运系统的最优运行。

实际航运系统运行一般采用“政策制定—利益主体竞争—信息反馈—政策更新”的闭环决策方式，即政策制定者给出相应政策，余下各利益主体以此为边界条件展开竞争，并向政策制定者反馈信息，并引导政策更新^[1]。近年来的硫氧化物控制政策即是这一闭环决策流程的典型。航运业对于硫的排放，在开放水域与排放控制区域分别执行不同标准，以开放水域为例，在 2011 年和 2020 年分别两次下调标准，分别从 4.5%降低至 3.8%，及从 3.8%降低至 0.5%，其中，2020 年的政策由于排放控制力度大对行业生态影响极大。由于含硫 0.5%的燃料价格是 3.8%的近 2 倍，大量船东选择加装气体洗涤设备以满足硫排放政策^[102]，这一政策同样影响港口的燃料存储计划^[103]。

与控制硫氧化物类似，航运碳排放很早便引起政策制定者关注。在 2011 年的欧洲交通运输白皮书中已指出，航运业的总排放量需在 2050 年至少降低 40%^[104]。在 2011 和 2014 年，IMO 分别提出

能效设计指标和能效运行指标,并要求2025年后下水的船舶的能效设计指标至少提升30%^[1]。随着近年来碳中和成为全球共识,有关航运碳排放控制的各类政策亦亟需更新,但排放控制过程仍将大概率保持类似硫排放控制的闭环决策流程。

这一闭环决策流程将同样对港口综合能源系统的运营产生影响。港口运营者需以这些政策作为边界条件调整自身的规划策略和运行方式。但到目前为止,国内外对这一主题的研究尚十分缺乏。从数学角度,涉及多主体协调的问题一般可构建为博弈论问题,文献[105]以船舶停靠时间作为协调变量建立船东与港口间的Nash博弈模型。在将来的研究中,仍有如下几个场景值得重点关注。

1) 政府制定碳排放政策而港口、船东各自采取相应措施的场景,可构建为政府为“领导者”,港口、船东为“跟随者”的Stackelberg博弈模型。

2) 港口管理者针对不同排放强度的船舶类型发布不同价格激励,不同船东通过改造船舶或优化运行措施竞争低价港口泊位的场景,可构建为多船东的Stackelberg博弈模型。

3) 上级网络和港口综合能源系统的服务价格协调机制,可采用多轮价格谈判机制,也可引入政府作为价格规则制定者,形成上级综合能源网络和港口综合能源系统之间的Nash博弈模型。

4.4 不确定性场景下系统运行特性

不确定性场景中的运行特性一直是综合能源系统研究的关键问题,由于地理原因和对国民经济的重要性,港口综合能源系统的规划与运行将面临众多不确定场景,主要包括:气候变化、极端天气、气象变化等,如何确保港口综合能源系统在这些不确定性场景中的运行特性是当前研究中的关键问题。作为一类特殊的综合能源系统,港口能源侧运行特性的研究可与传统陆地应用共享部分研究成果^[106-108],因此本节不将能源侧作为研究重点,而重点描述由于港口“能源-交通”融合特性对港口运行特性产生的影响。

气候变化

由于毗邻海岸/河岸地区,气候变化对港口的建设与运行有极大影响,主要影响分为两方面。

1) 气候变化导致的海平面变化将导致港口泊位水深发生显著变化,这会对港口能够停靠的船舶产生根本性影响^[109]。由于外海的水深相对稳定而上海长期缺乏深水泊位,这也成为我国选择在洋山

通过填海建设港口并建设大桥与上海市区相连的重要原因^[110]。在内河港口,季节变化即可引起很大的水深变化,以重庆寸滩港为例,夏季与冬季的泊位水深相差可达20m,这将极大影响港口的泊位调度,从而影响港口的交通服务需求。

2) 气候变化导致的洋流变化、浮冰融化等会改变航道水文特性。例如,沿马六甲海峡南向的洋流每年为新加坡深水航道带来的大量泥沙,业已成为困扰新加坡航运业的关键问题^[111]。而若航道水深小于10倍船舶吃水,船舵的功能会受到限制,因此部分大型船舶为确保航行安全不得不绕行印尼龙目海峡,而印尼龙目海峡则由于洋流作用水深不断增加,成为世界少数可通航30万吨以上船舶的海峡航道^[112]。同时,全球气候变暖使北极地区浮冰融化,为开辟北冰洋航道创造了良机,对周围相关港口的建设均有重大影响^[113]。因此,如何评估气候变化对港口运行环境的影响,进而分析相应场景下的运行特性是港口综合能源系统的关键问题。

1) 极端天气。

极端天气对港口运行同样具有显著影响,主要航道上的极端天气将导致船舶停靠时间变长,港口的锚地亦会变得紧张^[114]。同时极端天气袭击港口将导致港口设备损坏,如:电力网络故障、港机损坏、部分泊位不适合使用等,这些事故可能影响港口正常运行。

这些极端天气还可能由于连锁效应导致其影响在港口范围内扩展。主要机理为:极端天气影响船舶停靠方案,改变港机和转运车辆的任务需求,进而可能引起货物积压并降低港口与外界交通系统的协同效率^[115-116]。因此,评估极端天气对港口运行的影响,分析极端天气下港口恢复服务的能力,同样是港口综合能源系统发展面临的重大问题。

2) 气象变化。

这里的气象变化主要指阳光、风和温度等较温和的变化。由于未来港口综合能源系统将接入大量新能源,因此气象变化对港口的能源侧具有很大的影响^[12]。在不确定性条件下研究港口能量侧的鲁棒优化方法是可行的研究思路。与此同时,温度变化会对港口区域冷链运输等与温度控制相关的负荷产生影响,为确保港口服务的可靠性,将温度变化纳入港口综合能源系统的运行优化值得尝试。

5 结论

随着电气化水平的不断发展和各类异质能源系统的融入, 未来港口将成为一个复杂的“能源-交通综合系统”。鉴于港口在国民经济中的重要地位, 党和国家高度重视港口的发展, 已发布一系列政策文件明确提出“绿色港口”的发展计划。

1) 作为论文的第一部分, 本文从港口的发展历程入手, 明确本文研究对象, 分析港口能源系统建设的历史进程及当前挑战, 并选取典型港口分析其功能与结构和发展现状, 总结港口综合能源系统发展的内生动力。

2) 从环保法规角度入手, 提出港口综合能源系统的典型结构, 并展望未来以港口综合能源系统为核心的海-陆能源协同运行框架, 分析未来海洋与陆地融合发展的趋势。

3) 从能源特性和交通特性两方面综述港口综合能源系统与陆地综合能源系统的联系与区分。在此基础上, 提出港口综合能源系统多能流融合、能源-交通融合、多利益主体协调运行和不确定性场景下系统运行特性 4 类问题, 为港口综合能源系统未来的研究提供参考方向。

致 谢

感谢美国伊利诺伊理工大学周全博士多次为论文修改提出建议。感谢重庆港务物流公司信息科技部刘世刚主任为本研究提供数据支持及技术交流服务。感谢华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室开放基金为本研究提供经费支持。

参考文献

- [1] PSARAFTIS H. Sustainable shipping: a cross-disciplinary view[M]. Cham: Springer, 2019.
- [2] United Nations Conference on Trade and Development. Review of maritime transport 2020[R]. Genève: UNCTAD, 2020.
- [3] BOILE M, THEOFANIS S, SDOUKOPOULOS E, et al. Developing a port energy management plan: Issues, challenges, and prospects[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2549(1): 19-28.
- [4] WOO J K, MOON D S H, LAM J S L. The impact of environmental policy on ports and the associated economic opportunities[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2018, 110: 234-242.
- [5] YAP W Y, LAM J S L. 80 million-twenty-foot-equivalent-unit container port? Sustainability issues in port and coastal development[J]. Ocean & Coastal Management, 2013, 71: 13-25.
- [6] 曾庆光, 董明望, 辜勇. 考虑船舶碳排放的集装箱船舶进港靠泊调度问题研究[J]. 物流技术, 2020, 39(11): 95-101, 141.
ZENG Qingguang, DONG Mingwang, GU Yong. Research on coordination of arrival schedule and berth arrangement of container ships considering ship carbon emissions[J]. Logistics Technology, 2020, 39(11): 95-101, 141(in Chinese).
- [7] 范厚明, 郭振峰, 岳丽君, 等. 考虑能耗节约的集装箱码头双小车岸桥与 AGV 联合配置及调度优化[J]. 自动化学报, 2021, 47(10): 2412-2426.
FAN Houming, GUO Zhenfeng, YUE Lijun, et al. Joint configuration and scheduling optimization of dual-trolley quay crane and AGV for container terminal with considering energy saving[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(10): 2412-2426(in Chinese).
- [8] 程兴群, 金淳, 姚庆国, 等. 碳交易政策下多式联运路径选择问题的鲁棒优化研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(6): 82-90.
CHENG Xingqun, JIN Chun, YAO Qingguo, et al. Research on robust optimization for route selection problem in multimodal transportation under the cap and trade policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(6): 82-90(in Chinese).
- [9] MIRAKYAN A, DE GUIO R. Integrated energy planning in cities and territories: a review of methods and tools[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 22: 289-297.
- [10] SHAO Changzheng, DING Yi, WANG Jianhui, et al. Modeling and integration of flexible demand in heat and electricity integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 361-370.
- [11] 江里舟, 别朝红, 龙涛, 等. 能源交通一体化系统发展模式与运行关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1285-1300.
JIANG Lizhou, BIE Zhaohong, LONG Tao, et al. Development model and key technology of integrated energy and transportation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1285-1300(in Chinese).
- [12] WANG Wenyuan, PENG Yun, LI Xiangda, 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.
- [13] SIFAKIS N, KONIDAKIS S, TSOUTSOS T. Hybrid renewable energy system optimum design and smart dispatch for nearly Zero Energy Ports[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 310: 127397.

- [14] 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, 2022, 42(17): 6184-6195.
HUANG Yiwen, HUANG Wenxi, WEI Wei, et al. Logistics-energy collaborative optimization scheduling method for large seaport integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6184-6195(in Chinese).
- [15] ERTEM A, İŞBİLİR M, ARSLAN A. Review of intermodal freight transportation in humanitarian logistics [J]. European Transport Research Review, 2017, 9(1): 10.
- [16] CHAUDHURI A, DUKOVSKA-POPOVSKA I, SUBRAMANIAN N, et al. Decision-making in cold chain logistics using data analytics: a literature review[J]. The International Journal of Logistics Management, 2018, 29(3): 839-861.
- [17] United Nations Conference on Trade and Development. Review of maritime transport 2020[R]. Genève: UNCTAD, 2020.
- [18] MOLAVI A, LIM G J, RACE B. A framework for building a smart port and smart port index[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2020, 14(9): 686-700.
- [19] BERGQVIST R, MONIOS J. Green ports: inland and seaside sustainable transportation strategies[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- [20] 戈艳艳, 王姗姗. 考虑碳排放的港口全要素生产率及影响因素分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(2): 22-29.
GE Yanyan, WANG Shanshan. Total factor productivity and influencing factors analysis for ports considering carbon emissions[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(2): 22-29(in Chinese).
- [21] VENTURINI G, IRIS Ç, KONTOVAS C A, et al. The multi-port berth allocation problem with speed optimization and emission considerations[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 54: 142-159.
- [22] AHAMAD N B B, GUERRERO J M, SU C L, et al. Microgrids technologies in future seaports[C]//2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe(EEEIC/I&CPS Europe). Palermo: IEEE, 2018: 1-6.
- [23] SADIQ M, ALI S W, TERRICHE Y, et al. Future greener seaports: a review of new infrastructure, challenges, and energy efficiency measures[J]. IEEE Access, 2021, 9: 75568-75587.
- [24] MUTARRAF M U, TERRICHE Y, NASIR M, et al. A communication-less multimode control approach for adaptive power sharing in ship-based seaport microgrid [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 3070-3082.
- [25] FANG Sidun, WANG Yu, GOU Bin, et al. Toward future green maritime transportation: an overview of seaport microgrids and all-electric ships[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 207-219.
- [26] ALASALI F, HABEN S, HOLDERBAUM W. Energy management systems for a network of electrified cranes with energy storage[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 106: 210-222.
- [27] ZHAO Nan, SCHOFIELD N, NIU Wangqiang. Energy storage system for a port crane hybrid power-train[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(4): 480-492.
- [28] AHAMAD N B B, SU C L, XIAO Zhaoxia, et al. Energy harvesting from harbor cranes with flywheel energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3354-3364.
- [29] GENNITSARIS S G, KANELLOS F D. Emission-aware and cost-effective distributed demand response system for extensively electrified large ports[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4341-4351.
- [30] KANELLOS F D, VOLANIS E S M, HATZIARGYRIOU N D. Power management method for large ports with multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1259-1268.
- [31] VILLALBA G, GEMECHU E D. Estimating GHG emissions of marine ports-the case of Barcelona[J]. Energy Policy, 2011, 39(3): 1363-1368.
- [32] ACCIARO M, GHIARA H, CUSANO M I. Energy management in seaports: a new role for port authorities [J]. Energy Policy, 2014, 71: 4-12.
- [33] STARCREST Consulting Group. Port of Los Angeles inventory of air emissions-2019[R/OL]. https://kentico.portoflosangeles.org/getmedia/4696ff1a-a441-4ee8-95ad-abe1d4cddf5e/2019_Air_Emissions_Inventory.
- [34] FANG Sidun, WANG Hongdong. Optimization-based energy management for multi-energy maritime grids[M]. Singapore: Springer, 2021.
- [35] The Port of Los Angeles. Port of Los Angeles rolls out hydrogen fuel cell electric freight demonstration[EB/OL]. (2021-06-07). https://www.portoflosangeles.org/references/2021-news-releases/news_060721_zanzeff.
- [36] United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). Review of maritime transport 2015[R]. Genève: UNCTAD, 2015.
- [37] Next Gen Multipurpose Port/Jurong Port Singapore

- [EB/OL]. [2021-08-31]. <https://www.jp.com.sg/>.
- [38] The Business Time. Jurong Port starts world's largest port-based solar facility[EB/OL]. (2018-08-26). <https://www.businesstimes.com.sg/energy-commodities/jurong-port-starts-worlds-largest-port-based-solar-facility>.
- [39] CASTELEIN B, GEERLINGS H, VAN DUIN R. The reefer container market and academic research: a review study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120654.
- [40] IRIS Ç, 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.
- [41] ASH N, SCARBROUGH T. Sailing on solar: could green ammonia decarbonise international shipping[R]. New York: Environmental Defense Fund, 2020.
- [42] BURGESS M. Hamburg Hydrogen Network established to promote hydrogen and reduce emissions[EB/OL]. (2021-04-26). <https://www.h2-view.com/story/hamburg-hydrogen-network-established-to-promote-hydrogen-and-reduce-emissions/>.
- [43] TWIDELL J, WEIR T. *Renewable energy resources*[M]. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2006.
- [44] SEDDIEK I S. Application of renewable energy technologies for eco-friendly sea ports[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2020, 15(9): 953-962.
- [45] European Union. Sea terminals-smart, energy efficiency and adaptive port terminals[C]//Baltic Ports Organisation Conference. Riga: European Union, 2015.
- [46] BUIZA G, CEPOLINA S, DOBRIJEVIC A, et al. Current situation of the Mediterranean container ports regarding the operational, energy and environment areas[C]//International Conference on Industrial Engineering and Systems Management(IESM). Seville: IEEE, 2015: 530-536.
- [47] MOLAVI A, SHI Jian, WU Yiwei, et al. Enabling smart ports through the integration of microgrids: a two-stage stochastic programming approach[J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114022.
- [48] SONG Shuang, POH K L. SOLAR PV leasing in Singapore: enhancing return on investments with options [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 67: 012020.
- [49] MISRA A, PANCHABIKESAN K, GOWRISHANKAR S K, et al. GHG emission of the Port of Chennai[J]. *Carbon Management*, 2017, 8(1): 45-56.
- [50] HAFEN H. Energy cooperation port of hamburg[R]. Port of Hamburg, 2015.
- [51] ACCIARO M, GHIARA H, CUSANO M I. Energy management in seaports: a new role for port authorities [J]. *Energy Policy*, 2014, 71: 4-12.
- [52] TANG H S, QU K, CHEN G Q, et al. Potential sites for tidal power generation: a thorough search at coast of New Jersey, USA[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 412-425.
- [53] Froese J, Toeter S. Green and effective Operations at Terminals and in Ports: the outcome[J]. *Port strategy*, 2014, 10(14):28-38.
- [54] CASCAJO R, GARCÍA E, QUILES E, et al. Integration of marine wave energy converters into seaports: a case study in the port of Valencia[J]. *Energies*, 2019, 12(5): 787.
- [55] 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]//2018 IEEE International Conference on Industrial Technology(ICIT). Lyon: IEEE, 2018: 1043-1048.
- [56] PENG Yun, ZHAO Xinzhe, ZUO Tianli, et al. A systematic literature review on port LNG bunkering station[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 91: 102704.
- [57] NA J H, CHOI A Y, JI Jianhua, et al. Environmental efficiency analysis of Chinese container ports with CO2 emissions: an inseparable input-output SBM model[J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 65: 13-24.
- [58] 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.
- [59] EGGERT T. Status quo of use of hydrogen as fuel in port, shipping and transport industry[R]. Green efforts project technical report 2012.
- [60] California Hydrogen Business Council. Hydrogen and fuel cells in the ports workshop report[R]. Los Angeles: California Hydrogen Business Council, 2016.
- [61] ASH N, CARPENTER-LOMAX O. Zero-Carbon for Shipping: Propelling investment in South and Central America with hydrogen-based shipping fuels[R]. Washington: Ocean Conservancy, 2020.
- [62] 周上坤, 杨文俊, 谭厚章, 等. 氨燃烧研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4164-4181.
- ZHOU Shangkun, YANG Wenjun, TAN Houzhang, et al. Research progress of ammonia combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4164-4181(in Chinese).
- [63] AL-ABOOSI F Y, EL-HALWAGI M M, MOORE M, et al. Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry[J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2021, 31: 100670.
- [64] LIM D K, PLYMILL A B, PAIK H, et al. Solid acid

- electrochemical cell for the production of hydrogen from ammonia[J]. *Joule*, 2020, 4(11): 2338-2347.
- [65] BALLINI F, BOZZO R. Air pollution from ships in ports: the socio-economic benefit of cold-ironing technology[J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2015, 17: 92-98.
- [66] ZIS T, NORTH R, ANGELOUDIS P, et al. Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports[J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2014, 16(4): 371-398.
- [67] CHANG C, WANG C. 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.
- [68] TSENG P, PILCHER N. A study of the potential of shore power for the port of Kaohsiung, Taiwan: to introduce or not to introduce?[J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2015, 17: 83-91.
- [69] 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.
- [70] MUTARRAF M U, TERRICHE Y, NIAZI K A K, et al. Energy storage systems for shipboard microgrids—a review[J]. *Energies*, 2018, 11(12): 3492.
- [71] China News Agency. China's first oil-electric hybrid propulsion offshore official ship "Deep Sea 01" was launched in Guangzhou[EB/OL]. (2020-04-28). <https://www.tellerreport.com/news/2020-04-28-china-s-first-oil-electric-hybrid-propulsion-offshore-official-ship-%22deep-sea-01%22-was-launched-in-guangzhou.r1gORwSYI.html>.
- [72] 国际船舶网. 国内首艘大型全电动长江游船“君旅号”首航[EB/OL]. (2020-06-24). http://www.eworldship.com/html/2020/OperatingShip_0624/160958.html.
- [73] 中国西电集团有限公司. 中国西电集团成功中标国内首个海上移动浮式燃气轮机联合循环电站设备项目[EB/OL]. (2021-03-23). <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c17395185/content.html>. China Xidian Group Co., Ltd. China Xidian Group successfully won the bid for the first offshore mobile floating gas turbine combined cycle power plant equipment project in China, [EB/OL]. (2021-03-23). [http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c17395185/content.html\(in Chinese\)](http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c17395185/content.html(in%20Chinese)).
- [74] TRAN T K. Study of electrical usage and demand at the container terminal[D]. Burwood: Deakin University, 2012.
- [75] PARISE G, HONORATI A. Port cranes with energy balanced drive[C]//2014 AEIT Annual Conference-From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer(AEIT). Trieste: IEEE, 2014: 1-5.
- [76] PROUSALIDIS J, KANELLOS F, LYRIDIS D, et al. Optimizing the operation of port energy systems[C]//2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe(EEEIC/I&CPS Europe). Genova: IEEE, 2019: 1-6.
- [77] PEI Rui, XIE Jihua, ZHANG Hanlin, et al. Robust multi-layer energy management and control methodologies for reefer container park in port terminal[J]. *Energies*, 2021, 14(15): 4456.
- [78] HANGGA P, SHINODA T. Motion-based energy analysis methodology for hybrid straddle carrier towards eco-friendly container handling system[J]. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2015, 11: 2412-2431.
- [79] 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 & Management*, 2015, 17: 99-111.
- [80] The Port of Los Angeles. Port of Los Angeles rolls out hydrogen fuel cell electric freight demonstration[EB/OL]. (2021-06-07). https://www.portoflosangeles.org/references/2021-news-releases/news_060721_zanzeff.
- [81] IRIS Ç, LAM J S L. Optimal energy management and operations planning in seaports with smart grid while harnessing renewable energy under uncertainty[J]. *Omega*, 2021, 103: 102445.
- [82] BUI V D, NGUYEN H P, NGUYEN X P. Optimization of energy management systems in seaports as a potential strategy for sustainable development[J]. *Optimization*, 44(8): 19-30.
- [83] SEA. Smart, energy-efficient and adaptive port terminals. International congress on energy and the environment[R]. Valencia Port: SEA, 2014: 1-24.
- [84] VAN DUIN J H R, GEERLINGS H, VERBRAECK A, et al. Cooling down: a simulation approach to reduce energy peaks of reefers at terminals[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 72-86.
- [85] CANEPA M, FRUGONE G, BOZZO R. Smart Micro-Grid: an effective tool for energy management in ports[M]//ÖLÇER A I, KITADA M, DALAKLIS D, et al. Trends and Challenges in Maritime Energy Management. Cham: Springer, 2018: 275-293.
- [86] ÖLÇER A, BAUMLER R, BALLINI F, et al. Maritime energy management[M]//VISVIKIS I D, PANAYIDES P M. Shipping Operations Management. Cham: Springer, 2017: 177-196.
- [87] XIANG Yue, CAI Hanhu, GU Chenghong, et al.

- Cost-benefit analysis of integrated energy system planning considering demand response[J]. *Energy*, 2020, 192: 116632.
- [88] WANG Yongli, WANG Yudong, HUANG Yujing, et al. Operation optimization of regional integrated energy system based on the modeling of electricity-thermal-natural gas network[J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113410.
- [89] WU Shengyu, WANG Peng, YANG Jie, et al. Review on interdependency modeling of integrated energy system [C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2). Beijing: IEEE, 2017: 1-6.
- [90] KHAN M S, EFFENDY S, KARIMI I A, et al. Improving design and operation at LNG regasification terminals through a corrected storage tank model[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 344-353.
- [91] GÖTZ M, LEFEBVRE J, MÖRS F, et al. Renewable power-to-gas: a technological and economic review[J]. *Renewable energy*, 2016, 85: 1371-1390.
- [92] 薛屹洵, 潘昭光, 王彬, 等. 多能流多尺度综合安全评估关键技术研发与应用[J]. *电网技术*, 2021, 45(2): 437-446.
- XUE Yixun, PAN Zhaoguang, WANG Bin, et al. Security assessment module in integrated energy management system: development and application[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(2): 437-446(in Chinese).
- [93] BIERWIRTH C, MEISEL F. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 244(3): 675-689.
- [94] MU Yunfei, YAO Taiang, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for belt conveyor system in coal mine considering silo virtual energy storage[J]. *Applied Energy*, 2020, 275: 115368.
- [95] WANG Pei. Vehicle scheduling problem in terminals: a review[C]//14th International Conference on Verification and Evaluation of Computer and Communication Systems. Xi'an: Springer, 2020: 54-67.
- [96] KAZEMI Y, SZMEREKOVSKY J. Modeling downstream petroleum supply chain: the importance of multi-mode transportation to strategic planning[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 83: 111-125.
- [97] FOBBE L, HILLETFOETH P. Stakeholder interaction for sustainability in seaports. Analysing the implementation and its linkages to overarching interaction efforts[J]. *European Business Review*, 2021, 33(5): 693-724.
- [98] ASHRAFI M, WALKER T R, MAGNAN G M, et al. A review of corporate sustainability drivers in maritime ports: a multi-stakeholder perspective[J]. *Maritime Policy & Management*, 2020, 47(8): 1027-1044.
- [99] O'KEEFFE J M, CUMMINS V, DEVOY R J N, et al. Stakeholder awareness of climate adaptation in the commercial seaport sector: a case study from Ireland[J]. *Marine Policy*, 2020, 111: 102404.
- [100] SUSMAN R, GÜTTE A M, WEITH T. Drivers of land use conflicts in infrastructural mega projects in coastal areas: a case study of Patimban seaport, Indonesia[J]. *Land*, 2021, 10(6): 615.
- [101] HAEZENDONCK E, LANGENUS M. Integrated ports clusters and competitive advantage in an extended resource pool for the Antwerp Seaport[J]. *Maritime Policy & Management*, 2019, 46(1): 74-91.
- [102] ZHU Yuanqing, XIA Chong, SHREKA M, et al. Combustion and emission characteristics for a marine low-speed diesel engine with high-pressure SCR system [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(12): 12851-12865.
- [103] GONZÁLEZ-CANCELAS N, SERRANO B M, SOLER-FLORES F. Seaport sustainable: use of artificial intelligence to evaluate liquid natural gas utilization in short sea shipping[J]. *Transportation Journal*, 2019, 58(3): 197-221.
- [104] European Commission. Roadmap to a single European transport area-towards a competitive and resource efficient transport system[R]. Brussels: European Commission, 2011.
- [105] FANG Sidun, WANG Hongdong, SHANG Ce, et al. A decision-making method for berthed electric-ships based on generalized Nash game[C]//8th Renewable Power Generation Conference(RPG 2019). Shanghai: IEEE, 2019: 1-7.
- [106] YAN Mingyu, HE Yubin, SHAHIDEHPOUR M, et al. Coordinated regional-district operation of integrated energy systems for resilience enhancement in natural disasters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 4881-4892.
- [107] ZHOU Yizhou, WEI Zhinong, SHAHIDEHPOUR M, et al. Distributionally robust resilient operation of integrated energy systems using moment and Wasserstein metric for contingencies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(4): 3574-3584.
- [108] 张亚超, 易杨, 胡志鹏, 等. 基于分布鲁棒优化的电气综合能源系统弹性提升策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(13): 76-84.
- ZHANG Yachao, YI Yang, HU Zhipeng, et al. Resilience enhancement strategy of electricity-gas integrated energy system based on distributionally robust optimization[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(13):

- 76-84(in Chinese).
- [109] GRACIA V, SIERRA J P, GÓMEZ M, et al. Assessing the impact of sea level rise on port operability using LiDAR-derived digital elevation models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 1113-18.
- [110] 张耀光, 崔玉阁, 殷艳, 等. 上海洋山深水港建设的地域空间作用分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(3): 85-87, 100.
ZHANG Yaoguang, CUI Yuge, YIN Yan, et al. Analysis on regional space affect of Shanghai Yangshan deep-water port[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(3): 85-87, 100(in Chinese).
- [111] BHAKTY T E, YUWONO N, TRIATMODJO B, et al. Effect of underwater sill height against flow patterns in order to reduce sedimentation in navigation channel and basins[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on Civil, Offshore and Environmental Engineering*. Singapore: Springer, 2021: 232-240.
- [112] ROTHWELL D R. International straits and trans-Arctic navigation[J]. *Ocean Development & International Law*, 2012, 43(3): 267-282.
- [113] SMITH L C, STEPHENSON S R. New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(13): E1191-E1195.
- [114] MUSISINYANI N C, GROBLER J, HELBIG M. Weather downtime prediction in a south African port environment[C]//*40th International Conference on Artificial Intelligence XXXVII*. Cambridge: Springer, 2020: 241-255.
- [115] REPETTO M P, BURLANDO M, SOLARI G, et al. Integrated tools for improving the resilience of seaports under extreme wind events[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 32: 277-294.
- [116] ATHANASATOS S, MICHAELIDES S, PAPADAKIS M. Identification of weather trends for use as a component of risk management for port operations[J]. *Natural Hazards*, 2014, 72(1): 41-61.



方斯顿

在线出版日期: 2021-12-17。

收稿日期: 2021-08-31。

作者简介:

方斯顿(1991), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为海洋交通电气化, 能源交通融合, fangston@foxmail.com;

*通信作者: 张沈习(1988), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划、综合能源系统规划, willzxs@sjtu.edu.cn。

(编辑 乔宝榆, 胡琳琳)

Port Integrated Energy Systems Toward Carbon Neutrality (Part I): Typical Topology and Key Problems

FANG Sidun¹, ZHAO Changhong², DING Zhaohao³, ZHANG Shenxi^{4*}, LIAO Ruijin¹

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University; 2. Information Engineering Department, Chinese University of Hong Kong; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University; 4. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University), Ministry of Education)

KEY WORDS: carbon neutrality; port integrated energy systems; typical topology; multiple energy flow integration; energy-transportation integration

As the contradictions between the growing global shipping trades and energy consumption as well as environmental pollution are increasingly severe, countries all over the world are promoting the improvement of energy efficiency and sustainable development of ports to construct “green low-carbon ports”. Under this background, the Port Integrated Energy System (PIES), which is characterized by integration of multiple energy networks and inherent tight “transportation-energy” coupling, attracts widespread attention and it is expected to be the future energy system of the ports to realizing the “carbon peak, carbon neutrality”.

As the first part, in this paper, cargo port which serves container, bulk and liquid is taken as the research object. Firstly, based on the development trend and several representatives with different zones of ports, energy policies and emission types, this paper summarizes the internal motivation and external force of PIES, explores the general structure of PIES, which consists of the following four types of main network: power network, heat network, fuel network and transportation network in Fig. 1, and prospects a offshore-onshore energy integration with the core of seaport integrated energy system.

Then, the relation and distinction between port integrated energy system and land integrated energy system are reviewed in terms of energy characteristics and traffic characteristics. In the aspect of energy, the management of multi-type fuel flows is a significant difference. In the other aspect of transportation, the port energy management model integrating cold ironing equipment, various types of electrified port-side

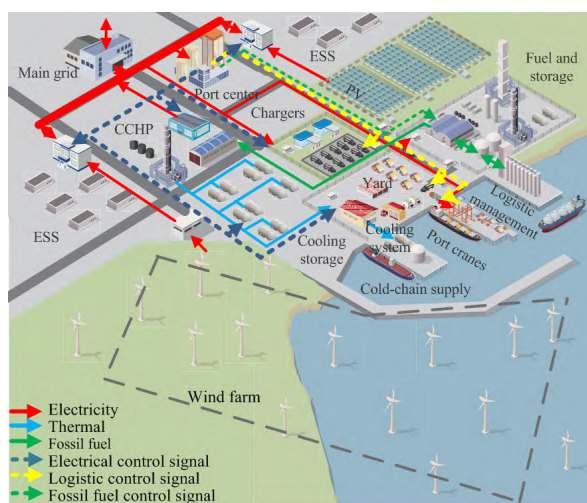


Fig. 1 port integrated energy system

machinery and transferring vehicles and cold-chain logistic is the next research focus.

On this basis, four key problems of PIES are proposed in this paper, including multi-energy flow coupling, energy-transportation integration, coordinated operation of multi-stakeholders and system operation characteristics under uncertain scenarios. In terms of the integrated development of transportation and energy systems, a model of energy-transportation integration is established in Fig. 2.

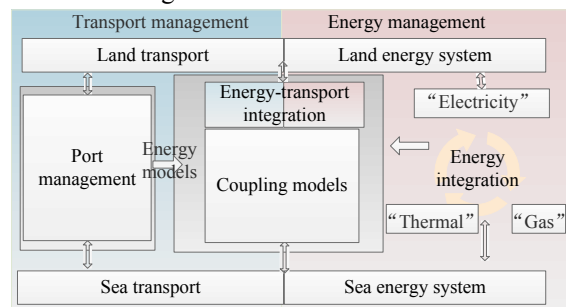


Fig. 2 Models of energy-transportation integration

Finally, it provides some reference directions for the future research of PIES under the “double carbon” target.