

# 考虑能流-物流耦合的港口综合能源系统 规划关键技术及挑战

张沈习<sup>1</sup>, 宋琪<sup>1</sup>, 程浩忠<sup>1</sup>, 方斯顿<sup>2</sup>, 吕佳炜<sup>1</sup>

- 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学电气工程系), 上海市 闵行区 200240;
- 重庆大学电气工程学院, 重庆市 沙坪坝区 400044)

## Key Technologies and Challenges on Planning of Port Integrated Energy System Considering Energy Flow-logistics Coupling

ZHANG Shenxi<sup>1</sup>, SONG Qi<sup>1</sup>, CHENG Haozhong<sup>1</sup>, FANG Sidun<sup>2</sup>, LYU Jiawei<sup>1</sup>

- Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation, Ministry of Education (Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China;
- School of Electrical Engineering, Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** The deep coupling between energy system and logistics system is one of the key characteristics of the future port integrated energy system (PIES). Planning of PIES considering energy flow-logistics coupling is of great significance for green and low-carbon transformation of ports. First, this paper presents the evolution of the PIES from three typical stages: traditional port, green port and near-zero-carbon port, and expounds its development status and trend. Then, the spatiotemporal load regulation of energy consumption in the port logistics system is analyzed, and the coupling mechanism of energy flow and logistics in the PIES is explored. On this basis, the general model of planning for PIES considering energy flow-logistics coupling is analyzed and constructed, and the characteristics and modeling elements are refined and compared from three levels of cross-port-level, port area-level and terminal-level, respectively. The research progresses of key technologies of the PIES planning at different levels are reviewed. Finally, focusing on the outstanding problems in the current PIES planning with energy flow-logistics coupling, the development directions and challenges are prospected.

**KEY WORDS:** port integrated energy system; spatiotemporal load regulation of energy consumption; energy flow-logistics coupling; planning

**摘要:** 能流系统和物流系统深度耦合是未来港口综合能源系

统(port integrated energy system, PIES)的关键特征之一, 开展考虑能流-物流耦合的 PIES 规划对港口绿色低碳转型具有重要意义。该文首先从传统港口、绿色港口、近零碳港口 3 个典型阶段展现 PIES 的形态结构演变, 阐述其发展现状和趋势; 其次, 分析港口物流系统的用能时空可调节性, 探究 PIES 能流-物流耦合机理; 在此基础上, 分析并构建考虑能流-物流耦合的 PIES 规划一般性模型, 提炼并对比跨(港)区级、港区级和码头级 3 个层级的 PIES 规划模型特点和建模要素, 梳理并评述不同层级 PIES 规划关键技术的研究现状; 最后, 着眼于当前考虑能流-物流耦合后 PIES 规划中的突出问题, 对其未来可能发展方向及挑战进行展望。

**关键词:** 港口综合能源系统; 用能时空可调节性; 能流-物流耦合; 规划

## 0 引言

随着水运贸易的蓬勃发展, 港口作为水路运输的枢纽口岸, 其各类物流生产作业的能源需求刚性增长, 港口也日益成为能源消耗和污染排放的重点领域之一。同时, 港口地理位置优越, 周围分布着丰富的风能、太阳能、海洋能等多种清洁能源, 多能互补、能源梯级利用的综合能源系统<sup>[1-3]</sup>能够有效促进港口清洁能源消纳、提高能源利用效率、降低碳排放水平。为响应世界港口气候行动计划, 联合国贸易和发展会议提出港口要综合考虑能源利用和管理, 规划和调动清洁能源资源<sup>[4]</sup>。荷兰、德国、美国、新加坡等纷纷采取行动, 对港口能源系统进行改造<sup>[5]</sup>。我国也出台了一系列政策法规以促进港

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52177099, U1966206); 上海市青年科技启明星项目(23QA1405400)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52177099, U1966206); Shanghai Rising-Star Program (23QA1405400)。

口能源结构调整：国务院在 2021 年印发的《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》中明确指出要深入推进港口岸电设施建设<sup>[6]</sup>；2022 年，国家发改委等部门联合印发的《关于进一步推进电能替代的指导意见》中，指出要在港口优先使用新能源车辆，加快电动汽车充电桩等基础设施建设<sup>[7]</sup>。随着岸电建设、港口装卸设备和运输车辆电气化、新能源船舶等工程的实施，未来港口的大型作业设备将全面采用电能替代技术，港口能流系统与物流系统将呈现强耦合性<sup>[8]</sup>，港口综合能源系统(port integrated energy system, PIES)对变革港口能源利用方式，建设现代化港口愈发重要。结合现有文献和技术发展趋势<sup>[9-10]</sup>，本文认为 PIES 是一种以电力为核心、多能流-物流耦合的能源系统形态，它以促进港口绿色低碳转型为目的，建立在岸电技术、电力驱动物流装卸设备、交通电气化等电能替代技术基础之上，对港口能源生产、分配、转换、存储、消费等统一协调与优化，是建设“世界一流港口”、实现“双碳”目标的必经之路。能流-

物流耦合是 PIES 的显著特征，与传统陆地综合能源系统不同，PIES 还需充分考虑泊位调度、港机调度、堆场管理、运输车辆调度、冷链运输管理以及多式联运等物流行为的用能特性分析与建模，充分考虑港口能流系统和物流系统之间的交互作用。

通常港口规划以港口、港区、码头为单位进行，PIES 规划同样也可以分层级进行。某港一般是指隶属于某行政区域的港口总称，根据地理位置或功能不同可划分为若干港区，港区内部又根据货种、船型、布局等因素划分为不同的功能区，以负责完成某些特定的工作，其中码头作业区主要是供船舶停靠、货物装卸堆码或旅客上下的场所<sup>[11]</sup>。比如，天津港主要分为北疆、南疆、东疆 3 个港区，其中北疆港区由专业化集装箱码头作业区、综合作业区、集装箱物流中心和保税区组成；南疆港区由若干主要作业区和散货物流中心组成；东疆港区由物流加工区、码头作业区和相配套的综合服务区组成。

如图 1 所示，在 PIES 实际规划过程中，为明确规划模型建模要素，可将研究对象根据地理范围

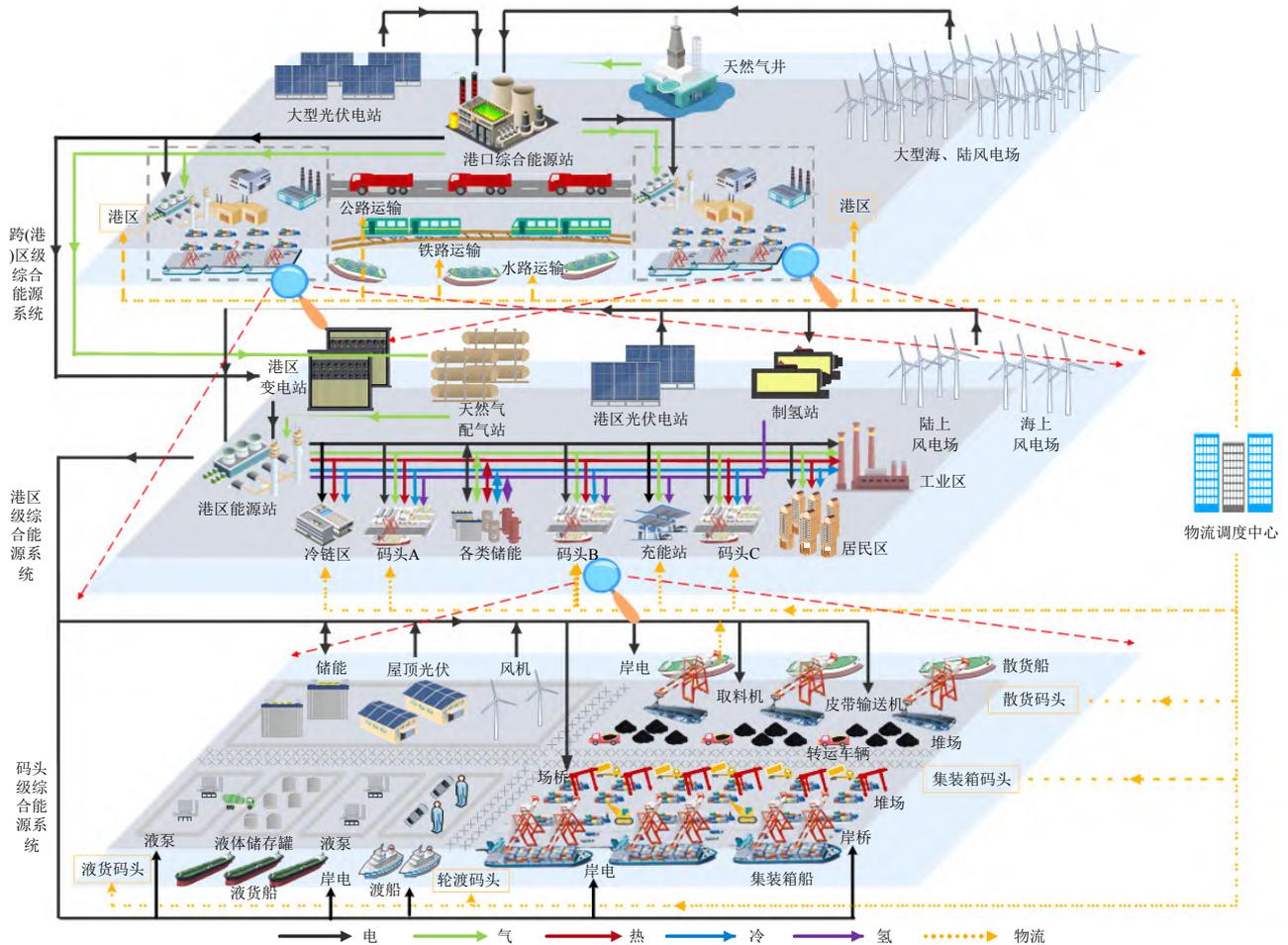


图 1 PIES 分层级示意图

Fig. 1 Hierarchical schematic of PIES

分为跨(港)区级 PIES、港区级 PIES 和码头级 PIES。其中，跨区级 PIES 主要以大型输电/气网为骨架，实现港区之间能源的长距离、大容量输送，集成各类大型清洁能源发电站、大型能源站、大型储能设备等；可利用物流系统的用能时空可调性实现负荷的跨港区转移，以促进清洁能源消纳、提供调频调峰等辅助服务。港区级 PIES 面向港区内部能源设备的优化配置及各类异质能源的中短距离传输，集成多类型清洁能源、多类型能源网络、多类型灵活负荷、多类型能源储存等；可利用港区级 PIES 打破各能源环节间的壁垒，促进港区内多类异质能源互补互济和协调优化。码头级 PIES 直接为码头终端物流设备供能，能流-物流耦合紧密，集成码头范围内的风、光等小微型发电设备，小微型能源转换设备，电储能、飞轮储能等小容量储能设备等；可通过灵活安排码头物流调度方案，以降低码头大功率设备运行时带来的峰值负荷。

目前，国内外学者针对考虑能流-物流耦合的 PIES 规划已展开了部分研究，但是尚未形成系统性

的 PIES 规划理论与方法。基于此，本文通过梳理和归纳相关文献，首先从 3 个阶段、4 个角度阐述 PIES 的形态结构演变；其次，在探究港口能流系统和物流系统的互动方式与耦合机理的基础上，从跨区级、港区级、码头级 3 个层级对比分析 PIES 规划模型的特点和建模要素，并建立考虑能流-物流耦合的 PIES 规划一般性模型；最后，对未来能流-物流强耦合下 PIES 规划发展中可能面临的挑战进行展望。

### 1 PIES 发展历程和形态结构演变

随着港口不断升级转型以及港口功能不断完善，PIES 的形态结构也不断革新。为更好地展现 PIES 的发展历程和形态结构演变，本节以港口绿色低碳转型为主线，选取了 3 个典型发展阶段：传统港口、绿色港口和近零碳港口，不同阶段港口能流系统和物流系统的技术应用如图 2 所示。通过总结不同阶段 PIES 在能源供给侧、能源消费侧、能源储存侧和能流-物流耦合程度 4 方面的特征，阐述 PIES 的发展现状和趋势。

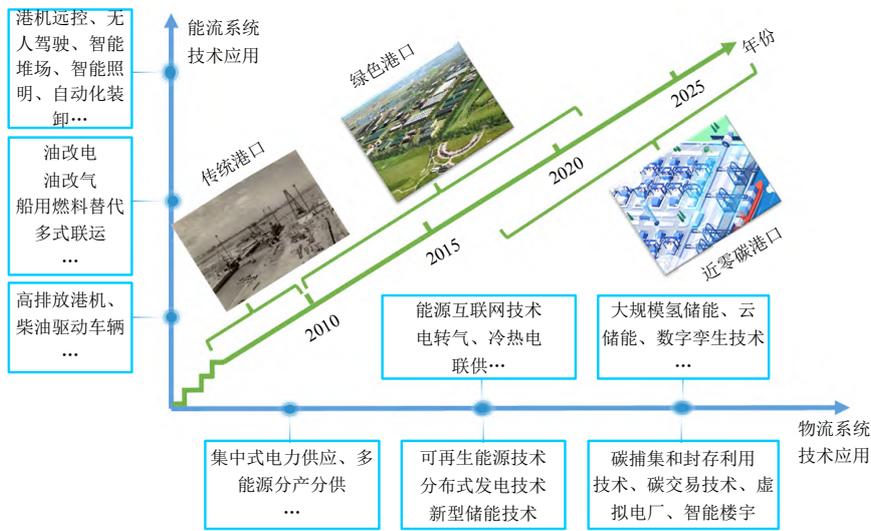


图 2 不同阶段港口能流系统和物流系统的技术应用

Fig. 2 Technical application of energy system and logistics system in different stages of port

#### 1.1 传统港口时期的 PIES

传统港口指过度追求经济效益，在日常生产中造成大量资源浪费和环境污染的粗放式港口。

传统港口时期的 PIES 在能源供给侧方面，能源结构单一，以化石能源为主，包括柴油、煤炭等，电力多采用集中式供应，污染排放大；在能源消费侧方面，消费终端高能耗、高污染、低能效、低互动，不仅货物装卸工艺体系老旧，冲击负荷大、自然功率因数低；而且在港口没有建立

岸电之前，船舶靠岸后使用船载辅机供电，其燃油发电所带来的碳排、其他污染物排放、噪音等对周围环境和居民带来不利影响<sup>[12]</sup>；在能源储存侧方面，储能设备数量及容量较小，多集中在“源”侧；在能流-物流耦合程度方面，电/气/热/冷分产分供、能流-物流耦合较弱，电力以上级电网供应为主，天然气由上级气网供应为主，热源采用市政热源或燃气锅炉，各供能系统独立运行、单独规划，彼此之间缺乏联系。

## 1.2 绿色港口时期的 PIES

绿色港口在经济利益和环境影响之间保持良好平衡,即能够在港口经济高速发展的同时尽量做到节约资源、保护环境、减少污染排放,具有多能供应集约高效、生态环境清洁友好、运输组织科学合理等特征<sup>[13]</sup>。

在能源供给侧方面,随着可再生能源技术、分布式发电技术的应用,港口能源结构绿色低碳化发展,风、光等清洁能源发电容量快速增长,化石能源仍为压舱石。文献[14]指出港口依托天然地理优势,离岸风电具有良好发展前景,目前已有较多港口发展风电以促进绿色低碳转型;文献[15]指出光伏发电对改善港口能源结构具有重要意义,如在港口的码头仓库屋顶及其他建筑屋顶上安装光伏为其供电,可以有效减少港口的碳排放量。文献[14]还指出,西班牙阿维莱斯港、美国新泽西港等已开始利用海洋能发电,但相较于风、光发电技术,目前海洋能发电技术还存在一定的限制。文献[16]指出,港口因地制宜发展分布式发电具有良好的经济效益和社会效益。

在能源消费侧方面,场桥“油改电”、集卡“油改电”、船用燃料替代、多式联运等技术应用加快了物流系统电气化改革,港口消费终端电气化水平提高,灵活调节和需求响应能力提升。文献[17]以某集装箱码头为例,运用系统仿真的方法研究传统集卡与自动导航车(automated guided vehicles, AGV)的能耗与污染排放,结果表明,使用 AGV 相比传统集卡减少排放 13.6%;文献[18]综述了船舶减排技术的相关研究,指出船舶使用生物燃料或液化天然气(liquified natural gas, LNG)相较于其他化石燃料具有更大的减排潜力。

在能源储存侧方面,随着各类新型储能技术的创新,“源”侧分布式电/气/热/冷多元储能规模化发展,“荷”侧超级电容/飞轮等电储能开始应用。文献[19]基于 P2G 技术将低谷负荷时段的多余风能转换为天然气储存,并在高峰负荷时段使用,与传统能源供应方式相比,年成本降低了 25.96%。文献[20]对超级电容和蓄电池进行比较,通过仿真模拟实验表明超级电容各方面性能优于蓄电池,对港口电网电压波动有较好的调节作用,在港口起重机节能方面有较好的应用前景。

在能流-物流耦合程度方面,随着能源互联网技术的快速发展,电/气/热/冷互联互通,能流-物流耦

合加深。港口各能流耦合与转换由以冷热电联供(combined cooling, heat and power, CCHP)、电转气(power to gas, P2G)、燃气锅炉、电制冷机、热泵等为核心的能源枢纽实现,能流系统与物流系统紧密联系。

## 1.3 近零碳港口时期的 PIES

近零碳港口是指减少港口各类生产作业过程中的二氧化碳等温室气体排放量并使其趋近于零的港口,这不仅是新时期有效探索港口减排发展模式、支撑建设世界一流港口的重要抓手,也是绿色港口内涵的进一步延伸和丰富,更可为全行业“碳达峰”、“碳中和”工作起到示范引领作用。

在能源供给侧方面,随着碳捕集和封存利用技术、碳交易技术的应用,港口能源结构零碳化发展,以风、光等清洁能源为主体,氢、氨等零碳能源广泛使用。文献[14]指出,港口水资源丰富,可利用风电电解水制氢,现已有上海港、汉堡港和长滩港等将氢气作为能源供应源来推动港口零碳化转型,以期早日实现零排放。文献[21]指出,新加坡港、鹿特丹港等致力于研究港口碳足迹测定方法,采用碳捕集技术来抵消船舶的碳排放。

在能源消费侧方面,随着以“大云物移智链”为代表的信息技术、虚拟电厂技术、智能楼宇技术的发展,近零碳港口消费终端智能化水平逐步提升,能源消费侧和供给侧高度灵活互动。文献[22]指出,近零碳港口在物流设备方面,实现智能化的同时全部采用清洁能源驱动,进一步推进了氢燃料电池在运输设备上的应用;在辅助生产方面,几乎全部使用绿色智能照明系统。文献[23]指出,可以通过配置智能计量仪表对港口各能源设备进行在线计量、监控和调度,从而实现智能控制,提高能源利用效率。

在能源储存侧方面,随着云储能技术、储氢/氨技术等的大力发展,PIES 可实现自产自足、能量动态平衡。文献[24]指出鹿特丹港计划大力发展储氢技术,推动港口绿色转型;爱沙尼亚塔林港计划建设 2.5 万 m<sup>3</sup> 的储氢设施,引领波罗的海绿色枢纽港口建设,以实现碳中和目标。文献[25]指出采用混合氢-电池储能-热储能可以保证港口功率平衡并降低 PIES 的总运营成本。

在能流-物流耦合程度方面,电/气/热/冷/氢互补互济,能流-物流深度耦合。PIES 各供能子系统协同配合,物流系统的船舶靠泊、货物装卸转运、

货物堆码、货物储存等全过程物流环节环环相扣，与能流系统紧密耦合，将成为近零碳港口规划中必不可少的一环。

综上，通过对以上 3 个港口典型发展阶段的 PIES 各环节特征进行分析，PIES 的形态结构演变

路径可总结为：能源供给侧清洁化、能源消费侧电气化、能源储存侧多元化和能流-物流耦合紧密化，如图 3 所示。港口资源禀赋优异、能源消耗总量大，充分发挥和调动 PIES 的能流-物流耦合潜力，能够有力促进港口绿色低碳转型。



图 3 不同阶段 PIES 的形态结构演变

Fig. 3 Morphologic structure evolution of PIES at different stages

## 2 PIES 能流-物流耦合机理分析

随着港口物流系统电气化发展，能流系统和物流系统的深度耦合将成为影响 PIES 规划的关键因素之一。本节介绍物流系统用能时空可调性对 PIES 的影响以及能流-物流耦合机理。

### 2.1 物流系统用能时间可调性对 PIES 的影响

港口物流系统用能时间可调性是指：物流系统通过控制各类物流设备的启停状态、运行功率、充电时间以实现能源消费及储存的时序分布可调性，从而改变 PIES 时序用能需求曲线和电、气、热、冷、氢等不同负荷的比例。下文分别从到港船舶、装卸设备、运输车辆、冷藏装置 4 个方面来体现物流系统的用能时间可调性。

#### 1) 到港船舶。

通常船舶靠港停泊后会关闭主机而使用船载辅机燃油发电以满足自身的负荷需求，因此在港口产生大量污染排放。为避免这一现象的发生，各国大力推行使用岸电代替船载辅机向船舶供电，从而给港口带来大量岸电负荷，船舶的停靠时间也将决定岸电负荷的时间分布。文献[26]指出 PIES 可以通过优化船舶靠泊时间安排来改变港口岸电负荷的总需求曲线，建立泊位分配需求响应模型后，港口的岸电负荷需求以日为单位呈现一定的规律性：低电价时港口岸电负荷需求较高，高电价时则较低；文献[27]指出相较于以船舶到港时间决定停泊顺

序，在考虑泊位分配后，PIES 能够将调度周期内部分用电量平移到其他时段，从而降低了能源供应成本，实现了经济效益的提升；文献[28]中提出了一种通过控制船舶靠泊开始和离开时间来最小化港口碳排放的优化模型。

#### 2) 装卸设备。

港口的大部分装卸作业通常是总量型约束，如码头岸桥只需在船舶最晚离港时间前完成货物的装卸，对处理延迟有一定的容忍性。文献[29]提出通过限制同一时间处于工作状态的起重机数量或限制起重机的最大运行功率可以显著降低高峰时间电力需求；文献[10]建立了港口起重机用能需求响应模型，认为起重机的运行功率与提升和放下货物时货物的运动状态有关，可以通过改变货物上升和下降的速度来实现需求响应，如通过减缓货物的运动速度，延长起重机服务时间，以压低起重机的功率消耗，起到降低运行成本的作用。

#### 3) 运输车辆。

目前，混合动力运输车辆、全电力动力运输车辆和清洁能源运输车辆是港口运输车辆的主要发展趋势，港口必须为运输车辆提供足够的充电功率或清洁能源供应。文献[30]指出在不妨碍日常物流任务的情况下，将港口 AGV 的电池充电过程转移到电价较低的时段，可以降低 PIES 用能成本；文献[31]利用多智能体系统对这一问题进行研究，结果表明

通过优化控制运输车辆的充放电时间和功率可以提升 PIES 的灵活性。

#### 4) 冷藏装置。

本节所讨论的冷藏装置主要为冷藏集装箱，目前，世界上 80% 以上的冷链运输依靠冷藏集装箱运输完成<sup>[32]</sup>。冷藏集装箱一般分为两类，一类具备自主温度控制能力，通过冷链插头供电；另一类无自主温度控制能力，靠隔热容器从港口接受低温流体维持温度。这两类冷藏集装箱给港口带来大量的电/热/冷需求，结合其内部热惯性调节制冷装置功率，建立需求响应模型，可在保持其温度在正常范围内的情况下实现节能收益最大化。文献[33]提出 2 种冷藏集装箱供能方案，即间歇性供电和有限功率供电，均可降低冷藏区峰值负荷，通过合理控制间歇性供电的时间间隔以及单位时间内的功率限值以体现冷藏装置用能的时间可调性；文献[34]提出一种基于分时电价的港口大规模冷藏集装箱负荷集群用电功率动态模型，实现负荷高峰期下冷藏集装箱负荷的转移、削减，在降低用能成本的基础上有效减小了港口的负荷峰谷差。

综上，物流系统用能时间可调性可以实现 PIES 物流负荷均衡分布，减少峰值负荷，改变 PIES 时序用能需求曲线。同时还能将一些物流环节如靠泊、装卸、运输、堆码、冷藏等的耗能过程安排在 PIES 用电低谷期或风光消纳瓶颈期，以减少用能成本并促进清洁能源消纳。

## 2.2 物流系统用能空间可调性对 PIES 的影响

港口物流系统用能空间可调性是指：物流系统通过调度各类可移动运输工具，在不改变 PIES 物理结构的前提下，实现负荷在港口内不同位置进行转移，从而改变 PIES 的负荷空间分布。下文分别从单港区 and 多港区物流系统的用能空间可调性进行阐述。

对于单个港区，到港船舶的泊位位置选择、装卸设备的堆场位置选择、运输车辆的充电桩位置选择、冷藏装置的充电插头位置选择均会影响港区能源网络各节点负荷空间分布。当大量物流系统用能负荷无序接入时，可能会造成港区负荷分布不均匀、线路阻塞、供电质量差等问题，物流系统用能空间可调性可以实现能源网络节点之间的负载均衡和供需平衡，改善港区能流分布，优化港区能源网络的位置和参数规划、充电站选址和容量规划。此外，在规划模型中嵌入模拟运行部分，还应考虑

运输工具位移、交通阻塞、充能排队等过程相应成本，对 PIES 规划模型目标函数也有一定的影响，同时也增加了模型构建时应考虑的不确定性因素。文献[26]对比分析两种船舶靠泊方案，即船舶按到达顺序直接靠泊和基于泊位优化选择性靠泊，认为可以通过改变靠泊位置来实现用能转移，从而均衡港区内能流空间分布，提高 PIES 的经济性和安全性。文献[35]对比分析 AGV 的两种充电方式即离线充电和在线充电，离线充电时 AGV 需要离开自己本身的工作线路前往特定的充电区充电，而在线充电时 AGV 不需要离开自己的工作路线，可短暂停驻在嵌入工作线路中的充电站点进行充电；将 AGV 的充电位置与不同区块的风光出力进行联合优化，可以降低 PIES 用能成本，促进清洁能源消纳。

对于多个港区，可通过物流运输来改变不同港区之间的负荷分布，实现负荷的跨港区空间转移。传统的供能模式下，全电船舶和冷藏集装箱在港区就地取电，而文献[36]提出一种新的全电船-冷藏集装箱多港区调度策略，即利用全电船舶搭载冷藏集装箱在不同港区之间灵活转移；结果表明引入空间转移后，全电船舶和冷藏集装箱负荷弹性大，具有明显的削峰填谷作用，使得各港区源荷分布更加均匀，PIES 出力曲线更加平滑。

由此可见，物流系统的用能空间可调性能够在不改变 PIES 物理结构的前提下，通过改变 PIES 的物流系统负荷分布和能流系统能流分布，从而影响不同位置能源设备的选址定容。

## 2.3 能流-物流耦合机理

将港口综合能源系统中能量的产、输、转、储过程简化为能流系统，分析港口能流系统和物流系统相互作用、彼此影响的方式及过程，总结归纳 PIES 能流-物流耦合框架如图 4 所示，耦合机理具体如下文所述。

物流系统的生产作业安排决定了物流负荷的时空分布，对能流系统的能流分布产生影响。从时间尺度上可平移用能需求，改变 PIES 时序用能需求曲线；从空间尺度上也可转移用能需求，改变 PIES 用能空间分布。当港口调度中心所发出的物流生产作业安排与能流系统的能流分布安排协同考虑时，可充分发挥物流系统的灵活性来配合能流系统调度。图 4 中包括靠泊、装卸、运输、堆码、冷藏等耦合环节和岸电、岸桥、运输车辆、场桥、冷藏装置等耦合设备；以集装箱港口为例，冷藏装置

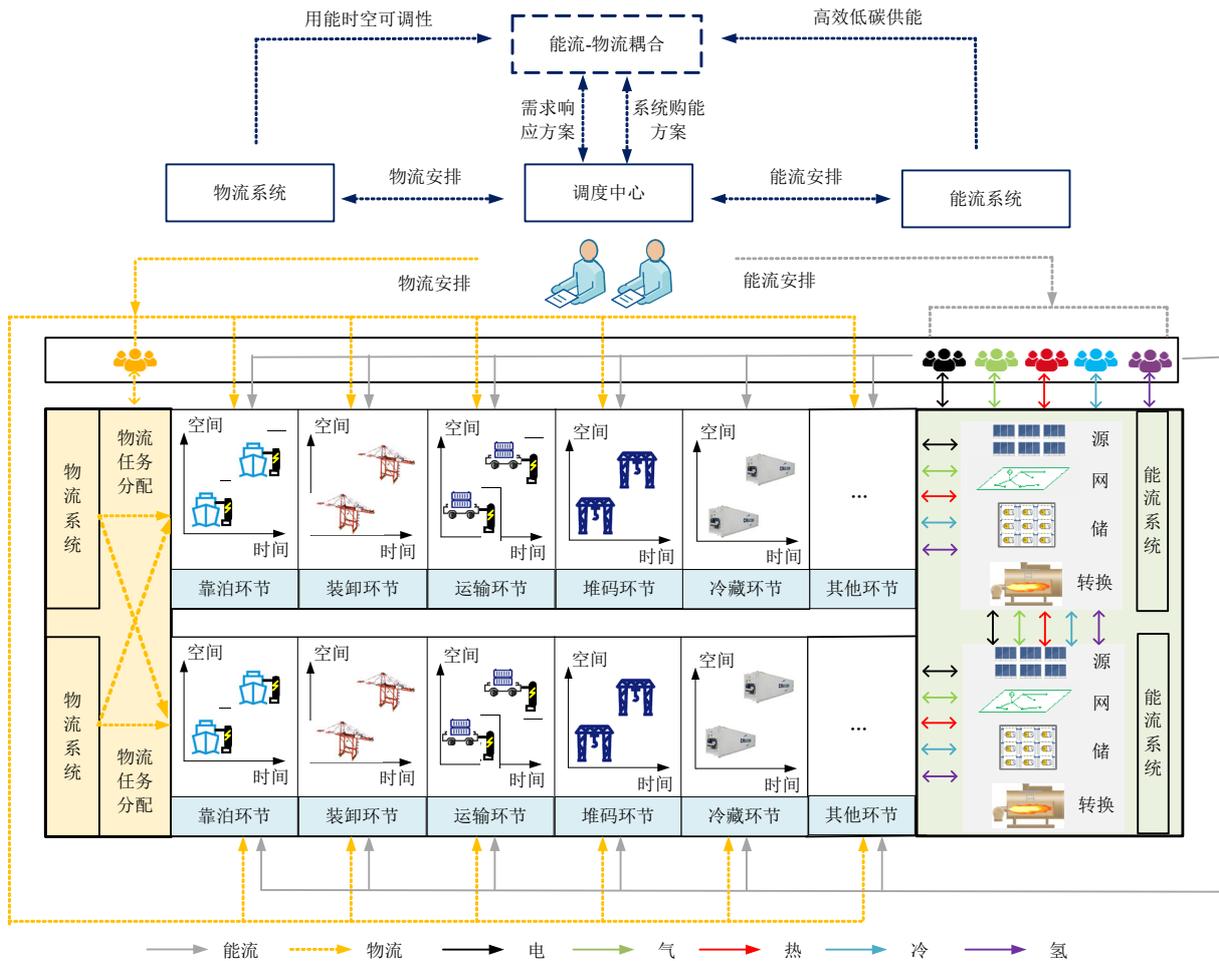


图4 PIES 能流-物流耦合框架

Fig. 4 Energy flow-logistics coupling framework of PIES

往往为冷藏集装箱，泊位分配决定岸电负荷分布，船舶货物装卸总量及岸桥分配决定岸桥负荷分布，运输车辆充能决定充电站负荷分布，堆场货物堆码总量及场桥分配决定场桥负荷分布，冷藏集装箱管理决定冷藏集装箱负荷分布。

能流系统的经济运行同样也可以改变物流系统负荷的时空分布，以实现港口负荷和清洁能源发电的时序匹配，为物流系统高效低碳供能。图4中，能流系统所含的各类能源设备相互配合，通过多能网络为物流系统供能，例如使用风、光等清洁能源发电设备、燃气轮机、吸收式制冷机、电制冷机、储能设备等，经电/气/热/冷/氢等多能网络为物流系统多能负荷供能，不同能源设备互联互通，提高了能流系统的供能可靠性。同时，港口可针对能源价格，制定不同的物流方案，改变每个时间段接入港口的船舶负荷需求、装卸与运输设备负荷需求、冷藏集装箱负荷需求等，以提高港口的运行经济性，如在电价较低时，港口运营商可以优先调度高负荷需求的大型船舶停靠，减少整体供能成本。

PIES 联合港口调度中心，以港口的各种物流任务及所需的电、气、热、冷、氢等能量为输入请求，以物流安排及能流安排为输出。物流系统能耗是能流系统负荷的重要组成部分，能流系统为物流系统提供可靠能量保障，二者相互配合，可以实现港口整体效益最大化。一方面，港口物流系统的用能时空可调性增强了 PIES “源荷” 互动灵活性，其物流时空安排将深刻影响能流分布；另一方面，能流系统为 PIES 高效低碳供能，确保港口在供能充足、环境友好的条件下提供稳定可靠的物流服务。此外，物流设备的电气化变革、能源设备的智能化升级也为 PIES 低碳转型提供发展路径。图4中，港口调度中心扮演着能流系统和物流系统信息交互处理平台的角色，将物流系统的物流任务、物流设备-物流网络-物流环节信息，能流系统的能源需求、能源站-能源网络-能源储存等信息汇聚到港口调度中心，再由调度中心将需求响应方案、系统购能方案返回物流系统和能流系统，实现双向互动。

### 3 考虑能流-物流耦合的 PIES 规划

PIES 能流-物流耦合机理复杂,需充分考虑不同层级下能流系统和物流系统的特点。在规划过程中,能流系统为物流系统提供了更多供能路径和用能选择;同时,物流系统的用能时空可调性也会深刻影响能流系统规划方案。本节首先构建了考虑能流-物流耦合的 PIES 规划一般性模型,其次从跨(港)区级、港区级、码头级 3 个层级梳理并提炼了规划模型建模要素,最后从不同角度对比分析不同层级规划模型的差异。

#### 3.1 考虑能流-物流耦合的 PIES 规划一般性模型

##### 3.1.1 模型构建

考虑能流-物流耦合的 PIES 规划一般基于港口能源结构和物流用能负荷的特征,计及能流-物流耦合方式,构建 PIES 基本架构,完成能源站选址定容与内部结构设计、能源网络拓扑规划与管线选型等,其基本模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} \min f(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) \\ \text{s.t. } g_1(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) \leq 0 \\ g_2(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) \leq 0 \\ h_1(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) = 0 \\ h_2(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}$ 为 PIES 规划模型决策变量构成向量,在跨区级 PIES 中表示大型光伏电站、大型海/陆风电场、大型综合能源站等选址定容布局,电、气等长距离能源互联网络管线型号及投建状态,大容量能源转换和储存设备类型及数量容量等;在港区级 PIES 中表示港区内光伏电站、海/陆风电场、电解制氢站和能源站选址定容布局,电、气、热/冷、氢等能源网络管线型号及投建状态,CCHP、锅炉、制冷机、储能等能源设备类型及数量容量等;在码头级 PIES 中表示码头内风、光等微型发电设备,蓄电池储能、飞轮储能、超级电容储能等小容量储能设备等。 $\boldsymbol{X}$ 为能流系统状态变量构成向量,包括上述各层级对应能源站购能方案、清洁能源出力情况、能源设备运行工况、能源网络节点电压/压力/温度、能源网络支路能流功率/流量等。 $\boldsymbol{Y}$ 为物流系统状态变量构成向量,在跨区级 PIES 中表示跨区水路、公路、铁路等物流运输网络状态和物流运输工具状态等;在港区级 PIES 中表示码头作业区、辅助生产区等功能区物流装卸运输工具状态,主要包括运输车辆充电状态、冷藏集装箱内部温度及其变化率等;在码头级 PIES 中表示码头内船舶进出港时间、物流

设备在用数量、物流设备单位时间内能装卸搬运的货物量及运行功率等。 $f(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y})$ 为考虑能流-物流耦合的 PIES 规划模型目标函数,包括经济性、环保性、高效性、供能和物流服务可靠性等,根据不同层级 PIES 因地制宜制定。 $g_1(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) \leq 0$ 为能流系统不等式约束,包括不同层级 PIES 对应的能源站购能上下限约束、能源设备数量及容量约束和出力上下限约束、能源网络功率传输容量约束、需求响应约束、清洁能源渗透率约束、碳排放约束、投资建设约束、选址及土地约束等;在跨区级 PIES 中突出考虑管存的高压天然气系统运行约束、能源互联网络线路传输容量约束等;在港区级 PIES 中突出中低压天然气系统运行约束、考虑传输延迟的热网动态特性等;在码头级 PIES 中突出能源设备变工况特性约束、岸电建设投资约束等。 $g_2(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) \leq 0$ 为物流系统不等式约束,在跨区级 PIES 中表示跨区水路、公路、铁路等物流运输网络和物流运输工具状态约束等;在港区级 PIES 中表示运输车辆充电状态、冷藏集装箱内部温度及其变化率约束等;在码头级 PIES 中表示码头内船舶靠泊约束、物流设备数量约束、物流设备运行功率上下限约束等。 $h_1(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) = 0$ 为能流系统等式约束,包括不同层级 PIES 对应的能源站能量转换与功率平衡方程、能源网络能流方程、储能平衡方程等。 $h_2(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}) = 0$ 为物流系统等式约束,包括不同层级 PIES 对应的船舶岸电使用总量、船舶装卸任务总量、货物转运任务总量、堆场搬运与堆垛总量等。

与仅考虑能流的 PIES 规划不同,考虑能流-物流耦合的 PIES 规划涉及到的状态变量更丰富、模型约束条件更多样、不确定性因素更复杂,如表 1 所示。考虑能流-物流耦合后,PIES 规划涉及的状态变量将同时包括船舶进出港时间、物流设备在用数量、物流设备单位时间内能装卸搬运的货物量及运行功率、冷藏集装箱内部温度和温度变化率等。除状态变量更丰富,考虑能流-物流耦合的 PIES 规划模型约束条件也更多样,规划时,在原有的能流系统约束条件基础上,还需同时考虑船舶靠泊约束、物流设备数量约束、物流设备运行功率上下限约束、冷藏集装箱内部温度约束等物流系统约束。此外,鉴于港口的交通枢纽和综合物流平台属性,考虑能流-物流耦合的 PIES 规划还需引入船舶到港准时率、泊位水深、航道水文特性及拥挤程度、道路拥挤度等不确定因素,进一步增加了规划模型的复杂度。

表1 两种情况下PIES规划模型对比

Table 1 Comparison of planning models of PIES in two cases

分类	仅考虑能流的PIES规划	考虑能流-物流耦合的PIES规划
状态 变量	能源站购能方案 清洁能源出力情况 能源设备运行工况	除左边表格中列出的内容之外,还包括以下内容: 船舶进出港时间 物流设备在用数量
	能源网络节点电压/压力/温度 能源网络支路功率/流量 ...	物流设备单位时间内能装卸搬运的货物量及运行功率 冷藏集装箱内部温度及其变化率 ...
不等式 约束条件	能源站购能上下限约束 能源设备数量及容量约束和出力上下限约束 能源网络功率传输容量约束 需求响应约束 清洁能源渗透率约束 碳排放约束 投资建设约束 选址及土地约束 ...	除左边表格中列出的内容之外,还包括以下内容: 船舶靠泊约束 物流设备数量约束 物流设备运行功率上下限约束 冷藏集装箱内部温度约束 ...
	能源站能量转换与功率平衡方程 能源网络能流方程 储能平衡方程 ...	除左边表格中列出的内容之外,还包括以下内容: 船舶岸电使用总量 船舶装卸任务总量 货物转运任务总量 堆场搬运与堆垛总量 ...
等式 约束条件	风光等可再生能源出力 灵活性多能负荷 能源设备/网络故障 能源价格 ...	除左边表格中列出的内容之外,还包括以下内容: 船舶到港准时率 泊位水深 航道水文特性及拥挤度 道路拥挤度 ...
不确定 性因素		

尽管考虑能流-物流耦合的PIES规划更具挑战性,但能够超越对港口能流系统和物流系统单独考量所带来的局限性,实现能流系统与物流系统互联互通,从而获得更可观的经济效益、社会效益和生态效益。

### 3.1.2 求解方法

式(1)建立的考虑能流-物流耦合的PIES规划模型为典型的大规模、高维度、非凸、非线性问题,一般可采用数学优化算法或启发式算法进行求解。

#### 1) 数学优化算法。

考虑能流-物流耦合的PIES规划模型中往往存在许多非凸项,主要体现在:能流系统的电网潮流约束、天然气管道流量方程、热网管道温降方程、能源设备非线性运行特征方程等;物流系统的船载辅机发电功率存在二次项,岸桥、场桥、运输车辆模拟运行功率为0-1变量与连续变量的乘积,冷藏集装箱制冷功率和温度变化方程存在非线性项等。可通过合适的转凸方法简化规划模型,提高求解速度。针对上述问题,文献[19]引入了P2G技术将港

口的剩余风电转化为天然气进行储存和利用,并采用大M法对储气模型中0-1变量与连续变量的乘积线性化处理,将PIES规划模型转化为混合整数线性规划问题;文献[37]建立了典型场景下港口微电网源储最优配置模型,并基于凸松弛技术将非线性模型转换为二阶锥规划模型进行求解;文献[38]建立了考虑电动转运车辆日常工作和充电安排的港口充电站规划模型,并采用动态规划算法求解。此外,其他综合能源系统相关研究中对规划模型求解采用的数学优化算法也同样适用于港口综合能源系统,如文献[39]提出一种基于条件风险价值的概率区间方法来描述风电的不确定性,并采用分段线性化处理目标函数中的非线性积分项,使得综合能源系统模型可采用线性规划方法求解;文献[40]基于多面体逼近方法将考虑生物质能发电的多阶段混合整数二阶锥规划模型转化为混合整数线性规划模型,使其在问题规模扩大时也易于求解;文献[41]采用改进的广义Benders分解算法并利用动态对偶乘子求解综合能源系统规划模型,以提高收

敛速度。

## 2) 启发式算法。

启发式算法直观简单、适应性强、收敛性好，可直接求解非凸、非线性的考虑能流-物流耦合的 PIES 规划模型，但其求解过程中无法保证所得到的局部最优解即为全局最优解，且求解结果受模型初值设定影响比较大，随机性也比较高。文献[42]通过对港口船只行为决策精细化建模，构建了计及岸电负荷弹性的 PIES 规划模型，并采用最佳响应法进行求解，极大地降低了规划模型求解复杂度；文献[43]考虑港口电-氢耦合特性，采用粒子群算法求解含电-氢混合储能的港口综合能源系统规划模型；文献[44]考虑港口电-热耦合特性，采用网格自适应直接搜索和自适应混沌粒子群相结合的混合优化算法对 PIES 电-热混合储能优化配置模型进行求解。此外，其他综合能源系统相关研究中对规划模型求解采用的启发式算法也同样适用于港口综合能源系统，如文献[45]采用二进制粒子群算法对考虑多能负荷特性互补的综合能源系统规划模型进行优化求解；文献[46]采用改进量子粒子群优化算法求解考虑分布式电源不确定性和碳排放惩罚的多维非线性综合能源系统规划模型，可以增强全局优化能力；文献[47]采用多目标自然聚合算法来寻求考虑碳减排的综合能源系统规划模型最优解。

由于不同层级下考虑能流-物流耦合的 PIES 规划模型建模要素不同，跨区级、港区级和码头级 PIES 所对应的能源设备种类及容量、能源网络选型、物流设备种类及容量、物流网络规模不同。因此，在进行考虑能流-物流耦合的 PIES 规划时，应在式(1)的基础上合理选择规划模型建模要素，不同层级因时因地制宜规划，具体如下所述。

### 3.2 考虑能流-物流耦合的跨(港)区级 PIES 规划

随着不同港区一体化建设的深入推进，各港区协同合作将是跨区级 PIES 规划中的重要一环。如图 5 所示，考虑到各个港区资源禀赋、功能定位、发展程度、生产作业规律和船舶到港规模不同，同一时间段下不同港区的新能源出力和多能负荷大小比例也不尽相同，跨区级 PIES 规划将涵盖多个港区，通过整合不同港区之间的能源资源，实现不同港区之间的能源供应与交换，确保能源的高效利用和灵活供应，改善各港区独立规划导致的经济效益欠缺、能源利用率低等现状。

在实际规划过程中，首先需要收集各港区的相



图 5 考虑能流-物流耦合的跨(港)区级 PIES 规划要素  
Fig. 5 Elements of planning for the cross-port-level PIES considering energy flow-logistics coupling

关基础数据，如多能负荷数据、当地能源价格、当地气象条件、当地政策等；然后根据港区的地理位置、资源分布、负荷类型，采取现场勘察的方式对港区可再生资源重点挖掘，对综合能源站进行优化选址；最后建立跨港区的能源互联网络，确定长距离能源传输管线的型号及投建状态。文献[19]对考虑综合需求响应的跨区级 PIES 建立能源互联模型，对 5 种不同规划方案分别进行研究，以确定总成本最小的最佳规划方案；文献[48]认为各港区通过能源站间的联络管线进行能量输送，建立了包含能源互联线路投资成本的跨港区能源互联规划模型；还借助灵敏度分析探究了港口能源市场价格变化对跨区级 PIES 规划的影响。

不同港区间存在水路、公路、铁路等多种物流运输网络，电气化船舶、电气化汽车、电气化机车能跨港区便捷转运货物，其充/用能行为不仅受到物流运输调度安排的约束，还与能流系统能源补给设施的选址定容紧密联系，加强了能流系统和物流系统的耦合。相比于仅考虑能流的跨区级 PIES 规划，耦合物流后，需重点关注物流运输可辅助能源、负荷跨港区转移及物流运输用能时空分布可调对规划方案的影响。文献[36]建立了全电动船舶-冷藏集装箱时空协同转移模型和能耗模型，认为可利用全电动船舶将冷藏集装箱运送至其他港区以实现物流系统用能负荷的跨时空转移，降低跨区级 PIES 的用能成本；文献[38]以总成本最小为目标建立了包含港口充电站数目、电动卡车电池容量、电动卡车充电方案的双层混合整数规划模型，并设置了 3

种电动卡车跨区运输路径,分析了电动卡车行程、港口交通状况、电价、充电基础设施的可用性等因素对规划方案的影响;文献[49]考虑车辆-转运任务最佳匹配、车辆-驾驶人员最佳匹配、车辆-运输路径最佳匹配,建立了港口车辆运输的能流-物流耦合模型。

### 3.3 考虑能流-物流耦合的港区级 PIES 规划

随着港口趋于综合物流平台的发展,港区内部形成许多功能区,如码头作业区主要包括货物装卸生产、码头岸电、码头照明、仓库空调冷藏等负荷;辅助生产区主要包括运输车辆充电站、冷藏区、办公区等负荷;工业区主要包括造船工业、钢铁工业、机械制造、海洋资源加工业和外贸加工业等负荷;居民区主要包括生活用电和采暖制冷等负荷。与跨区级 PIES 不同,如图 6 所示,港区级 PIES 主要面向港区内部能源设备的配置规划及各类异质能源的中短距离传输,需要考虑如何通过对多类型分布式清洁能源、多类型能源网络、多类型灵活负荷、多类型储能协同优化,充分利用 PIES 的多能互补的优势促进不同功能区互联互动,降低投资冗余。

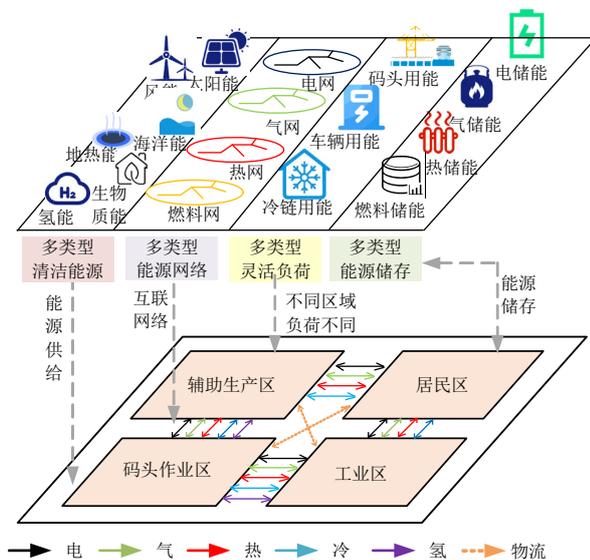


图 6 考虑能流-物流耦合的港区级 PIES 规划要素

Fig. 6 Elements of planning for the port-area-level PIES considering energy flow-logistics coupling

在计及多类型分布式清洁能源的港区级 PIES 规划方面,耦合物流后,需重点关注港区物流系统的用能需求与分布式清洁能源装机容量相匹配,充分利用物流系统柔性资源提升港区级 PIES 的灵活性。文献[37]提出一种包含氢的多能耦合结构,通过增加港区分布式清洁能源的利用、减少对燃油的依赖,从而减少港区的碳排放量;文献[50]建立一

种集成风、光、储能的 PIES 为港区岸电供能,能够有效降低港区污染排放并提高系统可靠性。基于以上多能耦合供能模型的建立,文献[51]建立两阶段优化规划模型,确定港区级 PIES 的风电装机容量和储能最优容量,并分析了船舶到港模式和泊位分配对风电装机容量的影响;文献[52]基于马尔可夫链对港区分布式清洁能源发电设备故障的不确定性建立随机特征模型,并综合可靠性评估指标,提出了计及供电可靠性与投资成本双重约束的分布式清洁能源配置方案。

在计及多类型能源网络的港区级 PIES 规划方面,耦合物流后,港区级 PIES 主要包括 4 类网络,分别是电力网络、热网络、燃料网络和物流运输网络<sup>[10]</sup>,各类异质网络通过若干耦合元件相连,需重点关注多网耦合对能源网络规划的影响。文献[53]将船舶、起重机、冷藏集装箱等物流负载接入港区电-热耦合网络中,建立非凸、非线性的网络模型,并采用松弛技术解决模型中非凸二次方程和双线性等式约束;文献[54]指出港区能源网络的规划需要考虑由于船舶停泊而导致的拓扑结构易变性及耦合物流网络后的高复杂性。

在计及多类型灵活负荷的港区级 PIES 规划方面,冷链物流带来了电/热/冷负荷,电气化运输车辆带来了电/气/氢负荷,这两类灵活物流负荷为港区级 PIES 规划带来了挑战与机遇。一方面,港区供能系统需要考虑冷链物流蓬勃发展所带来的大量电/热/冷负荷供应问题,文献[34]引入冷藏集装箱用能时空转移后,具有明显的削峰填谷作用,可以使 PIES 源荷分布更加均匀;文献[53]中假定冷藏集装箱制冷系统采用变频空调,并对制冷功率与箱内温度进行线性化处理,从而得到冷藏集装箱的需求响应模型,并与港区热网协同分析;文献[55]指出利用冷藏集装箱的蓄热特性,在冷藏区屋顶安装遮阳板,具有一定的经济性,可以减少能源设备的投资成本;文献[56]指出冷藏集装箱的堆垛位置及方式会影响其内部温度和功耗,规划过程中考虑冷藏集装箱的堆垛,可以实现港区级 PIES 的能源设备容量配置最优。另一方面,港区级 PIES 规划也要考虑充电站、加气站、加氢站等充能站规划问题,以及电力网络与天然气网络、氢气网络的耦合加深所带来的能源网络规划问题,文献[57]提出了一种双向装载的 AGV 路线规划方法,可以提高 AGV 的能源效率;文献[58]对比了 AGV 离线充电与在线充

电两种不同的车辆充电策略，针对在线充电站选址规划这一问题，提出了一种根据实时热区图中车辆经过次数选择充电站位置的方法，为计及运输车辆充能可调特性的港区级 PIES 规划提供了思路。

在计及多类型能源储存的港区级 PIES 规划方面，需重点关注物流系统用能不确定性和灵活性对储能优化配置的影响。文献[25]考虑混合电/热/氢储能的协同优化配置，建立了港区冷藏集装箱电/热/冷负荷需求响应模型，提高了港区级 PIES 的灵活性，并促进了可再生能源消纳；文献[42]在能流-物流耦合模型中考虑了电、热储能与其他能源设备的协调配合以促进港区节能减排；文献[59]将电池储能、超级电容储能、飞轮储能以单一或两两组合的形式集成到 PIES 的框架结构中，用于降低 PIES 峰值负荷，实现功率平衡；文献[60]采用模型预测控制方法优化了岸电负荷不确定性导致的预测精度小的问题，并建立了考虑多类型储能的港区级 PIES 混合整数规划模型，确定了多类型储能最佳容量。

### 3.4 考虑能流-物流耦合的码头级 PIES 规划

如图 7 所示，码头级 PIES 的规划对象主要为码头范围内的风、光等小微型新能源发电设备，燃气轮机、锅炉、P2G 设备、制冷设备等小微型能源转换设备，电储能、混合储能等小容量储能设备。码头级 PIES 能流-物流的耦合特性更加微观，目前的研究重点围绕岸电、装卸设备的接入对码头级 PIES 规划的影响。



图 7 考虑能流-物流耦合的码头级 PIES 规划要素

Fig.7 Elements of planning for the wharf-level PIES considering energy flow-logistics coupling

岸电的接入给码头级 PIES 规划带来了新问题。一方面，与传统负荷不同，岸电负荷面向船舶的能源需求，因此岸电负荷预测的影响因素不仅包括常规的气象因素，还包括影响船舶停靠的航道拥挤状

态、泊位水深、岸电价格、港口补贴政策等因素；文献[61]基于蒙特卡洛法随机抽取各类船舶的停靠时间、负载功率、靠泊时长，并建立岸电负荷预测模型。另一方面，由于岸电基础设施新建及改造价格昂贵，码头运营主体往往不愿采用岸电技术，因此，监管机构可采用激励政策来促进岸电的推广；文献[62]建立了一种双层规划模型，以寻求监管机构和运营主体在规划岸电方面的协同作用；文献[63]以平衡船舶、码头、电网与政府四方利益为目标确定岸电服务费与岸电参考电价。

码头装卸设备用能是码头负荷的主要部分，建立码头装卸设备能耗模型是码头级 PIES 规划模型建立的前提。目前相关研究主要集中在集装箱码头，文献[64]以集装箱码头的泊位、岸桥、堆场为研究对象，以能效特征因素为约束条件，在满足货物装卸效率的情况下建立了能耗模型，为后续嵌入 PIES 规划模型中奠定基础；文献[65]综合考虑集装箱码头岸桥、集卡和场桥能耗，建立了以总能耗和总时间最小为目标函数的规划模型；文献[66]在轮胎式场桥中配置飞轮储能和超级电容器储能，能够有效降低系统能耗。对于散货码头，皮带传送系统是用于运输干散货的主要设备，也是主要用能设备，文献[67]考虑调整皮带输送速度控制系统功率消耗，由此建立皮带传送系统功率需求响应模型，并通过鹿特丹港实际算例分析表明在规划过程中考虑皮带传送系统的需求响应可以减少能源消耗和碳排放量；文献[68]构建一种综合考虑散货船-多源岸电投资成本和碳排放量的多目标规划模型，并通过求解帕累托前沿获得折中解。对于 LNG 液货码头，LNG 通过液泵经液体传输管道运送至液体储存罐内，该过程中再液化、再气化、运输、储存等步骤都会消耗大量能源，同时 LNG 液化也会释放大能量，文献[10]建立了考虑管存特性的港口“气-液”耦合管道模型；文献[69]将 LNG 再气化装置与燃气轮机等能源设备相结合，优化 LNG 码头的能源系统配置，降低了投资成本。

### 3.5 不同层级规划模型对比

PIES 具有鲜明的层级特征，不同层级 PIES 的规划模型有所不同，表 2 针对不同层级 PIES 规划模型的建模要素进行了对比。首先，需充分计及不同层级 PIES 的差异性，因时因地制宜合理规划，例如在跨区级、港区级和码头级 PIES 规划模型中均涉及物流系统的协同配合，但跨区级物流系统大

多参与能源运输及负荷转移；港区级物流系统中运输车辆和冷藏集装箱可以实现 PIES 需求侧响应；码头级物流系统中电气化装卸机械和运输工具往往给码头级 PIES 带来冲击负荷；其次，在计及物流系统的用能时空可调性时，当地理范围减小，物流系统的空间转移性逐步减弱，用能时序可调性影响更加显著，规划时对其用能时间可调性依赖逐步

增强，例如码头级 PIES 与港区级 PIES 相比，各能流、物流设备建模往往更加精细化，时间尺度更短，更需考虑设备的可运行区间、变工况特性等对规划模型的影响；此外，不同层级 PIES 规划模型的规模不同，建模要素的颗粒度也有差别，例如码头级 PIES 对于体现船东满意度更加直观，直接表现于其靠泊服务满意度，船-港互动程度更高。

表 2 不同层级考虑能流-物流耦合的 PIES 规划对比

Table 2 Comparison of planning for PIES considering energy flow-logistics coupling in different levels

层级划分	跨区级 PIES	港区级 PIES	码头级 PIES
能流特征	以电、气为主要能源形式，能源大规模、长距离运输，集成各类大型清洁能源发电站、大型能源站、大型储能设备	涵盖电/气/热/冷/氢多种能源形式，涉及源-网-荷-储多项环节，集成多类型分布式清洁能源、能源网络、灵活负荷、能源储存等	用电负荷占比大，峰值负荷较大，集成风、光等新能源发电设备和储能设备
物流特征	基于水路、公路、铁路等物流运输方式实现跨港区物流中转，参与跨港区能源运输和负荷转移	除基础物流功能外，还实现货物的包装、加工、销售、保税等综合物流功能	实现船舶停靠、货物的装卸、运输和仓储等基础物流功能
能流-物流耦合时空特征	时间尺度上耦合程度较弱 空间尺度上耦合程度较强	时间、空间尺度上耦合程度均中等	时间尺度上耦合程度较强 空间尺度上耦合程度较弱
能流-物流耦合环节	主要体现在跨区物流中转带来的负荷转移和用能时空可调	主要体现在港区内不同物流场所用能时空可调	主要体现在码头岸电和码头装卸运输机械用能时空可调
规划模型建模要素	电力系统常规交流潮流方程 考虑管存的高压天然气系统能流 大型综合能源站功率平衡 大型多元储能 能源互联网络管线型号及投建状态 跨区物流运输工具能源补给设备配置 能源-物流运输网络耦合 各港区的选址资源禀赋 跨区物流运输调度安排约束 跨港区物流运输交通状况 多港区利益主体博弈 跨港区物流服务满意度 .....	电力系统 Distflow 潮流方程 中低压天然气系统能流 考虑传输延迟的热网动态特性 多类型清洁能源优化配置 电、气、热/冷网络耦合 P2X 设备特性 充电/气/氢站选址 各功能区互联互通 冷藏集装箱蓄热性及温度约束 冷库选址 码头作业、运输车辆充能、冷藏集装箱供能等物流服务满意度 .....	能源转换与功率平衡方程 能源设备运行工况 物流设备综合需求响应 岸电容量及价格 精细化建模 航道容量约束 码头装卸设备能耗、峰值负荷 起重机能量回馈及储存容量 泊位-起重机-运输车辆联合流水线调度 码头建筑一体化技术 船舶靠泊、货物装卸、运输、仓储等物流服务满意度 .....

### 4 挑战与展望

前文根据跨(港)区级、港区级、码头级 PIES 的特点和建模要素，梳理了不同层级 PIES 规划的关键技术。未来我国部分港口清洁能源占比将超过 60%，为实现 2025 年我国港口碳排放较 2020 年下降 5%、长江经济带港口岸电年电量较 2020 年增长 100%、清洁能源驱动的港作机械和车辆占比达 60% 等目标<sup>[70]</sup>，同时保证主要海港在 2030 年前开始向零排放转型，并在 2050 年前实现净零排放<sup>[71]</sup>，PIES 规划内容将更加丰富、规划模型将更加复杂，其研究将面临诸多挑战。因此，本节对其未来的规划研究中可能出现的挑战作出展望。

#### 4.1 PIES 能流-物流耦合建模方法

未来港口能流-物流耦合将更加紧密，呈现强耦

合性，主要表现为耦合设备和耦合环节多样化。

在耦合设备方面，未来港口各类大型机械设备将完全实现电气化、智能化，其种类和数量将逐渐增多且耗能过程将更复杂，但现有研究存在假设过于理想、偏离实际工况、忽略源荷属性变化等问题，无法深入挖掘能流和物流的耦合机理。因此，如何通过改进耦合设备模型的建模方法以更好地发挥其用能时空可调能力、提高设备能效是能流-物流强耦合下面临的挑战之一。从模型驱动角度，可在现有研究基础上对耦合设备进行精细化建模，如建立多工况下的能耗模型，并在分析物理原理的基础上通过数学手段获得易于嵌入规划模型的显式表达式；如建立多时间尺度下的能流-物流耦合模型，一般来说，跨区物流运输时间尺度最长，货物储存次

之，货物装卸转运时间尺度最短，将能流按时间尺度分为若干阶段，在不同阶段与相应物流进行耦合。从数据驱动角度，不仅可利用各类学习方法从大量耦合设备历史运行数据中挖掘出其耦合机理，还可以构建数字孪生虚拟模型以展现耦合设备整个生命周期的性能。从模型-数据混合驱动角度，首先建立模型驱动下的显式表达式，其次利用数据驱动方法辨识显示表达式参数，最后实现模型-数据混合驱动下的耦合设备高精度建模，以规避模型驱动方法过于理想和驱动方法过拟合/欠拟合的风险。耦合设备建模是后续规划模型构建的前提，在具体的规划过程中，可将能流-物流强耦合下的设备模拟运行模型内嵌于 PIES 规划模型中。

在耦合环节方面，目前的研究大多数针对物流作业过程中的单一或少数环节开展，很少有对物流全过程的用能特征进行综合考虑。然而随着未来船舶的大型化趋势，船舶所需装卸的货物量增多，导致船舶在港时间和在港业务办理增加，港口物流作业系统趋于一个随机因素多、动态联系复杂、多级

排队的离散随机系统，这就要求港口不断优化现有各生产资料与生产环节的衔接，做到系统化、高效化，从而提高港口竞争力。可基于 Petri 网或着色 Petri 网和其他工具协同进行流程挖掘，对船舶靠港、货物装卸、转运、堆码及储存等各物流环节行为决策精细化建模，打通港口物流系统作业全过程信息及增强能流系统“源-网-荷-储”互联互动，实现能流-物流耦合环节信息共享透明，以便提高 PIES 规划模型的灵活性。除了数学建模方法外，计算机仿真技术可以真实地反映港口作业中各要素的随机动态变化，可基于多智能体信息交互仿真技术，建立船舶、锚地、航道、泊位、码头、堆场等多智能体之间的关系，构建可视化的仿真模型，并将模型运用于 PIES 科学规划中。

#### 4.2 考虑能流-物流耦合的跨(港)区级 PIES 规划方法

多式联运具有降低物流成本、提高运输效率、增强运输灵活性、减少碳排放等重要意义，交通运输部印发的《绿色交通“十四五”发展规划》要求加快港口水水中转和铁水联运建设，“十四五”期间集装箱铁水联运量年均增长 15%以上<sup>[70]</sup>；上海港作为“世界第一大港口”，其 2030 年海铁联运量较 2021 年将翻两番以上，力争 2035 年完成 340 万标准箱<sup>[72]</sup>。同时，跨港区互联互通也将意味着不同能

源市场、辅助市场、利益主体的增多。在此背景下，如何在规划目标中综合考虑能源站和能源网络建设投资成本、清洁能源消纳能力、物流运输成本、物流服务满意度等，在约束条件中考虑频率安全、运输方式连续性、运输路径承载能力、货物时刻表等是跨区级 PIES 规划面临的难题。

为应对未来跨港区物流运输体系复杂化带来的挑战，考虑能流-物流耦合的跨区级 PIES 规划应充分计及“水路-公路-铁路”、“客运-货运”、“车辆-人员”之间的交互作用，分析物流系统运输规律，包括运输方案安排、网络流量分布、出行时间等，精准预测物流运输体系用能的规模和时空分布；充分挖掘能流系统与物流系统的互动潜力，通过灵活安排跨区物流运输用能的时空分布，调整跨区级 PIES 的峰谷特性，优化配置跨港区能源联络管线和能源补给设施，促进清洁能源消纳，降低投资成本，减小清洁能源出力不确定性造成的系统功率波动。此外，随着未来跨区物流运输工具数量的不断增加，跨区级 PIES 规划模型中物流系统的状态变量空间将呈指数增长，可采用启发式算法、机器学习算法等提高模型求解效率。

由于跨区级 PIES 覆盖地理范围跨度大，对于能流系统，当某个港区需要购能时，可以考虑从上级电、气网或者其他港区购买，甚至随着全电船舶微电网的发展，未来这类“移动式微电网”也能作为港区购能的选择之一；对于物流系统，船东可根据船舶港务费、停泊费等费用对比选择不同港区进行停靠。规划时应充分考虑不同市场能源价格、辅助服务需求、不同港区收费、激励政策类型(如碳排放激励和岸电补贴)等因素对跨区级 PIES 规划的影响。计及不同港区多利益主体的差异性后，规划模型又将引入博弈问题，如何平衡不同主体间的利益关系、刻画不同主体对能源价格的敏感性是考虑多主体博弈后跨港区 PIES 规划的核心问题，在规划过程中，可建立包含多利益主体的分布式规划模型、多智能体博弈模型等。

#### 4.3 考虑能流-物流耦合的港区级 PIES 规划方法

港区级 PIES 面向源网荷储多项环节、电气热冷氢多类能源、能流-物流两个维度，为码头作业区、辅助生产区、工业区、居民区等多区块的多能负荷供能，未来规划时可充分挖掘能流-物流各环节的灵活性资源，同时还需关注气象变化、极端天气等不确定性因素对能流系统和物流系统造成的影响。

首先,港区中存在许多电力/天然气/氢能驱动型转运车辆及其相应的充电站,转运车辆与充电站、PIES 之间的能量将实现双向互动,为降低能源输送成本、避免新开辟场地建设各类充电站,未来规划时可考虑能源站耦合电动汽车充电站、天然气汽车加气站、氢能汽车加氢站,基于“多站合一”能源站构建方法,实现能源站选址优化、站内设备容量优化以及转运车辆充能路径优化。其次,港区物流系统中还存在大量冷藏集装箱,未来规划时应考虑冷藏集装箱内部热惯性、热网管道蓄热特性和储热,并充分利用物流系统的用能时空可调性减少 PIES 设备容量投资成本。最后,未来港区内各功能区不断分化,需结合各功能区用能负荷差异,有针对性地对其建模,因地制宜规划各功能区适用的能源站和能源网络,并建立考虑站间互补互济和联络管线容量限制的多功能区能源站联合规划模型,对各能源站集群控制,以减少分区块单独规划造成的冗余投资。

此外,港口毗邻海/江/河岸等地区,受地势变化、全球气候变暖、洋流变化等因素的影响,气温、风速、日照、湿度等复杂多变的气象条件和暴雨、台风、海冰、风暴潮等频繁发生的极端天气导致港口“源-荷”具有高度不确定性,为计及多类型分布式清洁能源和多类型灵活负荷的港区级 PIES 规划带来了许多困难与挑战。针对气象变化,“源”侧风、光等新能源发电功率与风速、光照等有着密切的关系,受当日天气状况变化的强烈影响,其出力具有强不确定性;“荷”侧船舶航行停泊、货物中转储存等过程带来的灵活负荷受港区能见度、温度变化等影响也存在强不确定性。规划时可基于风速、光照强度、船舶到港时间、集装箱温度等变量概率分布模型,从期望值或机会约束的角度出发,建立港区级 PIES 随机规划模型;也可采用不确定集合来描述随机参数建立鲁棒规划模型或采用概率分布不确定集合来描述随机参数建立分布鲁棒规划模型,如可考虑设置船舶到港缓冲时间,用盒式不确定集合描述船舶到港时间这一随机变量,从而建立以港区模拟运行成本最小和缓冲时间最大为优化目标的鲁棒优化模型,并嵌入 PIES 规划模型中进行求解,以降低不确定性因素带来的影响。针对极端天气,“源”侧能源设备损坏和能源网络故障等因素,“荷”侧物流设备受损、泊位无法正常停靠等因素对港区级 PIES 弹性规划提出更高的

要求。为应对极端天气带来的风险,规划时首先通过脆弱性曲线量化不同极端天气对港区级 PIES 造成的危害,提出弹性量化指标,并建立弹性评估体系;其次需提高系统的应急保供能力,扩大移动储能设备的应急投入规模,并优化移动储能的时空配置和投入路径,保证港区可靠供电;最后建立不同时间尺度下考虑综合费用最小和弹性提升的多目标协同规划模型,是未来港区级 PIES 弹性规划的重点之一。

#### 4.4 考虑能流-物流耦合的码头级 PIES 规划方法

考虑能流-物流耦合的码头级 PIES 规划所面向的规划对象更加微观、更加细致,受地理范围局限性的影响程度较大,未来规划可从以下角度出发。

未来码头级 PIES 规划应锚定精细化、精准化发展目标。一方面,规划时能源设备的变工况特性应精细化建模,可通过多项式拟合、人工智能等方法刻画能源设备输出效率与负载率、温度、气压等因素的关系。另一方面,规划时物流设备的能耗特性应精细化建模,以起重机为例,可建立计及势能回收的垂直升降、水平运移等多过程动态能耗模型;以皮带传送系统为例,可建立考虑非均匀散货输送情况下的高精度动态模型,控制皮带速度适应载荷变化,提高皮带传送系统的能效水平。设备的精细化建模能够更加准确反映其工作状态,但往往也为规划模型引入了更多非线性约束,增加了模型求解难度,因此,可考虑采用自适应分段线性化将规划模型转为混合整数线性规划模型或直接采用各类启发式算法求解。

未来码头级 PIES 规划还应聚焦因地制宜设计,合理利用码头空间布置分布式清洁能源。由于码头可用于安装光伏面板的区域有限,可充分考虑光伏建筑一体化,在码头岸桥机房、维修车间、堆场大棚、仓库等物流场所建设屋顶光伏。规划时计及风、光不确定性,可建立考虑切负荷条件风险价值的随机规划模型以减轻清洁能源发电带来的随机性、间歇性、波动性的影响,提升清洁能源承载能力;规划时计及建筑场所的热惯性,可建立热平衡方程,同时考虑不同建筑材料特性对规划模型的影响。

#### 4.5 不同层级 PIES 联合规划方法

目前,PIES 规划的研究大多局限在某一层级之内,但是在港口转型的过程中,随着港口物流产业链的发展,各种物流活动不再局限于某一特定区域;同时,能流系统的“源网荷储”界限也逐渐模

糊, 能量在不同层级间的流动更加灵活, 不同层级之间能流系统的互联互动必然不断增强。如何科学有效地对不同层级 PIES 联合规划, 突破单一层级限制, 是未来将面临的挑战之一。

针对不同层级 PIES 联合规划模型的特点及建模要素有所差异这一问题, 可以从经济性、安全性、可靠性、环保性、灵活性、互动性等不同角度选取多项指标作为多维优化目标, 建立多目标规划模型并求解; 针对不同层级 PIES 联合规划模型涉及的清洁能源出力、能源价格、地方政策、船舶到达准时率、设备故障、道路航道拥挤程度等不确定因素众多这一问题, 可以建立基于海量场景驱动的机会约束规划模型、基于数据驱动的(分布)鲁棒规划模型等, 尽量减轻多重不确定性因素对联合规划的影响; 针对不同层级 PIES 规划模型涉及的利益主体众多这一问题, 可以建立多利益主体博弈规划模型, 将各利益主体视为参与博弈的决策者, 遵循多元主体利益平衡原则, 分析他们的决策选择和行为对规划模型的影响, 维护联合规划的共同利益, 实现利益均衡; 针对不同层级规划模型涉及的多元素、多时空、多尺度这一问题, PIES 联合规划可将各类具有不同优点的启发式算法进行联合或嵌套以求解大规模、多变量、高非凸性、高非线性、高复杂度的联合规划模型或通过各类松弛技术将模型转凸或线性化、通过各类分解算法降低模型求解维度, 以降低联合规划模型求解难度。

## 5 结论

双碳目标下, 港口节能减排迫在眉睫, PIES 亟待绿色低碳发展。本文在对 PIES 形态结构演变及能流-物流耦合机理分析的基础上, 根据跨(港)区级、港区级、码头级 PIES 的特点, 从能流特征、物流特征、能流-物流耦合特征、能流-物流耦合环节、规划模型建模要素等 5 个角度对不同层级 PIES 规划进行了对比; 最后, 对未来能流-物流强耦合下的 PIES 规划面临的挑战进行了展望, 以期为该领域的进一步研究提供参考。主要结论如下:

1) 考虑能流-物流耦合的跨(港)区级 PIES 规划需重点关注不同港区间物流负荷灵活转移及多港区互联对整体规划方案的影响。

2) 考虑能流-物流耦合的港区级 PIES 规划应充分利用港区内物流全环节用能时空可调特性提升规划方案的经济性、环保性、可靠性等。

3) 考虑能流-物流耦合的码头级 PIES 规划所面向的规划对象更加微观, 可重点关注码头前沿物流设备的操作特性和能耗特性对规划方案的影响。

## 参考文献

- [1] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.  
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207(in Chinese).
- [2] 吕佳炜, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑互联互通的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4001-4020.  
LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4020(in Chinese).
- [3] 吕佳炜, 张沈习, 程浩忠, 等. 集成数据中心的综合能源系统能量流-数据流协同规划综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5500-5520.  
LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect on coordinated planning of energy flow and workload flow in the integrated energy system containing data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5500-5520(in Chinese).
- [4] 贸易和发展理事会, 贸易和发展委员会. 运输、贸易物流和贸易便利化多年期专家会议第八届会议报告[R]. 日内瓦: 联合国, 2020.  
Trade and Development Board, Trade and Development Commission. Report of the multi-year expert meeting on transport, trade logistics and trade facilitation on its eighth session[R]. Geneva: WHO, 2020(in Chinese).
- [5] 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.
- [6] 中华人民共和国国务院. 关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见[EB/OL]. (2021-02-02) [2021-02-22]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content\\_5588274.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm).  
State Council of the People's Republic of China. Guiding opinions on accelerating the development of a green and low-carbon circular economic development system [EB/OL]. (2021-02-02)[2021-02-22]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content\\_5588274.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm) (in Chinese).

- [7] 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 工业和信息化部, 等. 关于进一步推进电能替代的指导意见[EB/OL]. (2022-03-09)[2022-03-30]. <https://www.doc88.com/p-19559797726854.html>. National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Guiding opinions on further promoting electric energy substitution [EB/OL]. (2022-03-09)[2022-03-30]. <https://www.doc88.com/p-19559797726854.html>(in Chinese).
- [8] 邰能灵, 王萧博, 黄文焘, 等. 港口综合能源系统低碳化技术综述[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3749-3763. TAI Nengling, WANG Xiaobo, HUANG Wentao, et al. Review of low-carbon technology for integrated port energy systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3749-3763(in Chinese).
- [9] 方斯顿, 赵常宏, 丁肇豪, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 114-134. FANG Sidun, ZHAO Changhong, DING Zhaohao, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality (part I): typical topology and key problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 114-134(in Chinese).
- [10] 方斯顿, 赵常宏, 丁肇豪, 等. 面向碳中和的港口综合能源系统(二): 能源-交通融合中的柔性资源与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 950-968. FANG Sidun, ZHAO Changhong, DING Zhaohao, et al. Port integrated energy systems toward carbon neutrality (II): flexible resources and key technologies in energy-transportation integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 950-968(in Chinese).
- [11] 郭子坚. 港口规划与布置[M]. 3版. 北京: 人民交通出版社, 2011: 3-5. GUO Zijian. Port planning and layout[M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2011: 3-5(in Chinese).
- [12] 陈毅, 刚轶金. 提供国内外船用电压的新型岸基供电系统[J]. 电工技术, 2021(18): 160-161, 164. CHEN Yi, GANG Yijin. Novel shore-based power supply system which can provide both domestic and foreign ships[J]. Electric Engineering, 2021(18): 160-161, 164(in Chinese).
- [13] 交通运输部. 深入推进绿色港口建设行动方案(2018-2022年)(征求意见稿)[EB/OL]. (2018-03-27)[2018-04-02]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202006/t20200623\\_3314525.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202006/t20200623_3314525.html). Ministry of Transport. Action plan to further promote green port construction(2018-2022)(draft for comments) [EB/OL]. (2018-03-27)[2018-04-02]. [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202006/t20200623\\_3314525.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/syj/202006/t20200623_3314525.html)(in Chinese).
- [14] 林森, 文书礼, 朱淼, 等. 海港综合能源系统低碳经济发展研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1364-1386. LIN Sen, WEN Shuli, ZHU Miao, et al. Review on low-carbon and economic development of seaport integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1364-1386. (in Chinese).
- [15] CAPRARA G, ARMAS V, DE MESQUITA SOUSA D, et al. An energy storage system to support cruise ships cold ironing in the port of Civitavecchia[C]//2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe(EEEIC/I&CPS Europe). Bari, Italy: IEEE, 2021: 1-5.
- [16] 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.
- [17] LI Hui, PENG Jianbiao, WANG Xi, et al. Integrated resource assignment and scheduling optimization with limited critical equipment constraints at an automated container terminal[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(12): 7607-7618.
- [18] 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.
- [19] SONG Tianli, LI Yang, ZHANG Xiaoping, et al. Integrated port energy system considering integrated demand response and energy interconnection [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117: 105654.
- [20] 苏文胜, 胡东明, 丁劲锋, 等. 超级电容控制系统在起重机的应用[J]. 港口装卸, 2019(4): 47-50. SU Wensheng, HU Dongming, DING Jinfeng, et al. Application of supercapacitor control system in crane[J]. Port Operation, 2019(4): 47-50(in Chinese).
- [21] 李文斌, 陈洁敏, 宗传苓. 深圳港碳达峰与碳中和路径的实践与探索[J]. 交通与港航, 2021, 8(4): 75-80. LI Wenbin, CHEN Jiemin, ZONG Chuanling. Practice and exploration of carbon peak and carbon neutral path in Shenzhen port[J]. Communication & Shipping, 2021, 8(4): 75-80(in Chinese).
- [22] 李海波. 港口碳达峰碳中和实现路径[J]. 中国港口, 2022(2): 5-9. LI Haibo. The realization path of carbon emission peak and carbon neutrality in ports[J]. China Ports, 2022(2):

- 5-9(in Chinese).
- [23] 陈辉, 朱星阳, 孙汝笋, 等. 关于港口智慧能源系统建设和应用的思考[J]. 船舶物资与市场, 2019, 27(10): 101-102.  
CHEN Hui, ZHU Xingyang, SUN Rusun, et al. Thoughts on the construction and application of port intelligent energy system[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2019, 27(10): 101-102(in Chinese).
- [24] 冯扬文, 徐晓炜. 疫情背景下国际集装箱港口生产与发展研究[J]. 中国水运, 2022(10): 43-45.  
FENG Yangwen, XU Xiaowei. Research on production and development of international container ports under the background of epidemic[J]. China Water Transport, 2022(10): 43-45(in Chinese).
- [25] SHI Zichuan, FAN Feilong, TAI Nengling, et al. An optimal operation strategy for integrated energy-logistics system in green port[C]//2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia(I&CPS Asia). Shanghai: IEEE, 2022: 1592-1597.
- [26] MAO Anjia, YU Tiantian, DING Zhaohao, et al. Optimal scheduling for seaport integrated energy system considering flexible berth allocation[J]. Applied Energy, 2022, 308: 118386.
- [27] 于湉湉. 考虑泊位优化和多能协同的港口综合能源系统运行优化[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.  
YU Tiantian. Integrated resource scheduling scheme for seaport considering berth allocation and multi-energy coordination[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2021(in Chinese).
- [28] YU Jingjing, VOß S, SONG Xiangqun. Multi-objective optimization of daily use of shore side electricity integrated with quayside operation[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 351: 131406.
- [29] 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(1): 3.
- [30] MA Ning, ZHOU Chenhao, STEPHEN A. Simulation model and performance evaluation of battery-powered AGV systems in automated container terminals [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2021, 106: 102146.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 杨莉, 黄文焘, 余墨多, 等. 港口大规模冷箱负荷群用电的一致性分层优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 586-596.  
YANG Li, HUANG Wentao, YU Moduo, et al. Consensus based hierarchical optimization scheduling method for large-scale reefer loads in ports[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 586-596(in Chinese).
- [35] 彭云辉, 张朋, 张煜, 等. 考虑自动化集装箱码头充电桩分配策略的动态调度仿真分析[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2023, 47(1): 180-184.  
PENG Yunhui, ZHANG Peng, ZHANG Yu, et al. Dynamic scheduling simulation analysis considering charging pile allocation strategy of automated container terminal[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2023, 47(1): 180-184(in Chinese).
- [36] 康慨, 施念, 王艳鹏, 等. 计及全电船-冷藏箱能量时空协同响应的港口配电网日前经济调度策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 544-553.  
KANG Kai, SHI Nian, WANG Yanpeng, et al. Day-ahead economic dispatch strategy of port distribution network considering the coordinated response of all-electric ship-refrigerator energy space-time[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 544-553(in Chinese).
- [37] 王萧博, 黄文焘, 邵能灵, 等. 面向源储优化配置的港口微电网运行场景高保真压缩与重构方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5839-5849.  
WANG Xiaobo, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. High-fidelity compression and refactoring method of port microgrid operation scenarios for renewable energy and storage configuration[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5839-5849(in Chinese).
- [38] WU Xuanke, ZHANG Yunteng, CHEN Yuche. A dynamic programming model for joint optimization of electric drayage truck operations and charging stations planning at ports[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(11): 11710-11719.
- [39] LI Zhe, WANG Chengfu, LI Bowen, et al. Probability-interval-based optimal planning of integrated energy system with uncertain wind power [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(1): 4-13.
- [40] YANG Hanyu, LI Canbing, SHAHIDEHPOUR M, et al. Multistage expansion planning of integrated biogas and electric power delivery system considering the regional availability of biomass[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 920-930.

- [41] YANG Wentao, LIU Weijia, CHUNG C Y, et al. Coordinated planning strategy for integrated energy systems in a district energy sector[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1807-1819.
- [42] 赵景茜, 米翰宁, 程昊文, 等. 考虑岸电负荷弹性的港区综合能源系统规划模型与方法[J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(12): 1577-1585.  
ZHAO Jingqian, MI Hanning, CHENG Haowen, et al. A planning model and method for an integrated port energy system considering shore power load flexibility[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2021, 55(12): 1577-1585(in Chinese).
- [43] DONG Zhixing, WEN Shuli, YE Huili, et al. Optimal allocation of hybrid hydrogen and battery storage system for multi-energy seaport microgrid[C]//2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Tianjin: IEEE, 2023: 624-629.
- [44] 林森, 文书礼, 朱淼, 等. 考虑碳交易机制的海港综合能源系统电-热混合储能优化配置[J/OL]. *上海交通大学学报*, 1-25[2023-07-21]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.428>.  
LIN Sen, WEN Shuli, ZHU Miao, et al. Optimal allocation of electric-thermal hybrid energy storage for seaport integrated energy system considering carbon trading mechanism[J/OL]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1-25[2023-11-21]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.428>(in Chinese).
- [45] 刘洪, 郑楠, 葛少云, 等. 考虑负荷特性互补的综合能源系统站网协同规划[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 52-64.  
LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Station and network coordinated planning of integrated energy systems considering complementation of load characteristic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 52-64(in Chinese).
- [46] GE Leijiao, LIU Hangxu, YAN Jun, et al. Optimal integrated energy system planning with DG uncertainty affine model and carbon emissions charges[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(2): 905-918.
- [47] SHEN Wei, QIU Jing, MENG Ke, et al. Low-carbon electricity network transition considering retirement of aging coal generators[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4193-4205.
- [48] 宋天立. 计及需求响应的港口综合能源系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.  
SONG Tianli. Study on integrated port energy system considering demand response[D]. Nanjing: Southeast University, 2020(in Chinese).
- [49] LU Ying, FANG Sidun, NIU Tao, et al. Energy-transport scheduling for green vehicles in seaport areas: a review on operation models[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 184: 113443.
- [50] 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, Italy: IEEE, 2018: 1-6.
- [51] 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.
- [52] FANG Liang, XU Xiaoyan, XIA Jun, et al. Reliability assessment of the port power system based on integrated energy hybrid system[J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2022, 70(2): e140372.
- [53] FANG Sidun, WANG Chenxu, LIAO Ruijin, et al. Optimal power scheduling of seaport microgrids with flexible logistic loads[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2022, 16(12): 2711-2720.
- [54] 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.
- [55] SHINODA T, BUDIYANTO M A, SUGIMURA Y. Analysis of energy conservation by roof shade installations in refrigerated container areas[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 377: 134402.
- [56] BUDIYANTO M A, SHINODA T. Stack effect on power consumption of refrigerated containers in storage yards [J]. *International Journal of Technology*, 2017, 8(7): 1182-1190.
- [57] XU Yixiang, QI Liang, LUAN Wenjing, et al. Load-in-load-out AGV route planning in automatic container terminal[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 157081-157088.
- [58] 谢旦岚, 郭笛, 纪媛, 等. 自动化码头运输设备充电策略优化的仿真研究(英文)[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(10): 1927-1935.  
XIE Danlan, GUO Di, JI Yuan, et al. Simulation research on optimization of AGV charging strategy for automated terminal[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(10): 1927-1935.
- [59] KERMANI M, SHIRDARE E, PARISE G, et al. A comprehensive technoeconomic solution for demand control in ports: energy storage systems integration [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(2): 1592-1601.
- [60] 王玮, 张晓晴, 苏粟, 等. 基于模型预测控制的含岸电混合能源系统优化运行[J]. *电力自动化设备*, 2021,

- 41(11): 17-24.  
WANG Wei, ZHANG Xiaoqian, SU Su, et al. Optimal operation of hybrid energy system considering cold ironing based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 17-24(in Chinese).
- [61] 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.
- [62] MOLAVI A, LIM G J, SHI Jian. Stimulating sustainable energy at maritime ports by hybrid economic incentives: a bilevel optimization approach[J]. Applied Energy, 2020, 272: 115188.
- [63] 胡晓青, 王蓓蓓, 黄俊辉, 等. 岸电建设运营各方成本效益最优化分析及江湖海岸电特性比较[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 169-178.  
HU Xiaoqing, WANG Beibei, HUANG Junhui, et al. Cost-benefit optimization analysis of participants in shore-side power construction and operation and characteristic comparison among river, lake and ocean shore-side power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 169-178(in Chinese).
- [64] 裴磊磊, 裴道方. 基于仿真优化的自动化集装箱码头双 ARMG 调度研究[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2017, 42(2): 500-510.  
PEI Leilei, CHANG Daofang. Research on twin ARMGs scheduling of automated container terminal based on simulation and optimization[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2017, 42(2): 500-510(in Chinese).
- [65] 赵倩儒. 考虑能耗的自动化集装箱码头作业设备协同调度优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.  
ZHAO Qianru. Collaborative scheduling optimization of operation equipment in automated container terminal considering energy consumption[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021(in Chinese).
- [66] PAPAIOANNOU V, PIETROSANTI S, HOLDERBAUM W, et al. Analysis of energy usage for RTG cranes [J]. Energy, 2017, 125: 337-344.
- [67] HE Daijie, PANG Yusong, LODEWIJKS G. Green operations of belt conveyors by means of speed control [J]. Applied Energy, 2017, 188: 330-341.
- [68] DANIEL H, ANTUNES C H, TROVÃO J P F, et al. Shore operations enhancement of bulk carriers based on a multi-objective sizing approach[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 276: 116497.
- [69] FIORITI D, BACCIOLI A, PASINI G, et al. LNG regasification and electricity production for port energy communities: economic profitability and thermodynamic performance[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 238: 114128.
- [70] 交通运输部. 绿色交通“十四五”发展规划[EB/OL]. (2021-10-29)[2022-01-21]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content\\_5669662.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669662.htm).  
Transportation Department. The 14th Five-Year development plan of green transportation [EB/OL]. (2021-10-29)[2022-01-21]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content\\_5669662.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669662.htm)(in Chinese).
- [71] MAO Xiaoli, COMER B, GEORGE E. Accelerating zero-emissions shipping in the U.S. and China [R]. Berkeley: University of California, 2023.
- [72] 上海市发展和改革委员会, 上海市交通委员会, 上海市财政局, 等. 关于印发《关于上海市进一步推动海铁联运发展的实施意见》的通知[EB/OL]. (2022-09-30)[2022-10-24]. [https://fgw.sh.gov.cn/fgw\\_csfz/20221024/ad6c517694074fefb040233eb92fdb95.html](https://fgw.sh.gov.cn/fgw_csfz/20221024/ad6c517694074fefb040233eb92fdb95.html).  
Shanghai Municipal Development and Reform Commission, Shanghai Municipal Transportation Commission, Shanghai Municipal Bureau of Finance, et al. Notice on printing and distributing the implementation opinions on further promoting the development of ocean-rail transportation in Shanghai[EB/OL]. (2022-09-30)[2022-10-24]. [https://fgw.sh.gov.cn/fgw\\_csfz/20221024/ad6c517694074fefb040233eb92fdb95.html](https://fgw.sh.gov.cn/fgw_csfz/20221024/ad6c517694074fefb040233eb92fdb95.html)(in Chinese).



张沈习

在线出版日期: 2024-02-20。

收稿日期: 2023-08-16。

作者简介:

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;

宋琪(1998), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统规划, songqi1998@sjtu.edu.cn;

程浩忠(1962), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会会员, IET Fellow, 主要研究方向为电力系统规划、电压稳定、电能质量、综合能源系统规划, hzcheng@sjtu.edu.cn;

方斯顿(1991), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为综合能源系统、能源交通融合, fangston@cqu.edu.cn;

吕佳炜(1994), 男, 博士, 主要研究方向为综合能源系统规划, SJTU-ljw@sjtu.edu.cn。

(编辑 乔宝榆, 李新洁)

# Key Technologies and Challenges on Planning of Port Integrated Energy System Considering Energy Flow-logistics Coupling

ZHANG Shenxi<sup>1</sup>, SONG Qi<sup>1</sup>, CHENG Haozhong<sup>1</sup>, FANG Sidun<sup>2</sup>, LYU Jiawei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation, Ministry of Education (Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University) 2. School of Electrical Engineering, Chongqing University)

**KEY WORDS:** port integrated energy system; spatiotemporal load regulation of energy consumption; energy flow-logistics coupling; planning

The intricate interplay between energy system and logistics system is one of the key characteristics of the future port integrated energy system (PIES). As the traditional method of modeling separately is incompatible, planning of PIES considering energy flow-logistics coupling is paramount for the green and low-carbon transformation of ports.

This paper reviews and prospects the key technologies and challenges on planning of PIES

considering energy flow-logistics coupling. The hierarchical schematic of PIES is shown in Fig. 1. Initially, the evolution, development status and trend of PIES are presented across three typical stages: traditional port, green port and near-zero-carbon port. Subsequently, it delves into the analysis of spatial and temporal load regulation of energy consumption in port logistics systems, exploring the coupling mechanism between energy flow and logistics in the PIES.

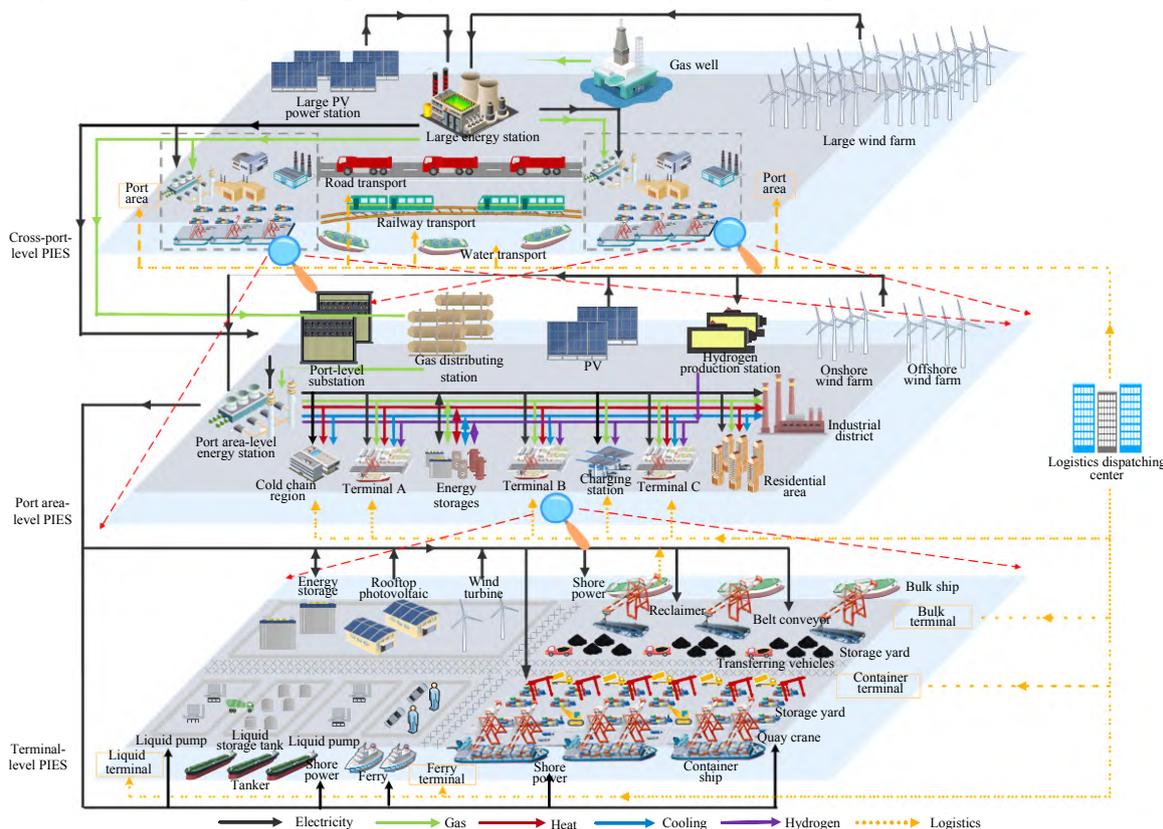


Fig. 1 Hierarchical schematic of PIES

On this basis, this paper presents a comprehensive model for planning of PIES with energy-logistics coupling and compares various solution methods including mathematical optimization and heuristic algorithm. The characteristics and differences in planning of three levels: cross port-level, port area-level and terminal-level are refined and compared from five perspectives: energy flow characteristics, logistics traits, energy flow-logistics

coupling attributes, energy flow-logistics coupling links, and planning modeling elements. Furthermore, the research advancements on key technologies of the PIES planning from varying levels are reviewed.

Finally, this paper highlights outstanding issues in the current PIES planning with intricate energy flow-logistics coupling, and anticipates possible development direction and challenges in the future.